

Landscaping

Untersuchung der Anforderung an die energieintensive Wirtschaft und den Standort NRW im Übergang zu einem weitgehend auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem der Zukunft - Abschlussbericht

Projekt-Nr.: 151115

Autorinnen und Autoren:

Thomas Adisorn

Dr. Karin Arnold

José Acosta Fernandez

Benjamin Fischer

Dr. Kathrin Greiff

Philipp Hammelmann

Simon Heck

Tomke Janßen

Dr. Dagmar Kiyar

Katharina Knoop

Dr. Georg Kobiela

Christine Krüger

Prof. Dr. Stefan Lechtenböhmer

Prof. Dr. Christa Liedtke

Frank Merten

Sabine Nanning

Andreas Pastowski

Dr. Sascha Samadi

Clemens Schneider

Dietmar Schüwer

Ansgar Taubitz

Jens Teubler

Dr. Peter Viebahn

Christoph Zeiss

Unter Mitarbeit von:

Dr. Claus Barthel

Rike Carpantier

Thomas Hanke

Sebastian Kiefer

Nicolas Kreibich

Arjuna Nebel

Katja Pietzner

Kilian Topp

Georg Wilke

Dr. Uta von Winterfeld

Ole Zelt

Dieser Bericht ist Ergebnis des Projektes 151115 Landscaping des Wuppertal Instituts.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE) durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Wuppertal Institut (2018): Landscaping: Untersuchung der Anforderung an die energieintensive Wirtschaft und den Standort NRW im Übergang zu einem weitgehend auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem der Zukunft. Projektbericht. Wuppertal.

Projektlaufzeit: Juni 2017–April 2018

Impressum

Herausgeber:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechpartner:

Dipl. -Biol. Christoph Zeiss, Projektleiter
Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen
Tel.: +49 (0) 202 2492 135
Mail: christoph.zeiss@wupperinst.org

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	9
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	11
Einleitung	14
1 AP 1: Identifikation und Bewertung von Innovationen entlang der Wertschöpfungsketten (Produkte und Dienstleistungen)	18
1.1 AP 1.1: Produkte als Klimaschutzprodukte und Klimainnovationen	20
1.1.1 Zielsetzung	20
1.1.2 Hintergrund und Definitionen	21
1.1.3 Bewertungsmöglichkeiten und Herausforderungen für Klimaschutzprodukte	28
1.1.4 Innovationen in der Wertschöpfungskette (WSK)	44
1.1.5 F&E-Empfehlungen / Arbeitsprogramm für eine vertiefende Analyse	48
1.2 AP 1.2: Konzept für den Aufbau eines Input-Output Modells für NRW	51
1.2.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	51
1.2.2 Verständnis der Funktionsweise sozioökonomischer Transformationssysteme	55
1.2.3 Grundzüge der erweiterten Input-Output-Rechnung	58
1.2.4 Input-Output-Rechnung für das Land NRW: State-of-the-art	66
1.2.5 Skizzierung eines Konzepts zum Aufbau eines Informationssystems für die EIOR für NRW	68
1.2.6 Konzept für die mögliche Verknüpfung und Integration der NRW-EIOT in eine multiregionale Input-Output-Tabelle	76
1.2.7 Datenerfordernisse	78
1.2.8 Zusammenfassung und F&E-Empfehlungen als Basis für Nachfolgeprojekte	81
2 AP2: Herausforderungen zukünftiger klimaneutraler Energiesysteme & Technologie-Entwicklungen in der Industrie	84
2.1 Motivation und Ziel-/Aufgabenstellung	84
2.2 Metaanalyse von Klimaschutzszenarien	85
2.2.1 Klimaschutz- und Flexibilisierungs-Strategien im Szenariovergleich	89
2.2.2 Endenergieverbrauch in der Industrie im Szenariovergleich	91
2.2.3 Stromerzeugung im Szenariovergleich	93
2.2.4 Bedeutung von Elektrifizierung und Netto-Importen im Szenariovergleich	95
2.2.5 Treibhausgasemissionen im Szenariovergleich	100
2.2.6 Schlussfolgerungen aus der Szenariovergleichsanalyse	102
2.3 Generische Zielszenarien zur Technologieauswahl	107

2.3.1	<i>Systemausschnitt und Ableitung von Dekarbonisierungsstrategien</i>	107
2.3.2	<i>Szenario „iCCS“</i>	113
2.3.3	<i>Szenario „P2X“</i>	114
2.3.4	<i>Szenario „all-electric“</i>	115
2.4	Kohlenstoffbilanz der Szenarien	117
2.5	Auswirkungen der Szenarien auf das Energiesystem und die Infrastruktur	119
2.5.1	<i>Elektrische Energieübertragung</i>	119
2.5.2	<i>Gasförmige Energieträger</i>	120
2.5.3	<i>Wasserstoffinfrastruktur</i>	121
2.5.4	<i>CO₂-Transportnetz</i>	123
2.5.5	<i>Wärme</i>	123
2.5.6	<i>Flüssige Grund- und Brennstoffe</i>	124
2.6	Zentrale Szenarienergebnisse	127
2.7	Low-Carbon-Break-Through-Technologien (LCBTT) für den Industriesektor	131
2.7.1	<i>LCBTT für die Stahlbranche</i>	131
2.7.2	<i>LCBTT für die Aluminiumbranche</i>	134
2.7.3	<i>LCBTT für die Chemiebranche</i>	135
2.7.4	<i>LCBTT für die Zementbranche</i>	137
3	AP 3: Rezeption und Gestaltung der Rahmenbedingungen	140
3.1	Einführung	140
3.2	Rahmenbedingungen	142
3.2.1	<i>Gestaltung von internationalem Wettbewerb</i>	142
3.2.2	<i>Risikoabsicherung für Investitionen</i>	146
3.2.3	<i>Gewährleistung der spezifischen Produktnachfrage</i>	150
3.2.4	<i>Technologieentwicklung</i>	153
3.2.5	<i>Infrastrukturentwicklung</i>	162
3.2.6	<i>Gesellschaftliche Akzeptanz</i>	165
3.3	Ausblick auf ein mögliches Politikpaket	169
4	AP 4: Kooperationsansätze und Industriesymbiose	172
4.1	Einleitung	172
4.2	Low Carbon Breakthrough Technologien und ihre Netzwerke	174
4.3	Literaturrecherche und Begriffsdefinitionen	176
4.4	Lessons learnt – Hemmnisse und Treiber für industrielle Symbiose	180
4.5	Potenziale für den Klimaschutz und die Industrie	182
4.6	Weiterführende Forschungsfragen	184
5	AP 5: Internationaler Austausch zu Good Practise der weitgehenden Emissionsminderung in der energieintensiven Wirtschaft	186
6	AP 6: Publikation zu Emissionsminderungsnotwendigkeiten und -optionen	192
7	Literaturverzeichnis	198
8	Anhang 1: Technologiesteckbriefe	213
8.1	Branche: Aluminiumherstellung	213

8.1.1	<i>A1 - Flexibilisierung der Elektrolyse zur Herstellung von Primäraluminium</i>	213
8.1.2	<i>A2 - Power-to-Heat als Option beim Schmelzen und Erwärmen</i>	216
8.2	Branche: Chemie	219
8.2.1	<i>C1 - Carbon Capture am Steam Cracker</i>	219
8.2.2	<i>C2 - Änderung des Ausgangsmaterials (Edukt) am Steam Cracker (z. B. Naphtha/Wachse aus Fischer-Tropsch statt Naphtha aus Erdöl)</i>	221
8.2.3	<i>C-3 Ablösung der Olefinproduktion im Steam Cracker durch andere Verfahren, z.B. auf Basis Methanol (MTO)</i>	223
8.2.4	<i>C-4 Nutzung von Membranverfahren zur Stofftrennung statt thermische</i>	225
8.2.5	<i>C-5 Power-to-Heat mit dem Schwerpunkt auf die Dampferzeugung</i>	227
8.2.6	<i>C-6 Wasserstoff aus Elektrolyse als Edukt statt Steam Reforming bzw. partielle Oxidation</i>	229
8.3	Branche: Primär-Rohstahlerzeugung	231
8.3.1	<i>ST1 - Primärstahl durch alkalische Eisenelektrolyse</i>	231
8.3.2	<i>ST2 - Direktreduktion mit Wasserstoff</i>	233
8.3.3	<i>ST3 - Elektrostahl per Lichtbogen- oder Induktionsofen</i>	235
8.3.4	<i>ST4 - Schmelzreduktion mit Kohle (und optional CCS/CCU)</i>	238
8.3.5	<i>ST5 - Hochofen mit CCS</i>	239
8.3.6	<i>ST6 - HISarna® mit CCS</i>	242
8.4	Branche: Zementherstellung	244
8.4.1	<i>Z1 - CO₂-Capture Post-Combustion (Aminwäsche-Nachrüstung an konventionellen Zementöfen)</i>	244
8.4.2	<i>Z2 - CO₂-Capture Oxyfuel (Ofenneubau)</i>	247
8.4.3	<i>Z3 - Elektrifizierung des Wärmeeintrags (PtH) im Sinterprozess und/oder bei der Kalzinierung</i>	250
8.4.4	<i>Z4 - Synergetische Konzepte Oxyfuel-Verfahren & PtG (Elektrolyse und ggf. Methansynthese)</i>	253
8.4.5	<i>Z5 - Alternative Zemente (Klinkersubstitute)</i>	257
9	Anhang 2: Imagebroschüre	259
10	Anhang 3: Dokumentation der Veranstaltung "Klimaschutz in der Industrie" am 10. November 2017 zur COP 23	260

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Übersicht zur ausgewerteten Studien/Guidelines in Bezug auf „Avoided emissions“ im Bereich der energieintensiven Industrie -----	26
Tabelle 2	Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von Schritt 1: Festlegung des Referenzsystems -----	30
Tabelle 3	Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von Schritt 2: Horizontaler Produktvergleich (Produktperspektive)-----	33
Tabelle 4	Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von Schritt 3: Vertikaler Produktvergleich (Systemperspektive)-----	35
Tabelle 5	Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von Schritt 4: THG-Minderung für Gewerbe, Haushalte, Industrie-----	38
Tabelle 6	Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von Schritt 5: Anrechnung von avoided emissions in Bilanzen -----	41
Tabelle 7	Stärken-Schwächen-Analyse zur Ausweisung von avoided emissions über Produktvergleiche-----	43
Tabelle 8	Verschiedene Fälle bei der Umverteilung von Industrieemissionen -----	44
Tabelle 9	Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von einer Bewertung von nicht-technischen Innovationen für die Ableitung von avoided emissions-----	48
Tabelle 10	Überblick über die wesentlichen Klimaschutzstrategien in den betrachteten Szenarien -----	90
Tabelle 11	In der Modellierung explizit abgebildete Produktionsprozesse-----	111
Tabelle 12	Matrix der in den Szenarien abgebildeten Technologien -----	113
Tabelle 13	Übersicht der relevanten Zielzustände zur erfolgreichen Transformation der energieintensiven Industrie bis 2050 -----	141
Tabelle 14	Vorläufig betrachtete Technologien im Landscaping Projekt-----	154
Tabelle 15	Wichtige Infrastrukturen für die Nutzung von Low Carbon Technologien in NRW -----	162
Tabelle 16	Beispiele für die Kategorisierung von IS -----	178
Tabelle 17	Panelisten der internationale Fachkonferenz "Klimaschutz in der Industrie" am 10. November 2017 zur COP 23-----	188
Tabelle 18	Zentrale Inhalte der internationale Fachkonferenz "Klimaschutz in der Industrie" am 10. November 2017 zur COP 23-----	189

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht über die inhaltliche Strukturierung der einzelne Arbeitspakete -----	16
Abbildung 2 Wirkmechanismus von Klimaschutzprodukten auf die Umwelt-----	22
Abbildung 3 Übersicht Scope 1, 2, und 3 Emissionen nach dem Greenhouse Gas Protocoll -----	24
Abbildung 4 Lebenszyklusweite CO ₂ e Emissionen von Klimaschutzprodukten und einem Referenzprodukt-----	25
Abbildung 5 Horizontale und vertikale Attribution von avoided emissions -----	31
Abbildung 6 Attribution in der Systemperspektive (Sektoren)-----	37
Abbildung 7 Beispielhafte Anpassung der 2030 Ziele vom nationalen Klimaschutzplan - Umverteilung von 20 % der Industrieemissionen-----	40
Abbildung 8 Elemente eines soziotechnischen Systems. -----	46
Abbildung 9 Typologisierung von organisatorischen Innovationen -----	47
Abbildung 10 Charakteristika der Funktionsweise sozioökonomischer Produktionssysteme -----	55
Abbildung 11 Die sozioökonomischen Produktionssysteme der Mikro-, Meso- und Makroebene in Deutschland: Einbettungsverhältnis-----	56
Abbildung 12 Gemeinsamkeit der Transformationsaktivitäten in unter- und übergeordneten Produktionssystemen: Produktion bzw. Verbrauch einer Einheit Produkt (-Output)-----	57
Abbildung 13 Materielle und energetische Ströme verursacht durch die Transformationsaktivitäten in Deutschland und in seinen Bundesländern: ausgewählte physische und monetäre Flüsse-----	58
Abbildung 14 Vereinfachte schematische Darstellung einer physischen Input-Output-Tabelle -----	60
Abbildung 15 Allgemeines Datensystem der erweiterten Input-Output-Rechnung für übergeordnete Produktionssysteme-----	61
Abbildung 16 Struktur der Aufkommenstabelle als Teil der Basistabelle-----	62
Abbildung 17 Struktur der Verwendungstabelle als Teil der Basistabelle -----	63
Abbildung 18 Struktur der Tabelle der direkten Auswirkungen (umweltökonomische Konten) als Teil der Basistabelle -----	63
Abbildung 19 Struktur einer erweiterten Input-Output-Tabelle -----	64
Abbildung 20 Charakteristika der Funktionsweise der NRW-Ökonomie: ausgewählte physische und monetäre Flüsse-----	67
Abbildung 21 Anwendung der DEBRIOT-Methode für die Erstellung einer bi-regionalen Input-Output-Tabelle für Deutschland: NRW und RD (restliches Deutschland) -----	71
Abbildung 22 Vereinfachte schematische Darstellung der Stahl-Produktionstechnik im Sauerstoffkonverter durch den Weg vom „Eisenerz zum Stahl“ -----	72
Abbildung 23 Vereinfachte Darstellung ausgewählter Inputs und Outputs, die die Herstellung von Stahl im Sauerstoffkonverter technisch bedingen: Abbildung der Input- und Output-Mengen, die die Produktion einer Tonne Produkt charakterisieren -----	73
Abbildung 24 Erweiterte NRW-spezifische Produktionsverflechtungsmatrix: Anpassung der SEETM (sozioökonomische und umweltbezogene Ergänzung der Technologiematrix) für NRW-----	74
Abbildung 25 Verfeinerung der Produktionsverflechtungsmatrix der Input-Output-Tabelle NRW: weitere Kalibrierung auf die regionalen Produktionscharakteristika-----	75
Abbildung 26 Datenflussdiagramm für die Verfeinerung der Produktionsverflechtungsmatrix -----	76
Abbildung 27 Unterteilung der nach NRW importierten und von NRW exportierten Produkte außerhalb Deutschlands -----	78
Abbildung 28 Integration der erweiterten Input-Output-Tabelle NRW im multiregionalen erweiterten Input-Output-Modell des Wuppertal Instituts (WI-SEEGIOM)-----	78

Abbildung 29 Übersicht über die Berücksichtigung von Flexibilitätsoptionen, energieintensiven Branchen und LCBTT in den betrachteten Szenarien -----	91
Abbildung 30 Endenergieverbrauch in der Industrie nach Energieträgern in den Jahren 2030 und 2050 -----	93
Abbildung 31 Inländische Stromerzeugung nach Energieträgern in den Jahren 2030 und 2050 -----	94
Abbildung 32 Inländische Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nach Energieträgern in den Jahren 2017, 2030 und 2050 -----	95
Abbildung 33 Direkte und indirekte Elektrifizierung des Endenergieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2015 und 2050 (inkl. Importe) -----	96
Abbildung 34 Nettoimporte von Strom und CO ₂ -armen Energieträgern nach Deutschland in 2015, 2030 und 2050 (ohne nicht-energetischen Bedarf) -----	98
Abbildung 35 Treibhausgasemissionen im Vergleich zu Elektrifizierung im Jahr 2050 (oben: direkt, unten: indirekt mit PtG) -----	99
Abbildung 36 THG-Emissionen von Deutschland nach Sektoren und Szenarien in den Jahren 2030 und 2050 -----	100
Abbildung 37 Der (technologische) Möglichkeitsraum für eine LC Industrie -----	108
Abbildung 38 Räumliche Aspekte der energieintensiven Grundstoffindustrien in Deutschland und NRW -----	110
Abbildung 39 Kohlenstoffbilanzen der drei untersuchten Systemen (Jahresflüsse) -----	117
Abbildung 40(a-d) Primärenergiebilanz NRW und resultierende jährliche Energieträgerimportströme gegenüber heute -----	128
Abbildung 41 Weltweite Emissionshandelssysteme -----	143
Abbildung 42 Anträge im Rahmen von Horizon 2020 -----	157
Abbildung 43 Technologiereifegrade und mögliche Anwendungsfelder der zentralen EU-F&E-Förderprogramme -----	159
Abbildung 44 Überblick zu Instrumenten zur Technologieentwicklung für die EPI -----	160
Abbildung 45 Übersicht zu Fördermitteln des European Regional Development Fund in fünf thematischen Bereichen (Stand: 20. März 2018; in Milliarden Euro) -----	164
Abbildung 46 Netzausbau-Verfahren -----	167
Abbildung 47 Rahmenbedingungen und Politikinstrumente im Überblick -----	171
Abbildung 48 Schema eines zukünftigen LCBT Netzwerks (eigene Darstellung) -----	174
Abbildung 49 Titelbild der Image-Broschüre „Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries“ -----	192
Abbildung 50 Screenshots aus dem Film „Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries“ -----	193
Abbildung 51 Screenshots aus dem Film „Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries“ -----	194
Abbildung 52 Titelbild der Broschüre „Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries“ -----	197

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
AEL	Alkalische Elektrolyse
BCA	Border Carbon Adjustments
BECCS	Bioenergy with carbon capture and storage
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BVT	Bestvalue Technology
BWS	Bruttowertschöpfung
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CDU	Christlich Demokratische Union Deutschlands
CEF	Connecting Europe Facility
COP23	UN-Weltklimakonferenz
CSU	Christlich-Soziale Union Deutschlands
d.h	Das heißt
DE	Deutschland
DEBRIOT	Double-Entry Bi-Regional Input-Output Tables
EE	Erneubare Energien
EEEF	Europäische Energieeffizienzfonds
EIOA	Erweiterte Input-Output-Analyse
EIOM	Erweiterte Input-Output-Modell
EIOR	Erweiterte Input-Output-Rechnung
EIOT	Erweiterte Input-Output-Tabelle
EKF	Energie- und Klimafonds
EMRIOT	Erweiterte multiregionale Input-Output-Tabellen
EPI	Energy-intensive Processing Industries
ERW	Beschäftigung
ESIF	Europäischen Struktur- und Investitionsfonds
ETS	Emission Trading System
EU	Europäische Union
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
FuE	Forschung und Entwicklung
Ggf.	Gegebenenfalls
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GHG	Greenhouse Gas
HTEL	Hochtemperatu-Elektrolyse
i.d.R	In der Regel
IEA	International Energy Agency
IF	Innovation Fund
IOT	Input-Output-Tabelle
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
IS	Industrial symbiosis
ISO	International Organization for Standardization
KRU	Ressourcenkommission des Umweltbundesamtes
LCA	Life-Cycle-Analyse
LCBTT	Low-carbon break-through technologies
NABeG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz
NEP-G	Netzentwicklungsplan-Gas
NEP-S	Netzentwicklungsplan-Strom
NGO	Nichtregierungsorganisation
NRW	Nordrhein-Westfalen
NTC	Net Transfer Capacity
PEF	Product Environmental Footprint
PEMEL	Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse
Pkw	Personenkraftwagen

PtG	Power-to-Gas
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik
RD	Restliches Deutschland
rd.	Rund
RI	Rohstoffinput
RW	Rest of World
SEE-TM	Socioeconomic and Environmentally Extended Technology-Matrix
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
TEN-E	Trans-European Networks for Energy
THG	Treibhausgas-Emissionen
u.U	Unter Umständen
UBA	Umweltbundesamt
WI	Wuppertal Institut
WSK	Wertschöpfungskette

Einheiten und Symbole

\$	US-Dollar
%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
a	annum / Jahr
Ag	Silber
Al	Aluminium
Au	Gold
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
Dy	Dysprosium
g	Gramm
Gt	Gigatonne
h	Stunde
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
In	Indium
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kt	Kilotonne
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
Li	Lithium
Mio.	Million
MJ	Megajoule
Mrd.	Milliarde
Mt	Megatonne
Nm ³	Normkubikmeter
s	Sekunde
t	Tonne

Einleitung

Auf der Weltklimakonferenz im Dezember 2015 in Paris (COP 21) wurde die Erreichung der Klimaneutralität spätestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts als Ziel festgelegt. Setzt man nicht großmaßstäblich auf Technologien der CO₂-Abtrennung und Speicherung, bedeutet dies nichts anderes als eine sukzessive Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energien. Mit der Zielsetzung die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % (gegenüber dem Bezugsjahr 1990) zu reduzieren, haben die EU, Deutschland und auch NRW bereits wichtige Weichenstellungen in diese Richtung gestellt. Mit dem Klimaschutzgesetz NRW aus dem Jahr 2013 ist das Land einen weiteren Schritt gegangen und hat die langfristig angestrebten Klimaschutzziele auch rechtlich fixiert.

Die energieintensive Industrie muss sich diesen Anforderungen national wie international stellen. Dabei werden sich vor allem die Unternehmen gut positionieren können, die sich pro-aktiv auf die steigenden Anforderungen einstellen und Klimaschutzmaßnahmen mit einer Verbesserung der Kostenstrukturen insbesondere aber der Innovation von Produkten und Prozessen verbinden. Das Projekt „Landscaping – Energiesystem der Zukunft“ setzt hier an. Ziel ist die Identifikation und Analyse der Anforderungen an die energieintensive Wirtschaft und den Standort NRW im Übergang zu einem weitgehend auf erneuerbaren Energien basierendem Energiesystem der Zukunft. Die Landscaping-Untersuchung soll als solide Wissensgrundlage für Wirtschaft, Wissenschaft, Gesellschaft und Politik dienen, auf Basis welcher eine langfristig angelegte Innovationsstrategie diskutiert und entwickelt werden kann, die sowohl die Klimaschutzanstrengungen als auch die Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrie in NRW stärkt. Das Projekt stellt damit einen wichtigen Baustein zur Umsetzung der im Klimaschutzplan des Landes genannten Ziele dar.

Für die zuvor beschriebenen Herausforderungen der schrittweisen Emissionsminderung des Energiesystems sind Innovationen auf verschiedenen Ebenen notwendig. Wie sowohl Arbeiten des Weltklimarates (IPCC) und der Internationalen Energieagentur für die globale Ebene als auch Analysen für Deutschland und für NRW im Rahmen des Klimaschutzplanprozesses und des nachfolgenden Dialogprozesses mit der Industrie zeigen, lassen sich drei maßgebliche Bereiche unterscheiden (Lechtenböhrmer et al. 2015b):

■ *neue innovative (Break-through-)Technologien (Low-Carbon-Technologien),*

da eine weitgehende Emissionsminderung mit den bisher vorhandenen Technologien in der energieintensiven Industrie nicht möglich sein wird. Erforderlich sind zum einen umfangreiche, z. T. auch radikale (Break-through-)Innovationen, z. B. die Nutzung von regenerativem Wasserstoff in Produktionsprozessen, die Entwicklung von neuen Produkten wie Low-Carbon-Zemente oder die verstärkte Nutzung elektrochemischer und/oder biotechnologischer Verfahren¹. Zum anderen ist eine umfassende Steigerung der Materialeffizienz über die kompletten Wertschöpfungsketten hinweg nötig (Allwood et al. 2012).

¹ Fishedick et al. (2014) / IPCC (aaO); Umweltbundesamt 2014 (aaO)

■ *neue innovative Kooperationsansätze,*

da die Emissionsminderung in der energieintensiven Industrie keine Aufgabe ist, die von einem Unternehmen allein realisiert werden kann weil die technischen und ökonomischen Herausforderungen der produzierenden Industrien als besonders hoch gelten können (Dewald und Achternbosch 2016). Als ein möglicher Ansatzpunkt kann ein branchenübergreifender, speziell auf Netzbildung für tiefgreifende Innovationen im Bereich der CO₂-Minderung und Clusterbildung zielender Ansatz gesehen werden, der hilft Synergieeffekte zwischen den Unternehmen und Branchen auszuschöpfen und auch Infrastrukturanforderungen gemeinschaftlich anzugehen². Dabei sollten neben den produzierenden Unternehmen selbst v. a. auch die (vielfach kleinen und mittelständischen) Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus integrativ einbezogen werden, da diese vielfach wichtige Innovationsmotoren sowie technologische Kompetenzträger sind³.

■ *eine neue innovative Standortpolitik,*

da die globale Konkurrenz u. a. aufgrund starker Preiskonkurrenz sowie z. T. hoher Kostenvorteile bei Rohstoffen und Energie den Standort NRW vor große Herausforderungen stellt. Die Weiterentwicklung hochinnovativer Wertschöpfungsketten rund um kohlenstoffärmere Grundstoffe sowie High-Tech-Materialien in NRW kann eine zentrale Strategie sein, Akteuren am Standort NRW zu einem Innovationsvorsprung in diesem zentralen Innovationsfeld zu verhelfen und so zur Sicherung von Arbeitsplätzen, Steuereinnahmen und der Attraktivität der Region für Fachkräfte, aber auch zum Klimaschutz in NRW und global beizutragen.

Welche Anforderungen auf die energieintensive Wirtschaft und den Standort NRW in diesen Bereichen im Detail zukommen, wird im Rahmen des Projektberichtes detailliert untersucht.

Strukturierung der inhaltlichen Arbeit

Die Themenvielfalt in der vernetzte Technologie-, Infrastruktur- und Systembetrachtung führt dazu, dass es eine Vielzahl von thematischen Überschneidungen bei der Betrachtung von Low Carbon Technologien und deren Einsatz gibt. Für diesen Bericht wurde eine Aufteilung gewählt, die zwischen einer Produktebene, einer Technologieebene und einer Rahmenbedingungsebene trennt, die gemeinsam auf einer Szenarienebene miteinander verwoben sind. Alle diese Teilelemente sind eng verzahnt und überschneiden sich auf verschiedenen Ebenen (Abbildung 1). Aus Gründen der besseren Bearbeitung wurden die einzelnen Bereiche inhaltlich getrennt betrachtet und bearbeitet. Dabei wurden nicht alle möglichen Schnittstellen mitbetrachtet, da es sich hier um eine Aufstellung des vorhandenen Wissens handelt, die als inhaltliche

² Dass in diesem Bereich weder in NRW noch darüber hinaus entsprechende Clusteraktivitäten existieren, diese aber von zahlreichen Stakeholdern aus Industrie und Politik für notwendig gehalten werden, haben z.B. die Analysen von Fishedick et al (2014) ergeben.

³ siehe die erste Zusammenstellung von auf NRW bezogenen Innovationssystemen der sechs energieintensivsten Industrien in Lechtenböhrmer et al. (2015b), aaO.

Grundlage in einen weitere Betrachtung in einem Innovationszentrum Low Carbon Technologien NRW genutzt werden.



Abbildung 1 Übersicht über die inhaltliche Strukturierung der einzelne Arbeitspakete

Quelle: Eigene Darstellung

Im Arbeitspaket 1.1 „Identifikation und Bewertung von Innovationen entlang der Wertschöpfungsketten (Produkte und Dienstleistungen)“

wurde untersucht, welche Möglichkeiten und Hemmnisse es bei der Bewertung und Einbeziehung von produktspezifischen Emissionen zu den Klimaschutzzielen von Unternehmen und politischen Einheiten gibt.

Das wurde im **Arbeitspaket 1.2 „Entwicklung eines regionalen Input-Output Modells für NRW“** durch eine eine Einschätzung der Möglichkeiten und Herausforderungen beim Aufbau eines Informationssystems zur Ermittlung der globalen sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen, die durch die Produktions- und Konsumaktivitäten im Land NRW ausgelöst werden, ergänzt.

Im **Arbeitspaket 2 Herausforderungen zukünftiger klimaneutraler Energiesysteme & Technologie-Entwicklungen in der Industrie** wurde durch eine Übersicht und Vergleich zentraler Klimaschutzzszenarien hinsichtlich der Aussagen zur Entwicklung der Industrie bis 2050 der Rahmen gesteckt, der in der

Wissenschaftslandschaft derzeit diskutiert wird. Im Anschluss wurden generische Zielszenarien für NRW 2050 entwickelt, um ein konsistentes Bild der notwendigen Technologien im Industriesektor zu bekommen. Diese Technologien wurden anhand einer inhaltlichen Matrix beschrieben und bilden eine wichtige Datenquelle für die weitere Bearbeitung des Themas im Innovationszentrum.

Das **Arbeitspaket 3 Rezeption und Gestaltung der Rahmenbedingungen** betrachtet die vorhandenen und nötigen Instrumente und Rahmenbedingungen, die bei einer Transformation des Energie- und Industriesystems eine Rolle spielen.

Das **Arbeitspaket 4 Kooperationsansätze und Industriesymbiose** untersucht, welchen Beitrag eine verstärkte Integration bzw. Vernetzung (energieintensiver) Industrien in NRW im Rahmen einer weitreichenden Treibhausgasminierungsstrategie der Grundstoffindustrie in NRW haben könnte. Dies konkretisiert sich in der Frage wie und ob industrielle Netzwerke (*industrial ecology, industrial symbiosis*) Beiträge zu einer zukünftig weitestgehend treibhausgasneutrale Industrielandschaft in NRW – basierend auf den beschriebenen LCBT Technologien – leisten könnte und welche Effekte sich hierdurch erzielen lassen könnten.

Im **Arbeitspaket 5 Internationaler Austausch zu Good Practise der weitgehenden Emissionsminderung in der energieintensiven Wirtschaft** hatte das Wuppertal Institut die günstige Gelegenheit, die örtliche Nähe zur COP 23 in Bonn zu nutzen und eine hochrangig besetzte und international sichtbare Veranstaltung als Side Event anzubieten und auszuwerten.

Das war auch zentrale Grundlage für das **Arbeitspaket 6 Publikation zu Emissionsminderungsnotwendigkeiten und –optionen**, in dem die Ergebnisse und Öffentlichkeitsarbeit zur COP und dem Industrieevent ausgewertet und in Publikationen umgesetzt wurden.

1 AP 1: Identifikation und Bewertung von Innovationen entlang der Wertschöpfungsketten (Produkte und Dienstleistungen)

Die Themenstellung geht auf Diskussionen zurück, die im Rahmen des Klimaschutzplanprozesses im Jahr 2013 mit den Stakeholdern der NRW-Industrie geführt worden sind⁴. Dabei wurde herausgestellt, dass über die Quellenbilanz (die als Grundlage von Klimaschutzzielen und Strategien dient) weder positive noch negative Effekte von Produkten erfasst werden können, die wertschöpfungskettenweit auftreten. Diese Effekte können nur über Produktbilanzen, z. B. Product Carbon Footprint Analysen, erfasst werden.

In den Diskussionen ist zudem immer wieder darauf hingewiesen worden, dass ein adäquater Umgang mit den Möglichkeiten der *Bewertung von „Klimaschutzprodukten“* von hohem Interesse ist. Entsprechende Bewertungsmethoden würden die Energieintensive-Industrie dabei unterstützen, Innovationsanstrengungen gezielt auf Produkte auszurichten, die unter ganzheitlicher Betrachtungsweise eine hohe Klimaschutzwirkung entlang der Wertschöpfungskette versprechen. Die methodische Herausforderung ist dabei, die Aufwendungen und damit die Emissionen sämtlicher Herstellungsprozesse und beteiligter Unternehmen in Bezug zu den durch die in der Nutzungsphase erzielten Einsparungen zu setzen, so dass Unternehmen nicht für die Emissionen bei der Herstellung dieser Produkte „bestraft“ werden.

Auf aggregierter Ebene betrifft dies ebenso das Land NRW, das einerseits sehr hohe industriebedingte Emissionen vorweist, die über die Stromerzeugung und industrielle Produkte auch anderen Bundesländern zugute kommen, andererseits hohe Emissionen erzeugt, die erhebliche Emissionseinsparungen auf Nutzerseite bewirken und somit nicht unbedingt dem Land zugeordnet werden sollten. Dementsprechend wurde ebenfalls diskutiert, aufbauend auf den betrieblichen Überlegungen auch ein *Konzept auf Landesebene* (NRW) zu entwickeln.

Die Diskussionen wurden in 2017 wieder aufgenommen und in einem ersten Statustreffen zusammengefasst⁵. Dabei wurde ebenfalls der Vorschlag des Wuppertal Instituts diskutiert, neben den aufgezeigten Fragen der Anrechenbarkeit von Emissionen auch *Innovationen entlang der Wertschöpfungsketten* zu identifizieren, ihre Bilanzierung zu verbessern und Handlungspotenziale aufzuzeigen. Diese ermöglichten es der energieintensiven Industrie, Innovationsanstrengungen gezielt auf Produkte auszurichten, die unter ganzheitlicher Betrachtungsweise eine hohe Klimaschutzwirkung entlang der Wertschöpfungskette versprechen und dies aktiv zu vermarkten.

Gleichzeitig wurde das Interesse von Vertretern der Industrie bekundet, zu analysieren, welcher Anteil der Emissionen dem Konsum in NRW zuzuordnen ist, welche Emissionen in NRW selbst und welche entlang der Vorketten importierter Produkte entstehen und welcher Anteil dem Export von Produkten zuzuordnen ist. Zur Lösung

⁴ Siehe die Arbeiten der „Ad-hoc Arbeitsgruppe Produktbilanzierung“ unter <http://www.klima.nrw.de/mediathek/dokumentation/ags-klimaschutz/>

⁵ Workshop im Wuppertal Institut am 28.03.2017 zur „Identifikation und Bewertung von Innovationen entlang der Wertschöpfungsketten“

dieser Fragen bietet sich eine *NRW-bezogene Input-Output-Bilanz* (siehe 1.2) an, die neben ökonomischen Größen auch Energie- und Materialflüsse berücksichtigt.

Während alle Fragen, die die betrieblichen Aspekte behandeln, in Kapitel 1.1 (Produkte als Klimaschutzprodukt) betrachtet werden, folgt die Zuordnung von Emissionen zu NRW und dem Export in Kapitel 1.2.

1.1 AP 1.1: Produkte als Klimaschutzprodukte und Klimainnovationen

Dr. Kathrin Greiff, Jens Teubler, Prof. Dr. Christa Liedtke, Dr. Peter Viebahn, Prof. Dr. Stefan Lechtenböhmer

1.1.1 Zielsetzung

Die Auseinandersetzung mit den im vorherigen Kapitel genannten Themen aus dem Bereich „Bewertung von Innovationen entlang der Wertschöpfungsketten“ zielt direkt auf die Generierung langfristig fokussierter Innovationsimpulse für Produkte/Prozesse und Dienstleistungen der beteiligten Unternehmen in Nordrhein-Westfalen im vorwettbewerblichen Umfeld ab. Um Anreize für maßgebliche Beiträge zum Klimaschutz durch die Gestaltung und Entwicklung von „Klimaschutzprodukten“ geben zu können, sollten Konzepte zur Lösung folgender Fragen – sowohl methodischer Art als auch von der Umsetzungsseite her – erarbeitet werden:

- 1 | Auf welche Weise könnten betriebliche Aufwendungen und die damit verbundenen Emissionen bei der Herstellung von Produkten in Bezug zu den durch die in der Nutzungsphase erzielten Einsparungen gesetzt werden („avoided emissions“, Scope4-Emissionen)?
In einem ersten Schritt ist dies auf Produktebene zu klären – der **Produktperspektive**. Die Produkte werden über den gesamten Lebenszyklus betrachtet und darüber die potenziell zu erzielenden „avoided emissions“ abgeleitet.
Beispiel: Vergleich von zwei verschiedenen Wärmedämmverbundsystemen mit unterschiedlichen U-Werten.
- 2 | Wie können Klimaschutzinnovationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zur Reduktion von Emissionen und Ressourcen beitragen?
Dabei wird das gesamte Produktsystem mit seinem Nutzen auf Endkonsumentenebene betrachtet – der **Systemperspektive**.
Beispiel: Vergleich von Endprodukten/Nutzen z. B. 40 Jahre warmer Wohnraum in einem Einfamilienhaus gedämmt vs. ungedämmt.
- 3 | Über diese Bilanzierung hinaus stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse der Bilanzierung möglicherweise zu einer **Reduktion von Klimaschutzpflichten der Industrie** führen könnten. Zentrale Fragestellungen sind die Methodik, nach der die Einsparungen auf der Nutzungsseite abgeschätzt werden können, die Ermittlung der anteiligen Emissionen bei der Herstellung über die gesamte Wertschöpfungskette (Allokations- und Attributionsregeln) sowie die mögliche Anrechnung der erzielten Einsparungen auf die Unternehmensebene.
Beispiel: Die Herstellung von Dämmstoffen verursacht bei den produzierenden Unternehmen Emissionen sowie emissionsbezogene Kosten, soweit sie in das CO₂-Handelssystem eingebunden sind. Auf Nutzungsseite bewirkt die Wärmedämmung eines Hauses über mehrere Jahrzehnte eine erhebliche Einsparung an Primärenergie und Emissionen.
- 4 | Neben **technischen Innovationen** führen auch **nicht-technische Innovationen** zu THG Einsparungen. Wie können diese bei der Berechnung von „avoided emissions“ erfasst werden?

Das Ziel eines solchen Konzepts/methodischen Vorgehens für die Bewertung von Klimaschutzprodukten bzw. *Innovationsbewertung* ist es,

- 1 | Industrieunternehmen die Möglichkeit zu geben, ihre Produkte als Teil eines gesamten Produktsystems gegenüber Referenzsystemen einzuordnen und eine Vergleichbarkeit zu schaffen; Dadurch soll erreicht werden, dass die Technologieentwicklung und Innovationsprozesse gestärkt werden und Richtung Klimaschutz gelenkt werden.
- 2 | Die potenziellen produktbezogenen Emissionseinsparungen sollen anteilig für das jeweilige Unternehmen mit Bezug auf die gesamte Wertschöpfungskette ausgewiesen werden und in Bezug zur Gesamtemission des Unternehmens gesetzt werden.

Für die Fragestellungen werden im Folgenden erste Lösungsansätze aufgezeigt und die dabei auftretenden Detailfragen zusammen gestellt, die in F&E-Empfehlungen für ein weiter gehendes Forschungsprogramm münden.

Schließlich werden die vorläufigen Ergebnisse mit Darstellung der Problematik, Lösungsmöglichkeiten und F&E-Bedarf in einem Fachmagazin veröffentlicht, um frühzeitig Diskussionen innerhalb der wissenschaftlichen und unternehmerischen Community zu ermöglichen.

1.1.2 Hintergrund und Definitionen

Typologisierung von Klimaschutzprodukten

Im Rahmen der Untersuchung von Bewertungsmöglichkeiten von Klimaschutzprodukten stellt sich zunächst die Frage, wie genau ein Klimaschutzprodukt definiert werden sollte.

Ein Produktvergleich stellt dabei die Grundlage einer solchen Definition dar. Ein Produkt sollte gegenüber einem Referenzprodukt bzw. -produktsystem (wertschöpfungskettenübergreifend) zu einer THG Einsparung führen. Dabei muss der Betrachtungsrahmen festgelegt werden, da produktbezogene Effekte auch zu weiteren makroökonomischen Effekten führen können, die hier aber nicht betrachtet werden sollten. Über den Betrachtungsrahmen hinaus besteht noch die Frage, ob ein Grenzwert für die Minderung von THG aufgestellt werden sollte, so dass ein Produkt erst dann als Klimaschutzprodukt benannt wird, wenn es diesen Grenzwert erreicht hat. Dieser Grenzwert kann dabei in Bezug zu einem festzulegenden Referenzsystem festgelegt werden oder auch an der Gesamtemission des jeweiligen Unternehmens gemessen werden.

Abbildung 2 stellt schematisch den Wirkzusammenhang zwischen einem Produzenten für Klimaschutzprodukte (hier auch Innovator) und ihrer Wirkung auf die Wertschöpfungskette und die damit einhergehenden Umweltwirkungen dar.

Effekte 0. Ordnung treten direkt beim Produzenten auf und sind somit von der Quellsbilanzierung erfasst, wenn auch nicht explizit ausgewiesen (z. B. durch Reduzierung der Energieaufwendungen einer Produktionsroute). Sie sind der Herstellungsphase zugewiesen.

Effekte 1. Ordnung betreffen den Abnehmer des Produktes im Business-to-Business sowie weitere gewerbliche Akteure wie z. B. Verwerter. Sie sind indirekt von der

märenergieverbrauchs. Die Quellenbilanz umfasst alle Emissionen, die in einem Land entstehen inklusive des Umwandlungssektors. Der Außenhandel wird dabei nicht berücksichtigt, Emissionen von exportiertem Strom werden dem Land dennoch zu geschrieben, wohingegen Emissionen von Importstrom nicht berücksichtigt werden.

Effekte von Produkten bzw. Produkt-Dienstleistungssystemen, die über den gesamten Lebenszyklus entstehen werden über die Quellenbilanz nicht erfasst. Dagegen gibt es z. B. mit der Lebenszyklusanalyse (ISO 14040/44) und dem Product Carbon Footprint (CO₂-Fußabdruck; Methodik des Intergovernmental Panel on Climate Change (Bernstein et al. 2007)) methodische Ansätze, die auf Produktebene sowie lebenszyklusweit Treibhausgasemissionen erfassen. Dabei werden unterschiedliche Ebenen der Bewertung unterschieden. Diese sind als Scope 1, 2 und 3 beschrieben. Scope 1 und 2 fokussieren bei der Betrachtung eines Produktes nur auf den Herstellungsprozess bzw. den Prozessschritt des Unternehmens, das die Betrachtung durchführt. Dabei werden bei Scope 1 nur die Standortspezifischen Emissionen berücksichtigt von stationären und mobilen Anlagen oder auch flüchtige Gase. Scope 2 bezieht zusätzlich dazu die Emissionen ein, die durch die Erzeugung von eingekauften Strom entstehen. Scope 3 bezieht alle weiteren Emissionen ein, die entlang der Wertschöpfungskette eines Produktes auftreten können in vorgelagerten und auch nachgelagerten Prozessen. Abbildung 3 verdeutlicht diese Vorgehensweise nach dem Greenhouse Gas Protocol (World Business Council for Sustainable Development und World Resources Institute 2011).

Bei der Darstellung des Scope 3 auf Produktebene werden demnach alle auftretenden Emissionen erfasst. Veränderungen gegenüber innovativer Herstellungsprozesse oder auch Unterschiede zu anderen Produkten mit gleichem Nutzen können nur über Vergleiche aufgezeigt werden.

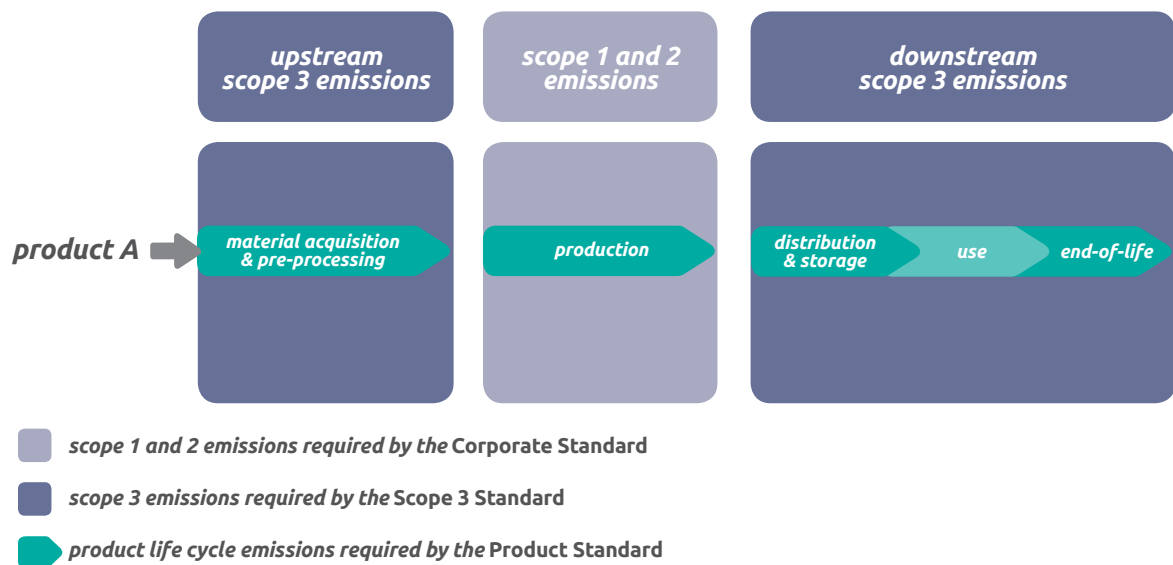


Abbildung 3 Übersicht Scope 1, 2, und 3 Emissionen nach dem Greenhouse Gas Protocol

Quelle: World Business Council for Sustainable Development und World Resources Institute 2011

Mittels Produktvergleichen können demnach auf Basis dieses methodischen Vorgehens aufgezeigt werden, wie innovative Produktsysteme gegenüber Referenzsystemen zu potentiellen THG Einsparungen führen bzw. Emissionen vermeiden. Diese vermiedenen Emissionen werden auch „avoided emissions“ genannt und seit längerem diskutiert. Die Zielsetzungen für die Kalkulation von avoided emissions kann sehr unterschiedlich sein:

- Informationsfluss für Endkunden/Nutzung im Marketing
- Integration von LCA/PCF in der Produktentwicklung, damit verschiedene Design Möglichkeiten/Entwicklungsmöglichkeiten direkt bewertet werden können hinsichtlich der Auswirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Als Datengrundlage für politische Entscheidungen zu Förderung von low-carbon Produkten „Klimaschutzprodukten“ und „Innovationen“
- Vernetzung aller WSK Partner für eine Verbesserung des Produktsystems
- Ganzheitliches Bild des Einflusses von Unternehmen auf das Klima, z. B. wenn Scope 3 beim Corporate CF nicht ausreichend ist da z. B. erhöhte Emissionen vorliegen bei erhöhter Produktion von Klimaschutzprodukten, die aber anderenorts (oder auch zu einer anderen Zeit) zu Einsparungen führen gegenüber bisher genutzten Produkten.

Um solche „vermiedene Emissionen“ bzw. Einsparpotenziale aufzuzeigen, haben sich in verschiedenen Branchen Akteure zusammengeschlossen, um Regelwerke für die Berechnung und Berichterstattung von „avoided emissions“ aufzustellen (siehe Tabelle 1). Derzeit liegt keine einheitliche Definition dieser avoided emissions vor. Das World Resource Institut hat folgende Definition auf seiner Website: „Avoided emissions are emission reductions that occur outside of a product’s life cycle or value chain, but as a result of the use of that product. Examples of products (goods and services) that avoid emissions include low-temperature detergents, fuel-saving tires, energy-efficient ball-bearings, and teleconferencing services.“ Nach einem unveröf-

fentlichten Working Paper des World Resources Institute (2016, unveröffentlichtes Working Paper on avoided emissions) sind diese avoided emissions wie folgt definiert: „*Avoided emissions*“ = „*emission reductions that a company realizes through society’s use of its products (goods and services) versus the use of alternative products*“.

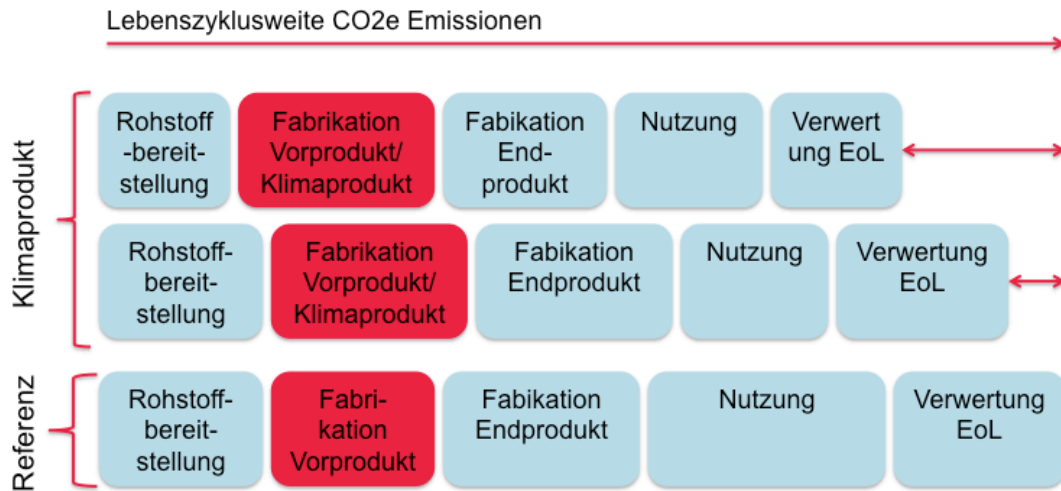


Abbildung 4 Lebenszyklusweite CO₂e Emissionen von Klimaschutzprodukten und einem Referenzprodukt

Quelle: Eigene Darstellung nach ICCA und WBCSD (2013)

„Avoided emissions“ sind demnach Emissionen, die eingespart werden durch die Anwendung/Nutzung von Produkten/Dienstleistungen im Vergleich zur Anwendung von alternativen Produkten/Dienstleistungen. Es handelt sich dabei um Produktvergleiche, die eine potenzielle Emissionsvermeidung aufzeigen, die nicht innerhalb der WSK des innovativen Produktes auftreten, sondern nur wenn dieses anstatt einem anderen genutzt wird. Abbildung 4 verdeutlicht dieses Vorgehen.

Tabelle 1 Übersicht zur ausgewerteten Studien/Guidelines in Bezug auf „Avoided emissions“ im Bereich der energieintensiven Industrie

Studie	Autoren	Titel	Inhalt	Definition „Avoided emissions“	Quelle
1	Lafarge Holcim 2016	Accounting and Reporting Protocol for Avoided Greenhouse Gas Emissions along the Value Chain of Cement-based Products	„This protocol has been developed with the purpose to enable the understanding, calculation and reporting of avoided GHG emissions for innovative cement-based product solutions. The protocol provides the framework, requirements, provisions and guidance to quantify GHG emissions avoided through innovative, climate-efficient cement-based products across their life cycle and along the entire value chain. It has been fitted to the challenges and business realities of the cement and construction sector.“	Avoided GHG emissions are the cumulative GHG emission savings that occur as a result of the use of a product, compared to a baseline solution, along the value chain.	http://www.lafarge-holcim.com/sites/lafargeholcim.com/files/atoms/files/lafargeholcim-avoided-emissions-protocol.pdf
2	ICCA& WBCSD 2013	Adressing the Avoided Emissions Challenge	„Guidlines from chemical industry for accounting for and reporting greenhouse gas (GHG) emissios avoided along the value chain based on comprehensive studies“	As part of low-carbon technology value chains various chemical industry products aid the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions compared to conventional products or compared to the market average. Under the terminology of the Greenhouse Gas Protocol international accounting tool, emission reductions of this kind are termed “avoided emissions”.	http://wbcsdservers.org/wbcsdpublishations/cd_files/datas/business-solutions/reaching-full-potential/pdf/E1%20CC%20LG%20guidance%20V3.pdf
3	ILCAj 2015	Guidelines For Assessing the Contribution of Products to Avoided Greenhouse Gas Emissions	„The Guidelines are intended to guide companies and organizations in calculating and assessing the contribution of their products, materials and components(“targets”) to avoided greenhouse gas emissions through the life cycle in comparison with a baseline, such as product(s) manufactured by the company or organization in the past.“	In theGuidelines, the “contribution to avoided emissions” is defined as the “quantified amount of contribution of the target product to reduced greenhouse gas emissions through the whole life cycle of final product(s) which achieve the reduction effects on environmental loads, in comparison to a baseline amount”.	https://www.ilcaj.org/lcahp/doc/iLCAj_Guidelines_avoided_emissions_assessment_v1_1_english.pdf

4	IC-CA/ECO FYS 2017	Greenhouse gas emission reduction enabled by products from the chemical industry	Assessment of global contribution of the chemical industry to selected six solutions in the context of avoiding GHG emissions.	[...] many innovative chemical industry products enable GHG emission reductions downstream in the value chain, also referred to as avoided emissions, e.g. lightweight materials in cars to save fuels and insulation materials to save energy for heating buildings. In this way, the chemical industry contributes to GHG emission reductions throughout society and enables a low carbon world	https://www.ecofys.com/files/files/ecofys-icca-2017-avoided-emissions-roadmap.pdf
---	--------------------	--	--	---	---

Quelle: Eigene Darstellung

Ein wesentlicher Punkt ist bei der Berechnung von „avoided emissions“ das Festlegen von geeigneten Alternativ-Produkten bzw. Produktsystemen und der vergleichenden funktionellen Einheit. Der Vergleich kann auf verschiedenen Ebenen der Wertschöpfungskette stattfinden. Zum einen auf Produktebene (mit Produkten jeweils auf gleicher Stufe der Wertschöpfungskette – hier auch als **Produktperspektive** benannt) oder zum anderen auf Endprodukt/Nutzen-Ebene (**Systemperspektive**). Die funktionelle Einheit muss dementsprechend festgelegt werden. Auf Produktebene werden z. B. zwei gleichartige Produkte miteinander verglichen (z. B. zwei verschiedene Dämmmaterialien mit unterschiedlichen U-Werten). Auf Endprodukt bzw. Nutzen-Ebene werden Produktsysteme modelliert und mit einander verglichen z. B. ein Standard-Reihenhaus mit durchschnittlicher Wohntemperatur für 40 Jahre mit und ohne Dämmung (ICCA und WBCSD 2013).

Das Referenzprodukt sollte laut bisheriger Guidelines die Technologie sein, die den Markt-Durchschnitt darstellt innerhalb einer Nutzungsgruppe/Produktgruppe. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich diese Baseline in Laufe der angenommenen Lebensdauer von Produkten ändern kann. So treten die Emissionen der Herstellung von z. B. Dämmmaterialien in einem bestimmten Jahr auf, die „avoided emissions“ werden aber im Laufe der angenommenen 40 Jahre realisiert. In dieser Zeitspanne könnten Veränderungen im Energiebedarf des Eigenheims auftreten und damit die potenziell „avoided emissions“ beeinflussen. Dies sollte immer deutlich gemacht werden, bestenfalls in der Anwendung von Sensitivitätsanalysen.

Wie beschrieben handelt es sich bei Avoided emissions immer um eine hypothetische Reduktion. Darüberhinaus ist die Ableitung der avoided emissions immer eine statische Analyse. Mit einer erhöhten Produktion erhöhen sich demnach auch die Einsparpotenziale für CO₂e. Bei dieser Vorgehensweise besteht die Gefahr, dass die berechneten hypothetischen Einsparungen steigen und damit die Umweltwirkungen insgesamt sinken bei einer realen Zunahme von Emissionen.

Die methodischen Ansätze zur Kalkulation von avoided emissions gehen immer mit einer Vielzahl von Herausforderungen einher wie auch die Ermittlung von Product Carbon Footprints, für die Regeln aufgestellt werden müssen:

- Zielsetzung
- Systemgrenzen und funktionelle Einheit
- Festlegen eines Referenzprodukts/-systems/-szenarios
- Einbezug potenzieller zukünftige Änderungen von Parametern durch Bezug auf Lebensdauern bis zu 50 Jahren und mehr
- Allokationsregeln
- Attributionsregeln – Verteilung der Einsparpotenziale auf verschiedene Akteure der Wertschöpfungskette

Eine mittels Stakeholder Prozess abgestimmte methodische Herangehensweise wird beispielsweise durch den europäischen Prozess zur Entwicklung des Product Environmental Footprint entwickelt (European Commission 2016a). Dieser Prozess ist bisher noch nicht abgeschlossen, wird allerdings bereits sehr kontrovers diskutiert (z. B. durch (BDI 2018)) Avoided emissions können an jeder Stelle der Wertschöpfungskette stattfinden, darum sollte immer der gesamte Lebenszyklus eines Produkts mit einbezogen werden. Dadurch steigt die Komplexität einer solchen Analyse. Bei einem Produktvergleich, bei dem Lebenszyklusstufen beider Produkte gleich sind, können für eine vereinfachte Analyse diese Stufen vernachlässigt werden vergleiche dazu ICCA und ECOFYS (2017).

Wenn Produktsysteme auf Ebene der Endprodukte miteinander verglichen werden kommt es zur Frage von Attributionen. Bisher liegen keine Guidelines zu Attributionsregeln vor, so dass das berichtende Unternehmen angehalten ist die Gesamtemissionen sowie potenzielle Einsparungen aufzuzeigen. Daneben können verschiedene Varianten von Attributionen dargestellt werden.

Eine solche Bewertung könnte zum Beispiel über die von der Ressourcenkommission des Umweltbundesamtes (KRU) geforderten Produktkennzeichnungsstelle organisiert werden (Åhman et al. 2017).

1.1.3 Bewertungsmöglichkeiten und Herausforderungen für Klimaschutzprodukte

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, sind avoided emissions ein Konzept der Produkt- und Unternehmensbilanzierung mit den damit zusammenhängenden Vorteilen und Herausforderungen. Auch im Rahmen der Finanzierung nachhaltiger Bonds (sogenannter Green Bonds) spielen sie als Wirkgröße eine immer größere Rolle.

Das folgende Kapitel soll nun aufzeigen, welche Schritte mindestens notwendig wären, um die zukünftige Vermeidung von Treibhausgasen in nationale Emissionsbilanzen und -ziele einzubinden. Mit jedem Schritt nimmt dabei nicht nur Erhebungsaufwand für die erforderlichen Daten zu, sondern auch die Komplexität der Berechnungen und das Ausmaß des dazugehörigen Stakeholder-Prozesses. Mit Blick auf die nationalen und internationalen Verpflichtungen des Landes NRW, erscheint die tatsächliche Umsetzung des Vorgehens allein aus politischer Sicht sehr schwierig, selbst wenn die entsprechenden Daten vorlägen. Allerdings kann auf diese Weise aufgezeigt

werden, welcher Nutzen für die energieintensive Industrie entsteht, wenn nur ein Teil des Gesamtprozesses umgesetzt wird.

Produktperspektive

Schritt 1: Festlegung des Referenzsystems

Das Referenzsystem beschreibt den Wirkmechanismus und Bezugspunkt der THG-Emissionen, die vermindert werden sollen. Ein Großteil der THG-Emissionen weltweit wird durch die Umwandlung von Energie induziert, es gibt jedoch auch Emissionen, die sich aus der Verwendung und der Freisetzung von Treibhausgasen in Produkten oder während Produktionsprozessen ergeben.

Es ist daher notwendig festzulegen, welche Ursache für die Treibhausemission betrachtet wird und welcher Teil des globalen Produktions- und Konsumsystems. Dabei sollte das Referenzsystem plausibel und logisch mit dem zu betrachtenden Klimaschutzprodukt verknüpft werden können. So könnte etwa eine moderne Windenergieanlage mit dem nationalen Strommix in Bezug gesetzt werden, nicht aber mit der Stromerzeugung in Haushalten, weil Windenergieanlagen i. d. R. öffentlich Strom in das Mittelspannungsnetz einspeisen. Andererseits könnten ausschließlich die gesamten Emissionen deutscher Haushalte als Referenzsystem gewählt werden, wenn ein typisches Haushaltsprodukt betrachtet wird. Und auch wenn die Emissionsursache typischerweise außerhalb der produzierenden Betriebe zu finden ist, können hier branchenbezogene Referenzsysteme gewählt werden.

Insgesamt ist die Festlegung eines Referenzsystems nicht aufwändig, was die erforderlichen Daten und Umrechnungsschritte anbelangt. Und auch der zugehörige Stakeholderprozess erfordert nur eine geringe Anzahl von Beteiligten (ggf. kann sogar gänzlich auf diesen verzichtet werden, wenn nur ein einzelnes Unternehmen betroffen ist). Da sich jedoch die Wahl des Referenzsystems auf alle nachfolgenden und berechneten Effekte auswirkt, sollte die Begutachtung durch Dritte (z. B. als Review) fester Bestandteil dieses Prozesses sein.

Allein die Festlegung eines Referenzsystems kann jedoch bereits für industrielle Unternehmen von Nutzen sein. Können doch so die eigenen Emissionen den Emissionen des Referenzsystems gegenübergestellt werden.

Tabelle 2 Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von
Schritt 1: Festlegung des Referenzsystems

Kategorie	Einschätzung	Begründung
Datenverfügbarkeit	sehr hoch	Es liegen i. d. R. öffentliche Statistiken und Emissionsfaktoren vor
Komplexität der Berechnungen	sehr gering	In Fällen in denen Berechnungen notwendig sind beschränken sie sich i. d. R. auf den Zugschnitt veröffentlichter Daten.
Ausmaß des Stakeholderprozesses	gering	Nur das einzelne Unternehmen selbst, oder die Unternehmen einer Branche/eines Verbandes.
Umsetzbarkeit	sehr hoch	Es gibt keine Vorgaben von Seiten des Gesetzgebers.
Reliabilität der Ergebnisse	hoch	Bei transparenter Darstellung des Entscheidungsprozesses ist eine Manipulation so gut wie ausgeschlossen. Zusätzliche Review-Prozesse können jedoch u. U. sinnvoll sein.
Nutzen für die energieintensive Industrie		
Das Ausmaß der eigenen Emissionen oder eines Teilbereiches (z. B. für eine Produktionsroute) der eigenen produktionsbedingten Emissionen, kann in Bezug zu den Emissionen des Konsums oder anderer Teilnehmer der Wertschöpfungskette gesetzt werden. → für die politische Ebene: es können über das Festlegen von Referenzen Grenzwerte festgelegt werden zur Einordnung von Klimaschutzprodukten - eine Klassifizierung wäre auch möglich		
Umsetzung am Beispiel von Wärmedämmprodukten		
Weil Wärmedämmsysteme den Wärmeverlust durch beheizte Flächen reduzieren, eignen sich die absoluten und relativen (pro kWh) THG Emissionen des Endenergieverbrauchs von Wärme in öffentlichen und privaten Gebäuden in Deutschland.		

Quelle: Eigene Darstellung

Schritt 2: Horizontaler Produktvergleich

Im zweiten Schritt erfolgt die Berechnung der avoided emissions im Rahmen einer klassischen Lebenszyklusanalyse gemäß des Greenhouse Gas Protocols (World Business Council for Sustainable Development und World Resources Institute 2011). Das Ziel ist hierbei, die Emissionen der Vor- und Nachketten eines Klimaschutzproduktes den potentiell Emissionen eines anderen Produktes gegenüberzustellen, die in verschiedenen WSK-Phasen auftreten können. In der Regel wird dies durch einen Vergleich mit einem Referenzprodukt erfolgen, das dem Marktdurchschnitt entspricht, zumindest aber dieselbe Dienstleistung zur Verfügung stellt. Für Vergleiche zwischen Unternehmen sollte die Festlegung des Referenzproduktes im Rahmen eines Stakeholder-Prozesses durchgeführt werden.

Als Vergleichsmetrik wird dafür eine sogenannte funktionelle Einheit festgelegt, auf die alle Inputs und Outputs des Lebenszyklus bezogen werden. Die Wahl der funkti-

onellen Einheit hat einen hohen Einfluss auf das Ergebnis, weil hier bereits eine Dienstleistung integriert werden kann (und ggf. sollte). So können zum Beispiel die Ergebnisse einer Ökobilanz über zwei verschiedene Staubsauger deutlich voneinander abweichen, je nachdem ob die Anzahl der jährlichen Anwendungen oder die absolute Menge aufgesaugten Schmutzes pro Jahr als funktionelle Einheit fungiert. Im ersten Fall profitieren Geräte mit geringem Energieverbrauch, im zweiten Fall Geräte mit vergleichsweise hoher Dienstleistung (hier: Staubaufnahme).

In der Regel wird ein solcher Produktvergleich im Rahmen einer attributionalen Ökobilanz durchgeführt; d. h. dass die Systeme der vor- und nachgelagerten Ketten auf einmal festgelegten generischen Daten beruhen und die zu betrachtenden Produkte und Dienstleistungen wiederum keinen Einfluss auf das sie umgebende System haben (etwa wenn eine Produktinnovation das Verhalten des Konsumenten oder die verkaufte Produktionsmenge beeinflusst). Es kann jedoch hier bereits notwendig sein, eine „consequential LCA“ durchzuführen, welche die umgebende Systeme über Systemraumerweiterung einbindet. Denkbar ist dies zum Beispiel, wenn ein Produkt Vor- oder Nachteile in der Verwertung bei Lebensende (EoL) gegenüber einem anderen Produkt zeigt.

Darüber hinaus (und unabhängig von der gewählten Methode) müssen die ermittelten avoided emissions, die durch den Wirkmechanismus im Referenzsystem erwartet werden, auf die Beteiligten der Wertschöpfung aufgeteilt oder attribuiert werden (siehe Abbildung 5)

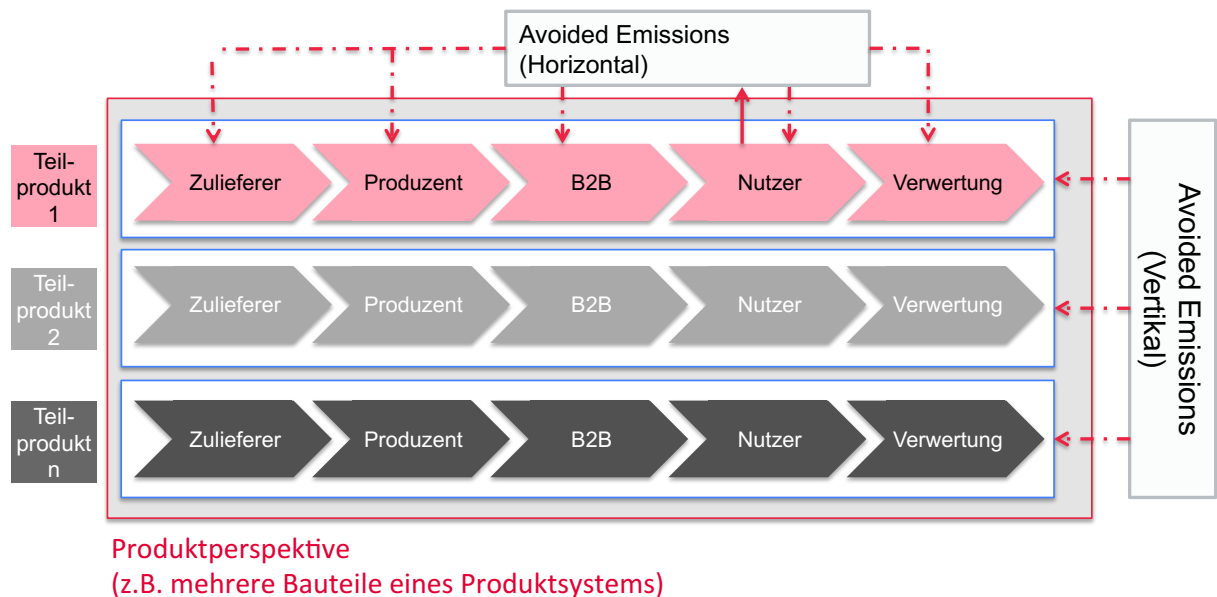


Abbildung 5 Horizontale und vertikale Attribution von avoided emissions

Quelle: Eigene Darstellung

Da hierfür kein Standard existiert, ist eine Vielzahl von Varianten möglich, die hier exemplarisch aufgeführt und in einem Stakeholder-Prozess diskutiert werden sollte.

1 | 100 zu 0 Methode:

Nur der Innovator nimmt für sich die avoided emissions in Anspruch. Wegen Doppelzählung können diese Emissionen jedoch nicht direkt mit den eigenen Emissionen verrechnet werden, sondern werden gesondert dargestellt.

2 | 50 zu 50 Methode:

Jeder Akteur (inklusive des Akteurs, bei dem die avoided emissions anfallen) bekommt dieselben Anteile gutgeschrieben und "verrechnet" diese mit den eigenen Emissionen.

3 | Physisch:

Dem direkten Profiteur (i. d. R. der Käufer) der avoided emissions werden die Hälfte der geminderten Emissionen gutgeschrieben, während die Anteile der anderen Akteure sich an der massenbezogenen Produktzusammensetzung orientieren.

4 | Monetär:

Die Kosten für den direkten Profiteur (z. B. Kaufpreis) werden in Bezug gesetzt zu den Investitionen, Kosten oder Umsätzen der beteiligten Akteure.

Die Ergebnisse horizontaler Produktvergleiche können von Unternehmen nicht nur zu Marketingzwecken und Produktvergleichen genutzt werden. Wie an den Entwicklungen zum Product Environmental Footprint ersichtlich, können auf diese Weise auch branchenweite (Öko-)Effizienzgrößen ermittelt werden, die in umweltrelevante Mindeststandards (z. B. Ökodesign) und Label für ökologisch vorteilhafte Produkte einfließen können (BDI 2018). Darüber hinaus garantiert das Konsensprinzip, dass sich auch wissenschaftliche Veröffentlichungen an den Standards und dazugehörigen Guidelines orientieren.

Tabelle 3 Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von Schritt 2: Horizontaler Produktvergleich (Produktperspektive)

Kategorie	Einschätzung	Begründung
Datenverfügbarkeit	hoch	Die wichtigsten Daten liegen den Unternehmen i.d.R. vor. Umgebende Systeme werden durch generische Datenbanken abgedeckt oder durch "cut-off" abgeschnitten.
Komplexität der Berechnungen	mittel	Die Berechnungsmethoden für attributionale Lebenszyklusanalysen sind Stand der Wissenschaft und i. d. R. nicht komplex. Einfache Systemraumerweiterungen können hingegen bereits heute mit gängiger Software durch einen LCA Experten durchgeführt werden.
Ausmaß des Stakeholderprozesses	hoch	Festlegungen wirken sich auf die Ergebnisse aus, was den Partikularinteressen einzelner Akteure widersprechen kann. Ohne Einbindung "neutraler" Vertreter sinkt zudem die Akzeptanz für die Ergebnisse des Prozesses.
Umsetzbarkeit	hoch	Im Rahmen der Guidelines für den Produkt Environmental Footprint (PEF) liegen bereits geeignete Umsetzungsstrategien und ein Framework vor.
Reliabilität der Ergebnisse	mittel	Ein Review-Prozess wird empfohlen, weil die Festlegung der funktionellen Einheit, der Systemgrenzen, des Referenzproduktes, der Allokations- und Attributionsregeln, einen hohen Einfluss auf das Ergebnis hat. Ohne ein solches Review setzt man sich der Gefahr eines "Greenwashing" aus.
Nutzen für die energieintensive Industrie		
Es werden robuste Produkt- und Unternehmensvergleiche zu Marketingzwecken ermöglicht, aber auch zur Einbettung in gesetzliche Mindestvorgaben und Standards für Labels.		
Umsetzung am Beispiel von Wärmedämmprodukten		
Hier könnte ein einzelnes Produkt mit einem Dämmstoffmix in Deutschland verglichen werden. Als funktionelle Einheit eignet sich die Dämmung von 1 m ² Außenfassade an einem typischen Einfamilienhaus in Deutschland nach dem EnEV Standard.		

Quelle: Eigene Darstellung

Systemperspektive

Schritt 3: Vertikaler Produktvergleich

Der oben beschriebene horizontale Produktvergleich unterstellt einen linearen Zusammenhang zwischen einem einzelnen Produkt und den identifizierbaren Akteuren der Wertschöpfungskette mit einem positiven Wirkmechanismus während der Nut-

zung des Produktes. Wertschöpfungsketten sind jedoch miteinander vernetzt und ein einzelnes Produkt trägt oft nur zu einen geringen Teil zum Klimaschutzmechanismus bei.

Im dritten Schritt müssen daher (Teil-, Vor-)Produkte berücksichtigt werden, die ebenfalls zur Reduzierung von THG-Emissionen beitragen und Teil desselben Produkt-Dienstleistungs-Systems sind. Beispielsweise wird der Wärmeverbrauch eines Gebäudes nicht nur durch den Transmissionswärmeverlust durch Wände, Böden und Fenster beeinflusst, sondern auch durch die Effektivität des Heizsystems und durch das individuelle Verhalten der Nutzer. Oder bei dem Treibstoffverbrauch eines Fahrzeugs spielt nicht nur das Gewicht der Karosserie, sondern das Gesamtgewicht, der Windwiderstand und schließlich die gesamte Kette der Wärme-Kraft-Umwandlung sowie das Fahrverhalten eine Rolle. Hinsichtlich des End-of-Life von Produkten müssen darüberhinaus verschiedene Möglichkeiten berücksichtigt werden und das methodische Vorgehen für die Anrechnung ausgearbeitet werden.

Diese Teileffekte sollten in Anlehnung an Schritt 2 zunächst horizontal innerhalb der jeweiligen Wertschöpfungskette quantifiziert werden, um sie dann vertikal über alle Wertschöpfungsketten verteilen zu können.

Teilbereiche des Referenzsystems können hierbei abgeschnitten oder mit typischen (unveränderten) Referenzwerten versehen werden. Die Robustheit der Ergebnisse und Glaubwürdigkeit der Attribution nimmt jedoch ab, wenn große Teile des Referenzsystems unberücksichtigt bleiben.

Tabelle 4 Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von Schritt 3: Vertikaler Produktvergleich (Systemperspektive)

Kategorie	Einschätzung	Begründung
Datenverfügbarkeit	mittel bis hoch	Die wichtigsten Daten liegen den Unternehmen i. d. R. vor. Bei fehlender Einbindung von "vertikalen" Akteuren, nimmt der Aufwand für die Datenrecherche zu.
Komplexität der Berechnungen	hoch	Die Berechnungsmethoden für attributionale Lebenszyklusanalysen sind Stand der Wissenschaft und i.d.R. nicht komplex. Die Systemraumerweiterung erfordert jedoch die Berücksichtigung möglicher Wechselwirkungen.
Ausmaß des Stakeholderprozesses	sehr hoch	Gegenüber des horizontalen Produktvergleiches müssen zusätzliche Akteure eingebunden werden. Partikularinteressen bestehen nicht nur zwischen horizontalen Akteuren, sondern auch vertikalen Akteursgruppen.
Umsetzbarkeit	mittel	Im Rahmen der DesignRL sowie der Guidelines für den Produkt Environmental Footprint (PEF) liegen bereits geeignete Umsetzungsstrategien und ein Framework vor. Der Aufwand steigt jedoch deutlich mit Einbindung zusätzlicher Akteure.
Reliabilität der Ergebnisse	hoch	Gegenüber des horizontalen Produktvergleichs wird eine hohe Robustheit der Ergebnisse erzielt. Die Vielzahl festzulegender Parameter erlaubt zudem umfangreiche Sensitivitätsanalysen. Die Unsicherheiten aufgrund dieser Parameter sollten jedoch ausgewiesen werden.
Nutzen für die energieintensive Industrie		
Der Anteil des eigenen Produktes am Klimaschutz kann verlässlich (mit hoher Sicherheit) bestimmt werden. Die Ergebnisse des Stakeholderverfahren können genutzt werden, um Guidelines und Normen festzulegen, an denen sich Wissenschaft und Politik orientieren können. Sensitivitätsanalyse und Szenarien könnten für die Ableitung von Strategien genutzt werden.		
Umsetzung am Beispiel von Wärmedämmprodukten		
Die ökologische Vorteilhaftigkeit eines Wärmedämmproduktes kann auf diese Weise in den Kontext des Marktes gestellt werden, indem es in Gebäuden mit unterschiedlichen Voraussetzungen für den Wärmeverbrauch "verbaut" wird. Mögliche Effizienzkriterien sind z. B. Gebäudetyp, Baujahr, Typ & Alter des Heizsystems, Stand der Sanierung, Art der Nutzung. Fälle für "besondere Eignung" können identifiziert werden.		

Quelle: Eigene Darstellung

Politische Ebene: Anrechnung auf Klimaschutzpflichten der Industrie

Schritt 4: THG-Minderungen für Gewerbe, Haushalte, Industrie

Die ersten drei Schritte können im Rahmen bereits existierender Methoden und Frameworks umgesetzt werden. Hierbei können bereits auch einfache Hochrechnungen vorgenommen werden, die größere Wirtschaftsräume betreffen. Für eine konsistente Betrachtung von avoided emissions im regionalen, nationalen oder intranationalen Rahmen müssen jedoch komplexere Verfahren genutzt werden.

Im vierten Schritt werden daher zunächst alle Sektoren und Branchen identifiziert, welche für die Entstehung und Minderung der jeweiligen Treibhausgase verantwortlich sind. In der Regel beinhaltet dies eine Anpassung und Erweiterung des Referenzsystems (Schritt 1).

Dann werden die von diesen Sektoren induzierten Treibhausgase in der Vergangenheit den möglichen THG-Minderungen durch Klimaschutzprodukte in der Zukunft gegenüber gestellt. Dabei ist es notwendig, die lineare Betrachtung des Lebenszyklus zu ersetzen, bei der Aufwendungen in Herstellung und Verwertung über die vermutete Lebens- und Nutzungsdauer skaliert werden. Stattdessen wird ein Modell der jährlichen Addition dieser Produkte und Austausch anderer Produkte generiert (Stock-Modell). Hier ist es üblich, unterschiedliche Szenarien zu betrachten, die einem Base-Case (z. B. Business-as-Usual) gegenübergestellt werden.

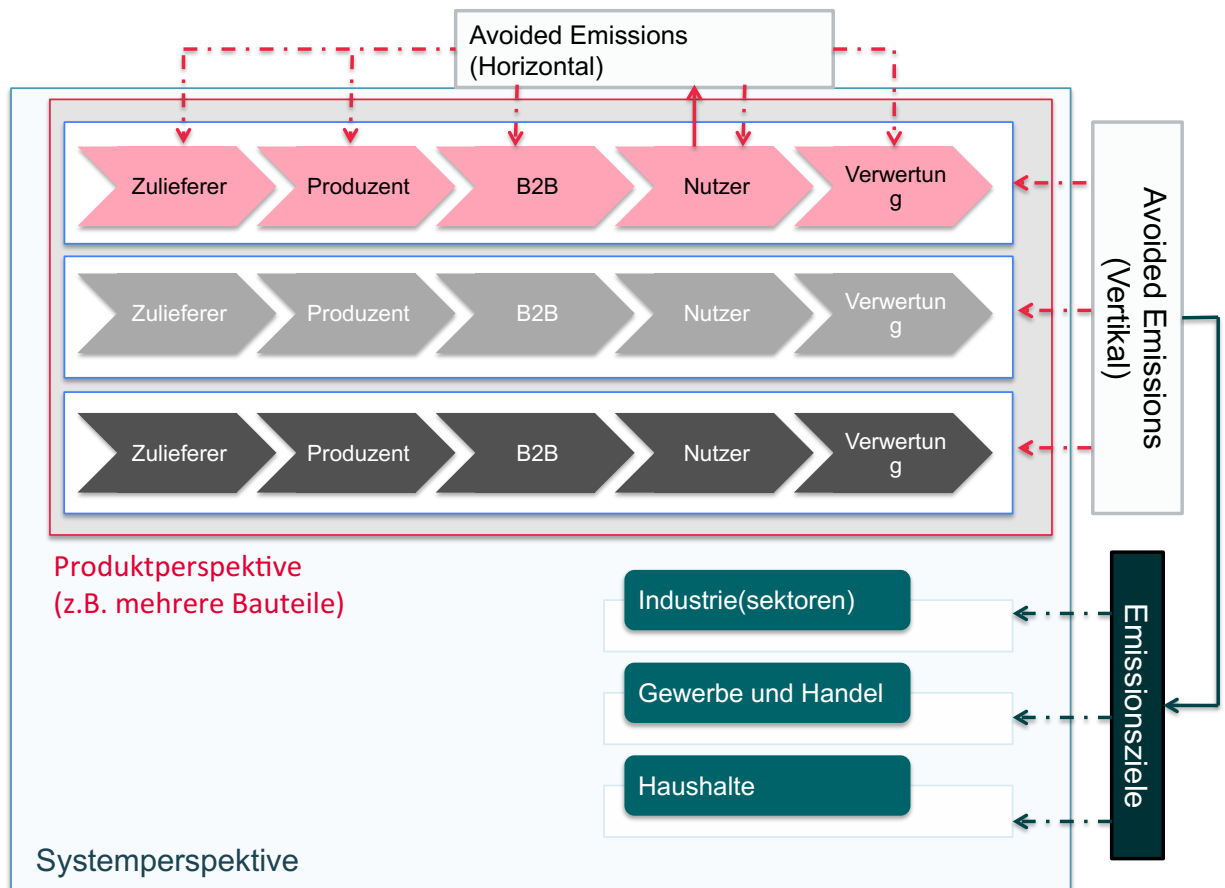


Abbildung 6 Attribution in der Systemperspektive (Sektoren)

Quelle: Eigene Darstellung

Die auf diese Weise quantifizierten THG-Minderungen, werden, analog zu Schritt 2 und Schritt 3, auf die unterschiedlichen Sektoren nach einem Attributionsschlüssel verteilt. Weil bereits für das Stock-Modell Investitionsrechnungen bzw. Investitions-schätzungen durchgeführt worden sind, empfiehlt sich hier eine Methode, die sich an diesen Investitionen orientiert. Zudem sollten langjährige Effekte, die erst spät ein-treten, anders behandelt werden, als kurzfristige Effekte. Dies kann zum Beispiel über sogenannte Discount-Raten erfolgen, wie sie in der Kosten-Nutzen-Analyse üb-lich sind.

Als Beispiel für diese Vorgehensweise und Diskussion der damit einher gehenden methodischen Probleme kann das Projekt COMBI dienen⁶.

⁶ Siehe auch <https://combi-project.eu>.

Tabelle 5 Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von
Schritt 4: THG-Minderung für Gewerbe, Haushalte, Industrie

Kategorie	Einschätzung	Begründung
Datenverfügbarkeit	gering	Ex-post Daten sind zumeist verfügbar. Stock-Modelle für die Zukunft müssen jedoch unter Ausnutzung begleitender Sekundärdaten abgeschätzt werden.
Komplexität der Berechnungen	sehr hoch	Geringe Änderungen im Stock-Modell können große Auswirkungen auf die Gesamteffekte haben. Wechselwirkungen zwischen den Sektoren müssen ggf. berücksichtigt werden.
Ausmaß des Stakeholderprozesses	sehr hoch	Für eine hohe Glaubwürdigkeit der Ergebnisse sollten zusätzliche Vertreter aus Wissenschaft, Politik und geeigneten Interessensgruppen (z. B. Verbraucherzentralen) eingebunden werden.
Umsetzbarkeit	mittel	Es existieren bereits Beispiele aus Forschungsprojekten. Der gesamte Prozess ist jedoch sehr aufwändig.
Reliabilität der Ergebnisse	gering bis mittel	Die Robustheit der Ergebnisse innerhalb der Szenarien ist hoch. Attribution und Abschätzung des Soll-Zustandes ist jedoch mit hohen Unsicherheiten behaftet.
Nutzen für die energieintensive Industrie		
Der Nutzen von Klimaschutzprodukten kann gesamtwirtschaftlich dargestellt werden. Im Rahmen der Szenarienbildung können politische Ziele eingebunden werden und der Anteil der energieintensiven Industrie an der Zielerreichung quantifiziert werden. Auf diese Weise wird eine sachgerechte Gegenüberstellung von Industrieemissionen und Beitrag der Industrie zum Klimaschutz ermöglicht.		
Umsetzung am Beispiel von Wärmedämmprodukten		
Es kann gezeigt werden, wie effektiv die Hersteller von Wärmedämmprodukten zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor beitragen, indem Maßnahmenbündel miteinander verglichen werden (z. B. Energetische Sanierung, Neubau energieeffizienter Gebäude, Einsatz energieeffizienter Geräte in Gebäuden).		

Quelle: Eigene Darstellung

Schritt 5: Anrechnung von avoided Emissions in Bilanzen

Sowohl die Referenzwerte, als auch die nationalen Emissionsziele basieren auf Quellenbilanzen. Treibhausgase werden also am Ort ihrer Entstehung erfasst. Somit bleiben einerseits indirekte Emissionen aus dem Import und Export von Gütern unberücksichtigt. Andererseits haben die Vorketten der Infrastrukturen für Energieerzeugung einen hohen Einfluss auf die Emissionen innerhalb eines Sektors.

Für eine mögliche Anrechnung der durch Klimaschutzprodukte vermiedenen Treibhausgase, müssten demnach sowohl die Ziele als auch Referenzwerte angepasst wer-

den. Weil exportierte Klimaschutzprodukte in anderen Ländern zu Minderungen führen, müsste dies zudem für alle Warenflüsse zwischen allen Ländern erfolgen. Derzeit existieren hierfür weder ausreichende Datengrundlagen, noch Berechnungsmethoden. Es ist zudem unklar, ob eine solche Bilanzierungsweise letztlich zu geringeren Emissionszielen für die Industrie in Deutschland führen würde. In einem ersten Schritt würde jedoch bereits die Disaggregation von Input-Output-Tabellen auf Ebene der Bundesländer eine transparentere Darstellung möglicher Lastenverschiebungen ermöglichen. Dies wird in Kapitel 3 diskutiert.

Es sind jedoch weitere Möglichkeiten denkbar, wie die Ergebnisse einer sektoriellen Zuweisung von avoided Emissions (Schritt 4) genutzt werden können:

1. Bei Beschränkung der Erfassung von in Deutschland produzierten und genutzten Klimaschutzprodukten, werden die avoided emissions mit den Emissionen in den Sektoren Gewerbe, Industrie und Haushalt verrechnet. Der Quellbilanz könnte dann eine Bilanz gegenübergestellt werden, bei der – entgegen dem Verursacherprinzip – ein Teil der durch Gewerbe und Haushalte verminderten Emissionen in der Zukunft, den produzierenden Unternehmen gutgeschrieben werden. Abbildung 7 verdeutlicht solch eine Umverteilung beispielhaft. Der blaue Balken zeigt dabei die bestehenden Sektorziele. Der rote Balken verdeutlicht die Emissionsmenge, die bei einer Umverteilung abgezogen wird bzw. dazugerechnet wird, um ein angepasstes Ziel je Sektor für 2030 zu erhalten, das dann mit dem grünen Balken verdeutlicht wird. Für die Abschätzung der Emissionsmenge, die umverteilt werden könnte, könnten auch Analysen auf Konsumebene genutzt werden wie durch den Konsumindikator auf NRW Ebene bereits gezeigt (Büttgen et al. 2018).

Anpassung der 2030 Ziele (Klimaschutzplan) für Sektoren (20 % der Industrie-Emissionen gleichverteilt)

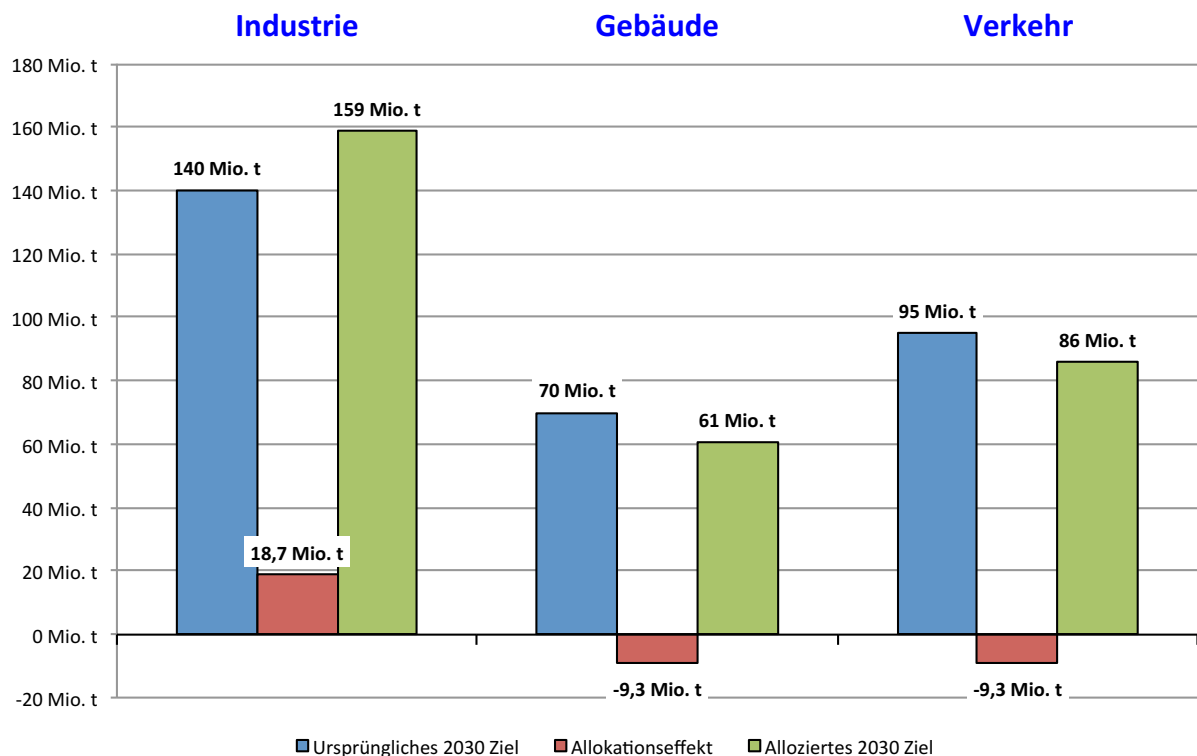


Abbildung 7 Beispielhafte Anpassung der 2030 Ziele vom nationalen Klimaschutzplan - Umverteilung von 20 % der Industrieemissionen

Quelle: Eigene Darstellung

Erläuterung der Abbildung 7 Dargestellt werden die Emissionsziele der Handlungsfelder Industrie, Gebäude, Haushalte im **blauen Balken** (auf Basis des Klimaschutzplanes 2050). Der Allokationseffekt (**roter Balken**) steht beispielhaft für die möglichen Emissionen aus der Herstellung, Distribution und Verwertung von Klimaschutzinnovationen im Gebäudebereich (Annahme: 20 % des Emissionszieles der Industrie). Dieser wird nun zu gleichen Teilen auf die Handlungsfelder verteilt.

Für das allozierte Ziel (**grüner Balken**) steigt demnach das Emissionsziel der Industrie auf Kosten der Emissionsziele für Gebäude und Haushalte.

2. Durch die transparente und robuste Darstellung zukünftiger THG-Minderungen von Klimaschutzprodukten, könnten Hersteller dieser Produkte finanziell begünstigt werden; insbesondere wenn diese finanziellen Vorteile in zusätzliche Investitionen für die THG-Minderung der direkten Emissionen fließen. So könnten z. B. Hersteller mit hohen Umsätzen durch Klimaschutzprodukte und "garantiertem" THG-Minderungseffekt verbilligte Emissionszertifikate erwerben. Ebenso ist denkbar, dass die avoided emissions "zertifizierter" Klimaschutzprodukte in Produktvorgaben und Normen wie der Ökodesign-Richtlinie einfließen. Klimaschutzprodukte könnten damit klassifiziert werden und einer bestimmten Förderstufe zugeordnet werden. Dafür wäre wie bereits durch die Kommission für Ressourceneffizienz vom Umweltbundeamt (KRU) eine Produktkennzeichnungsstelle notwendig, die neben der Ressourceneffizienz auch das Treibhausgas-minderungspotenzial berücksichtigt (Åhman

et al. 2017). Alle Produkte müssten dafür geclustert werden innerhalb verschiedener Branchen über das Kriterium Treibhausgasminderungspotenzial. Darüberhinaus können weitere Kriterien bei der Clusterung einfließen wie Langlebigkeit, Ressourceneffizienz etc.

Tabelle 6 Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von Schritt 5: Anrechnung von avoided emissions in Bilanzen

a) Umverteilung von Industrieemissionen

Kategorie	Einschätzung	Begründung
Datenverfügbarkeit	mittel bis gering	Ex-post Daten sind zumeist verfügbar. Auf nationaler Ebene Abschätzung des Beitrags von Klimaschutzprodukten durch die Industrie durchführbar. Für eine globale Umsetzung müsste allen weltweiten wesentlichen Wertschöpfungsketten abgedeckt werden.
Komplexität der Berechnungen	sehr hoch	Derzeit gibt es keine Methoden für die Umsetzung eines solchen Vorgehens.
Ausmaß des Stakeholderprozesses	Sehr hoch	Vertreter aus Wissenschaft, NGO's, Handel und Industrie sowie Politik müssen nicht nur zusammenarbeiten, sondern auch ein Interesse an der Umverteilung haben. Der Prozess sollte auf EU Ebene durchgeführt werden
Umsetzbarkeit	gering	Die Umverteilung und damit Anrechnung von avoided emissions widerspricht dem Verursacherprinzip. Eine Besserstellung oder Förderung von Herstellung von Klimaschutzprodukten kann jedoch mit den nationalen Interessen zum Klimaschutz vereinbar sein.
Reliabilität der Ergebnisse	keine Angabe	Zum derzeitigen Zeitpunkt ist eine Einschätzung der Robustheit dieses Vorgehens nicht möglich.
Nutzen für die energieintensive Industrie		
Anstrengungen bei der Herstellung von Klimaschutzprodukten und damit zusammenhängende Emissionen werden gefördert (Optimierung der Nutzungsphase).		
Umsetzung am Beispiel von Wärmedämmprodukten		
Die Verwendung von Klimaschutzinnovationen im Gebäudebereich könnte im Energieausweis für Gebäude zusätzlich vermerkt sein.		

Quelle: Eigene Darstellung

b) Zertifizierung von Klimaschutzprodukten und Aufnahme in Öko-Design-RL; Vergünstigung beim Erwerb von Emissionszertifikaten – ähnlich zur Systemperspektive, siehe Tabelle 4

Kategorie	Einschätzung	Begründung
Datenverfügbarkeit	mittel bis hoch	Die wichtigsten Daten liegen den Unternehmen i. d. R. vor. Bei fehlender Einbindung von "vertikalen" Akteuren, nimmt der Aufwand für die Datenrecherche zu.
Komplexität der Berechnungen	mittel	Die Berechnungsmethoden für attributionale Lebenszyklusanalysen sind Stand der Wissenschaft und i. d. R. nicht komplex.
Ausmaß des Stakeholderprozesses	hoch	Es müssen alle Akteure eingebunden werden im jeweiligen Produktsystem, aber auch politische Akteure (Länder, Bund, Europäische Union).
Umsetzbarkeit	mittel	Im Rahmen der Design RL sowie der Guidelines für den Produkt Environmental Footprint (PEF) liegen bereits geeignete Umsetzungsstrategien und ein Framework vor. Der Aufwand steigt jedoch deutlich mit Einbindung zusätzlicher Akteure.
Reliabilität der Ergebnisse	hoch	Es wird bei guter Datenverfügbarkeit eine hohe Robustheit der Ergebnisse erzielt. Die Vielzahl festzulegender Parameter erlaubt zudem umfangreiche Sensitivitätsanalysen.
Nutzen für die energieintensive Industrie		
Es wird ein Produktranking aufgestellt mit dem sich Unternehmen vergleichen können; darüber hinaus wird über das Ranking eine Förderungswürdigkeit abgeleitet und z. B. Vergünstigungen für die Unternehmen ermöglicht.		
Umsetzung am Beispiel von Wärmedämmprodukten		
Wärmedämmverbundsysteme würden je nach ihrem Beitrag zu Emissionseinsparungen (z. B. entsprechend dem U-Wert) klassifiziert und eine Vergünstigung z. B. beim Erwerb von Emissionszertifikaten je nach Klimaschutzproduktklasse festgelegt		

Quelle: Eigene Darstellung

Fazit methodisches Vorgehen für die energieintensive Industrie

Die bisher aufgestellten Guidelines für die Bilanzierung von „avoided emissions“ sind sehr rudimentär. Nutzer dieser Regelungen werden vor allem angehalten ihr Vorgehen transparent darzustellen. Eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Bilanzierungen ist durch die bisherigen Regelwerke nicht gegeben, da z. B. der Anwender zahlreiche Annahmen individuell festlegen kann sowie die Datengrundlage nicht einheitlich festgelegt ist. Das Anwendungsbeispiel (Use Case) mit den (relativ) einfachen Berechnungen beinhaltet bereits eine Reihe von Unsicherheiten und Herausforderungen, die bei komplexeren Produkten (z. B. Leichtbaumaterialverbände in ei-

nem PKW) noch deutlicher zu Tage treten. Tabelle 7 fasst die mit einem abgestimmten Prozess zur Ausweisung von avoided emissions zusammenhängenden Herausforderungen und Möglichkeiten in einer SWOT-Analyse zusammen. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass bei einer konsequenten Umsetzung der Ausweisung von avoided emissions die Gefahr besteht, dass ein unverhältnismäßiger Aufwand erforderlich ist vor allem durch das Erstellen von mit Stakeholdern abgestimmten Regelwerken und der kontinuierlichen Beobachtung des Marktgeschehens und damit einhergehender Anpassungsnotwendigkeiten.

Tabelle 7 Stärken-Schwächen-Analyse zur Ausweisung von avoided emissions über Produktvergleiche

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ganzheitliche/WSK übergreifende Analyse möglich ▪ gute Orientierung/Entscheidungshilfe bei Produktentwicklungen/Optimierung ▪ Vergleichbarkeit unter den Unternehmen bereits durch 1. Schritt Festlegen des Referenzsystems möglich ▪ Anreiz für Unternehmen/Hersteller avoided emissions des gesamten Produktsystems zu optimieren ▪ Produktionsbedingte Emissionsmenge kann in Bezug zur gesetzt werden ▪ methodische Grundlagen vorhanden ▪ Erhöhung der Markttransparenz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ methodisch sehr komplex und aufwändig → detaillierte Product-Carbon Footprint Analysen zu Systemvergleichen erforderlich ▪ gute und einheitliche Datenbasis erforderlich ▪ methodisch anspruchsvoll ▪ Definition von Produkt- oder Systemalternativen /Referenzsystemen über die Einbindung aller Stakeholder im Produktsystem (entsprechend Branchenkonsultation im Rahmen des EU PEF-Prozesses) ▪ Definition von begründeten Rahmenbedingungen vor allem bzgl. der Nutzungsphase
Chancen	Risiken/Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ WSK übergreifende Analyse verwirklichtbar ▪ Einbindung in vorhanden ERP/IT-systeme möglich/entwickelbar ▪ Ausweitung auf die Betrachtung verschiedener Umweltkategorien über LCA Ansatz möglich ▪ Bisher nicht erfasste Daten von Herstellern können für Auswertungszwecke genutzt werden ▪ Ausrichtung von unternehmensspezifischen Innovationsstrategien auf gesamtsystemische Emissionsminderungen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktgruppenspezifische Bilanzierungsregeln müssen festgelegt werden unter Einbezug aller Stakeholder eines Produktsystems ▪ Unabhängiges Critical Review zur Überprüfung der Analysen erforderlich ▪ Hoher finanzieller Aufwand ▪ Glaubwürdigkeit abhängig von der Genauigkeit und der Vergleichbarkeit mit Referenzprodukten

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Gensch (2017)

Als am praktikabelsten durchsetzbar erscheint das Vorgehen wie in a dargestellt, die Umverteilung unter den Sektoren. Auf diese Weise werden zwei Ziele erreicht. Zum einen verringert die Industrie ihre Quellemissionen (auf Kosten anderer Sektoren) und erreicht damit Emissionsziele schneller. Zum anderen profitieren alle Akteure von Innovationen der Industrie; ob sie nun auf Prozess- und damit Quellebene zu Emissionsminderungen führen oder erst während der Nutzungsphase zum Klimaschutz beitragen.

Diese Vorgehensweise widerspricht zunächst dem Verursacherprinzip. Sie fördert jedoch die Entwicklung und Marktdurchdringung von innovativen Produkten und Pro-

zessen, die einen Beitrag zum Klimaschutz insgesamt leisten. Tabelle 8 stellt verschiedene Fälle dar, die bei diesem Ansatz betrachtet werden müssen.

Tabelle 8 Verschiedene Fälle bei der Umverteilung von Industrieemissionen

Fall	bisher	mithilfe der Allokation	Potential
Industrie stellt zusätzliche Klimaschutzprodukte her aufgrund erhöhter Nachfrage	Emissionen der Industrie steigen / Emissionen der Verbraucher sinken	Emissionen der Industrie steigen geringer / Trade-off auf Seiten der Verbraucher	Fehlentwicklungen können vermieden werden
Industrie stellt Klimaschutzprodukte mit geringeren Emissionen in der Herstellung her	Emissionen der Industrie sinken / Emissionen der Verbraucher bleiben unverändert	Emissionen von Industrie und Verbrauchern sinken gleichermaßen	gesteigerte Nachfrage nach Produkten aus klimaschutzfreundlichen Industrieprozessen
Industrie stellt Klimaschutzprodukte her, die erst in der Nutzungsphase ihre Wirkung erzielen	Emissionen der Industrie bleiben unverändert oder steigen sogar / Emissionen der Verbraucher sinken	Emissionen der Industrie sinken aufgrund der Allokation / Emissionen der Verbraucher sinken aufgrund des Verbrauchs	Auch die Industrie profitiert von der Entwicklung von Klimaschutzprodukten

Quelle: Eigene Darstellung

Voraussetzung ist dabei immer die Abschätzung von avoided emissions, die durch Produkte der Industrie in anderen Sektoren erfolgen und das Ableiten des Anteils, der auf andere Sektoren umverteilt werden muss/sollte. Diese vorausschauende Betrachtung kann bereits im Innovations- und Designprozess Anwendung finden

1.1.4 Innovationen in der Wertschöpfungskette (WSK)

In der Diskussion um avoided emissions geht es zum einen um bestehende/etablierte Produkte, zum anderen aber auch um Innovationen. Im folgenden werden Innovationen genauer betrachtet und eine Definition von Klimaschutzinnovationen abgeleitet.

Typologisierung von „Klimaschutzinnovationen“

Nach Schumpeter definiert sich eine Innovation als die Umsetzung neuer Kombinationen in die Realität. Die Neuerung muss dabei erstmalig eingesetzt werden (Schumpeter 1912 in Granig und Perusch 2012). Die Definition von Pleschak und Sabisch lautet: „...Innovation [ist] die Durchsetzung neuer technischer, wirtschaftlicher, organisatorischer und sozialer Problemlösungen im Unternehmen. Sie ist darauf gerichtet, Unternehmensziele auf neuartige Weise zu erfüllen“ (Pleschak/Sabisch 1996 in Granig und Perusch 2012).

Innovationen können nach verschiedenen Kriterien unterschieden werden. Nach Schumpeter gibt es folgende fünf Fälle zur Beschreibung von Innovationen:

1 | Herstellung eines neuen Produktes oder einer neuen Produktqualität

- 2 | Einführung einer neuen, noch unbekanntem Produktionsmethode (muss jedoch nicht auf einer Erfindung basieren)
- 3 | Erschließung eines neuen Absatzmarktes, auf dem ein Industriezweig noch nicht „eingeführt“ war (unabhängig davon, ob dieser Markt schon vorher existierte oder nicht)
- 4 | Erschließung einer neuen Bezugsquelle von Rohstoffen oder Halbfabrikaten
- 5 | Durchführung einer Neuorganisation (wie z. B. Schaffung oder Abschaffung einer Monopolstellung)

Grandig und Perusch (2012) zeigen verschiedene Differenzierungsmöglichkeiten auf nach:

- Innovationsbereich (Produkt, Prozess, kulturell/sozial, Strukturrell/organisatorisch)
- Innovationsauslöser (zweckinduziert, mittelinduziert)
- Innovationsgrad (Basis, Verbesserung, Anpassung, Imitation, Scheininnovation)
- Veränderungsumfang (Inkrementalinnovation, Radikalinnovation)
- Bezugseinheit (Unternehmen, Kunden, Konkurrenz)

Öko- oder Eco-Innovationen werden definiert als neue Produkte, Prozesse, Dienstleistungen oder Geschäftsmodelle, die neben einem ökonomischen Vorteil auch signifikant zu einer Reduktion von negativen Umweltauswirkungen führen (Pacheco et al. (2017); Kemp und Pearson (2007)). Darüber hinaus wird diskutiert, dass Eco-Innovation über konventionelle Organisationsgrenzen hinweg betrachtet werden sollten, da sie auch zu Änderungen von sozio-kulturellen Systemen beitragen können / zu einer Transformation im Gesamtgesellschaftlichen Rahmen. Eco-Innovation sind somit nicht nur technische Innovationen, sondern umfassen vor allem auch soziotechnische/soziale Innovationen, die eine Änderung im Konsumentenverhalten und Bedarf herbeiführen (Geibler 2010; OECD 2009). Innovationen können demnach als komplexe Phänomene betrachtet werden, die technische und nicht-technische Aspekte umfassen (Armbruster et al. (2008)). leiten vier Typen von Innovationen ab:

- technische Produkt Innovationen
- nicht-technische Service-/Dienstleistungs-Innovationen
- technische organisatorische Innovationen (Fokus auf technische Veränderungen)
- nicht-technische organisatorische Innovationen

Im Bezug auf Klimaschutz kann geschlossen werden, dass das Ziel einer „Klimaschutzinnovation“ die Reduktion bzw. das Einsparen von Treibhausgasen bezogen auf den bereitgestellten Nutzen für einen Endverbraucher bzw. die Gesellschaft ist. Von Bedeutung ist, Produkt-Dienstleistungssysteme von der Nutzenfunktion her zu charakterisieren, um so Potenziale im gesamten Lebenszyklus aufdecken zu können. Neben prozess- und technologie-bezogenen Innovationsansätzen kommen so auch gestalterische Optionen in das Blickfeld (Designoptionen von Produkten und Dienstleistungen). Werkstoffliche sowie modulare Substitutionspotenziale werden übergreifend sichtbar, die z. T. auch branchenübergreifend adressiert werden könnten.

Bewertung „Nicht-technische“ Innovationen

Wie oben beschrieben gibt es verschiedene Definitionen von nicht-technischen Innovationen. Eine Einteilung erfolgt in Abgrenzung an Produkt- und Produktionsprozess-Innovationen. Alle anderen Innovationen werden als nicht-technisch deklariert. Diese können noch weitreichender unterteilt werden in sozio-technische Innovationen, die auf eine Änderung von technischen Systemen oder deren Nutzung abzielt oder organisatorischer Innovationen. Elemente eines soziotechnischen Systems zeigt Abbildung 6. Während für die Beschreibung und Bewertung von technische Innovationen methodische Ansätze vorliegen (siehe OECD und Eurostat („Zotero Forums - All Discussions“ o. J.)), ist die Bewertung von nicht-technischen Innovationen immer noch in der Diskussion.

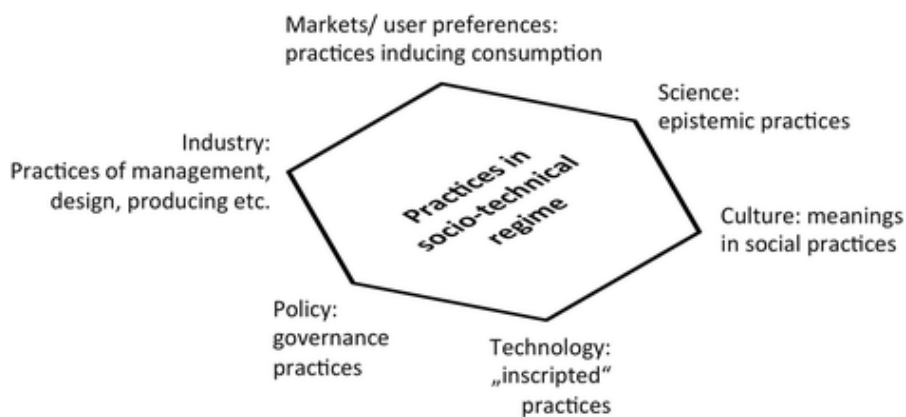


Abbildung 8 Elemente eines soziotechnischen Systems.

Quelle: Hölsgens et al. (2018)

Organisatorische Innovationen wurden von Armbruster (2008) näher beschrieben, Abbildung 8 zeigt eine Typologisierung entsprechend dem Typ und dem Fokus einer organisatorischen Innovation. Organisatorische Innovationen umfassen dabei verschiedenste Geschäftsstrategien:

- Ablösung traditioneller, zentraler Organisationsstrukturen durch dezentralere produkt- oder kundenorientierte Organisationsstrukturen zur Erhöhung von Flexibilität in Unternehmen
- Einführung von Qualitätsmanagement- oder kontinuierlichen Verbesserungsprozessen
- Einrichtung von „Simultaneous Engineering“ oder funktionsübergreifenden Teams zur Verkürzung von Produktentwicklungsprozessen in den Unternehmen
- Implementierung von Just-in-Time- und Supply-Chain-Management-Konzepten zur Steigerung der Produktivität und Reduktion von Lagerkosten

Auch mit dieser Typologisierung ist es schwierig nicht-technische Innovationen eindeutig zu fassen und deren Wirkung zu beschreiben. Eine Bewertung von Auswirkungen zum Beispiel hinsichtlich einer Einsparung von THG kann nur über die Entwicklung von Szenarien zum Beispiel in einem Living-Lab Prozess erfolgen, die mögliche Entwicklungen durch diese nicht-technische Innovationen abbilden und kann

hauptsächlich qualitativ erfolgen. Der Living-Lab Prozess unterstützt dabei die Einbindung verschiedener Akteure. Living Labs sind Forschungs- und Innovationsplattformen, die neue Perspektiven für die Verbesserung der Marktakzeptanz und für die Berücksichtigung von Rebound-Effekten in Innovationsprozessen eröffnen (Liedtke et al. 2012a, Liedtke et al. 2012b, Geibler et al. 2013).

Während technische Innovationen, die schon mit ihren Parametern klar beschrieben werden können, mit dem in Kapitel 1.1.3 dargestellten Vorgehen genauso bewertet werden können wie bestehende Klimaschutzprodukte, muss für die Bewertung von nicht-technischen Innovationen ein weiteres Vorgehen entwickelt werden. Es besteht dabei immer eine hohe Unsicherheit in der Abschätzung von Änderungen von Parametern, die durch nicht-technische Innovationen beeinflusst werden. Solche Bewertungen erscheinen für unternehmensinterne Zwecke sinnvoll – gekoppelt an klassischen internen Unternehmensbewertung mit buchhalterischen Erfolgsmaßen – gerade als Entscheidungsgrundlage für Investitionen. Durch hohe Unsicherheiten auch in der Datenverfügbarkeit sollte die Bewertung von nicht-technischen Innovationen allerdings nicht für die Quantifizierung von avoided emissions und darüber die Ableitung von Emissionszielen auf nationaler Ebene genutzt werden.

Eine Abschätzung erscheint aber im Rahmen von Szenarienanalysen sinnvoll und könnte auch in politischen Entscheidungen genutzt werden, um z. B. bisher unwirtschaftliche Innovationsinvestitionen mit hohem potentiellen Klimaschutzpotenzial zu fördern. Dafür sind allerdings weitere Untersuchungen und die Entwicklung eines abgestimmten Vorgehens mit den wesentlichen Unternehmensakteuren erforderlich.

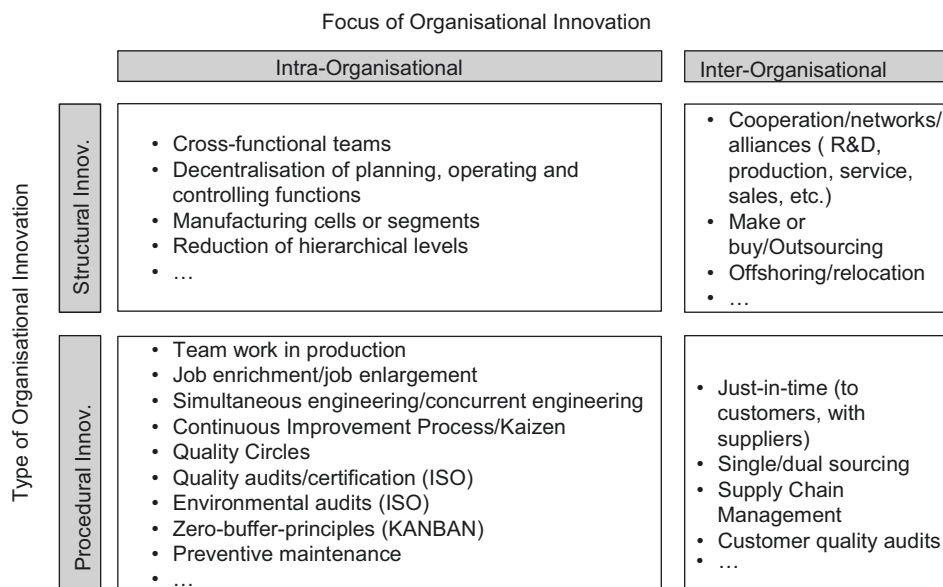


Abbildung 9 Typologisierung von organisatorischen Innovationen

Quelle: Armbruster et al. (2008)

Tabelle 9 Einschätzung der Umsetzbarkeit und des Nutzens von einer Bewertung von nicht-technischen Innovationen für die Ableitung von avoided emissions

Kategorie	Einschätzung	Begründung
Datenverfügbarkeit	sehr gering	Es müssen viele Annahmen getroffen werden
Komplexität der Berechnungen	sehr hoch	Derzeit gibt es keine Methoden für die Umsetzung eines solchen Vorgehens
Ausmaß des Stakeholderprozesses	Gering bis hoch	Nicht-technische Innovationen können umfangreichen Einfluss haben und eine Analyse erfordert dann auch die Einbindung von allen betroffenen Akteuren. Sofern die Untersuchung für unternehmensinterne Zwecke genutzt wird ist keine Einbindung zwingend erforderlich
Umsetzbarkeit	mittel	Auf Unternehmensebene gut durchführbar
Reliabilität der Ergebnisse	keine Angabe	Zum derzeitigen Zeitpunkt ist eine Einschätzung der Robustheit dieses Vorgehens nicht möglich.
Nutzen für die energieintensive Industrie		
Abschätzung von Klimawirksamkeit von nicht-technischen Innovationen; Koppelbar mit ökonomischen Auswirkungen; als unternehmensinterne Entscheidungsgrundlage		

Quelle: Eigene Darstellung

1.1.5 F&E-Empfehlungen / Arbeitsprogramm für eine vertiefende Analyse

Wie oben beschrieben erscheint die Entwicklung eines Stakeholder-Prozesses zur Bestimmung von avoided emissions für die Anrechnung auf nationale Emissionsziele als nicht verhältnismäßig. Das Experteninterview mit dem Unternehmen COVEST-RO hat ebenso ergeben, dass eine solche Anrechnung als nicht zielführend angesehen wird.

Möglich wäre eine weniger komplexeres Vorgehen zur Ausweisung von Klimaschutzprodukten mit entsprechend festzulegender Klassifizierung. Davon könnte ein Beitrag abgeleitet werden, den die Industrie zur Einsparung von Emissionen in anderen Sektoren leistet. Auch dafür wäre ein Stakeholder-Prozess notwendig.

Zu klären bleibt, inwiefern diese Emissionseinsparungen in den Endkonsumenten-Sektoren durch zusätzliche Emissionsaufwendungen von Industrieseite entstehen und ob solche Verschiebungen bei der Festlegung der Sektorziele bereits berücksichtigt sind.

Folgende Fragen stellen über die diskutierten Herausforderungen aus Kapitel 2.4 für eine weitere Ausarbeitung der Ableitung und Verwendung von avoided emissions bzw. Ausweisung von Emissionen und Produktvergleichen:

- Methodischen Vorgehen anhand der dargestellten Schritte 1 bis 5 (Kap. 3) muss noch im Detail ausgearbeitet werden, dabei stellen sich methodische Fragen:
 - Welche Referenzsysteme sind zu wählen mit welchen funktionellen Einheiten?
 - Wie wird mit zeitlichen und räumlichen Zuordnungen umgegangen?
 - Welche Daten liegen den Unternehmen bereits vor und welche müssten neu erhoben werden?
 - Welche Auswirkungen haben verschiedene End-of-Life Szenarien?
 - Wie werden Parameteränderungen durch Lebensdauern bis zu 50 Jahren und mehr berücksichtigt?
 - Welche Allokations- und Attributionsregeln müssen festgelegt werden und welche Akteure müssen dafür jeweils einbezogen werden?
- Wie lassen sich "typische" Anwendungsfälle (Nutzungsphase) generieren?
- Wie können Systemgrenzen so gesetzt werden, dass damit keine Reboundeffekte etc. entstehen?
- Wie werden die Rohmaterialflüsse betrachtet sowie End-of-Life Optionen im internationalen Kontext?
- Wie können Zielvorgaben für einzelne Sektoren erstellt werden?
- Wie kann erreicht werden, dass nicht einfach das ökologisch beste Produkt einer „Kategorie“ gefördert wird, sondern nur das Produkt, das wirklich ökologisch nahe am möglichen Optimum ist – in Abhängigkeit des Bezugssystems?
- Eco-innovationen (auch nicht-technischer Art) mit in Bewertung einbeziehen - für welche Arten von nicht-technischen- Innovationen ist das möglich? Können diese entsprechend eingeteilt und genau umschrieben werden? Welche Parameter müssen konkret festgelegt werden pro Einzelfall?
- Welche politischen und unternehmerischen Ziele werden mit der Anrechnung von avoided emissions verfolgt?
- Die Betrachtung darf nicht nur auf CO₂-Emissionen beschränkt bleiben, sondern es sollten komplette Ökobilanzen eingesetzt werden. Oft werden Reduktionen eines Stoffes durch erhöhte Freisetzung anderer Stoffe begleitet. Welche Umweltkategorien sollten zusätzlich betrachtet werden?
- Sollten Sektor/Branchenziele abgeleitet werden?
- Wie hoch müssen die anteiligen Emissionseinsparungen sein, damit das Produkt als Klimaschutzprodukt anerkannt wird? Muss ein Grenzwert aufgestellt werden?
- Könnte auch eine CO₂ Steuer als Lösung fungieren?
- Wie kann eine Attribution von eingesparten Emissionen auf Produktebene erfolgen?
- Die Produkte sollten von ihrem Nutzer her charakterisiert und eingeteilt werden, kann darüber ein Verteilschlüssel aufgestellt werden?
- Wie werden Produkte behandelt, die keine „Klimaschutzprodukte“ sind?

Als Ergebnis aus dem Experteninterview mit COVESTRO hat sich ergeben, dass aus Unternehmenssicht Sektorziele nicht verfolgt werden sollten genauso wie eine Aufteilung der avoided emissions auf verschiedene Akteure (Attribution). Vielmehr sollte das methodische Vorgehen zur Ausweisung von Emissionen über die gesamte Wertschöpfungskette branchenspezifisch weiterentwickelt werden entsprechend der international akzeptierten Methodiken. Dieses Ergebnis sollte über diese Vorstudie

hinaus allerdings noch mit weiteren Akteuren der Wirtschaft und auch der Politik diskutiert werden, um ein umfangreiches Bild zu erhalten.

1.2 AP 1.2: Konzept für den Aufbau eines Input-Output Modells für NRW

José Acosta-Fernandez, Dr. Peter Viebahn

1.2.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zielsetzung

Das Hauptziel dieses Arbeitspaketes ist eine Einschätzung der Möglichkeiten und Herausforderungen beim Aufbau eines Informationssystems zur Ermittlung der globalen sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen, die durch die Produktions- und Konsumaktivitäten im Land NRW ausgelöst werden.

Mit Hilfe dieses Informationssystems sollen insbesondere die Effekte auf Treibhausgas (THG)-Emissionen, den Rohstoffinput (RI), die Beschäftigung (ERW) und die Bruttowertschöpfung (BWS) erfasst werden, die durch die Produktion der energieintensiven Grundstoffindustrien in NRW verursacht werden. Ihre Erfassung soll unter Berücksichtigung der in NRW angewandten Produktionstechnik sowie der globalen Nachfrage nach den in NRW hergestellten Produkten erfolgen.

Da die Produktion- und Konsumaktivitäten in NRW auf der Verwendung sowohl von inländisch produzierten als auch von importierten Produkten⁷ beruht, soll das angestrebte Informationssystem auch dazu dienen, diese Auswirkungen nach inländischen und ausländischen Verursachern darzustellen. Damit sollen die Effekte des Warenaustausches in Form von Importen und Exporten als Ausdruck der nationalen und internationalen Arbeitsteilung ersichtlich werden.

Der Aufbau eines derartigen Informationssystems erfordert das Verständnis der Funktionsweise von anthropogenen bzw. sozioökonomischen Transformationssystemen⁸. Wie jedes Wirtschaftssystem ist auch das Land NRW ein anthropogenes Transformationssystem, in welchem sowohl Produktions- als auch Konsumaktivitäten stattfinden, die eine Umwandlung von Inputs in Outputs voraussetzen. Dabei zeichnet sich die Transformation von Inputs in Outputs durch eine bestimmte Produktivität sowie spezifische sozioökonomische und umweltbezogene Effekte dieser Transformation aus.

Sowohl bei der Produktivität als auch beim Ausmaß dieser Effekte handelt es sich um wichtige Indikatorengruppen. Sie geben Auskünfte über den Nachhaltigkeitsgrad der Verwendung von materiellen und energetischen natürlichen Ressourcen in sozioökonomischen Transformationssystemen. Daher kommt es insbesondere auf die quantitative Ausprägung solcher Kennziffern an, um die Funktionsweise eines anth-

⁷ Der Begriff Produkt wird hier in einem breiteren Sinne angewendet. Er umfasst sowohl Güter, die produziert oder verwendet werden, als auch Dienstleistungen, die erbracht oder in Anspruch genommen werden.

⁸ Unter „anthropogenen Transformationssystemen“ werden hier Systeme verstanden, deren Bestehen durch die menschlichen Produktions- und Konsumaktivitäten bestimmt ist. Dieser Begriff umfasst also einerseits die Produktionsaktivitäten, die in einer Industrie, einer gesamten Branche, einer lokalen, regionalen, nationalen oder supranationalen Ökonomie erfolgen. Andererseits enthält er auch die Konsumaktivitäten, die in solchen Wirtschaftssystemen stattfinden (z. B. den Konsum in den privaten Haushalten, der in den lokalen, regionalen bis hin zu den supranationalen Ökonomien zustande kommt). Bei den „anthropogenen Transformationssystemen“ handelt es sich also um Produktionssysteme bzw. Wirtschaftssysteme und Konsumsysteme, bei welchen durch menschliche Aktivitäten eine Umwandlung von Vorprodukten bzw. Inputs in Outputs bzw. Endprodukte erfolgt.

ropogenen Produktionssystemen als mehr oder weniger nachhaltig einzustufen zu können.

Nutzen der erweiterten Input-Output-Rechnung

Die Produktivität sowie die Effekte der Produktions- und Konsumaktivitäten sind das Resultat der Einwirkung bestimmter Eigenschaften sozioökonomischer Produktionssysteme. Hierzu zählen die Zusammensetzung und Quantität der Inputs und Outputs aus der bzw. in die Natur, die angewandte Produktionstechnik sowie die Zusammenstellung und Quantität der produzierten und verbrauchten Produkte.

Die Einwirkungen dieser Eigenschaften auf das Produktivitätsniveau können im Einzelnen oder im großen Zusammenhang analysiert werden. Je nach Größe des betrachteten Transformationssystems können sie sowohl produktspezifisch, branchenspezifisch als auch gesamtwirtschaftlich betrachtet werden. Gleiches gilt für die Einwirkungen dieser Eigenschaften auf die sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekte. Grundlegende Voraussetzungen, um diese zu ermitteln, sind die Verfügbarkeit der entsprechenden Daten und die Anwendung einer geeigneten Analysemethode. Es werden also sowohl ein Informationssystem als auch ein analytischer Ansatz benötigt, welche einerseits die umfassende und vollständige Abbildung der oben erwähnten Eigenschaften von Transformationssystemen ermöglichen, zum anderen aber auch die Untersuchung und Modellierung ihres Wirkungsgrades auf die genannten Effekte zulassen.

Die erweiterte Input-Output-Rechnung (EIOR) stellt sich als das am besten geeignete methodische Instrument für diesen Zweck dar. Sie ermöglicht insbesondere für Produktionssysteme auf übergeordneter Ebene (z. B. die deutsche Volkswirtschaft) einerseits die Abbildung ihrer Produktions- und Konsumcharakteristika (d. h. der Transformationscharakteristika), andererseits die Analyse der hiermit verbundenen sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen.

Die Abbildung der Produktions- und Konsumcharakteristika erfolgt dabei in der Form einer erweiterten Input-Output-Tabelle (EIOT). Hierfür werden verschiedene Datensätze über die Produktion und den Konsum in der betrachteten Ökonomie verwendet. Die Untersuchung ihrer Auswirkungen wie THG-Emissionen oder Beschäftigungseffekte findet mittels der erweiterten Input-Output-Analyse (EIOA) statt. Letzteres wird in einem gesamtwirtschaftlichen Kontext durchgeführt.

Die EIOR besteht also grundsätzlich aus zwei Komponenten (die in nachfolgenden Kapiteln erläutert werden):

- die erweiterte Input-Output-Tabelle (EIOT) und
- die darauf aufbauende erweiterte Input-Output-Analyse (EIOA), die mittels der Anwendung eines erweiterten Input-Output-Modells (EIOM) erfolgt.

Da für deutsche sozioökonomische Transformationssysteme auf Ebene einer Region bzw. eines Bundeslandes (wie z. B. des Landes NRW) bisher jedoch keine EIOT vorhanden ist und somit kein EIOM aufgebaut und die entsprechende EIOA nicht durchgeführt werden kann, ergibt sich ein zweifacher Handlungsbedarf:

- 1 | die Konzipierung einer Vorgehensweise, welche zunächst die Erstellung einer regionalspezifischen erweiterten Input-Output-Tabelle (NRW-EIOT) und anschließend den Aufbau eines repräsentativ umfassenden regionalspezifischen erweiterten Input-Output-Modells bzw. Transformationsmodells (NRW-EIOM) ermöglicht, sowie
- 2 | die Erstellung eines Konzepts für die mögliche Verknüpfung und Integration der NRW-EIOT mit einer bestehenden multiregionalen EIOT, um die Auswirkungen der Produktion und des Konsums in NRW in einem globalen Kontext zu untersuchen. Erst nach der Durchführung dieser Integration ist es möglich, fundierte Erkenntnisse über die Aufteilung der Auswirkungen der inländischen Transformationsaktivitäten (z. B. der THG-Emissionen, die durch die Produktion und den Konsum in NRW global entstehen) auf NRW, den Rest von Deutschland und das Ausland zu gewinnen. Eine solche multiregionale EIOT steht z. B. als Datengrundlage des multiregionalen Input-Output-Modells *WI-SEEGIOM*⁹ des Wuppertal Instituts zur Verfügung.

Mittels der in einer solchen EIOT enthaltenen Angaben über die Funktionsweise des „Transformationssystems NRW“ wären im Falle der energieintensiven Grundstoffindustrie beispielsweise die Ermittlung, Analyse und Modellierung ihrer Produktivität sowie der globalen sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen ihrer Produktionsaktivitäten aus verschiedenen Perspektiven möglich (Produktions-, Konsum- und Außenhandelsperspektive). Da die Input-Output-Analyse nicht nur ex-post sondern auch (eingeschränkt) ex-ante Untersuchungen ermöglicht, könnten zudem die Effekte möglicher Veränderungen bei den angewandten Produktionstechnologien oder neuer Investitionen ermittelt werden. Die Ergebnisse aller diesen Untersuchungen bieten eine umfangreiche Informationsgrundlage für Entscheidungen in der Industrie und der Politik. So könnten z. B. die Auswirkungen einer veränderten regionalen Produktionsweise bei der Herstellung von Stahl (z. B. mittels der Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsmittel) analysiert werden¹⁰.

Mehrwert

Zusammenfassend ergibt sich für das Land NRW bzw. die Industrie folgender *Mehrwert* durch das angestrebte Informationssystem:

- Alle Indikatoren im Sinne von Fußabdrücken – z. B. carbon footprint, raw material footprint etc. – könnten für NRW branchenspezifisch bzw. produktgruppenspezifisch ermittelt werden. Die geographische Verortung dieser globalen Auswirkungen wäre ersichtlich. Somit wäre NRW europaweit nicht nur innovativ, sondern Vorreiter bezüglich der detaillierten Messung der Nachhaltigkeit ihrer Produktions- und Konsumcharakteristika.

⁹ Bei dem Modell WI-SEEGIOM handelt es sich um ein multiregionales Input-Output-Modell, das um sozioökonomische und umweltbezogene politisch relevante Größen erweitert worden ist. Die Datengrundlage von WI-SEEGIOM sind die multiregionalen erweiterten Input-Output-Tabellen von EXIOBASE, welche im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte für die Europäische Kommission erstellt wurden (FP6 und FP7). Diese multiregionalen EIOT bzw. Datensysteme werden zurzeit am Wuppertal Institut erweitert und weiterentwickelt.

¹⁰ Eine grundlegend andere zukünftige Struktur des Transformationssystems erfordert dagegen eine Neukonzipierung der EIOA, da die bisherige EIOA auf den empirisch erfassten Zusammenhängen der einzelnen Wirtschaftssektoren in der Vergangenheit basiert.

- Die globalen Effekte, die auf die Produktion in NRW zurückzuführen sind, könnten ihren tatsächlichen Verursachern entsprechend der Verwendung der inländischen Produktion (d. h. Verwendung in NRW oder in anderen Bundesländern bzw. in den übrigen Weltregionen) zugeordnet werden. Somit wäre erstmalig sichtbar, welche sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekte tatsächlich auf NRW und welche auf dem Export entfielen.
- Die durch den Konsum in NRW direkt und indirekt verursachten Auswirkungen könnten entlang der globalen Lieferkette ebenfalls zurückverfolgt werden. Der Anteil an den damit verbundenen globalen Gesamteffekten, der auf NRW (d. h. Produkte inländischer Herkunft) sowie den anderen Bundesländern und dem Rest der Welt (d. h. Produkten ausländischer Herkunft bzw. Importen) zuzuschreiben ist, wäre ersichtlich. Somit könnten Fragen der Auswirkungen der internationalen Arbeitsteilung beantwortet werden.
- Abhängig von der Datenverfügbarkeit könnte die Inanspruchnahme der Umwelt seitens kleinerer Produktionssysteme in NRW bzw. Subsysteme von NRW ebenfalls ermittelt werden. Dies trifft insbesondere geographisch kleinere Ökonomien (wie z. B. das gesamte Ruhrgebiet oder das Stadtgebiet Düsseldorf), die in der Ökonomie des Landes NRW eingebettet sind.
- Weiterhin könnten Veränderungen bei den sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekten als Resultat von Substitutionsprozessen (neue Produktionstechnologien, andere Zusammensetzung der Inputs, neuer Import/Export-Mix, neuer Konsum-Mix) ermittelt werden. Dies beträfe z. B. die Auswirkungen auf die THG-Emissionen oder den Ressourcenverbrauch bei der Verwendung gebrauchter PKWs für die Wiedergewinnung von Stahl, der Verwendung einer Tonne Altpapier für energetische Zwecke oder dem Ausbau von Strom aus erneuerbaren Energiequellen.
- Insgesamt könnten somit die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen festgelegter politischer Ziele evaluiert und die Entwicklung von Politiken auf der Basis produktspezifischer Informationen gezielter und wirkungsvoller gestaltet werden.

Vorgehensweise

Der Erstellung solcher „regionalen“ erweiterten Input-Output-Tabellen stellt eine große Herausforderung dar. Dies ist insbesondere durch die von Region zu Region unterschiedliche Datenlage bedingt. Es wird also ein innovativer Ansatz benötigt, der auf der Grundlage bestehender Daten und plausibler Annahmen eine solide Abbildung der wichtigsten realen Eigenschaften der inländischen Produktions- und Konsumaktivitäten in den untersuchten Produktionssystemen ermöglicht. Im Falle des Landes NRW bedeutet dies die Erstellung einer NRW-spezifischen EIOT unter Berücksichtigung der realen Transformationscharakteristika seiner untergeordneten Produktionssysteme (Regionen, Branchen, Industrien) und seiner Außenhandelsbeziehungen sowohl mit den anderen deutschen Bundesländern als auch mit dem Rest der Welt.

Unabhängig von der Datenlage besteht für die beschriebene, notwendige Vorgehensweise aber derzeit auch kein ausgearbeitetes, implementierbares Konzept, so dass diese Aufgabenstellung alleine schon eine wichtige Forschungslücke darstellt. Im Rahmen dieses Arbeitspakets werden daher erste konzeptionelle Schritte skizziert, die für den Aufbau eines derartigen Informationssystems für NRW notwendig sind.

Als Grundlage dienen die nachfolgend beschriebene Funktionsweise anthropogener Produktionssysteme, die Eigenschaften bestehender Datensätze sowie Erkenntnisse aus vorherigen methodischen Arbeiten.

1.2.2 Verständnis der Funktionsweise sozioökonomischer Transformationssysteme

Die anthropogenen Produktions- und Konsumaktivitäten bestimmen die Funktionsweise sozioökonomischer Transformationssysteme mit (Abbildung 10). Dabei werden energetische und nicht-energetische natürliche Ressourcen sowie in der Ökonomie erzeugte „Vorprodukte“ (Inputs¹¹) in energetische und nicht-energetische „Endprodukte“ und Reststoffe (Outputs¹²) umgewandelt. Die Umwandlung von Inputs in Outputs erfolgt mittels der Anwendung einer bestimmten Transformationstechnik.

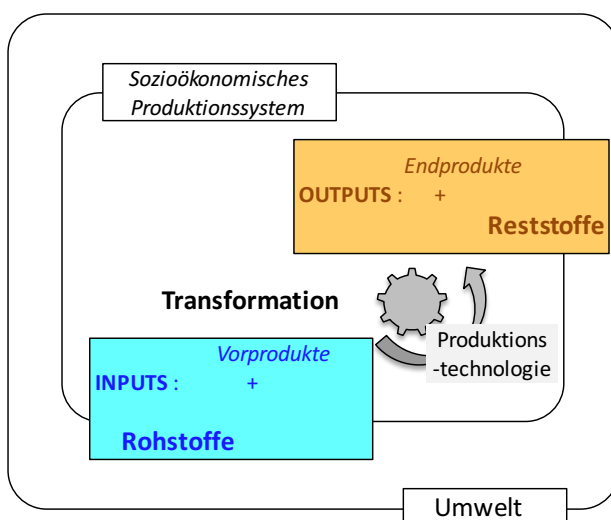


Abbildung 10 Charakteristika der Funktionsweise sozioökonomischer Produktionssysteme

Quelle: Eigene Darstellung

Aus der Perspektive der gesamten sozioökonomischen und umweltbezogenen *Transformationsauswirkungen*, zu welchen die Produktions- und Konsumaktivitäten in einem anthropogenen Transformationssystem führen, kommt sowohl der *angewandten Transformationstechnik* als auch der *Zusammensetzung und Menge der eingesetzten Inputs und erzeugten Outputs* eine besondere Rolle zu. Zum einen stellen diese zwei Charakteristika dar, anhand welcher verschiedene anthropogene Transformationssysteme in ihrer Funktionsweise beschrieben und differenziert werden können. Zum anderen sind sie ausschlaggebend für das Ausmaß der gesamten Transformationsauswirkungen.

Wenn sich die anthropogenen Produktionssysteme der Mikro-, Meso-, und Makro-Ebene im selben geographischen Raum befinden, stehen sie darüber hinaus in einer Einbettungsbeziehung untereinander. So sind beispielsweise Industriebetriebe (d. h. Produktionssysteme der Mikro-Ebene), die sich einer Wirtschaftssparte (d. h. Pro-

¹¹ Zu den Inputs gehören u. a. Rohstoffe, erneuerbare Energien, Zwischenprodukte und wiederverwertbare Materialien.

¹² Zum Ergebnis der Produktions- und Konsumaktivitäten (d. h. Output) gehören nicht nur Energieprodukte, Güter, Dienstleistungen und andere nutzbare Produkte, sondern auch nicht-wiederverwertbare Abfälle, Abwasser und Luftschadstoffe.

duktionssysteme der Meso-Ebene) zuordnen lassen, in einer regionalen oder nationalen Ökonomie (d. h. Produktionssystem der Makro-Ebene) eingebettet (siehe Abbildung 11).

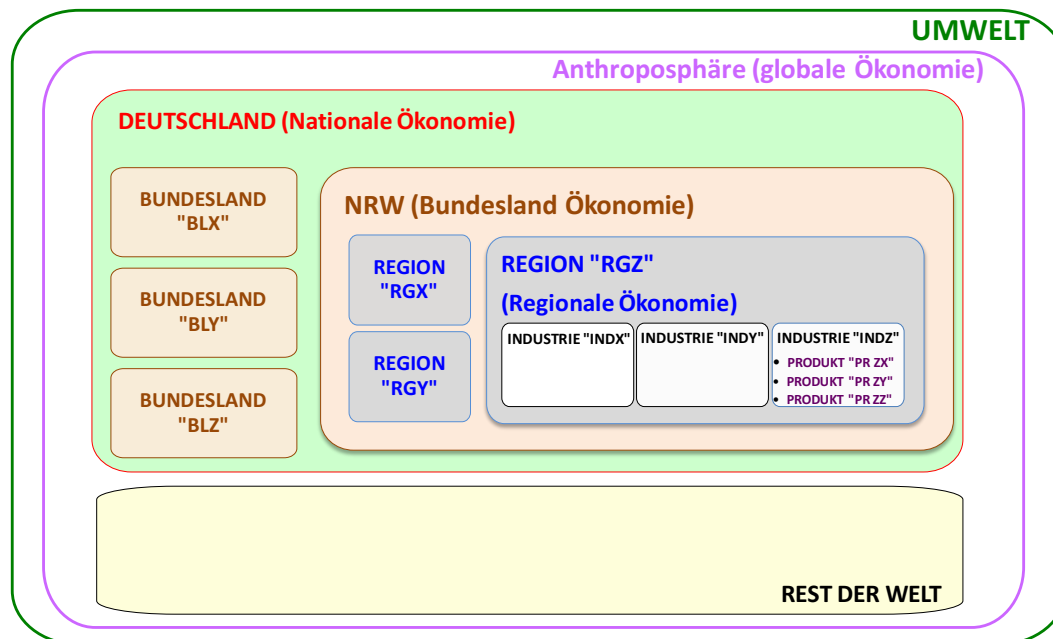


Abbildung 11 Die sozioökonomischen Produktionssysteme der Mikro-, Meso- und Makroebene in Deutschland: Einbettungsverhältnis

Quelle: Eigene Darstellung

Das bestehende Einbettungsverhältnis, das Ausmaß der Produktion und des Konsums sowie die angewandte Produktionstechnik führen dazu, dass die Auswirkungen der anthropogenen Transformationsaktivitäten nicht nur mit der *Unterschiedlichkeit der Transformationscharakteristika* sondern auch mit der *Unterschiedlichkeit der Größe* des betrachteten Produktionssystems zusammenhängen.

- Die *Unterschiedlichkeit in den Transformationscharakteristika* der Produktionssysteme ist darauf zurückzuführen, dass in jedem der dazu gehörenden Produktionssysteme bestimmte Zusammensetzungen von Inputs auf verschiedene Weise in Outputs unterschiedlicher Zusammenstellung transformiert werden.
- Die *Unterschiedlichkeit in der Größe* der Produktionssysteme ist dagegen durch die Menge der verwendeten Inputs und der erzeugten Outputs bestimmt. Beide sind das Ergebnis zum einen der Produktions- und Konsumniveaus im betrachteten Produktionssystem selbst und zum anderen des Einbettungsverhältnisses, welches zwischen den unter- und übergeordneten Produktionssystemen besteht.

Die gesamten Auswirkungen der Transformationsaktivitäten in Produktionssystemen der übergeordneten Ebene (z.B. Branchen oder regionale, nationale oder supernationale Ökonomien) ergeben sich daher aus der Summe der Transformationsaktivitäten aller Aktivitäten in den dazu gehörenden untergeordneten Produktionssystemen (z.B. Industriebetriebe), d. h. aus der Summe *produktspezifischer* Auswirkungen. Besteht insbesondere für einen konkreten geographischen Raum flächendeckend ein ähnlicher technologischer Standard, lässt sich die Stärke eines produktspezifischen Transformationseffekt in den übergeordneten Produktionssystemen (z.B. Branchen)

mithilfe von Angaben über eine als exemplarisch angesehene (generische) Transformationstechnologie und das mengenbezogene Produktionsniveau ermitteln (Abbildung 12 Gemeinsamkeit der Transformationsaktivitäten in unter- und übergeordneten Produktionssystemen: Produktion bzw. Verbrauch einer Einheit Produkt (- Output)) verdeutlicht dies am Beispiel der Nahrungsmittel-, der Automobil- und der Stahlindustrie. Unternehmen aus verschiedenen regionalen Ökonomien sind eingebettet in einen übergeordneten geographischen Raum (z. B. NRW), für welchen ein vergleichbarer technologischer Standard angenommen wird. Um nun beispielsweise die sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen der Bierproduktion in der NRW-Nahrungsmittelindustrie zu ermitteln, genügen Angaben über das Produktionsniveau und die technisch bedingten Effekte eines einzigen, als vergleichbar angesehenen Produktionsprozesses, so dass nicht jeder Prozess einzeln untersucht werden muss.

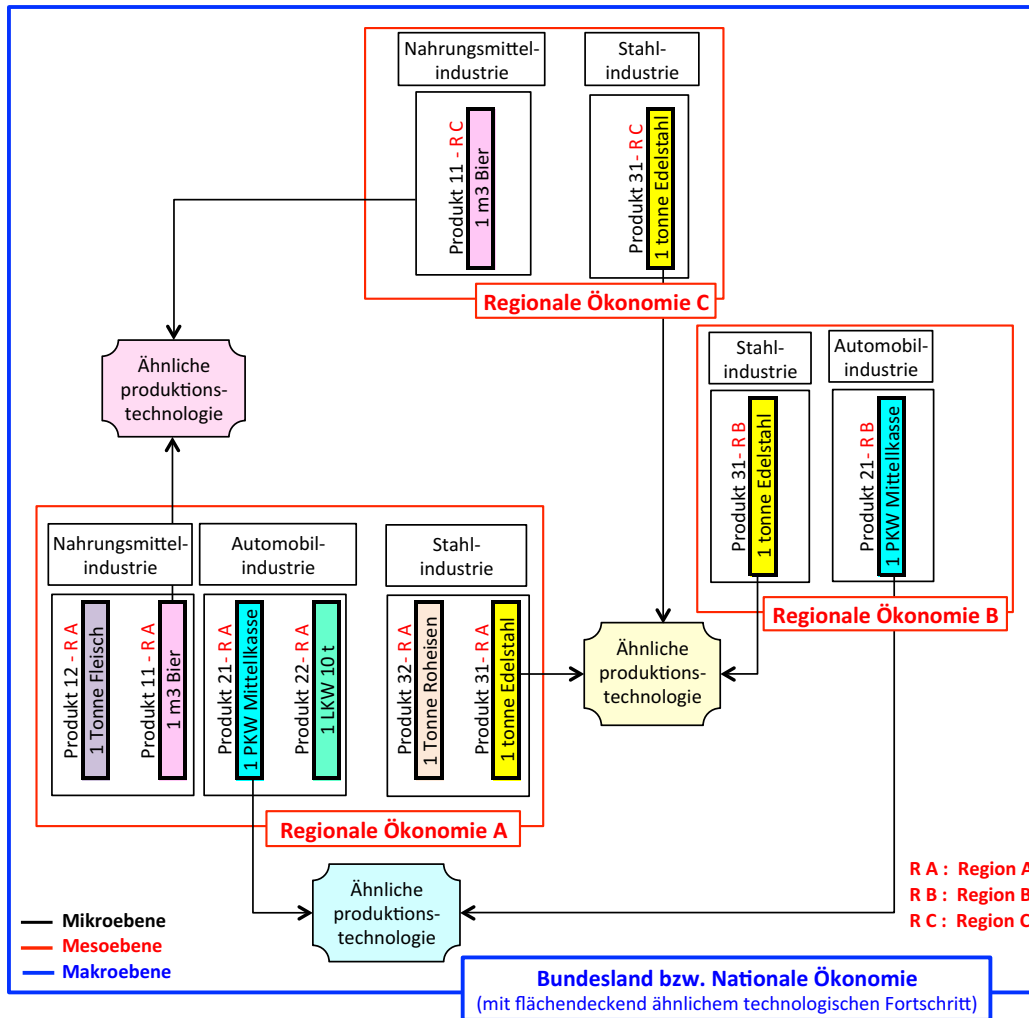


Abbildung 12 Gemeinsamkeit der Transformationsaktivitäten in unter- und übergeordneten Produktionssystemen: Produktion bzw. Verbrauch einer Einheit Produkt (- Output)

Quelle: Eigene Darstellung

Der wesentliche Ausgangspunkt für die Abschätzung der Auswirkungen der Transformationsaktivitäten in einem Produktionssystem der übergeordneten Ebene (z. B.

dem Land NRW) ist also die realitätsnahe Abbildung der Transformationscharakteristika der Produkte, welche im betrachteten System hergestellt und verbraucht werden. Diese Transformationscharakteristika von „Produkten“ sollten – auf einer normalisierten Darstellungsbasis – in einer entsprechenden Datenbank erfasst werden, so dass die EIOA später sowohl auf Landesebene als auch für regionale oder lokale Ökonomien durchgeführt werden könnte.

Allerdings gilt es zu beachten, dass die Nachfrage eines Transformationssystems nach (Vor-)Produkten nicht nur mit inländisch produzierten Gütern, sondern auch mit Importen befriedigt wird. Das Ausmaß des gesamten Effekts ergibt sich also als Resultat der Zusammenwirkung dieser Größen.

1.2.3 Grundzüge der erweiterten Input-Output-Rechnung

Die Produktions- und Konsumaktivitäten in anthropogenen Transformationssystemen führen zu bestimmten sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekten, die sich mittelbar oder unmittelbar aus der Transformation von Inputs in Outputs ergeben. Um diese Auswirkungen erfassen und analysieren zu können, ist eine umfassende Darstellung sowohl aller materiellen und energetischen Ströme und deren Flussrichtung im betrachteten Transformationssystem (siehe Abbildung 13) als auch der Zusammenhänge zwischen den Produktions- und Konsumaktivitäten erforderlich.

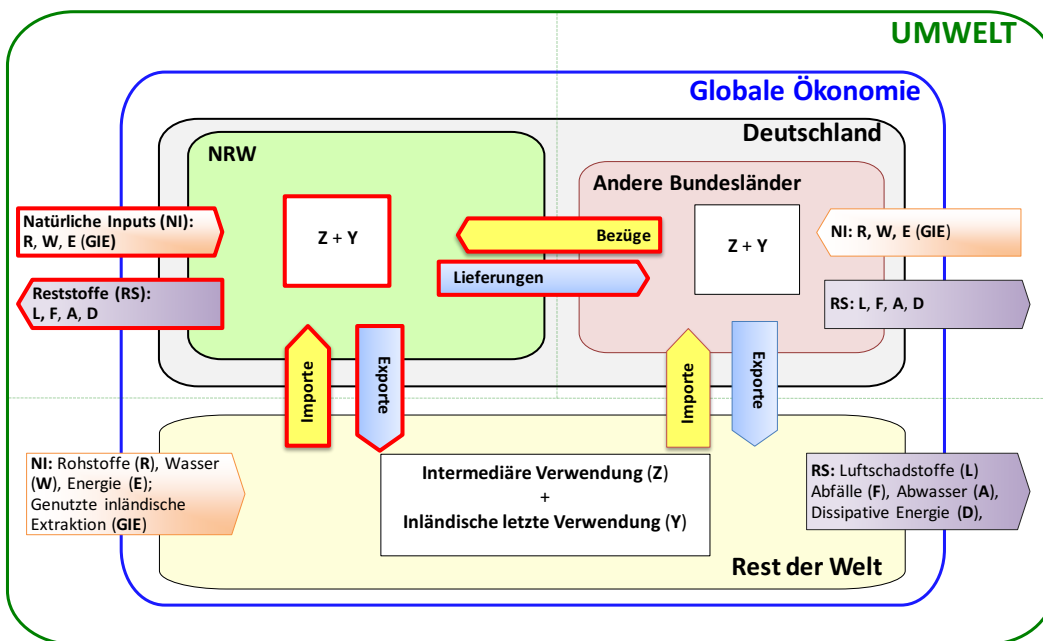


Abbildung 13 Materielle und energetische Ströme verursacht durch die Transformationsaktivitäten in Deutschland und in seinen Bundesländern: ausgewählte physische und monetäre Flüsse

Quelle: Eigene Darstellung

Hierfür ist die erweiterte Input-Output-Rechnung (EIOR) ein geeignetes methodisches Instrumentarium. Sie ermöglicht nicht nur die vollständige Abbildung der materiellen und energetischen Ströme, welche die Funktionsweise eines Produktionssystems charakterisieren, sondern auch ihre Untersuchung und somit die Ableitung

von wichtigen Indikatoren wie die Fußabdruck-Kennziffern (z. B. bezüglich Treibhausgas, Rohstoffinput, Bruttowertschöpfung, Beschäftigung).

Die Ermittlung sozioökonomischer und umweltbezogener Fußabdrücke unter expliziter Berücksichtigung der zusammenhängenden Eigenschaften von anthropogenen Transformationssystemen, wie sie in Kapitel 1.2.2 beschrieben wurden, beruht auf der erweiterten Input-Output-Analyse (EIOA). Die sozioökonomischen Transformationssysteme können dabei wie oben beschrieben der Mikro-Ebene (Unternehmen), der Meso-Ebene (Branche, regionale Ökonomie) oder der Makro-Ebene (nationale oder supranationale Ökonomie) zugeordnet sein.

Für Wirtschaftssysteme der übergeordneten Ebene (z. B. nationale Ökonomien) erfolgt die Berechnung solcher „Fußabdruck-Kennziffern“ mittels der EIOA in einem *gesamtwirtschaftlichen* Kontext. Dies bedeutet: Die EIOA ermöglicht die Quantifizierung der gesamten erwünschten und unerwünschten Auswirkungen der Produktions- und Konsumaktivitäten zum einem unter Berücksichtigung der Eigenschaften des gesamten industriellen Produktions- bzw. Transformationsgefüges der Weltregion (Land), in welcher die Produkte¹³ eingesetzt bzw. hergestellt werden, und zum anderen unter Berücksichtigung der Gesamtmenge, Zusammensetzung und Herkunft der produzierten und verwendeten Produkte.

Anhand der EIOA können die Auswirkungen der gesamten inländischen Verwendung von Produkten insofern entlang der gesamten weltweiten Lieferkette erfasst werden. Dabei kann die Aufmerksamkeit nicht nur auf die Auswirkungen der Verwendung von Produkten für die Durchführung von *Produktionsaktivitäten* („intermediäre Verwendung“) sondern auch auf die Auswirkungen der Nutzung von Produkten für *Konsumaktivitäten*, den *Export* oder als *Investitionsgüter* („letzte Verwendung“) gerichtet werden. In jedem Fall handelt es sich bei diesen mittels eines Modells abgeschätzten Auswirkungen um globale Effekte, die jedoch nach Industriegruppen bzw. Produktgruppen und ggf. nach Weltregionen differenziert sind. Die EIOA beruht dabei auf den Informationen, die in einer erweiterten Input-Output-Tabelle (EIOT) enthalten sind (siehe Abbildung 14 Vereinfachte schematische Darstellung einer physischen Input-Output-Tabelle). Je nach Detaillierungsgrad der EIOT insbesondere hinsichtlich der Herkunft und des Verbleibs der Vor- und Endprodukte ist eine geographische Zuordnung dieser gesamtwirtschaftlichen Effekte nach Weltregionen bzw. Ländern möglich. Bisher ist dies der Fall, wenn die EIOA für Wirtschaftssysteme bestimmter übergeordneten Ebenen (nationale oder supranationale Ökonomien) durchgeführt wird. Hierfür werden erweiterte *multiregionale* Input-Output-Tabellen (EMRIOT) verwendet, in denen die globale Ökonomie in Weltregionen bzw. in einzelne Länder unterteilt wird. Für jede Weltregion wird die Verwendung der in den Ländern dieser Weltregion produzierten sowie der importierten Güter sowohl in der Produktions- als auch in der Konsumsphäre nicht nur nach Verwendungsbereichen (Produktionssektoren/Industrien, Endnachfragesektoren), sondern auch nach der geographischen Herkunft der Produkte innerhalb dieser Weltregion abgebildet.

¹³ Der Begriff Produkt bzw. Produktgruppe wird hier als umfassende Bezeichnung für Güter und Dienstleistungen verwendet.

Jede in einer EMRIOT abgebildete nationale Ökonomie oder auch Weltregion ist also mit den anderen nationalen Ökonomien bzw. Weltregionen verknüpft. Dies erfolgt durch die vollständige Darstellung der globalen Außenhandelsströme von Produktgruppen bzw. der Import- und Exportbeziehungen zwischen den Ländern. Die Informationen über das Herkunftsland der Güter und Dienstleistungen, die in jeder Weltregion (Land) verwendet werden, ermöglicht eine entsprechende geographische Zuordnung der ermittelten gesamten sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen.

Allgemeine Struktur und Datensystem für den Aufbau von EIOT

In einer Input-Output-Tabelle wird generell das Aufkommen und die Verwendung von Produkten, Gütern und Dienstleistungen innerhalb der Produktions- und – Konsumsphäre entsprechend der Flussrichtung der realen Ströme ex-post wiedergegeben (siehe Abbildung 14 Vereinfachte schematische Darstellung einer physischen Input-Output-Tabelle). Im Falle von monetären IOT werden diese Ströme in monetären Einheiten erfasst. Die Erweiterung der monetären IOT erfolgt durch die zusätzliche Darstellung der direkten Auswirkungen der Produktions- und des Konsumaktivitäten in nicht-monetären Größen (wie z. B. Energieverbrauch, THG-Emissionen, Beschäftigung, etc., siehe Abbildung 14). Diese erweiterte Input-Output-Tabelle (EIOT) ist die unabdingbare Voraussetzung für den hier verfolgten Ansatz der Input-Output-Analyse.

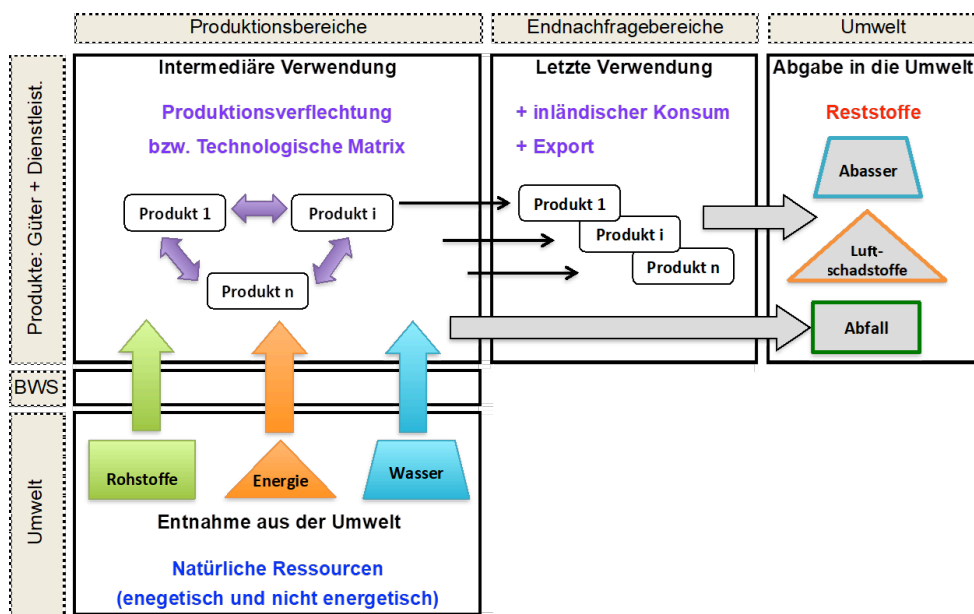


Abbildung 14 Vereinfachte schematische Darstellung einer physischen Input-Output-Tabelle

Quelle: Eigene Darstellung

Erweiterte Input-Output-Tabellen können prinzipiell für einzelne Industrieanlagen, für eine ganze Branche oder eine lokale, regionale, nationale oder supranationale Ökonomie erstellt werden. Das hierfür benötigte Informationssystem besteht aus verschiedenen Datensätzen und Tabellen („zusätzliche Daten“ und „Basistabellen“, siehe Abbildung 15).

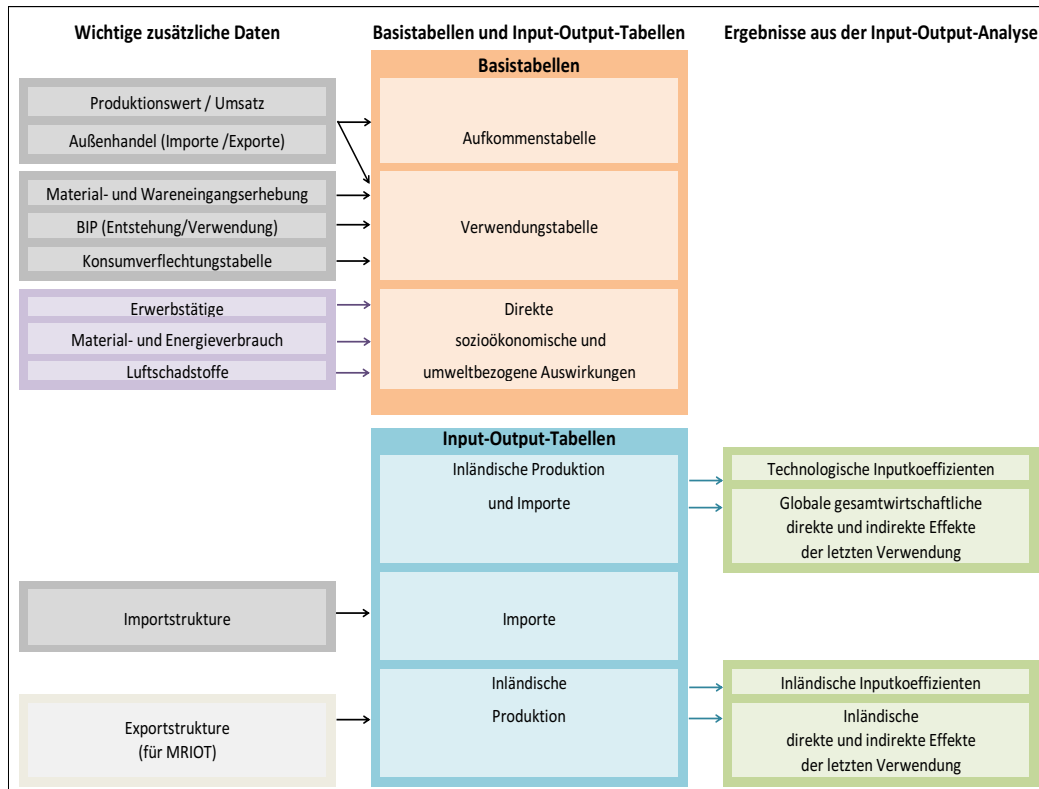


Abbildung 15 Allgemeines Datensystem der erweiterten Input-Output-Rechnung für übergeordnete Produktionssysteme

Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt (2010), S. 7

Basistabellen

Während einige dieser Datensätze in physischen Einheiten ausgedrückt werden, werden andere Informationen in monetären Einheiten präsentiert. In der Regel werden die Basistabellen, sei es in monetären oder physischen Einheiten, im Format von Aufkommens- und Verwendungstabellen dargestellt. In den folgenden Abbildungen werden die drei Teile der Basistabellen schematisch präsentiert. In allen diesen Tabellen werden das Aufkommen, die Verwendung und die direkten Auswirkungen für drei Industriegruppen beispielhaft dargestellt. Die in diesen Tabellen enthaltenen Informationen sind generell spaltenweise zu interpretieren.

- Die *Aufkommenstabelle* (Supply Table) zeigt die durch die Wirtschaftsbereiche im Inland produzierten Güter, ergänzt um die Importe (beide gegliedert nach Gütergruppen), welche für die inländische Verwendung zur Verfügung stehen (siehe Abbildung 16). Während in den Zeilen die Produkte gezeigt werden, wird die Herkunft der Produkte in den Spalten abgebildet. So zeigt die Spalte für die Stahlindustrie beispielsweise die gesamte inländische Produktion dieser Industrie zum einen von Hauptprodukten (Stahl) und zum anderen von sekundären Produkten (industrielle Gase und Elektrizität).

- Die *Verwendungstabelle* (Use Table) zeigt dagegen die Verwendung der inländisch produzierten und importierten Waren und Dienstleistungen nach Verwendungsarten, d. h. entweder als Vorleistungen der Wirtschaftsbereiche oder zum Zwecke von Konsum, Investitionen und Exporten. Zudem weist diese Tabelle die im Produktionsprozess entstandene Wertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen aus (siehe Abbildung 17). So werden in der grüne Spalte beispielsweise alle Produkte bzw. Inputs (in- und ausländischer Herkunft) dargestellt, die in der chemischen Industrie für die Durchführung aller ihrer Produktionstätigkeiten eingesetzt werden.
- In der Tabelle der *direkten Auswirkungen* (siehe Abbildung 18) werden die sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekte gezeigt, die im Inland durch die inländischen Produktions- und Konsumaktivitäten direkt verursacht werden (auch als *umweltökonomische Konten* bezeichnet). Die Spalte in Blau zeigt beispielsweise die verschiedenen sozioökonomischen und umweltbezogenen direkten Auswirkungen der Produktionsaktivitäten des Elektrizitätssektors (Luftemissionen, Ressourceninput, Beschäftigung).

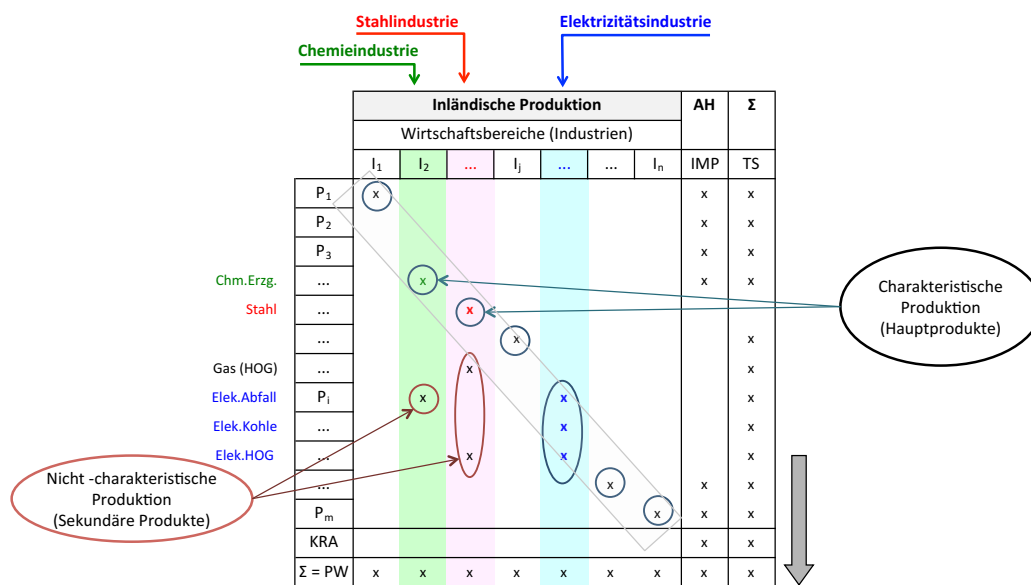


Abbildung 16 Struktur der Aufkommenstabelle als Teil der Basistabelle

Quelle: Eigene Darstellung

	Intermediäre Verwendung							Letzte Verwendung				Σ	
	Wirtschaftsbereiche (Industrien)							Inl. Letzte Verw.					GV
	I ₁	I ₂	...	I _j	I _n	K	BV	INV	EXP		
Landwirt.- Produkte	P ₁	x					x					x	x
Mineralien	P ₂	x	x	x	x	x	x		x				x
Fossile Energieträger	P ₃	x	x	x	x	x	x	x				x	x
Nahrungsmittel	...	x					x	x				x	x
Chemische Erzeug.	...	x										x	x
Stahlprodukte	...	x										x	x
Maschinen	...	x	x	x	x	x	x					x	x
Transportgüter	P ₁	x	x	x	x	x	x	x				x	x
Bauprodukte	...	x					x			x			x
Elektrizität	...	x	x	x	x	x	x	x					x
Transportservices	...	x	x	x	x	x	x	x					x
Other services	P _m	x	x	x	x	x	x	x					x
	KRA								x				x
	KNRI											x	x
	PSS	x		x	x	x			x		x		x
	BWS	x	x	x	x	x	x						x
	Σ = PW	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x

Abbildung 17 Struktur der Verwendungstabelle als Teil der Basistabelle

Quelle: Eigene Darstellung

	Intermediäre Verwendung							Letzte Verwendung			Σ	
	Wirtschaftsbereiche (Industrien)							Inl. Letzte Verw.				
	I ₁	I ₂	...	I _j	I _n	PH	NPO	STA		
CO ₂	x	x	x	x	x	x	x	x				x
CH ₄	x	x	x	x	x	x	x	x				x
NO _x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
SO _x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
Kalk	x	x	x	x	x	x	x	x				x
Sand	x	x	x	x	x	x	x	x				x
Kohle	x	x	x	x	x	x	x	x				x
Eisenerz		x	x	x	x	x	x	x				x
Andere Metalle		x	x	x	x	x	x	x				x
Biomasse	x	x	x	x	x	x	x	x				x
Beschäftigte	x	x	x	x	x	x	x	x				x
Wasser	x	x	x	x	x	x	x	x				x

Abbildung 18 Struktur der Tabelle der direkten Auswirkungen (umweltökonomische Konten) als Teil der Basistabelle

Quelle: Eigene Darstellung

(Erweiterte) Input-Output-Tabellen

Um die kreislaufförmige Verflechtung der intermediären Verwendung bei der Produktion (industrielle Produktionsgefüge) sowie den Zusammenhang zwischen der inländischen Produktion und der letzten Verwendung von Gütern und Dienstleistungen darstellen zu können, werden *Input-Output-Tabellen* (IOT) erstellt. Eine Input-Output-Tabelle zeigt sowohl das Aufkommen als auch die Verwendung von Waren und Dienstleistungen innerhalb einer einzigen Tabelle – die in diesen Tabellen enthaltenen Informationen sind daher spalten- und zeilenweise zu interpretieren. IOT,

deren Spalten und Zeilen nach homogenen Gütergruppen gegliedert sind, beschreiben detailliert die Charakteristika der Transformation von Inputs in Outputs sowie des Konsums im Inland.

- Die *Spalten* der Vorleistungsmatrix zeigen, wie viele Vorleistungsgüter aus inländischer Produktion und Importen von einem Produktionsbereich verbraucht wurden.
- Die *Zeilen* zeigen die Verwendung einer Produktgruppe bei den Produktions- und Konsumbereichen.
- Wird die (in monetären Einheiten abgebildete) Input-Output-Tabelle mit der (in physischen Einheiten dargestellten) Tabelle der direkten sozioökonomischen Auswirkungen der inländischen Produktion und Konsumaktivitäten ergänzt, so entsteht eine erweiterte Input-Output-Tabelle.

Abbildung 19 zeigt wiederum ein Beispiel, das sich aus den drei vorherigen Beispieltabellen zusammensetzt.

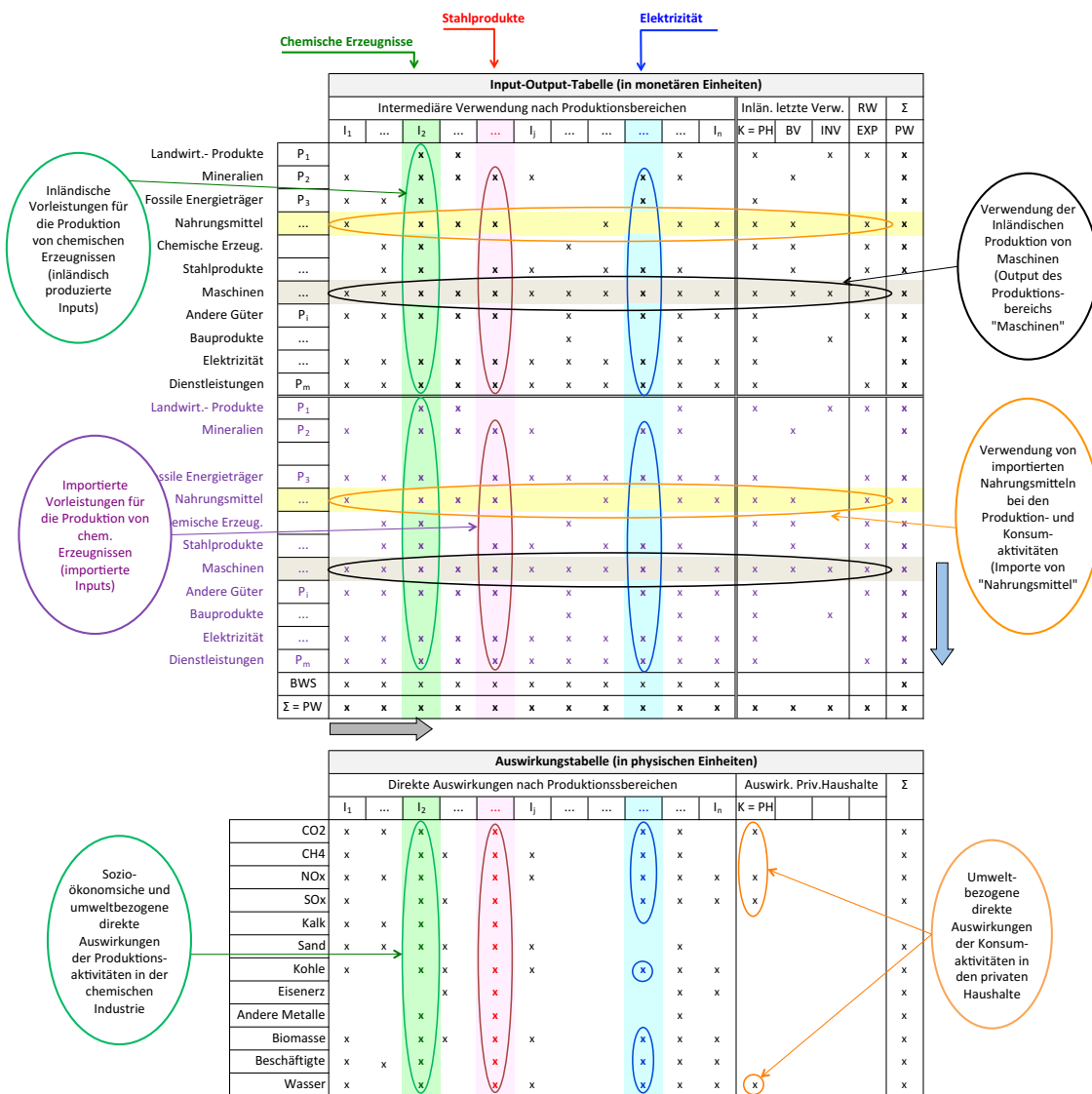


Abbildung 19 Struktur einer erweiterten Input-Output-Tabelle

Quelle: Eigene Darstellung nach Holub und Schnabl (1994), S. 140

Grundmodell für die Ermittlung von Fußabdruck – Indikatoren

Gemäß der Input-Output-Analyse wird die gesamte Produktion einer Ökonomie unter bestimmten Annahmen mittels der Leontief-Produktionsfunktion dargestellt (Holub und Schnabl 1994 S. 93 ff.):

$$x = z + y$$

$$x = (I - A)^{-1} \cdot y$$

Bei dieser Gleichung handelt es sich um das sogenannte Mengenmodell. Demnach wird die gesamte Produktion (x) durch die für die letzte Verwendung produzierte Menge aller Gütergruppen (y) und durch die angewandte Produktionstechnologie (A) innerhalb der Wirtschaft bestimmt¹⁴. Die Matrix A wird aus der intermediären Verwendung von Produkten (z) für die Produktion abgeleitet. Dabei sind alle Parameter nach Produktgruppen oder Industrien gegliedert.

Auf der anderen Seite ergibt sich die Gesamtauswirkung (G) der inländischen Produktion einer Ökonomie aus der Summe der direkten Auswirkungen, die von jedem Produktionsbereich unmittelbar verursacht werden (G_j). Da der direkte Effekt eines Produktionsbereichs als Resultat der Multiplikation der Auswirkung pro produzierter Output-Einheit (g_j) mit der gesamten inländischen Produktion der entsprechenden Gütergruppe (x_i) ausgedrückt werden kann, bedeutet dies (in Vektorschreibweise):

$$G_D = g \cdot x$$

Die Verknüpfung des Konsums in einer Ökonomie mit ihren direkten Auswirkungen G_D erfolgt dann über den Produktionswert (x), der Bestandteil beider Gleichungen ist. Im Fall der THG-Emissionen lässt sich die für die Analyse angewandte Modellformel wie folgt ausdrücken:

$$THG_D = \langle thg_j \rangle \cdot (I - A)^{-1} \cdot y_D$$

[Tonnen] = [Tonnen/Euro] * [Euro]

THG_D	:	THG-Emissionen im Inland, die aus der inländischen Produktion entstehen
$\langle thg_j \rangle$:	THG-Emissionen pro produzierte Produkt-Einheit des Produktionsbereichs j
$(I - A)^{-1}$:	Matrix der direkten und indirekten Produktion pro produzierte Produkt-Einheit
A	:	Matrix der technologischen Produktionskoeffizienten
y_D	:	Gesamte Produktion für den inländischen Konsum und den Export

Anwendung der erweiterten Input-Output-Rechnung auf NRW

Die Anwendung der EIOR konzentriert sich bisher auf die Folgenanalyse der Funktionsweise sozioökonomischer Transformationssysteme der nationalen und suprana-

¹⁴ Die Variable „I“ stellt die Einheitsmatrix dar. Sie ergibt sich aus der algebraischen Lösung des Gleichungssystems, das der IOA zugrunde liegt.

tionalen Ebene (z. B. Deutschland, Europa). Für Transformationssysteme auf *untergeordneten* Ebenen (Bundeslandebene bzw. regionale Ebene) ist der Einsatz von EIOR aufgrund der schlechten Datenverfügbarkeit jedoch stark eingeschränkt. Die Überwindung dieser unzulänglichen Datensituation erfordert zunächst die Konzipierung eines innovativen Ansatzes, der die Nutzung von Daten aus anderen Quellen (u. a. Daten über die regionalen Produktionsstrukturen und über die in der Region tatsächlich angewendeten Produktionstechnologien) ermöglicht.

Das vorliegende Konzeptpapier hat daher zum Ziel, eine methodische Verfahrensweise zur Ermittlung von globalen sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen (Fußabdruck-Kennziffer) für Produkte bzw. Produktgruppen zu skizzieren, die im Land NRW produziert bzw. konsumiert werden. Mit dem Vorliegen solcher regionalspezifischer Kennziffern wäre die Voraussetzung geschaffen, Vergleiche der globalen Auswirkungen der regionalspezifischen Produktion und des Konsums im Land NRW mit den globalen Auswirkungen der Produktion und der letzten Verwendung in anderen Ökonomien durchzuführen. Die Konzeptentwicklung erfolgt in mehreren Schritten

- 1 | In Kapitel 1.2.4 wird dargestellt, welche Möglichkeiten und Einschränkungen bisher schon bei der Erstellung einer NRW-bezogenen EIOT bestehen (state-of-the-art).
- 2 | Anschließend wird in Kapitel 1.2.5 ein methodisches Konzept für die Erstellung einer erweiterten Input-Output-Tabelle für Ökonomien auf der Bundeslandebene (Land NRW) beschrieben.
- 3 | In Kapitel 1.2.6 wird ein Konzept für die mögliche Verknüpfung und Integration der NRW-EIOT mit einem bestehenden multiregionalen Input-Output-Modell entwickelt, um die Verknüpfungen zwischen regionalen und nationalen bzw. globalen Variablen zu ermöglichen.
- 4 | Um die NRW-EIOT mit Daten füllen zu können, wird in einem vierten Schritt in Kapitel 1.2.7 eine mögliche Vorgehensweise aufgezeigt, wie Daten über die in der Region angewandten Produktionstechnologien aufbereitet und mit Daten über die inländische Produktion im Bundesland verbunden werden können. Hierfür wird soweit möglich auf vorherige konzeptionelle Vorarbeiten zurückgegriffen, die am Wuppertal Institut für die Ermittlung von produktspezifischen Auswirkungen durchgeführt wurden.
- 5 | Schließlich werden – ebenfalls in Kapitel 1.2.7 – die wesentlichen Anforderungen hinsichtlich der Berichterstattung seitens der amtlichen Statistik NRW sowie der Informationen aus der Industrie skizziert, die für die Umsetzung und Anwendung eines derartigen Ansatzes notwendig sind.

1.2.4 Input-Output-Rechnung für das Land NRW: State-of-the-art

Die ersten Versuche der Erstellung einer NRW-bezogenen EIOT beruhen auf der Übertragung der Transformationscharakteristika von Deutschland auf das Land NRW inklusive einiger damit verbundener direkten Umwelteffekte (siehe (Kronenberg und Többen 2011; Wuppertal Institut 2015)). Die Abbildung der in den Industrien von NRW angewandten spezifischen Produktionstechnik, der damit verbundenen direkten umweltbezogenen Auswirkungen sowie der tatsächlichen „Außenhandelsbeziehungen“ von NRW wurde aufgrund der lückenhaften Datenlage dabei über-

gangen. Insbesondere die fehlende Erfassung eines wichtigen Teils der Importe und Exporte von NRW, d. h. der Produktlieferungen *in* und Produktbezüge *aus* anderen Bundesländern, stellt eine erhebliche Schwachstelle dar (siehe Pfeile mit rotem Rand in Abbildung 20). Für deren realitätsnahe Abschätzung fehlen bislang sowohl die Datengrundlage als auch eine ausgearbeitete etablierte Vorgehensweise.

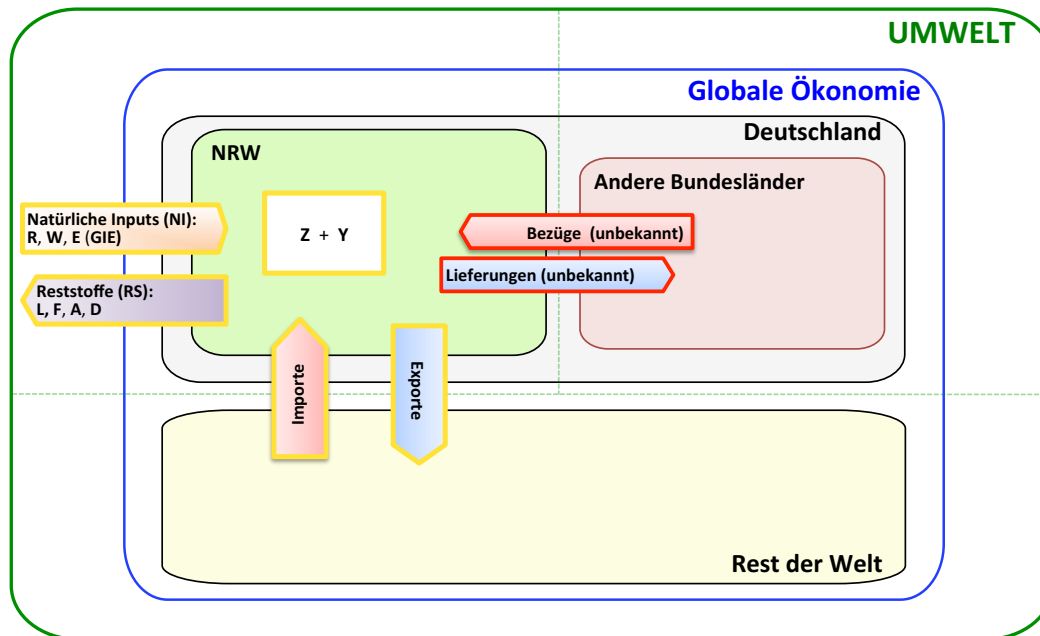


Abbildung 20 Charakteristika der Funktionsweise der NRW-Ökonomie: ausgewählte physische und monetäre Flüsse

Quelle: Eigene Darstellung

Auch die konzeptionellen Inkompatibilitäten zwischen einigen der verfügbaren Datensätze erschweren die Erstellung einer EIOT für NRW. So können verfügbare Daten ohne eine entsprechende Aufbereitung im Sinne der EIOA nicht verwendet werden. Dies betrifft beispielsweise in den Energiebilanzen für NRW enthaltene Angaben zu Energieaufkommen und -verwendung oder durch Materialflussrechnung abbildbare Daten zum Ressourcenverbrauch. Diese Inkompatibilitäten, die in erster Linie mit der Abgrenzung der Ökonomie und den angewandten Rechnungsregeln zusammenhängen, verhindern eine akkurate Verknüpfung der jeweiligen Daten.

In anderen Worten sind die Daten bezüglich der direkten (energetischen und rohstofflichen) Umweltauswirkungen der Produktions- und Konsumaktivitäten in NRW und die Daten über die Transformationscharakteristika in den Industrien bzw. Produktionsbereiche (z und y in Abbildung 20), welche im Rahmen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen erhoben werden, in einigen Fällen inkonsistent, um sie für den Zweck der Erstellung einer EIOT zu verwenden. Es ist wissenschaftlich belegt, dass diese Inkompatibilitäten je nach Produktionsbereich bzw. Wirtschaftsaktivität zu einer beachtlichen Über- bzw. Unterschätzung der Auswirkungen der Produkti-

ons- und der Konsumaktivitäten im betrachteten Produktionssystem führen können¹⁵.

Für das Land NRW können daher mit der gegenwärtigen Datenlage zwar Input-Output-Analysen durchgeführt werden, jedoch nur auf der Basis von Daten, die extrem grobe Abschätzungen der relevanten Input-Output-Verhältnisse abbilden, anstatt ansatzweise die tatsächlichen regionalen Charakteristika der Produktion berücksichtigen.

Die analytischen Defizite der bisher angewandten Vorgehensweise, welche auf derivativ ermittelten EIOT beruhen (siehe (Kronenberg und Többen 2011; Wuppertal Institut 2015)), können jedoch mittels der Verwendung von NRW-spezifischen Daten insbesondere für die relevanten Industriebranchen zum großen Teil behoben werden. Hierfür werden Angaben über die technischen Charakteristika der Produktion sowie des mengenmäßigen Niveaus der Produktion und des Konsums in NRW benötigt – d. h. Daten, welche die Produktion und Verwendung von Produkten auf Mikro, Meso- und Makro-Ebene in NRW betreffen. Darüber hinaus werden Daten über die Transformationscharakteristika in anderen Weltregionen benötigt, aus welchen NRW Rohstoffe, Güter, Dienstleistungen u. a. importiert.

1.2.5 Skizzierung eines Konzepts zum Aufbau eines Informationssystems für die EIOR für NRW

Die wichtigsten methodischen Schritte zum Aufbau eines Datensystems für die Durchführung der EIOR können wie folgt unterteilt werden:

- 1 | Erstellung *einer vorläufigen Input-Output-Tabelle für NRW*
Dieser Schritt setzt die Anwendung eines Ansatzes für den Aufbau einer vorläufigen Matrix der intermediären Verwendung bzw. Produktionsverflechtungsmatrix und einer Matrix der letzten Verwendung voraus (siehe oberen Matrizen in Abbildung 14). Erste Annäherungsgrößen für diese Flüsse davon könnten mittels eines partial-survey Ansatzes abgeschätzt werden. Hierfür eignet sich der DEBRIOT Ansatz (siehe unten).
- 2 | *Abschätzung des NRW-„Außenhandels“ sowie der Verwendung der inländischen Produktion von NRW*
Hierfür ist die Festlegung einer Vorgehensweise für die Ermittlung des Verbleibs der inländischen Produktion von NRW sowie der Herkunft der verwendeten Produkte in NRW notwendig. Dabei könnten Informationen aus einer Befragung zu Daten der Industrie in NRW mit den Ergebnissen der Anwendung des DEBRIOT-Ansatzes kombiniert werden. Die Aufgabe wäre die Unterteilung des Verbleibs der Produktion in NRW in „Verbleib in NRW“ und „Verbleib in den ande-

¹⁵ Ein Beispiel für solche Inkompatibilitäten ist die unterschiedliche Systemgrenze, die bei der Erstellung von Energiebilanzen und Luftschadstoffemissionsinventaren und bei der Erstellung von volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) verwendet werden. Während bei den beiden ersteren die Grenzen des Produktionssystems durch die geographischen Grenzen definiert werden (Territorialprinzip), wird bei den VGR der Wirtschaftsraum betrachtet (Residenzprinzip). Bei der Ermittlung der Nachhaltigkeit von Produktionsaktivitäten, bei welchen der Transport von Waren und Personen eine wichtige Rolle spielt, können solche konzeptuellen Unterscheide weitreichende Konsequenzen haben, insbesondere wenn das untersuchte Produktionssystem auf den Import von Rohstoffen und Vorprodukten angewiesen und durch den Export von Produkten charakterisiert ist. Im Falle der CO₂-Emissionen kann beispielsweise die Nichtbeachtung dieser Inkompatibilitäten in Zusammenhang mit der Untersuchungsperspektive (Produktions- oder Konsumperspektive) zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen führen.

ren Bundesländern (Export in die anderen Bundesländer)“. Daraus ließen sich ebenfalls die Importe aus den anderen Bundesländern (RD) ableiten.

3 | *Verfeinerung der Produktionsverflechtungsmatrix für NRW*

Die nötige Verfeinerung beruht auf der Spezifizierung und Kalibrierung der abgeschätzten inländischen Produktionstechnologiematrix für NRW. Hierfür könnten Life Cycle Inventory Daten (z. B. aus der Ecoinvent-Datenbank, ergänzt um Daten aus der Industrie u. a.) genutzt werden.

4 | *Ermittlung der direkten sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekte der Produktion und des Konsums in NRW*

In diesem Schritt geht es um die Erstellung der Matrix der *direkten Auswirkungen* der Produktion in NRW, um die bereits ermittelten IOT (Schritte 1 bis 3) zu erweitern. Nur mit diesen beiden Matrizen ließe sich eine vollständige EIOT für NRW aufbauen. Für die Erstellung der Erweiterungsmatrix können Abschätzungen der direkten Auswirkungen der Produktion in NRW insbesondere für die relevantesten Branchen ebenfalls auf der Basis von Angaben pro produzierter Einheit (Life Cycle Inventory Daten) und Daten aus der Industrie in NRW durchgeführt werden. Die daraus resultierenden direkten Gesamtauswirkungen müssen anschließend kalibriert werden, wozu ebenfalls Life Cycle Inventory Daten, Daten aus der Industrie und andere offizielle Daten verwendet werden könnten.

Die einzelnen Schritte werden im Folgenden näher beschrieben.

Erstellung einer vorläufigen (monetären) Input-Output-Tabelle

Für die Erstellung einer ersten, vorläufigen NRW-bezogenen IOT oder zumindest einer Produktionstechnologiematrix können folgende Ansätze verwendet werden (siehe Schröder und Zimmermann (2014):

- 1 | Survey-Ansätze,
- 2 | Nonsurvey-Ansätze und
- 3 | Partial-Survey-Ansätze

Survey-Ansätze beruhen auf vollständig originären Daten aus verschiedenen statistischen Erhebungen der Produktions- und Konsumcharakteristika einer Region. Wegen der hohen Realitätsnähe und Datenqualität ist die Anwendung von Survey-Ansätzen auf der einen Seite empfehlenswert. Auf der anderen Seite ist sie zeit- und kostenintensiv. Die Erstellung von aktuellen regionalen IOT mittels der Anwendung dieses Ansatzes findet weltweit nur für wenige Regionen statt.

Nonsurvey-Ansätze beruhen dagegen auf plausiblen Annahmen und Schätzungen über die regionalen Produktions- und Konsumcharakteristika und auf verschiedenen Verhältnisangaben (z. B. Inputkoeffizienten), die aus den nationalen Input-Output-Tabellen abgeleitet werden. Die Erstellung von IOT auf der Basis von Nonsurvey-Ansätzen ist nicht nur kostengünstig, sie zeichnet sich im Vergleich zu anderen Verfahren auch durch eine deutlich kürzere Erstellungszeit aus. Diese Fakten führen dazu, dass in der Praxis häufig Nonsurvey-Ansätze verwendet werden. Die Übertragung der Transformationscharakteristika (Koeffizienten und Multiplikatoren sowie Absatzstruktur) in den Produktionssystemen der übergeordneten Ebene (nationale Ökonomie) auf die Produktionssysteme der untergeordneten Ebene (regionale Ökonomie) kann jedoch zu großen Verzerrungen der Zusammenhänge und Auswirkungen führen.

Für die Erstellung einer vorläufigen EIOT für NRW wird hier die Anwendung eines *hybriden Ansatzes* vorgeschlagen. Solche hybride Ansätze sind bekannt als *Partial-Survey-Ansätze*. Sie sind im Grunde Nonsurvey-Ansätze, die jedoch mit originalen Daten für die regionale Ökonomie verbessert bzw. durch sie ergänzt werden und damit eine höhere Qualität besitzen. Die Anwendung dieser Ansätze ermöglicht die Generierung belastbarer Ergebnisse mit einem vertretbaren Kosten- und Zeitaufwand.

Abschätzung des NRW-„Außenhandels“ sowie der Verwendung der inländischen Produktion von NRW

Eine EIOT für das Land NRW, die einen gewissen Grad an Qualität aufweist, soll sich durch eine realitätsnahe Abbildung der Außenhandelsbeziehungen kennzeichnen. Hierzu gehört nicht nur der Austausch von Gütern und Dienstleistungen mit dem Rest der Welt (deutsches Ausland), sondern auch mit den anderen Bundesländern. Dabei stellt die Abschätzung der NRW-Lieferungen in das übrige Deutschland sowie der NRW-Bezüge aus dem übrigen Deutschland eine hohe Herausforderung dar, da kaum bzw. keine Daten für ihre akkurate Quantifizierung bestehen. Eine der Ansätze, die sich für die Durchführung dieser Abschätzung empfiehlt, ist der hybride DEBRIOT-Ansatz.

Mittels der DEBRIOT Methode (*Double-Entry Bi-Regional Input-Output Tables*), die auf Boomsma und Oosterhaven (1992) zurückzuführen ist, können bi-regionale Lieferbeziehungen, also zwischen einer Region A (z. B. NRW) und dem Rest der Volkswirtschaft, bezeichnet als Region B (z. B. RD: restliches Deutschland), sektoral abgebildet werden. Als Datenquellen können hier eine Input-Output-Tabelle für die „nationale“ Ökonomie (IOT für DE) sowie eine Reihe survey-basierter Daten über die regionale Produktion und den regionalen Konsum verwendet werden. Die survey-basierte Datengewinnung für die Region orientiert sich vornehmlich an der Befragung regionaler Unternehmen zu den Zielregionen ihres Güterabsatzes, unterteilt in die eigene Region (NRW), die restliche Volkswirtschaft (RD) und die übrige Welt (Rest der Welt: RdW). Daten über die Herkunft der Vorleistungsbezüge der regionalen Unternehmen würden wesentlich zur akkurateren Abbildung der Produktionscharakteristika und Ermittlung der damit verbundenen globalen Auswirkungen beitragen. In der Praxis gestaltet sich die Erhebung dieser Daten jedoch als eine schwierige Aufgabe mit einer niedrigen Erfolgswahrscheinlichkeit.

Die Datensätze und Datenflüsse, die die Anwendung des DEBRIOT-Ansatzes zur Erstellung einer bi-regionalen IO-Tabelle für Deutschland: Region „NRW“ und Region „Restliches Deutschland“ voraussetzt und somit die Ermittlung einer vorläufigen Input-Output-Tabelle für NRW ermöglicht, lassen sich schematisch wie folgt darstellen.

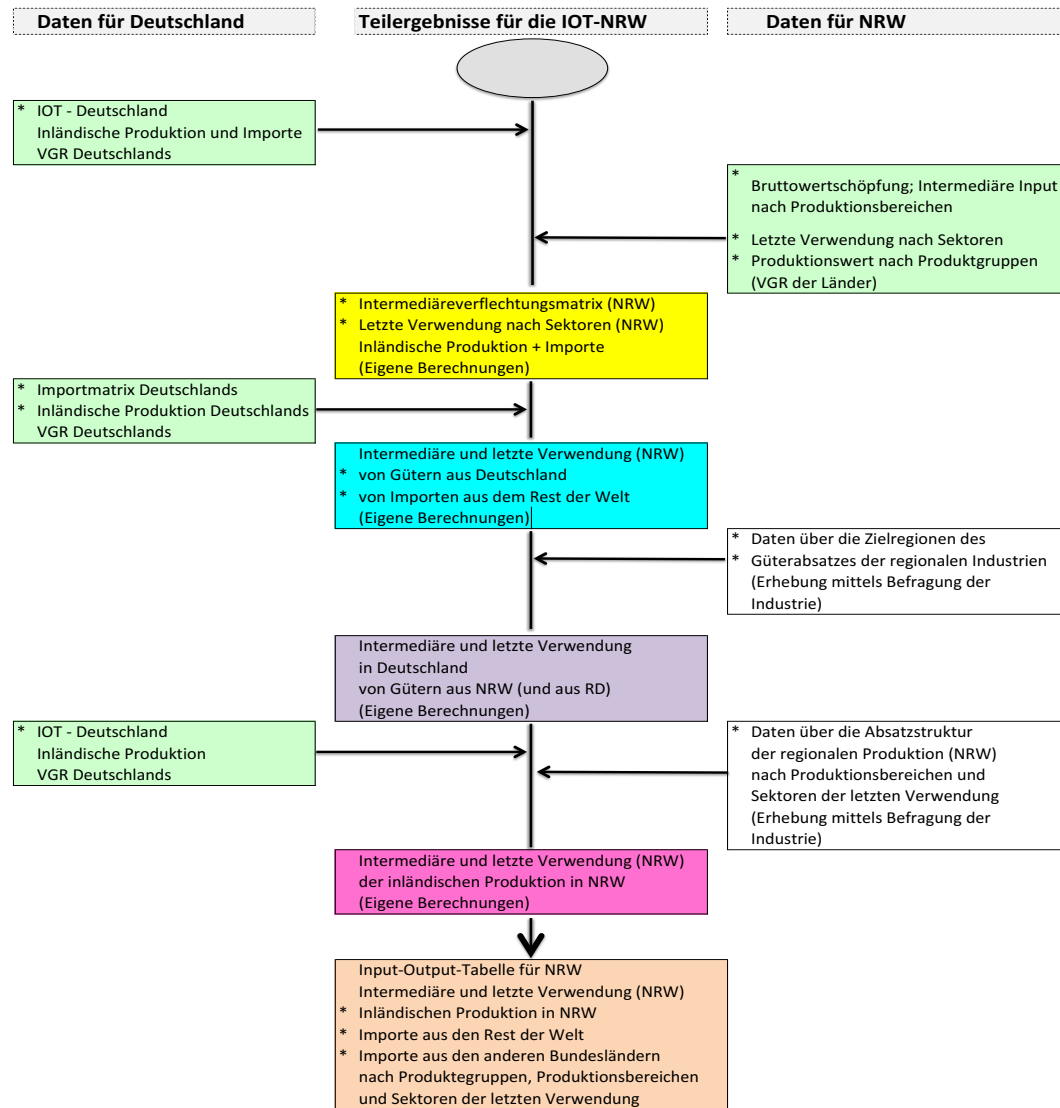


Abbildung 21 Anwendung der DEBRIOT-Methode für die Erstellung einer bi-regionalen Input-Output-Tabelle für Deutschland: NRW und RD (restliches Deutschland)

Quelle: Eigene Darstellung

Verfeinerung der Produktionsverflechtungsmatrix für NRW

Die erstellte vorläufige IOT für NRW bildet grob die Produktions- und Konsumstruktur im Land NRW ab. Gegenüber den Ergebnissen, die aus der Anwendung der bisherigen Ansätze für das Herunterbrechen der „durchschnittlichen“ Transformationscharakteristika der gesamten Bundesrepublik Deutschland auf NRW resultieren, stellt sie eine erhebliche Verbesserung dar. Sie ist jedoch noch weit davon entfernt, die regionale Produktionstechnik abzubilden. Die vorläufige IOT für NRW ist also noch nicht geeignet, um eine akkurate Ermittlung der Auswirkungen der Produktion- und Konsumaktivitäten in NRW durchzuführen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es erforderlich, sie auf die Input-Output Verhältnisse zu kalibrieren, welche die Produktion der regionalen Industrie charakterisieren.

Für die angestrebte Kalibrierung kann eine Vorgehensweise genutzt werden, die auf der Verwendung von Daten der Mikro-Ebene beruht. Den Ausgangspunkt hierfür stellen formalisierte Angaben über die Produktionstechnik pro Einheit Produkt für die

verschiedenen Produkte bzw. Produktgruppen dar, die in NRW produziert werden. Der Schwerpunkt liegt hier insbesondere auf der Darstellung der Produktionstechnik derjenigen Produkte, die eine hohe Relevanz für die Wirtschaft des Landes NRW haben. Dies trifft insbesondere auf die energieintensive Grundstoffindustrie zu. Abbildung 22 zeigt beispielhaft eine Darstellung derjenigen Input- und Output-Flüsse, die bei der Produktion einer Tonne Stahl in einem Sauerstoffkonverter anfallen. Eine generische Beschreibung der Produktionsverhältnisse kann üblicherweise Ökobilanz-Datensätzen entnommen werden, z. B. der Ecoinvent-Datenbank. Diese müssten ggf. auf die jeweils betrachteten Prozesse vor Ort in NRW angepasst werden, wozu Daten aus der Industrie u. a. benötigt würden.

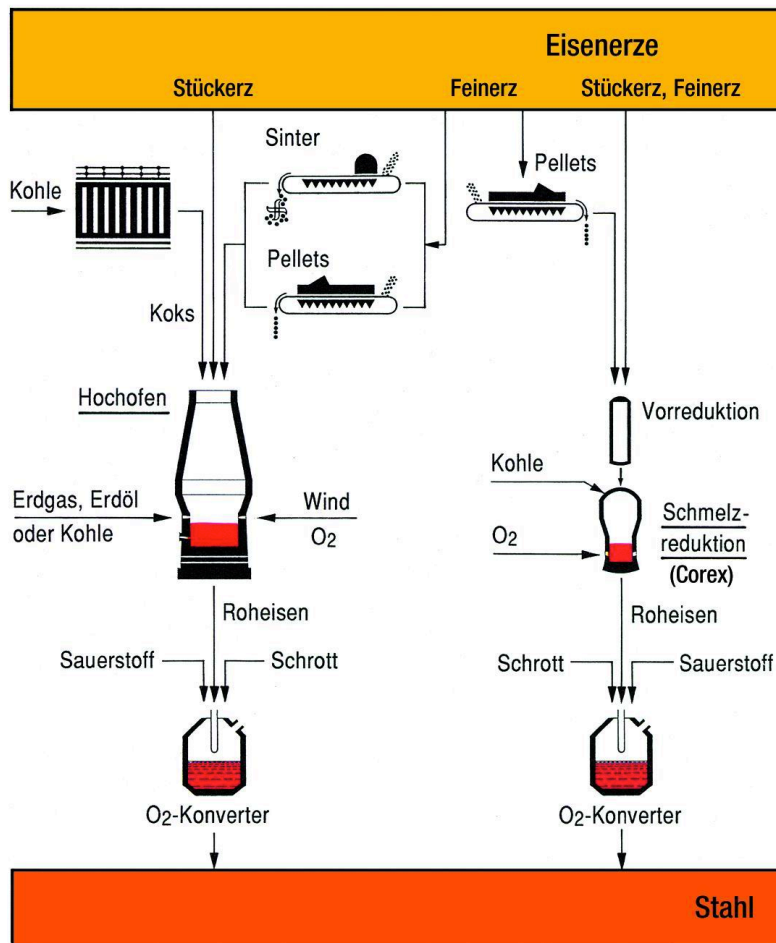


Abbildung 22 Vereinfachte schematische Darstellung der Stahl-Produktionstechnik im Sauerstoffkonverter durch den Weg vom „Eisenerz zum Stahl“

Quelle: Stahl-online.de (2013)

		P-01 Sinter	P-02 Pellets	P-03 Koks	P-04 Elektrizität	P-05 Roheisen	P-06 Stahl (Flüssig)	P-07 Andere Produkte
Inputs	Unit							
Industrielle Hauptprodukte								
P-01 Sinter	t/t					1,10		
P-02 Pellets	t/t					0,33		
P-03 Koks	t/t	0,05	0,01			0,35		
P-04 Elektrizität	MJ /t	105,00	89,50	95,00		320,00	79,00	
P-05 Roheisen	t/t						0,94	
P-06 Stahl (Flüssig)	t/t							
P-07 Andere Produkte	t/t	0,03						0,01
Industrielle Nebenprodukte								
Wiederverw. Materialien	t/t	0,32						0,17
Andere energ.Reststoffe (COG,BFG)	MJ /t	128,50	398,70	3550,00		2190,00		
Primärinputs aus der Umwelt								
Metallerze								
Eisenerz	t/t	0,84	0,94			0,21	0,16	
Andere Erze	t/t							
Mineralien								
Kalk	t/t	0,11	0,00			0,01	0,04	
Bentonit	t/t		0,01					
Olivin	t/t		0,03					
Dolomit	t/t		0,03					0,00
Fossilenergieträger								
Kohle	t/t		0,01	1,29		0,11	0,00	
Erdgas	MJ /t		209,00			140,00	37,50	
Andere								
O2 (Luft)	Nm3 /t		10,70	11,00		50,00	58,31	
Wasser	m3 /t	0,06	0,81	0,69		2,17	2,75	

		P-01 Sinter	P-02 Pellets	P-03 Koks	P-04 Elektrizität	P-05 Roheisen	P-06 Stahl (Flüssig)	P-07 Andere Produkte
Outputs	Unit							
Hauptprodukte								
Einheit Produkt-(Output)	t	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Nebenprodukte /Reststoffe								
Andere energ.Reststoffe (COG,BFG)	MJ /t			9230,00				
Luftschadstoffe	t/t	0,26	0,03	0,56		0,53	0,12	
Abfall (Schlacken, Schlamm etc.)	t/t					0,40	0,14	
Abwasser	m3 /t	0,13	0,80	0,35		2,42	2,66	

Abbildung 23 Vereinfachte Darstellung ausgewählter Inputs und Outputs, die die Herstellung von Stahl im Sauerstoffkonverter technisch bedingen: Abbildung der Input- und Output-Mengen, die die Produktion einer Tonne Produkt charakterisieren

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Daten entnommen aus European Commission (o. J.)

Die Angaben pro Einheit Output können in einer NRW-spezifischen „Technologie-Matrix“ (SEE-TM = Socioeconomic and Environmentally Extended Technology-Matrix) zusammengestellt werden, ergänzt um ihre sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen. Abbildung 23 zeigt dies am Beispiel der Darstellung der „Produktionstechnik“ (d. h. der Inputs für die Produktion einer Einheit Output) für die Produkte Kohle, Stahl, Strom und Automobile. In der Spalte für Stahl werden beispielsweise in der oberen Matrix alle Inputmengen dargestellt, die für die Herstellung eine Tonne Stahl eingesetzt werden müssen. Auf der gleichen Spalte in der unteren Matrix werden dagegen die direkten sozioökonomischen und umweltbezogenen Auswirkungen zusammengetragen, die mit der Produktion einer Tonne Stahl verbunden sind.

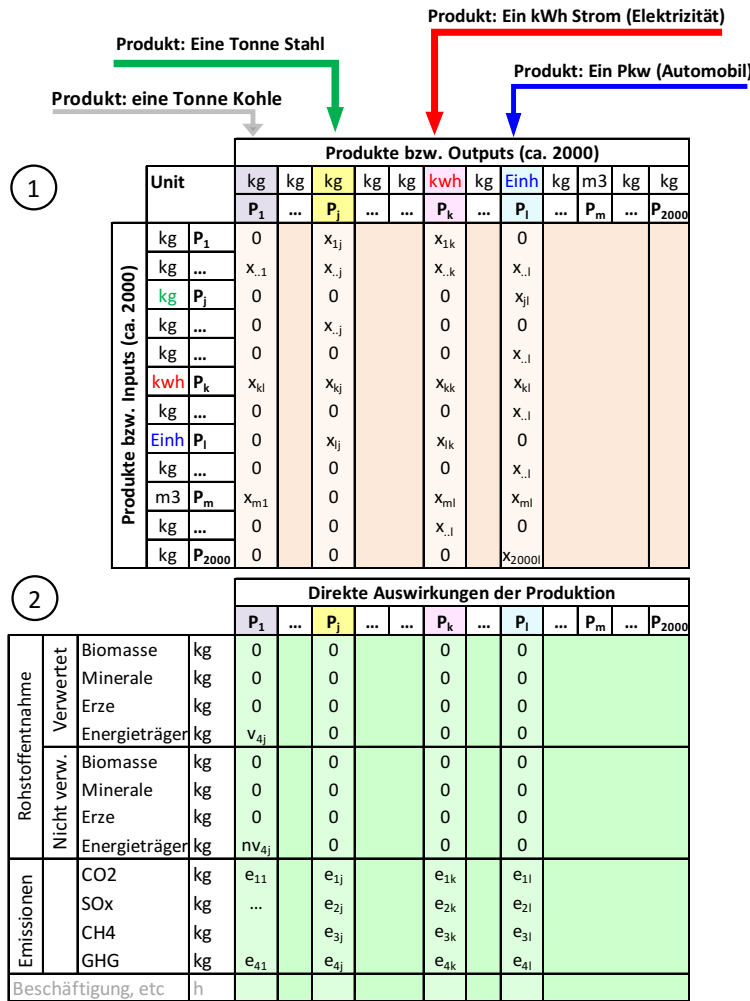


Abbildung 24 Erweiterte NRW-spezifische Produktionsverflechtungsmatrix: Anpassung der SEE-TM (sozioökonomische und umweltbezogene Ergänzung der Technologiatrix) für NRW

Quelle: Eigene Darstellung

Für den Aufbau der SEE-TM Matrix können ebenfalls Datensätze aus bestehenden LCI-Datenbanken verwendet werden. Auf diese Weise wird zunächst eine Produktionsverflechtungsmatrix erstellt, in welcher die abgebildeten Abgaben pro Einheit Output nicht regionalspezifisch sind. Diese allgemeingültigen Angaben können dann in einem nächsten Schritt mit repräsentativen Angaben für die regionale Industrie ersetzt werden (siehe Abbildung 24, rechte Seite oben). Dadurch erfolgt eine Kalibrierung bzw. Spezifizierung der SEE-TM auf die Transformationscharakteristika im Land NRW.

Eine an die Produktionscharakteristika NRWs angepasste Version der SEE-TM bildet die Grundlage für die Erstellung einer EIOT für NRW und somit einem regionalen produktbezogenen Informationssystem, das die Beantwortung von Fragestellungen im Kontext der nachhaltigen Produktion und der letzten Verwendung von Produkten auf der Mikro-, Meso-, und Makroebene ermöglichen würde.

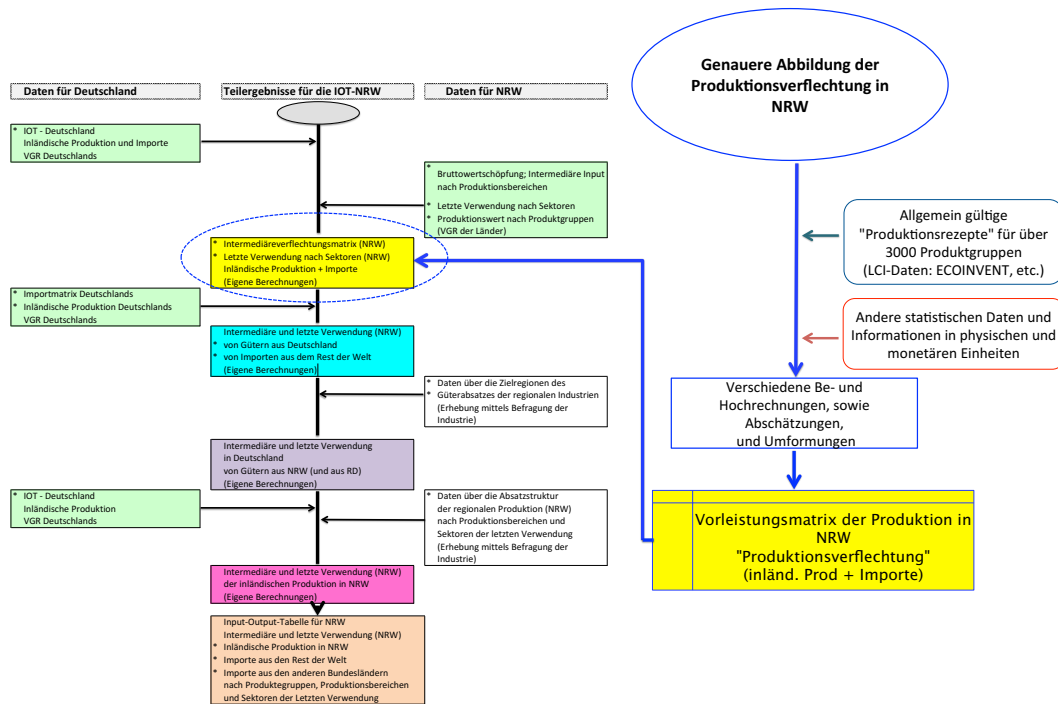


Abbildung 25 Verfeinerung der Produktionsverflechtungsmatrix der Input-Output-Tabelle NRW: weitere Kalibrierung auf die regionalen Produktionscharakteristika

Quelle: Eigene Darstellung

Ermittlung der direkten sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekte der Produktion und des Konsums in NRW

Die in der NRW-spezifischen SEE-TM enthaltenen Daten bezüglich der sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekte beziehen sich bisher nur auf eine Einheit Produkt. Sie müssen anschließend mit Hilfe von Angaben über ihre regionale Produktionsmenge auf ganz NRW hochskaliert werden (siehe Abbildung 25, rechte Seite). Auf dieser Weise können die gesamten direkten sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekte der Produktionsaktivitäten in NRW ermittelt werden. Die Durchführung dieser Hochrechnung für jede Branche würde unter Berücksichtigung der tatsächlichen Produkt-Mixe und des Produktionsniveaus in der Region erfolgen.

Da in jeder Region eine Vielzahl von Produkten produziert werden können, können diese ersten Abschätzungen ihrer Auswirkungen Unter- bzw. Überschätzungen darstellen. Um dies zu überprüfen, wären die ermittelten Auswirkungen in einem anschließenden Schritt bestehenden Statistiken für die verschiedenen Branchen gegenüberzustellen, so dass notwendige Kalibrierungen und Anpassungen an die entsprechenden Angaben für die übergeordneten Ebenen bzw. für das Land NRW erfolgen können.

Der gesamte Datenfluss für die Abschätzung der erweiterten Produktionsverflechtungstabelle für NRW ist in Abbildung 27 zusammengefasst.

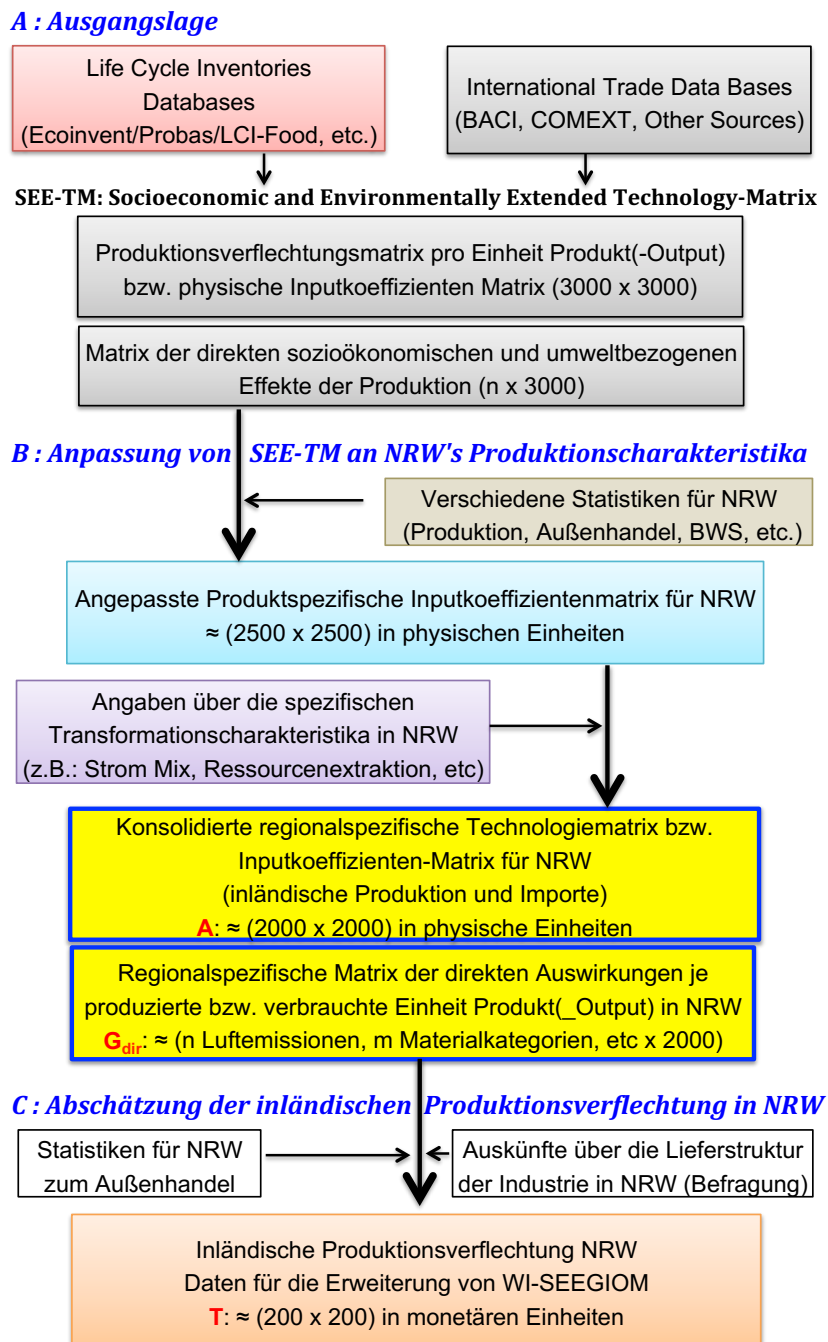


Abbildung 26 Datenflussdiagramm für die Verfeinerung der Produktionsverflechtungsmatrix

Quelle: Eigene Darstellung

1.2.6 Konzept für die mögliche Verknüpfung und Integration der NRW-EIOT in eine multiregionale Input-Output-Tabelle

Um eine geographische Zuordnung der globalen Auswirkungen der Produktions- und Konsumcharakteristika in NRW als Resultat der internationalen Arbeitsteilung abbilden zu können, ist es notwendig, die NRW-EIOT als Ergebnis der Anwendung der beschriebenen Vorgehensweise mit einer bestehenden multiregionalen Input-Output-Tabelle (EMRIOT) zu verknüpfen. Ein Weg hierfür wäre die Integration der NRW-EIOT in das dafür zu verwendende multiregionale Tabellensystem. Verwendet

werden könnte z. B. die Datenbasis, die WI-SEEGIOM zugrunde liegt. WI-SEEGIOM besteht aus zwei Kernkomponenten:

Bezüglich der *Darstellung der globalen Wirtschaft* beruht WI-SEEGIOM auf der finalen Version von EXIOBASE (Version 3.3), die das WI als Konsortialpartner in den früheren EU-Projekten EXIOPOL, CREEA und DESIRE nutzen kann. EXIOBASE umfasst 200 Produktgruppen, 163 Industriezweige, 222 biotische und abiotische Rohstoffe, 59 Energieträger, 417 verbrennungs- und nichtverbrennungsbedingte Emissionen (28 energiebedingte Emissionen) sowie 4 Typen von Flächen und 3 Typen von Wasserverbrauch. Die daraus entstehenden erweiterten multiregionalen Input-Output-Tabellen und das dazugehörige Modell ermöglichen damit erheblich umfangreichere Auswertungen, als mit anderen Input-Output-Modellen möglich sind. Insgesamt werden 45 Länder abgedeckt, die ca. 85 % der Weltwirtschaftsleistung umfassen. Die nicht erfassten Länder werden unter Rest of World (RW) subsummiert, die wiederum in fünf Weltregionen unterteilt sind. Alle in WI_SEEGIOM bzw. EXIOBASE abgebildeten Weltregionen (Länder) sind miteinander verknüpft. Dies erfolgt durch die vollständige Darstellung der globalen Außenhandelsströme. Für jede Weltregion wird die Verwendung der importierten Güter sowohl in der Produktions- als auch in der Konsumsphäre nicht nur nach Verwendungsbereichen, sondern auch nach der geographischen Herkunft der Produkte abgebildet. Diese Informationen über das Herkunftsland der von jeder Weltregion (Land) importierten Güter ermöglicht andererseits die geographische Zuordnung der ermittelten gesamten Auswirkungen.

Hinsichtlich der Abbildung der *Charakteristika von neuen umweltfreundlichen Technologien* sowie von veränderten *nachhaltigen Produktions- und Konsummustern* beruht WI-SEEGIOM auf weiteren Datensätzen und Modellberechnungen, die im Rahmen von Satelliten-Modulen durchgeführt werden (bspw. Stromerzeugung durch erneuerbare Energien).

Die Integration der NRW-EIOT in die MRIOT von WI-SEEGIOM bzw. EXIOBASE erfordert im Wesentlichen zwei Schritte:

- 1 | Unterteilung der Importe von NRW aus dem deutschen Ausland und der Exporte von NRW ins deutsche Ausland. Dies würde auf der Grundlage von detaillierten Handelsstatistiken erfolgen. Durch diesen Schritt würden die Import- und Export-Flüsse für Deutschland, die in WI-SEEGIOM abgebildet sind, ebenfalls mittels Differenz ermittelt. Auf diese Weise ließen sich die Matrizen in EXIOBASE, in welchen die intermediäre Verwendung und die letzte Verwendung für ganz Deutschland abgebildet sind, in zwei sich ergänzenden Matrizen unterteilen. Die Summe beider Matrizen ergibt wiederum die Produktions- und Konsumcharakteristika für ganz Deutschland. Das gleiche Verfahren wäre für die sozioökonomischen und umweltbezogenen direkten Auswirkungen anzuwenden (siehe Abbildung 27).
- 2 | Substitution der Matrizen in EXIOBASE, in welchen die intermediäre Verwendung und die letzte Verwendung für ganz Deutschland abgebildet sind, durch die unterteilten Matrizen, in welchen einerseits die Produktions- und Konsumcharakteristika von NRW und andererseits der anderen Bundesländern insgesamt abgebildet sind (siehe Abbildung 28).

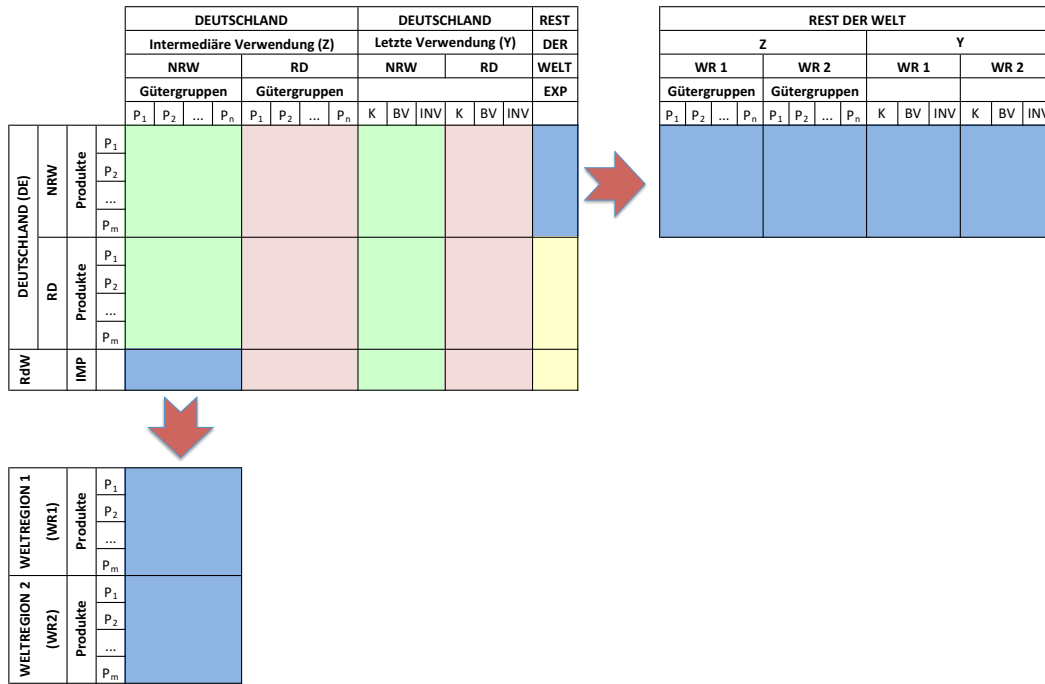


Abbildung 27 Unterteilung der nach NRW importierten und von NRW exportierten Produkte außerhalb Deutschlands

Quelle: Eigene Darstellung

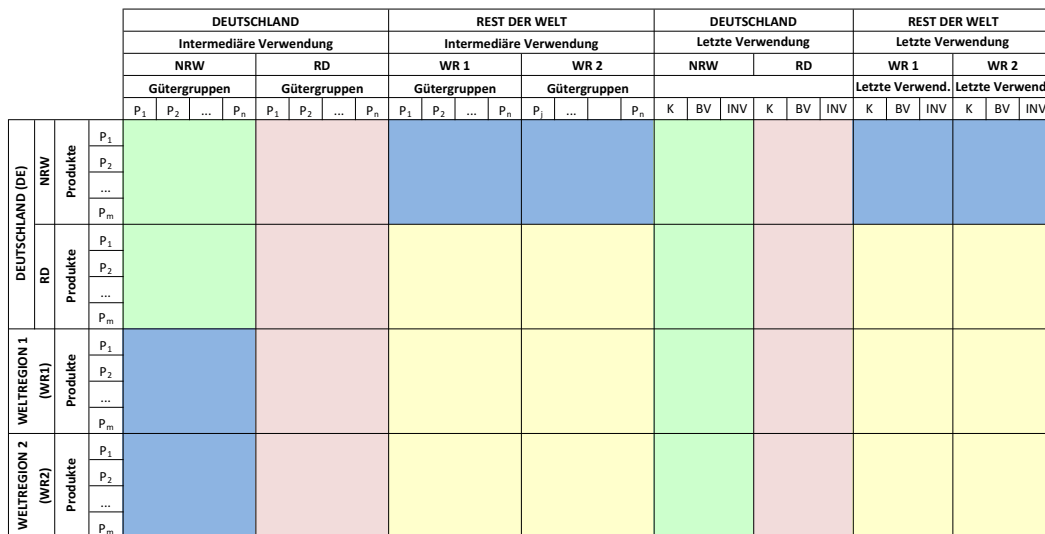


Abbildung 28 Integration der erweiterten Input-Output-Tabelle NRW im multiregionalen erweiterten Input-Output-Modell des Wuppertal Instituts (WI-SEEGIOM)

Quelle: Eigene Darstellung

1.2.7 Datenerfordernisse

Allgemeine Einschätzung

Die Durchführung der EIOA auf der Basis von erweiterten Input-Output-Tabellen führt zu einer soliden Abschätzung der globalen Auswirkungen der Produktions- und Konsumaktivitäten in einem Produktionssystem. Im Falle von Produktionssystemen unterhalb einer Nationalökonomie ist die Anwendung dieses analytischen Instru-

mentariums jedoch nur in wenigen Ausnahmefällen möglich, da hierfür die entsprechenden „regionalspezifischen“ EIOT fehlen.

Die Daten auf der *Mikroebene bzw. Produktebene* stellen das Fundament der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise für die Erstellung einer EIOT für das Land NRW dar. Diese Datensätze beinhalten zum einen Angaben über die Produktionstechniken¹⁶, die in NRW für die Herstellung bestimmter Produkte tatsächlich angewendet werden. Zum anderen sind in diesen Datensätzen Angaben über Transformationstechnologien enthalten, die eine „allgemeine“ Gültigkeit haben, jedoch nicht NRW-spezifisch sind. Hierbei handelt es sich um Angaben über Produktionstechniken für Produkte, die in NRW produziert werden, aber für welche keine NRW-spezifischen Daten zur Verfügung stehen. Die Nutzung dieser Daten für diesen Zweck beruht insofern auf der Annahme, dass die in NRW angewandte Produktionstechnik für solche Produkte mit Hilfe dieser Daten zumindest annäherungsweise wiedergegeben wird.

Beide Datensätze haben einen repräsentativen und umfassenden Charakter. Dies wird dadurch bedingt, dass sie sich nicht auf eine spezielle Produktionstechnik beziehen, die in einer einzelnen Industrie (z. B. in einem ganz spezifischen Stahlwerk einer spezifischen Region NRW) oder zur Erzeugung eines einzelnen Produkts angewendet wird (z. B. einer Tonne Stahl bestimmter Legierungszusammensetzung), sondern auf eine generische Produktionstechnik (z. B. alle Stahlwerke in Deutschland) oder eine generische Produktgruppe (z. B. eine Tonne Stahl unbestimmter Legierungszusammensetzung).

Die Produktions- und Konsumdaten auf der *Meso- und Makroebene* dienen ihrerseits zwei Zwecken.

Zum einen stellen sie den produktspezifischen Skalierungsfaktor für die Hochrechnung von Gesamteffekten dar. Hierfür können produktspezifische Angaben über die Gesamtproduktion und den Gesamtkonsum im Land NRW mit den entsprechenden Produktionstechniken einschließlich der damit verbundenen direkten Auswirkungen kombiniert werden. Denn nur mit Hilfe dieser Angaben für die Makroebene können die Daten für die Mikroebene zur Abschätzung der sozioökonomischen und umweltbezogenen Gesamtauswirkungen der Produktion und Konsum in NRW führen.

Zum anderen stellen sie Hilfsgrößen für die korrekte Dimensionierung und Überprüfung der Abschätzung der Auswirkungen im Land NRW dar. Dies trifft insbesondere auf die Angaben über die Charakteristika der Produktion und den Konsum auf der nationalen Ebene oder in ausgewählten Branchen zu. Mittels der Verwendung dieser Hilfsgrößen (wie z. B. der Gesamtproduktion einer Branche in NRW, des regionalen Strom-Mixes, des gesamten nationalen Konsums eines Produkts, des gesamten Ressourcenverbrauchs in Deutschland etc.) können zum einen das Produktionsverflechtungsmodell an die Charakteristika der Transformation in NRW angepasst und zum anderen die zulässige Ober- und Untergrenze für die Ergebnisse der Abschätzung der Effekte in NRW festgelegt werden. Für die Produkte, die in NRW produziert bzw.

¹⁶ Wie bereits erläutert, besteht die Wiedergabe der Produktions- bzw. Transformationstechnik in der systematischen Zusammenstellung aller notwendigen Inputs einschließlich der relevantesten Ressourcenentnahme (z. B. Eisenerz) für die Produktion einer Einheit Produkt(-Output) zuzüglich die Reststoffabgabe in die Natur (z. B. CO₂).

konsumiert werden und für die keine Angaben auf der Mikroebene bestehen, können solche Daten auf der Meso- und Makroebene ebenso als Ersatzgrößen für die Produktionstechnologien und den Output verwendet werden.

Zusammenfassend werden im Folgenden mögliche Datenquellen für die oben beschriebenen Anforderungen beschrieben.

Datenquellen auf der Mikroebene

Auf der Mikroebene (d. h. auf der Ebene der Produkte bzw. einzelner Industrien) kommen im Wesentlichen zwei Datenquellen in Betracht:

1 | *Direkte Auskünfte aus den Industriebranchen in NRW*

Diese Auskünfte umfassen zum einen die Charakteristika der angewandten Produktionstechniken, die für die entsprechenden Industriebranchen in NRW „repräsentativ“ sind, sowie die produktspezifische regionale Gesamtproduktion. Zum anderen umfassen sie Angaben über die Herkunftsstruktur der verschiedenen Inputs sowie über die Verbleibstruktur der Outputs (d. h. Anteil von NRW, Anteil der anderen Bundesländer, Anteil von Rest der Welt). Insbesondere die Verbleibanteile stellen relevante Angaben für die geographische Zuordnung der Ursachen des Fußabdrucks von NRW sowohl aus Produktions- wie auch Konsumerspektive dar.

2 | *Bekannte LCI-Datenbanken (wie Ecoinvent, LCI-FOOD u. a.)*

Diese können als Ersatzquellen für Angaben über die Charakteristika „repräsentativer“, jedoch nicht-NRW spezifischer Produktionstechnologien genutzt werden. Viele LCI-Daten gelten für mehrere Weltregionen und berücksichtigen keine regionalspezifischen Merkmale der angewandten Produktionstechniken. Sie können hier jedoch zur Abbildung der Transformationstechnik von Inputs in Outputs für Produkte genutzt werden, die zwar in NRW produziert werden, für welche aber keine direkten Daten aus der Industrie zugänglich sind. Die Angaben in den LCI-Datenbanken sind generell in physischen Einheiten ausgedrückt und geben die Einsatzmenge der verschiedenen stofflichen und energetischen Materialien (sei es in Form von Rohstoffen oder aufbereiteten Vorleistungen) je Einheit Produkt an. Da das Ziel die Erstellung einer EIOT für NRW ist, die mit den Produktions- und Konsumaktivitäten in den anderen Bundesländern und in anderen Regionen der Welt verknüpft werden soll, sind Angaben über Produktpreise notwendig, um von den LCI-Daten Gebrauch zu machen. Mit Hilfe der Produktpreise kann die Darstellung der Produktionstechnik in monetären Einheiten erfolgen. Diese monetären Darstellungen, bei welchen alle Inputs und Outputs in einer Währung (Euro) ausgedrückt sind, sind zusammen mit den direkten umweltbezogenen Auswirkungen die Basis für den Aufbau der EIOT für NRW.

Mit Ausnahme der Daten über die Produktionstechnik, die in NRW angewendet wird, sind die meisten der aufgelisteten Datensätze der Mikroebene verfügbar. Im Falle der „allgemein“ gültigen LCI-Datensätze ist ihre Verwendung an den Erwerb einer Lizenz der entsprechenden Datenbank gebunden. Darüber hinaus benötigen sie aufgrund einiger Darstellungsmerkmale und Rechnungskonventionen zunächst bestimmte Überprüfungen und Anpassungen, bevor sie zum Zweck der EIOT für NRW verwendet werden können. Dies setzt die Durchführung einer sorgfältigen Aufbereitung und Validierung voraus, so dass sie als kompatibel mit den Randgrößen aus der

Meso- und Makroebene angesehen und in Abstimmung mit den Experten und Vertretern der regionalen Industrie als „repräsentativ“ für das Land NRW erachtet werden können.

Datenquellen auf der Meso- und Makroebene

Auf der Meso- und Makroebene (d. h. auf der Ebene der Branchen bzw. gesamten Ökonomien) kommen im Wesentlichen drei Datenquellen in Betracht:

- 1 | *Verschiedene Publikationen und weitere Datensätze von IT.NRW und DESTATIS*
Diese Quellen sind die Hauptquellen für Angaben über die Produktions- und Konsummengen im Land NRW sowie für die Randgrößen der damit verbundenen direkten sozioökonomischen und umweltbezogenen Effekte (z. B. Inländische Rohstoffextraktion, Energieaufkommen und -verwendung, Luftschadstoffemissionen, Beschäftigung, Bruttowertschöpfung etc.). Darüber hinaus können Angaben über die spezifischen Transformationscharakteristika in NRW aus verschiedenen Publikationen von anderen fachlichen Ressorts und Ministerien des Landes NRW verwendet werden. Angaben über den Strom-mix in NRW können beispielsweise aus dem Energieatlas NRW vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW entnommen werden.
- 2 | *Offizielle nationale Input-Output-Tabellen und Datensätze der Umweltökonomischen Gesamtrechnung von DESTATIS und EUROSTAT sowie diverse Produktions- und Außenhandelsstatistiken und Daten für Deutschland in internationalen Datenbanken wie PRODCOM und COMEXT von Eurostat, Industriestatistiken der UN, Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO), Internationale Energieagentur (IEA) etc.*
Die aus diesen Quellen benötigten Informationen sind Daten in physischen und monetären Einheiten über die Produktionsmenge bzw. den Output sowie über den Import bzw. Export einzelner Produkte bzw. Produktgruppen. Auf der Basis dieser Daten können grobe technische Proportionen von Inputs, welche ersatzweise bei fehlenden spezifischeren Angaben verwendet werden können, oder die zulässigen Grenzen für die Abschätzung bestimmt werden.
- 3 | Darüber hinaus können die im Rahmen verschiedener europäischer (FP7-) Forschungsprojekte wie DESIRE entstandenen multiregionalen monetären und physischen Input-Output-Tabellen und umweltbezogenen Erweiterungen verwendet werden. Diese Datensätze sind in einigen Fällen öffentlich zugänglich. Ihre Anwendung für diesen Zweck bedarf jedoch einer intensiven und zeitaufwendigen Aufbereitung. Eine Einschätzung der Verfügbarkeit und Zugänglichkeit der spezifischen Daten für NRW ist weiter unten erläutert.

1.2.8 Zusammenfassung und F&E-Empfehlungen als Basis für Nachfolgeprojekte

Aus den hier erläuterten methodischen Schritten für die Erstellung einer EIOT für NRW lässt sich erkennen, dass der Aufbau einer NRW-spezifischen „erweiterten Technologie-Matrix“ (SEE-TM) ein breites Anwendungsspektrum hat. Diese könnte insbesondere dazu dienen, viele der Probleme und Schwierigkeiten der Berichterstattung bezüglich der Nachhaltigkeit bzw. nicht-Nachhaltigkeit von Produktionsaktivitäten sowohl auf der Bundesebene als auch auf der Ebene von Regionen zu überwinden. Somit wäre der Weg zur Berechnung von regionalspezifischen und produkt-

gruppenspezifischen Fußabdruck-Kennziffern und anderen Indikatoren geebnet (z. B. bezüglich des CO₂-Fußabdrucks, THG-Emissionen, Rohstoffinput etc.).

Es könnten ebenso Aussagen über die Inanspruchnahme der Umwelt bzw. über die sozioökonomischen Effekte der Transformation in den regionalen oder sogar lokalen Ökonomien (wie z. B. das gesamte Ruhrgebiet oder das Stadtgebiet Düsseldorf) getroffen werden. Für solche Produktionssysteme bestehen in der Regel – mit Ausnahme von einzelnen Fällen – so gut wie keine Informationen über die Nachhaltigkeit der gesellschaftlichen, materiellen und energetischen Transformation, die in ihnen stattfindet. Um auch für Produktionssysteme dieser Größenordnung solche Nachhaltigkeitsindikatoren ermitteln zu können, kommt es insbesondere auf die Verfügbarkeit der Angaben sowohl über die angewandte Produktionstechnik als auch über die produktspezifische Gesamtproduktion bzw. den Gesamtverbrauch in einer Region oder einer Stadt an.

Alle Fragestellungen, die darauf abzielen, den Energieverbrauch bzw. die Luftemissionen (z. B. CO₂-Emissionen) zu ermitteln, die mit der „inländischen“ Gesamtproduktion bzw. Gesamtverwendung von konkreten Produkten wie z. B. Stahl, PKW, etc. verbunden sind, könnten unter Berücksichtigung der tatsächlichen regionalen Transformationscharakteristika beantwortet werden. Auf der Basis von Daten über die Wiederverwertung von bestimmten Produkten bzw. Materialien können ebenfalls Recyclingeffekte pro Einheit Output gesamtwirtschaftlich errechnet werden.

Ein derartiges Analysegerüst würde darüber hinaus Modellierungsarbeiten zu den Auswirkungen künftiger veränderter produktspezifischer Produktions- bzw. Verbrauchsmengen ermöglichen. So könnten z. B. Fragestellungen nach der Veränderung der THG-Emissionen und der Materialentnahme aus der Natur bzw. der Importmengen als Effekt der Verwendung eines alten PKWs für die Wiedergewinnung von Stahl oder einer Tonne Altpapier für energetische Zwecke modelliert werden.

Alle diese Analysemöglichkeiten würden wiederum zu konkreteren und präziseren Schlussfolgerungen über die produktspezifische, ineffiziente bzw. optimale und effiziente Nutzung von Ressourcen und die damit verbundenen THG-Emissionen führen. Ebenso könnte die Entwicklung von Politiken auf der Basis von produktspezifischen Informationen gezielter und wirkungsvoller gestaltet werden.

Über die Berücksichtigung verschiedener länderspezifischer Produktionstechnologien für die Erzeugung eines bestimmten Produkts könnten die Auswirkungen ermittelt werden, die sich aus den verschiedenen Produktionsweisen bzw. aus der Verwendung einer auf diese Weise produzierten Einheit Output ergeben. Auf diese Weise könnten die „Innovationseffekte“ neuer Technologien sowie Verbesserungspotenziale bestehender Technologien pro Einheit Output ermittelt werden. So könnten beispielsweise die THG-Emissionen, der Ressourcenverbrauch, die Bruttowertschöpfung oder die Beschäftigungseffekte ermittelt werden, die mit der Erzeugung von einer kWh Elektrizität mittels Photovoltaik, Wind, Wasser, Kohle, Gas etc. oder mit der Produktion einer Tonne Stahl mittels ein neues Verfahrens verbunden sind.

Ausgehend von den regionalspezifischen Produktionstechnologien und der Herkunft der einzelnen Produkte könnten die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von festgelegten politischen Zielen evaluiert werden. So könnte zum Beispiel ermittelt werden, zu welchen globalen THG-Emissionsminderungen, Ressourcenverbräuchen o-

der Beschäftigungseffekten die Anwendung von Low-Carbon Technologien in der energieintensiven Grundstoffindustrien führen würde.

Darüber hinaus würden sich die auf diese Weise ermittelten Kennziffern und gezogenen Schlussfolgerungen von ähnlichen Kennziffern und Analysenergebnissen, die mit anderen Methoden berechnet werden, deutlich unterscheiden. Hierfür spricht den gesamtwirtschaftliche Kontext, in welchem sie berechnet bzw. abgeleitet werden¹⁷.

Die konkrete Weiterentwicklung des Modells zur Anwendung auch auf der Landesebene von NRW setzt jedoch zunächst drei wesentliche Punkte voraus:

- 1 | *Die Verfügbarkeit kritischer Daten auf Bundesebene und Landesebene*
Hierzu ist der fachliche Austausch mit DESTATIS und IT.NRW und eine erweiterte Zugriffsmöglichkeit auf bestehende Daten aus der amtlichen Statistik erforderlich.
- 2 | *Die Verfügbarkeit von produktgruppen- bzw. branchenspezifischen Daten aus der Industrie*
Dies trifft insbesondere auf die Darstellung der durchschnittlich angewandten Produktionstechnik in den regionalen Industrien bestimmter Branchen sowie die Lieferstruktur der Produktion zu.
- 3 | *Finanzierung weiterer Forschungs- und Entwicklungsprojekte*
Die in diesem Kapitel skizzierte Vorgehensweise stellt eine Basis für die Entwicklung eines erweiterten Input-Output-Modells für NRW dar. Es bedarf nun weiterer F&E-Projekte, um dieses Konzept methodisch zu implementieren und an ausgewählten Beispielen (Fallstudien) zu testen, bevor es auf die oben genannten Fragestellungen angewandt werden kann.

¹⁷ Abschätzungen solcher Effekte mittels der Anwendung anderer Ansätze wie beispielsweise die LCA werden in der Regel nicht in einem gesamtwirtschaftlichen Kontext durchgeführt. Hierfür werden die analytischen Grenzen des damit verbundenen Produktionssystems enger als bei dem Input-Output-Analyse-Ansatz definiert. So werden beispielsweise die Auswirkungen der Inanspruchnahme von Dienstleistungen, die ebenfalls wichtige indirekte Inputs darstellen können, nicht berücksichtigt.

2 AP2: Herausforderungen zukünftiger klimaneutraler Energiesysteme & Technologie-Entwicklungen in der Industrie

2.1 Motivation und Ziel-/Aufgabenstellung

Mit der Energiewende in Deutschland sind fundamentale Änderungen der Energie- und Stromversorgung verbunden. Diese werden im Zeitverlauf (hier zunächst bis zum Jahr 2050) in verschiedenen Ausprägungen und Phasen ablaufen. Dabei sind in verschiedenen Szenariestudien unterschiedlich ambitionierte Klimaschutzszenarien für Deutschland und in Teilen auch für Nordrhein-Westfalen vorhanden, die unterschiedliche Fragestellungen untersuchen. Dabei sind allerdings nur wenige Studien dabei, die die Transformation der energieintensiven Grundstoffindustrie unter Berücksichtigung von Low Carbon Breakthrough Technologien betrachten. Um die Betrachtung möglicher Technologien und Transformationspfade auf einer möglichst breiten Datenlage aufzusetzen werden in diesem Kapitel die zentrale Szenariostudien in einer Metaanalyse analysiert und verglichen. Dabei wird ein besonderer Augenmerk auf die inhaltliche Tiefe der Betrachtung der energieintensiven Grundstoffindustrie gelegt.

Auf Basis der Metanalyse hat das Wuppertal Institut eigene Szenarien erstellt, die prototypische Zielzustände für eine energieintensive Grundstoffindustrie in NRW auf Basis von Low Carbon Breakthrough Technologien beschreibt und so eine große Bandbreite von technologischen Möglichkeiten darstellt. Diese in sich konsistenten Zielszenarien bilden die Grundlage für die Auswahl und Beschreibung zentraler Low Carbon Breakthrough Technologien, die für Nordrhein-Westfalen besonders interessant sind.

2.2 Metaanalyse von Klimaschutzszenarien

Das Ziel der Metaanalyse von Szenarien ist, mittel- bis langfristige Veränderungen im Energiesystem zu identifizieren und insbesondere die Rolle, die der Industrie in den verschiedenen Szenarien zugeschrieben wird, vergleichend zu analysieren.

Zunächst wurde eine Vielzahl von Szenariostudien gesichtet. In die hier angestellte Metaanalyse werden Szenarien aufgenommen, welche ...

- aktuell sind (nicht älter als 2014),
- mindestens die Emissionsminderungsziele des Energiekonzepts der Bundesregierung erreichen (-80 % gegenüber 1990) und
- eine sektorscharfe Abbildung der Annahmen und Ergebnisse darstellen.

Anhand dieser Kriterien wurden aus der Vielzahl existierender Szenariostudien folgende Studien bzw. Szenarien für qualitative und quantitative Analysen herangezogen:

- „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“, *Zielszenario*, Erstellt von EWI, GWS und Prognos im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 2014 (Prognos AG et al. 2014)
- „Klimaschutzszenario 2050“, *Klimaschutzszenario 80* und *Klimaschutzszenario 95*, erstellt von Öko-Institut und Fraunhofer ISI im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015)
- *Szenario Klimaschutz NRW 2016*, als interne Arbeitsgrundlage des Wuppertal Instituts erstelltes Szenario im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2017
- „Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten“, *GreenEe-Szenario*, Umweltbundesamt, 2017 (Jens Günther et al. 2017)
- „Klimapfade für Deutschland“, *Szenarien 80%-Klimapfad* und *95%-Klimapfad*, erstellt von Boston Consulting Group und Prognos im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie, 2018 (Philipp Gebert et al. 2018)
- „Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt - Aktuelle Szenarien 2017 der deutschen Energieversorgung“, *Szenario KLIMA-17 MEFF*, erstellt von Joachim Nitsch, 2017 (Joachim Nitsch 2017)
- „Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050“, *85%-Szenario* und *90%-Szenario*, erstellt durch das Fraunhofer ISE im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 2015 (Henning und Palzer 2015)
- „Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry“, Dechema, 2017 (Alexis Michael Bazzanella und Florian Ausfelder 2017)

Im Folgenden werden kurz die wesentlichen Charakteristika der Studien bzw. Szenarien sowie die Darstellungstiefe der Industrie beschrieben. Eine genauere Analyse und Gegenüberstellung wesentlicher Schlüsselparameter dieser Szenarien findet in den anschließenden Unterkapiteln statt.

Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015)

In der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ werden Szenarien bis 2050 mit verschiedenen Ambitionsniveaus analysiert hinsichtlich der Fragestellung, welche Maßnahmen notwendig sind für die Erreichung der Klimaziele und welche Sektoren welche Minderungsbeiträge erbringen müssen. Im Klimaschutzszenario 80 wird eine Emissionsminderung von 80 % ggü. 1990 erreicht. Im Klimaschutzszenario 95 wird davon ausgegangen, dass das Restemissionsbudget von 5 % ggü. 1990 für die Land- und Abfallwirtschaft sowie nicht vermeidbare Emissionen aus Industrieprozessen benötigt wird, und die Energiebereitstellung dementsprechend vollständig dekarbonisiert ist. Das Klimaschutzszenario 80 geht bezüglich der Industrie von hohen Effizienzfortschritten und einem Ausbau der Kreislaufwirtschaft aus, im Klimaschutzszenario 95 werden diese Anstrengungen noch übertroffen und zusätzlich prozessbedingte Emissionen durch CCS abgefangen. Die Studie weist teilweise Effizienzpotenziale für einzelne Industrieprozesse aus. Die Szenarien unterscheiden sich insofern von den anderen in der Metaanalyse betrachteten, als dass das 80%-Szenario verhältnismäßig hohe Stromimporte vorsieht und dass im 95%-Szenario die indirekte Elektrifizierung, beispielsweise über Wasserstoff, eine verhältnismäßig geringe Rolle spielt.

Hier verwendete Szenariobezeichnungen: KS 80 und KS 95

Klimapfade für Deutschland (Philipp Gebert et al. 2018)

Die Studie wurde im Unterschied zu den meisten anderen hier betrachteten Studien nicht durch einen öffentlichen Träger beauftragt, sondern entstand im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI). Die Studienergebnisse wurden in einem Bottom-Up Prozess mit der deutschen Industrie erarbeitet. Neben einem Referenzpfad werden zwei Szenarien dargestellt, die zu THG-Minderungen von 80 bzw. 95 % führen, der 80%-Klimapfad und der 95%-Klimapfad, wobei im 95 %-Pfad die energiebedingten Emissionen zu 100 % gemindert werden. Außerdem wird unterschieden zwischen den Zielszenarien „nationale Alleingänge“ und „globaler Klimaschutz“, die sich insbesondere in Brennstoff- und CO₂-Kosten unterscheiden. Da Einsatz und Wirkung der technischen Maßnahmen zwischen diesen Szenarien nicht unterschieden werden, wird diese Szenariendifferenzierung im Rahmen dieser Metaanalyse nicht dargestellt, sondern lediglich die beiden zuvor beschriebenen Pfade differenziert. In der Studie werden alle Sektoren betrachtet (Energie, Industrie, Haushalte und GHD, Verkehr, Wärme, Land- und Abfallwirtschaft), ein besonderer Fokus liegt auf der Industrie. Hier werden starke Effizienzentwicklungen angesetzt, im 95%-Klimaschutzpfad kommen außerdem synthetische Brennstoffe und CO₂-Abscheidung und -Speicherung zum Einsatz.

Hier verwendete Szenariobezeichnung: 80 %-Pfad und 95 %-Pfad

Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose (Prognos AG et al. 2014)

Die Energiereferenzprognose stellt vor dem Hintergrund der zu erwartenden Umfeldbedingungen die aus Sicht der Autoren wahrscheinliche Entwicklung bis zum Jahr 2030 dar. Daran schließt das Zielszenario an, in dem die Ziele der des Energie-

konzepts der Bundesregierung bezüglich THG-Minderung (-80 % ggü. 1990), Endenergieverbrauch und Anteile Erneuerbarer Energien bis 2050 erreicht werden. Mittel dafür sind insbesondere eine sehr breite und tiefe Entwicklung hin zur Energieeffizienz, auch in der Industrie, durch den konsequenten Einsatz von innovativen Technologien und eine Verdopplung der energetischen Sanierungsrate bei Gebäuden. Für die energieintensive Industrie werden Übersichten über Energieverbrauch, Intensität und mögliche Technologien zur Energieeinsparung gegeben. Im Unterschied zu den anderen in dieser Metaanalyse betrachteten Szenarien werden im Zielszenario keine relevanten Verhaltensänderungen angenommen. Es ist außerdem das einzige betrachtete Szenario, dass von der Nutzung von Biomasseimporten ausgeht.

Hier verwendete Szenariobezeichnung: Zielszenario

Szenario Klimaschutz NRW 2016

Das als interne Arbeitsgrundlage erstellte Szenario Klimaschutz NRW fokussiert auf das Bundesland Nordrhein-Westfalen, weist aber auch Ergebnisse für Gesamt-Deutschland aus. Ziel des Szenarios ist das Erreichen einer territorialen THG-Minderung in NRW um mindestens 80 % im Jahr 2050 gegenüber 1990, dabei wird von einem Erhalt der industriellen Wertschöpfung in NRW ausgegangen. Die Kombination beider Randbedingungen führt dazu, dass Power-to-x als Strategie eine bedeutendere Rolle zukommt als in anderen Szenarien mit einem Minderungsziel von 80 %.

Hier verwendete Szenariobezeichnung: KS NRW 2016

Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten (Jens Günther et al. 2017)

Diese Studie ist Teil eines übergreifenden Vorhabens mit dem Ziel, die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Ressourcenschonung und Klimaschutz in einen integrierten Transformationsprozess darzustellen. In dieser Studie wird das Szenario *GreenEe* dargestellt, das von hohen Klimaschutzanstrengungen und mittleren Rohstoffnutzungspfaden bei hoher Rohstoffeffizienz ausgeht. Es wird eine THG-Minderung von -95 % gegenüber 1990 angestrebt. Für die Industrie wird davon ausgegangen, dass Brennstoffe durch Strom bzw. strombasierte Brennstoffe (PtG, PtL) ersetzt werden, zudem werden für die Branchen der energieintensiven Industrie spezifische Annahmen dargestellt. Im Vergleich zu den anderen Szenarien wird in diesem Szenario verhältnismäßig viel Wasserstoff eingesetzt.

Hier verwendete Szenariobezeichnung: GreenEe

Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt - Aktuelle Szenarien 2017 der deutschen Energieversorgung (Joachim Nitsch 2017)

Die Studie schreibt Szenarien fort, die zuvor als (Joachim Nitsch 2016) veröffentlicht wurden. Es werden zwei Szenarien beschrieben, die das obere Ziel des Reduktionsziels der Bundesregierung, eine THG-Minderung von 95 % gegenüber 1990, erreichen. Eines davon ist das Szenario KLIMA-17 MEFF (mittlere-Effizienz-Szenario), das hier in die Metaanalyse aufgenommen wird. Dieses Szenario geht von einer Steigerung der Energieproduktivität etwa entsprechend dem Energiekonzept der Bundesregierung aus, einer Halbierung des Primärenergieverbrauchs gegenüber 2008. Die Anteile erneuerbarer Energien liegen hingegen deutlich höher als im Energiekonzept angestrebt (98 % des Bruttostromverbrauchs aus EE). Bezüglich der Industrie werden wenig differenzierte Annahmen ausgewiesen. Das Szenario sieht deutlich höhere Stromimporte vor als die anderen Szenarien in dieser Metaanalyse.

Hier verwendete Szenariobezeichnung: K17 M

Die folgenden Studien werden hier vorgestellt, da sie eine Bereicherung der Diskussion der möglichen Entwicklungen darstellen, werden aber in der quantitativen Analyse in den nachfolgenden Unterkapiteln nicht aufgenommen, da sie entweder keine ausreichende Darstellungstiefe des Industriesektors haben oder aufgrund ihres unterschiedlichen Zuschnittes nicht für eine vergleichende, quantitative Gegenüberstellung geeignet sind.

Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050 (Henning und Palzer 2015)

Ziel der Studie ist es aufzuzeigen, wie eine kostenoptimale Transformation des deutschen Energiesystems aussehen kann, mit der die Klimaschutzziele erreicht werden können. Wie die Szenariennamen es bereits ausdrücken, werden im *85%-Szenario* eine Minderung von 85 % ggü. 1990 erreicht, im *90%-Szenario* entsprechend 90 %. Die Studie fokussiert auf die energetische Sanierung des Gebäudebestandes, die Wärmeversorgung, neue Fahrzeugkonzepte und die Entwicklung des Stromsektors. Die Industrie wird in der Studie wenig detailliert beschrieben. Lediglich einzelne Aspekte werden genannt, wie die Elektrifizierung der Wärmeversorgung und der Einsatz von biogenen Brennstoffen. Auch Aussagen zur Flexibilitätsanforderungen an die Industrie werden nicht getroffen. Aus diesem Grund wird die Studie nicht in die quantitative Auswertung im nächsten Teil aufgenommen.

Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry (Alexis Michael Bazzanella und Florian Ausfelder 2017)

Im Unterschied zu den anderen in dieser Analyse beschriebenen Szenariostudien stellt diese Studie der Dechema keine Untersuchung des gesamten Energiesystems dar, sondern fokussiert auf die Chemische Industrie. Ziel der Studie ist die Explora-

tion von Optionen, die langfristig zu einer „Low-Carbon-Chemieindustrie“ führen können und das aufzeigen von entsprechenden Entwicklungspfaden. Es werden vier Szenarien dargestellt (Business-As-Usual, Intermediate, Ambitious, Maximum). Dafür werden Maßnahmen unter anderem aus den Bereichen Sektorkopplung, Power-to-X und Biomassenutzung aufgeführt. Die Studie sei hier genannt als ein Beispiel für engagierte Sektorstudien. Sie wird allerdings nicht in die quantitative Analyse im nächsten Teil aufgenommen, da sie aufgrund des anderen Zuschnitts nicht direkt mit den anderen Szenariostudien vergleichbar ist.

2.2.1 Klimaschutz- und Flexibilisierungs-Strategien im Szenariovergleich

Tabelle 10 gibt eine Übersicht über wesentliche CO₂-Minderungsstrategien, die in den betrachteten Studien zum Einsatz kommen und die Grundlagen für die nachfolgend dargestellten quantitativen Ergebnisse im Szenariovergleich bilden. Die Szenarien sind dabei gruppiert nach solchen, die Emissionsminderungen im Bereich von 80-85 % (links) erreichen, und solchen, die Minderungen von 95-100 % schaffen (rechts).

Die strategischen Unterschiede zwischen diesen beiden Gruppen, d. h. den weniger und den stärker ambitionierten THG-Minderungsszenarien, liegen vor allem in den Bereichen Verhaltensänderungen, Elektrifizierung (insbesondere indirekt), Importen von Wasserstoff bzw. synthetischen Energieträgern und CCS bei Industrieanlagen. Von diesen Strategien wird (bzw. muss offenbar) zur Erreichung der ambitionierteren THG-Senkungen viel stärker Gebrauch gemacht (werden). Die Strategien zur Effizienzsteigerung und zur Nutzung von erneuerbaren Energien sind dagegen für beide Gruppen etwa gleich wichtig.

In der Gruppe der ambitionierteren Szenarien (THG-Minderung größer -95 %) zeigen sich große Strategie-Unterschiede nur in wenigen Einzelbereichen. Zwei Szenarien KS 95 und 95 %-Pfad) setzen im Industriebereich relativ aber unterschiedlich stark auf eine Abscheidung und Speicherung von CO₂ (CCS), die anderen dagegen gar nicht. Im KS 95 wird angenommen, dass in 2050 41 Mt CO₂ abgeschieden werden, im 95 %-Pfad liegt der Wert mit 93 Mt mehr als doppelt so hoch. Dieses letztgenannte BDI-Szenario nimmt an, dass CCS eingesetzt wird für Prozessemissionen der Stahl- und Zementproduktion, der Dampfreformierung im Rahmen der Ammoniaksynthese und Emissionen bei der Müllverbrennung und der Mineralölverarbeitung. Das Szenario geht davon aus, dass der Einsatz von CCS günstiger ist als Alternativen zur Emissionsminderung wie der Einsatz neuer Technologien (siehe Kapitel 2.2.5).

Große Importe von Wasserstoff bzw. synthetischen Gasen spielen in zwei Szenarien (eines davon mit CCS) und große Stromimporte in einem anderen Szenario eine bedeutende Rolle, während ansonsten solche Importe wenig bis gar nicht unterstellt werden (siehe Kapitel 2.2.4). Bemerkenswert sind noch die Unterschiede bei Verhaltensänderungen und indirekte Elektrifizierung, die von allen Szenarien über die gesamte Nutzungsbandbreite berücksichtigt werden.

Tabelle 10 Überblick über die wesentlichen Klimaschutzstrategien in den betrachteten Szenarien

Szenarien		KS 80	80 %-Pfad	Zielszenario	KS NRW 2016	KS 95	95 %-Pfad	GreenEe	K17 M
Energiebedingte THG-Reduktion 2050 in %		-85	-84	-80	-82	-98	-100	-100	-96
NACHFRAGESEITE	Energieeffizienzverbesserungen	+	++	++	++	+++	++	++	++
	Verhaltensänderungen	+	+	o	+	+++	+	+	++
	Elektrifizierung								
	Direkte Elektrifizierung	++	+	+	+	+++	++	++	++
	Indirekte Elektrifizierung (z. B. H ₂)	o	o	o	+	+	++	+++	++
ANGEBOTSSEITE	Nutzung emissionsfreier Energieträger								
	Erneuerbare für Stromerzeugung	++	++	+	++	++	++	+++	++ +
	Erneuerbare für Verkehr & Wärme	++	++	+++	++	++	++	++	++ +
	Atomenergie	o	o	o	o	o	o	o	o
	Import emissionsfreier Energieträger								
	Biomasse	o	o	++	o	o	o	o	o
	Strom	++	o	+	o	+	o	o	++ +
	H ₂ bzw. synth. Energieträger	o	o	o	o	+	+++	+++	o
	Nutzung von CCS/CCU								
	Bei der Stromerzeugung	o	o	o	o	o	o	o	o
Bei Industrieanlagen	o	o	o	o	++	+++	o	o	
Legende: o keine (relevante) Nutzung + geringe Nutzung ++ mittlere Nutzung +++ starke Nutzung									

Quelle: Eigene Darstellung

Für eine bessere Einordnung der nachfolgend dargestellten und diskutierten Ergebnisse aus dem Szenariovergleich ist zudem relevant zu wissen, welche Flexibilitätsoptionen eingesetzt, welche Industriebranchen und ob *low-carbon break-through technologies* (LCBTT) berücksichtigt werden. Eine solche Übersicht zeigt Abbildung 29 für die quantitativ ausgewerteten Szenarien.

Demnach werden nur die folgenden drei Flexibilitätsoptionen in nahezu allen Szenarien (jeweils 7 von 8) zugrundegelegt: Netzausbau, Speicherausbau und Power-to-Heat. Die Mehrheit der Szenarien (6 bzw. 5 von 8) setzt zudem auf DSM Nutzung und Sektorkopplung und betrachtet explizit auch die energieintensiven Branchen

(Primärstahl, Zement, Chemie und Aluminium). Der Einsatz von LCBTT in der energieintensiven Industrie spielt dagegen so gut wie keine Rolle und wird nur in einem Szenario explizit berücksichtigt.

Flexibilitätsoptionen im Industriesektor kommen in den meisten Szenarien mit Ausnahme von KS-NRW 2016 nur sehr vereinzelt zum Einsatz. DSM wird dabei am häufigsten (in vier Fällen) berücksichtigt.

Berücksichtigung von ...	MWIDE KS NRW2016		BMWI 2014 Zielszen.		BMUB 2015 KS80		BMUB 2015 KS95		BWMi 2015 90%		BWMi 2015 85%		BDI 2017 80%-Pfad		BDI 2017 95%-Pfad	
	Allg.	Ind.	Allg.	Ind.	Allg.	Ind.	Allg.	Ind.	Allg.	Ind.	Allg.	Ind.	Allg.	Ind.	Allg.	Ind.
... Flexibilitätsoptionen																
Netzausbau (Gas/Strom/Wärme)	x		x	x	x		x		x		x		x		x	
DSM Nutzung	x	x	x		x		x		–		–		x	x	x	x
Speicherausbau	?		x		x		x		x		x		x		x	
Sektorkopplung	x	x	–						x		x		x	?	x	?
CCS (Industrie / KW)	–		–		–		x		–		–		–	–	–	x
CCU	–		x						–		–		x	–	–	x
Power-to-Wasserstoff	x	x	x				x		x		x		x		x	
Power-to-Heat	x	x	–		x		x		x		x		x		x	
Power-to-Methan	–		–				x		x	x	x	x	–		x	
Power-to-Kraftstoff	–		–				x		x		x	x	–		x	
Power-to-Chem	x	x							–		–		–		–	
... energieintensiven Branchen																
Primär-Rohstahlerzeugung:		x		x		x		x		–		–		x		x
Zement:		x		x		x		x		–		–		x		x
Chemie:		x		x		x		x		–		–		x		x
Alu:		x		x		x		x		–		–		(x)		(x)
... weiteren LCBTT für die energieintensive Industrie				x										–		–

Abbildung 29 Übersicht über die Berücksichtigung von Flexibilitätsoptionen, energieintensiven Branchen und LCBTT in den betrachteten Szenarien

Legende: KW=Kraftwerke; LCBTT=low-carbon break-through technologies; x=Wird explizit und quantitativ berücksichtigt; (x)=Wird nur am Rande und eher qualitativ berücksichtigt; –=Wird nicht berücksichtigt; leer=keine Aussage möglich.

Quelle: Eigene Darstellung

2.2.2 Endenergieverbrauch in der Industrie im Szenariovergleich

Die zuvor ausgewählten und qualitativ untersuchten Szenariostudien werden im Folgenden zusätzlich quantitativ ausgewertet und diskutiert. Der Fokus liegt dazu im Folgenden zunächst auf den Entwicklungen des industriellen Endenergieverbrauchs. Anschließend werden zentrale Entwicklungen bei der Stromerzeugung, der Elektrifizierung und Nettoimporten dargestellt. Abschließend folgt eine Übersicht über die resultierenden THG-Emissionen.

Für eine bessere Einordnung der folgenden Ergebnisse und Interpretationen, bezogen auf den Endenergieverbrauch in der Industrie, sind die folgende Annahmen zu Entwicklungen von Einwohnern und Bruttoinlandsprodukt zu berücksichtigen:

- Die **Einwohnerzahl** in Deutschland geht langfristig zurück, von ca. 82 Mio. im Jahr 2010 auf 72 Mio. (Zielszenario und Klimaschutz NRW 2016) bis 77 Mio. (80 und 95 %-Pfad). Dies wirkt grundsätzlich dämpfend auf die Energie- und Konsumgüternachfrage.
- Das **Bruttoinlandsprodukt** wächst im Zeitraum 2010 bis 2050 im Durchschnitt jährlich um etwa 0,7 % (GreenEe) bis 1,3 % (80 und 95 %-Pfad). Zusammen mit der sinkenden Einwohnerzahl bedeutet dies eine weiter steigende Produktivität.

Die Szenarien zeigen zunächst recht unterschiedliche Entwicklungen des industriellen Energiebedarfs. Der Endenergieverbrauch der Industrie betrug im Jahr 2015 2548 PJ. Bis zum Jahr 2030 sehen die meisten Szenarien eine relative Minderung zwischen 10 % (95 %-Pfad) und 28 % (KS 95), lediglich das KS NRW 2016-Szenario geht bis dahin noch von einem Anstieg des Endenergiebedarfs um 8 % aus. Dies liegt an den relativ „optimistischen“ Annahmen zur Steigerung der Wertschöpfung. Bis zum Jahr 2050 gehen alle Szenarien von einer mehr oder weniger deutlichen Minderung des Endenergieverbrauchs durch den Industriesektor aus. Diese liegt zwischen -18 % (95 %-Pfad) und -43 % (GreenEe und KS 95). Im KS NRW 2016-Szenario wird trotz der anfänglich gegenläufigen Entwicklung noch eine Minderung von -21 % erreicht. Dies liegt daran, dass in dieser Periode zusätzlich zu stärkeren Effizienzanstrengungen als zuvor auch stärker von Low-Carbon-Break-Through-Technologien (LCBTT, siehe Kapitel) Gebrauch gemacht wird.

Der **Stromverbrauch der Industrie** bleibt in allen Szenarien und Zieljahren in einer annähernd ähnlichen Größenordnung (von 622 bis 861 PJ in 2050) wie im Jahr 2015 (815 PJ). Zwischen den Szenarien gibt es jedoch einzelne, nennenswerte Unterschiede, die maßgeblich durch die verschiedenen Effizienz- und Elektrifizierungsstrategien geprägt werden. In den vier Szenarien (Ziel, 80 %-Pfad, KS 80 und KS 95) werden mit rd. -20 bis -24 % die größten Reduktionen erreicht. Die geringste Reduktion zeigt das GreenE Szenario mit nur ca. 5 %, während im KS NRW 2016-Szenario der industrielle Stromverbrauch sogar um 6 % ansteigt. Dieser Anstieg liegt an dem unterstellten relativ großen Elektrifizierungsgrad in Höhe von ca. 43 % insbesondere der energieintensiven Industrie (Fokus NRW), der nur noch vom KS 95 mit 44 % und GreenE Szenario mit 53 % übertroffen wird. Ansonsten liegen die Elektrifizierungsgrade zwischen 31 und 37 % und damit ungefähr gleich hoch wie in 2015 (32 %), was einen niedrigeren Stromverbrauch durch die Industrie zur Folge hat.

Der **Brennstoffverbrauch der Industrie** wird im Vergleich zum Stromverbrauch deutlich stärker gesenkt. Bis zum Jahr 2030 sehen die meisten Szenarien einen Rückgang der Nutzung fossiler Brennstoffe von heute 1401 PJ auf Werte zwischen 1059 PJ und 1303 PJ. Nur in den Szenarien KS 80 und KS 95 werden im gleichen Zeitraum noch deutlich stärkere Rückgänge auf 762 PJ bzw. 486 PJ erwartet. Bis zum Jahr 2050 geht die Nutzung fossiler Brennstoffe auf Werte zwischen 415 PJ und 786 PJ zurück. Nur das GreenEe-Szenario geht davon aus, dass langfristig keine fossilen Brennstoffe in der Industrie mehr genutzt werden. In diesem Szenario kommt dagegen mit ca. 587 PJ eine erhebliche Menge an erneuerbarem Wasserstoff bzw. synthetische Energieträger zum Einsatz. Nur das KS NRW 2016-Szenario sieht mit ca. 199 PJ ebenfalls einen (signifikanten) Einsatz solcher Energieträger vor.

Die beiden Szenarien der BDI-Studie, 80 %-Pfad und 95 %-Pfad, sehen dagegen einen deutlich stärkeren Einsatz von Biomasse im Industriesektor als die anderen Szenarien.

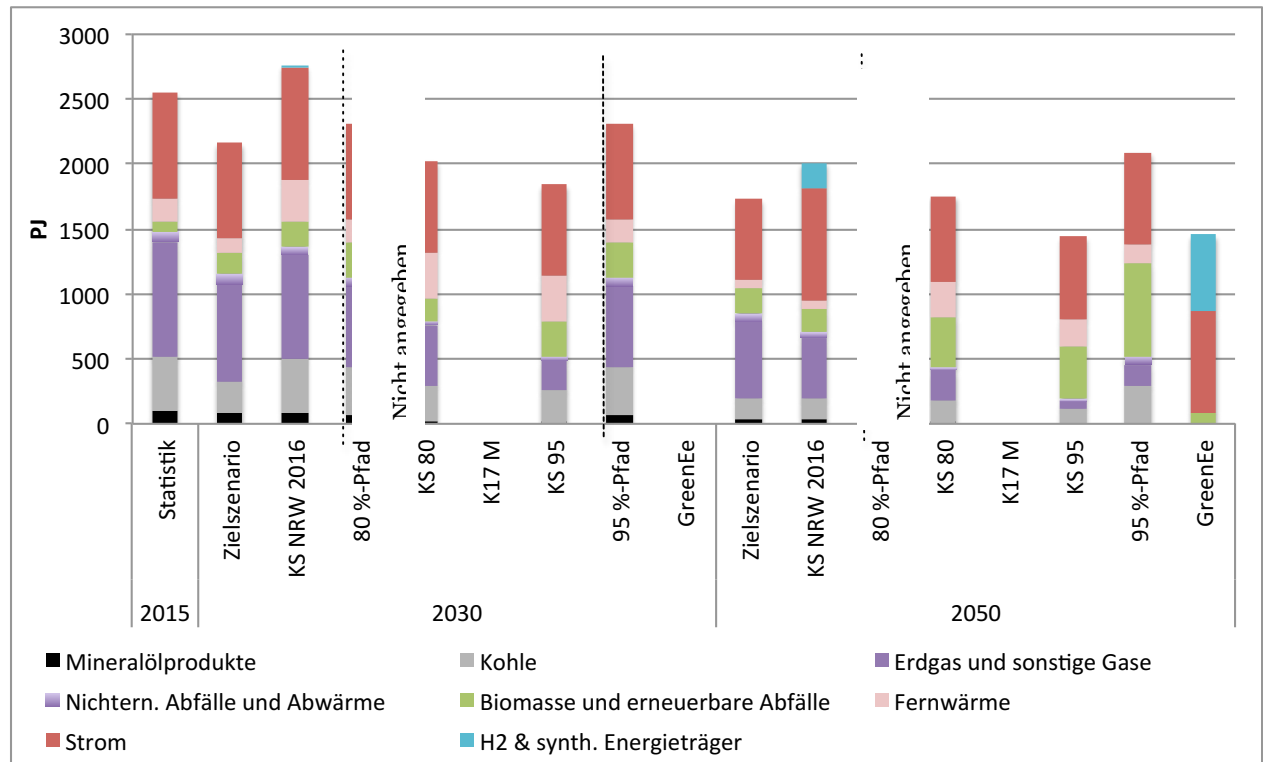


Abbildung 30 Endenergieverbrauch in der Industrie nach Energieträgern in den Jahren 2030 und 2050

Quelle: Eigene Darstellung

2.2.3 Stromerzeugung im Szenariovergleich

Die Stromerzeugung¹⁸ in Deutschland entwickelt sich in allen betrachteten Szenarien von einem heute (2017) noch überwiegend von fossilen Energieträgern (ca. 66 %) dominierten System bereits in 2030 zu einem System, das überwiegend (58 bis 78 %) von erneuerbaren Energien geprägt wird (siehe Abbildung 31). Im **Jahr 2050** liegt der EE-Anteil an der Stromerzeugung in den meisten Szenarien über 90 % bis 100 % und nur in einem Szenario (Zielszenario) bei 83 %. Die Anteile von Strom aus fossilen Quellen liegen in 2050 unter 100 TWh. Sie decken damit rein rechnerisch weniger als 1/6 des Endenergieverbrauchs (622 bis 861 TWh) und stammen maßgeblich aus Erdgas (17-47 TWh) und nur vereinzelt noch aus Kohle (4-19 TWh).

Die Entwicklung der erzeugten **Strommengen** hingegen wird von den betrachteten Szenarien unterschiedlich gesehen. Die Hälfte der Szenarien (KS NRW 2016, K17 M, KS 95 und GreenE) weist eine moderate bis deutliche Steigerung der Stromerzeugung auf Werte zwischen 739 (+13 %) und 860 (+33 %) TWh auf. Im 95 %-Pfad Szenario wird nach zwischenzeitlicher Reduktion wieder annähernd der gleiche Wert wie heute (2017) erreicht. Dagegen erwarten die drei Szenarien (Zielszenario, 80 %-Pfad und KS 80) sogar langfristig eine nennenswerte Reduktion der inländischen Stromerzeugung zwischen -6 % und -32 %¹⁹.

¹⁸ Ohne Importe und Speicherstrom

¹⁹ Diese Reduktion wird auch nicht durch zusätzliche Stromimporte kompensiert.

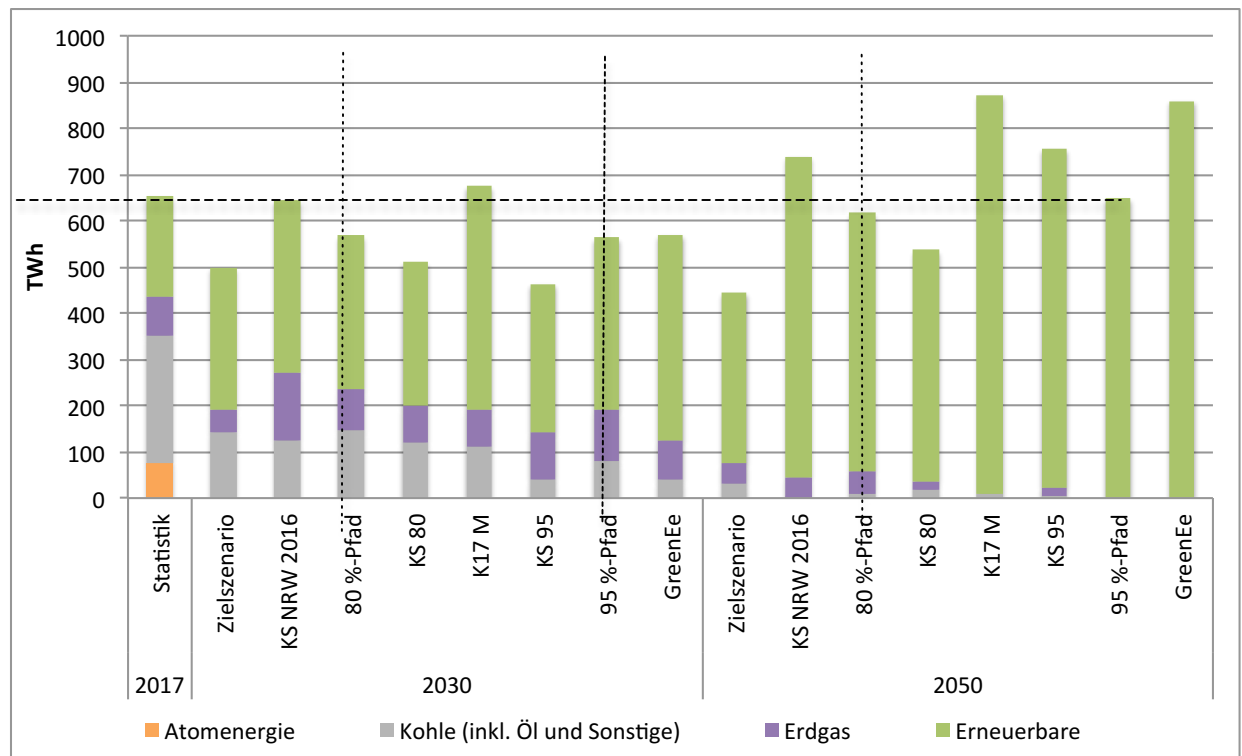


Abbildung 31 Inländische Stromerzeugung nach Energieträgern in den Jahren 2030 und 2050

Quelle: Eigene Darstellung

In allen betrachteten Szenarien tragen, wie zuvor beschrieben, erneuerbare Energien spätestens in 2050 den Großteil der Stromerzeugung. Die Energiebereitstellung aus nicht-fluktuierenden Quellen wie Wasserkraft, Geothermie und Biomasse hat dabei aufgrund der begrenzten Potenziale einen sehr geringen Anteil. Dieser liegt in 2030 zwischen 15 % (im KS 80) und 27 % (im Zielszenario) an der erneuerbaren Erzeugung. Da die Potenziale zu diesem Zeitpunkt schon weitgehend ausgeschöpft sind, die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien aber weiter ausgebaut wird, verringert sich der Anteil der nicht-fluktuierenden Erzeugung bis 2050 auf Anteile zwischen 6 % in den Szenarien GreenEE und KS 95 und 22 % im Zielszenario.²⁰

Somit stammt ein stark überwiegender Anteil des Stroms aus fluktuierender Erzeugung. Daraus resultiert eine große Herausforderung an das gesamte Energiesystem: Um die zeitliche Deckung von Strombedarf und –Erzeugung in Einklang zu bringen, ist es notwendig, in großem Umfang Flexibilitäten einzusetzen. Dies bedeutet neben einem räumlichen Ausgleich durch das Stromnetz auch einen zeitlichen Ausgleich durch Stromspeicher, die Nutzung von Flexibilitäten, die sich durch die Sektorkopplung ergeben (wie beispielsweise das geregelte Laden von Elektrofahrzeugen, der zeitlich geeignete Einsatz von Wärmepumpen oder die Herstellung synthetischer Kraftstoffe mittels Elektrolyse) sowie auch Lastmanagement, also die zeitliche Anpassung von Lasten, insbesondere in der Industrie. Nicht alle Studien behandeln oder beziffern diese Flexibilitäten (vgl. Abbildung 29), doch ohne sie kann die Stromversorgung nicht stabil aufrecht erhalten werden.

²⁰ Nur im Zielszenario sind Biomasseimporte angenommen.

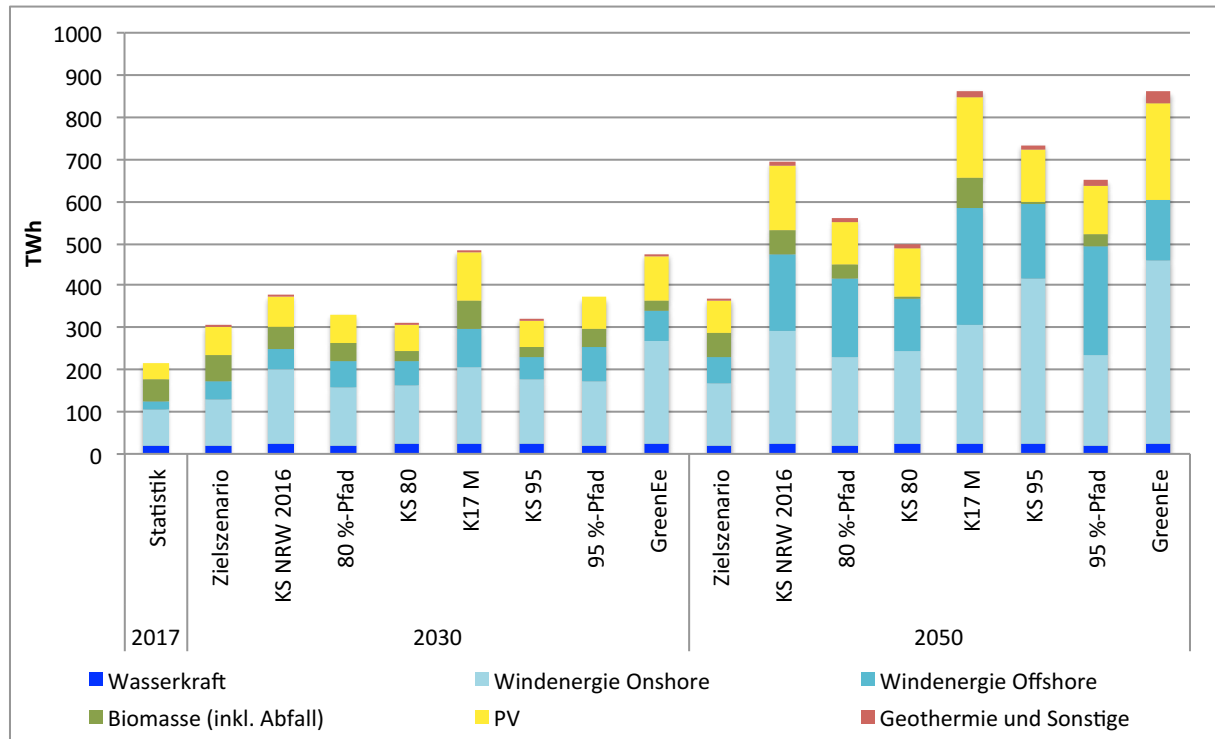


Abbildung 32 Inländische Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nach Energieträgern in den Jahren 2017, 2030 und 2050

Quelle: Eigene Darstellung

2.2.4 Bedeutung von Elektrifizierung und Netto-Importen im Szenariovergleich

Eine wesentliche Maßnahme zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung, des Verkehrs und auch in der Industrie, ist die Elektrifizierung, also die Nutzung von Strom anstelle von Brenn- oder Kraftstoffen, da die CO₂-freie Stromerzeugung kostengünstiger umzusetzen und in ihren Potenzialen weniger beschränkt ist als CO₂-freie Brenn- und Kraftstoffe. Die Bedeutung der **direkten Elektrifizierung** zeigt sich in den Szenarien am signifikant steigenden Anteil der Elektrizität am Endenergieverbrauch (siehe Abbildung 46). Während der Anteil heute (2015) bei 21 % liegt, nimmt er in den betrachteten Szenarien bis 2050 um 8 (Zielszenario) bis 29 (KS 95) Prozentpunkte zu.

Die direkte Elektrifizierung spielt dabei vor allem in den ambitionierteren Klimaschutzszenarien ($\geq 95\%$ THG-Reduktion ggü. 1990) eine wichtige Rolle (vgl. Tabelle 10), so dass dort der Stromanteil zwischen 34 und 50 % liegt. In den weniger ambitionierten 80 % Szenarien liegt die direkte Elektrifizierung dagegen in drei von vier Fällen „nur“ zwischen 29 und 32 % und erreicht einzig im KS 80 Szenario (mit 41 %) eine vergleichbare Größenordnung und Bedeutung wie in den 95 % Szenarien. Dies liegt daran, dass die konventionellen Kraft- und Brennstoffe in den weniger ambitionierten Szenarien deutlich weniger durch erneuerbare Energieträger (Strom und Biomasse) substituiert werden.

Die **indirekte Elektrifizierung** des Endenergieverbrauchs mit Hilfe der Umwandlung von (EE-)Strom in Wasserstoff bzw. daraus weiter synthetisierten Energieträgern („Power-to-X“) wird ebenfalls am stärksten (bis zu einem Anteil von 38 %) in

den ambitionierten Klimaschutzszenarien genutzt. Lediglich im KS 95 Fall beträgt der Anteil der indirekten Elektrifizierung „nur“ 4 % und liegt damit vergleichbar niedrig wie in den zwei Fällen der weniger ambitionierten 80 % THG-Szenarien. Dies liegt daran, dass der direkten Elektrifizierung und dem Einsatz von CCS in der Industrie in diesem Szenario mehr Bedeutung beigemessen wird (vgl. Tabelle 10).

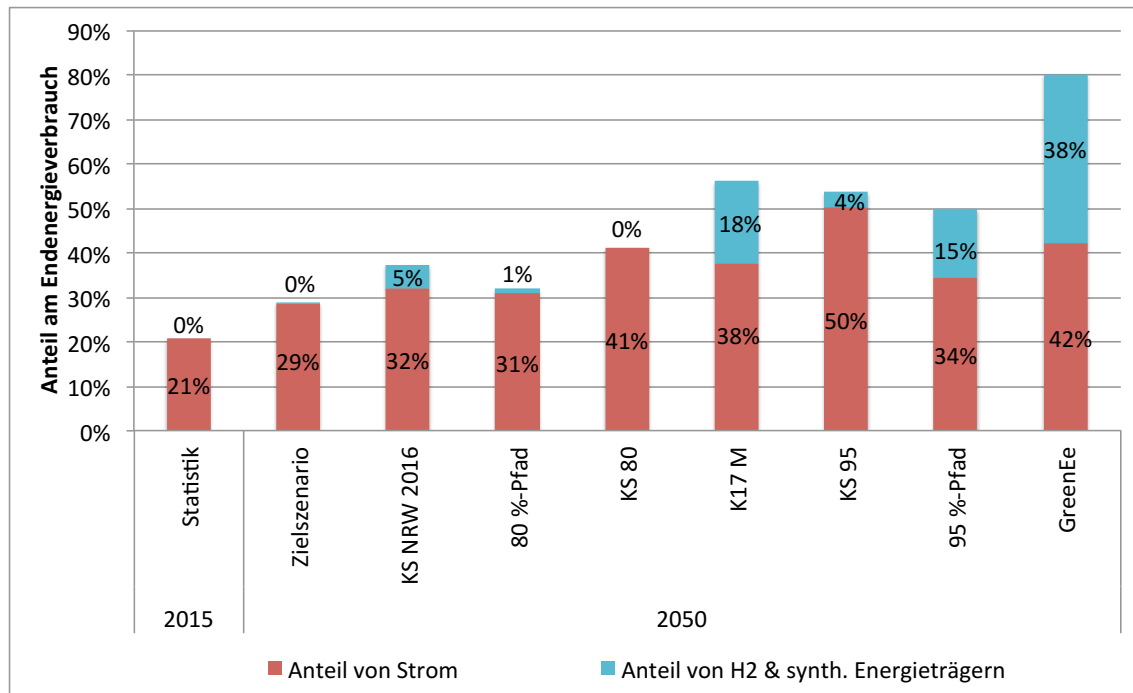


Abbildung 33 Direkte und indirekte Elektrifizierung des Endenergieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2015 und 2050 (inkl. Importe)

Quelle: Eigene Darstellung

Die Elektrifizierung des Endenergieverbrauchs wird gemäß Szenariovergleich langfristig und in Abhängigkeit der THG-Zielniveaus zunehmend wichtig wird. Ambitioniertere THG Minderungen (wie z. B. $\geq 95\%$ ²¹) benötigen zudem indirekte Elektrifizierung mittels Power-to-X, wobei der nötige Umfang von PtX offenbar vom CCS-Einsatz in der Industrie abhängt und ohne CCS stark ansteigen wird (muss). Wenn CCS in der Industrie gelingt wird deutlich weniger PtX und damit auch weniger EE-Strom benötigt und umgekehrt. Da es sich hierbei um zwei weitgehend unabhängige Strategien handelt, die beide zeit- und kostenintensiv sind, stellt dies eine potenziell kritische Wechselwirkung im Hinblick auf eine sichere, effiziente und effektive Erreichung der Klimaschutzziele dar. Eine denkbare Auflösung dieser neuralgischen Wechselwirkung könnte in einem Strategiewechsel von CCS zu CCU²² liegen, so dass die industriellen CO₂-Quellen für PtX-Synthesen nutzbar gemacht werden. Dadurch werden jedoch auch die Abhängigkeiten und damit die Komplexität der Strategien

²¹ Diese Zielgröße resultiert allein aus der Szenarioauswahl und gibt damit nicht an, ab welchem Zielniveau dieser Effekt signifikant einsetzen würde.

²² Carbon Capture and Utilization.

steigen, so dass zu diesem Themenkomplex weitere, vertiefende Untersuchungen erforderlich sind.

Da die vorigen relativen Angaben zur Elektrifizierung auch die zugehörigen Importe umfassen, ist zusätzlich und im Hinblick auf die nötigen Infrastrukturen auch ein Blick auf die in den Szenarien unterstellten Importmengen interessant. Die in den Szenarien als nötig erachteten Nettoimportmengen unterscheiden sich erheblich sowohl im Hinblick auf den Energieträger als auch auf die Mengen (siehe Abbildung 47). Die in 2015 noch üblichen Nettostromexporte von etwa 187 PJ wechseln zumindest langfristig überwiegend zu Nettostromimporten mit einer großen Bandbreite von wenigen PJ bis knapp 600 PJ (oder ca. 167 TWh_{el}). Dies bedeutet eine Steigerung der Nettoaustauschmengen um bis zu einem Faktor 3 im Vergleich zu heute.

Signifikante Nettoimporte von strombasierten (PtX) Energieträgern werden vereinzelt bereits im Jahr 2030 gesehen und erreichen langfristig (2050) in zwei Fällen erhebliche Größenordnungen von ca. gut 1.200 bis 1.300 PJ, was im Falle von strombasiertem Gas rein energetisch knapp der Hälfte des Primärenergieverbrauchs an Erdgas im Jahre 2015 (ca. 2.781 PJ) entspricht.

Bemerkenswert ist, dass im KS95-Szenario der Stromimport in 2030 etwa 77 PJ beträgt, um dann bis 2050 auf ca. 29 PJ abzufallen, quasi „zu Gunsten“ von PtX Energieträgern mit deutlich größeren Importmengen in Höhe von ca. 143 PJ. Dies illustriert, dass selbst innerhalb eines Szenarios ein signifikanter, struktureller Wechsel bei den Energieträgerimporten auftreten kann.

Der Szenariovergleich zeigt, dass langfristig (bis 2050) mit einer deutlichen Steigerung der Nettoimporte von Energieträgern nach Deutschland zu rechnen ist. Dabei kommt es zu einer relativ klaren Trennung zwischen zwei Gruppen von Entwicklungen, einmal nur Stromimporte und einmal nahezu ausschließlich PtX-Energieträger. Dies stellt unterschiedliche Anforderungen an die Energienetze für Strom und Gas bzw. Öl.

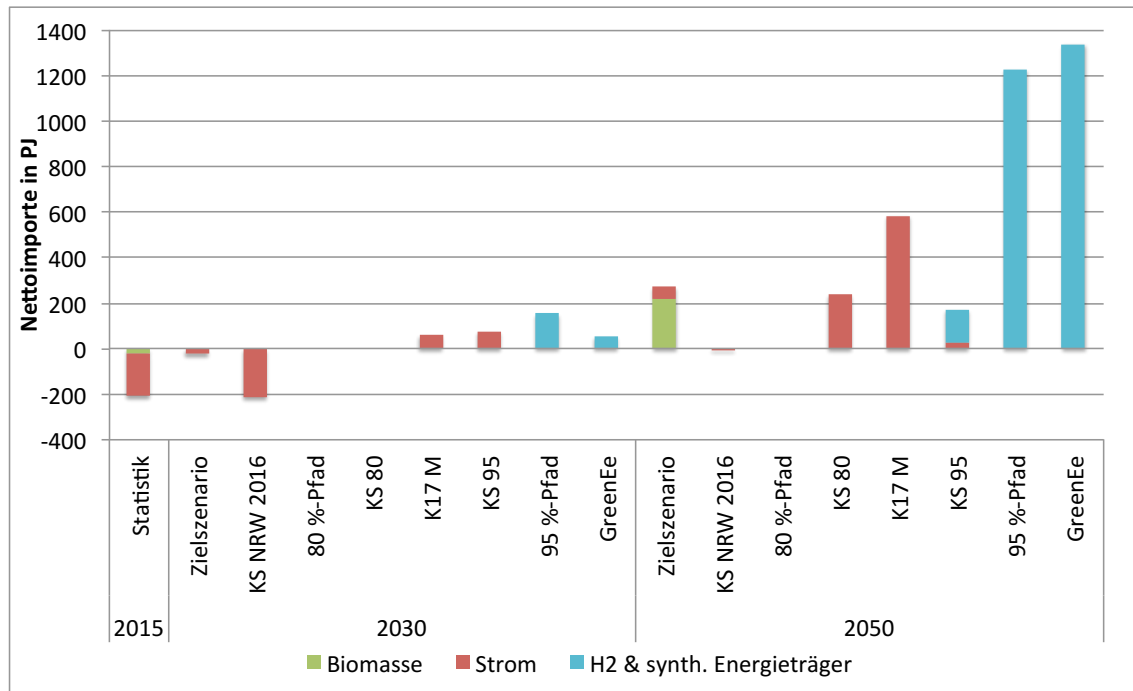


Abbildung 34 Nettoimporte von Strom und CO₂-armen Energieträgern nach Deutschland in 2015, 2030 und 2050 (ohne nicht-energetischen Bedarf)

Quelle: Eigene Darstellung

Im Unterschied zu anderen Einflussfaktoren (wie z. B. CCS und EE-Ausbau) und ihrem maßgeblichen Beitrag zur Reduktion der THG Emissionen, kann aus einer höheren Elektrifizierung der Energieversorgung keine eindeutige (maßgebliche) Wirkung abgeleitet werden. Dazu sind in Abbildung 34 die THG Emissionen der Szenarien über den direkten Stromanteil (links) und den indirekten Stromanteil mittels Power-to-Gas (rechts) im Jahr 2050 abgebildet.

Bei der direkten Elektrifizierung reichen die Stromanteile am gesamten Endenergieverbrauch im Jahr 2050 zwischen knapp unter 30 % (Zielszenario) bis zu 50 % (KS 95 Szenario). Die zugehörigen THG Emissionen verteilen sich dagegen von der Größenordnung her weitgehend unabhängig davon auf zwei Bereiche:

- von 200 bis 300 Mio t CO₂-äq für Stromanteile von 30-41 % in den weniger ambitionierten Klimaschutzszenarien (-80 % THG-Ziel)
- von 50 bis 100 Mio t CO₂-äq, für Stromanteile von 34 % bis 50 % in den stärker ambitionierteren Klimaschutzszenarien (-95 % THG-Ziel)

Allein in der ersten Gruppe der vier -80 % Szenarien lässt sich zwischen dem Zielszenario mit dem geringsten Stromanteil (rd. 30 %) und den höchsten THG Emissionen (ca. 300 Mt) sowie dem KS 80 Szenario mit 41 % Elektrifizierung und mit den niedrigsten Emissionen (gut 250 Mt) eine Tendenz für eine positive Wirkung der Elektrifizierung ausmachen. Bei den ambitionierteren Szenarien liegen die THG Emissionen trotz signifikant verschiedener direkter Elektrifizierungsgrade von 34 % und 50 % etwa auf gleichem Niveau.

Abbildung 35 (unteres Diagramm) zeigt, dass die indirekte Elektrifizierung mittels PtX keinen eindeutigen bzw. maßgeblichen Einfluss auf die gesamten THG Emissio-

nen hat, zumindest bis zu einem Anteil von knapp 6 %. Die THG Emissionen reichen in den Fällen von 70 bis knapp 300 Mio t CO₂-äq. Dies gilt insbesondere für die weniger ambitionierten -80 % Szenarien, für die der niedrigste Emissionswert (ca. 216 Mio t CO₂-äq) bei einem PtX-Anteil von Null erreicht wird. Die starke THG Minderung im KS95-Fall bei einem indirekten Elektrifizierungsgrad von ca. knapp 4 % resultiert vor allem aus einer stärkeren Nutzung von Effizienzmaßnahmen und von CCS. Im Vergleich dazu schaffen die beiden Szenarien 95 %-Pfad und K17M mit einer deutlich höheren indirekten Elektrifizierung (rd. 15 bzw. 18 %) auch keine nennenswert größeren THG Minderungen. Hauptgründe dafür sind vielmehr ein CCS-Einsatz in der Industrie (95 %-Pfad) und ein starker Stromimport sowie eine stärkere Dekarbonisierung des Verkehrssektors (K17M).

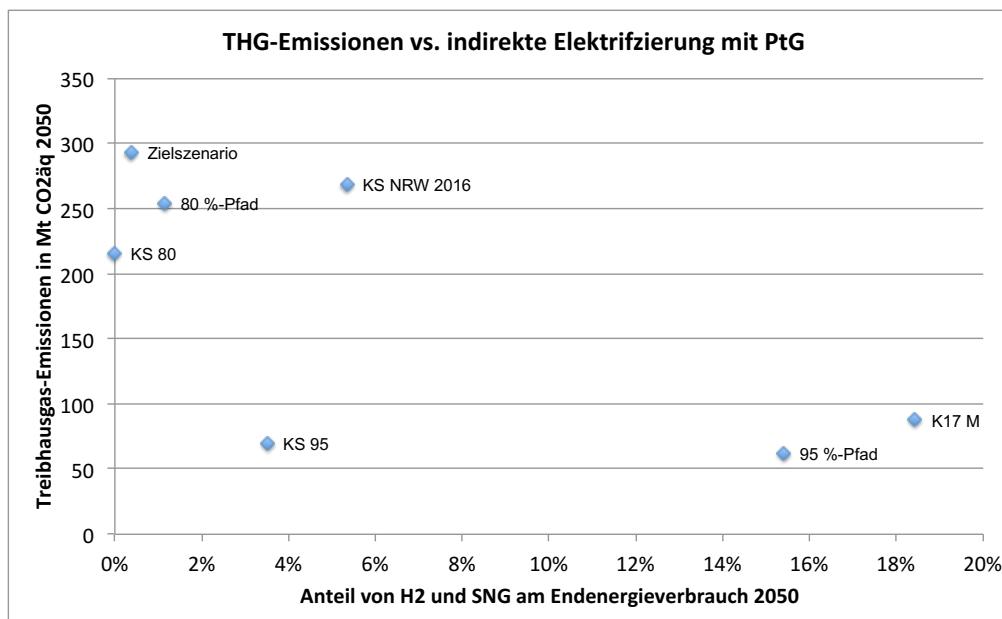
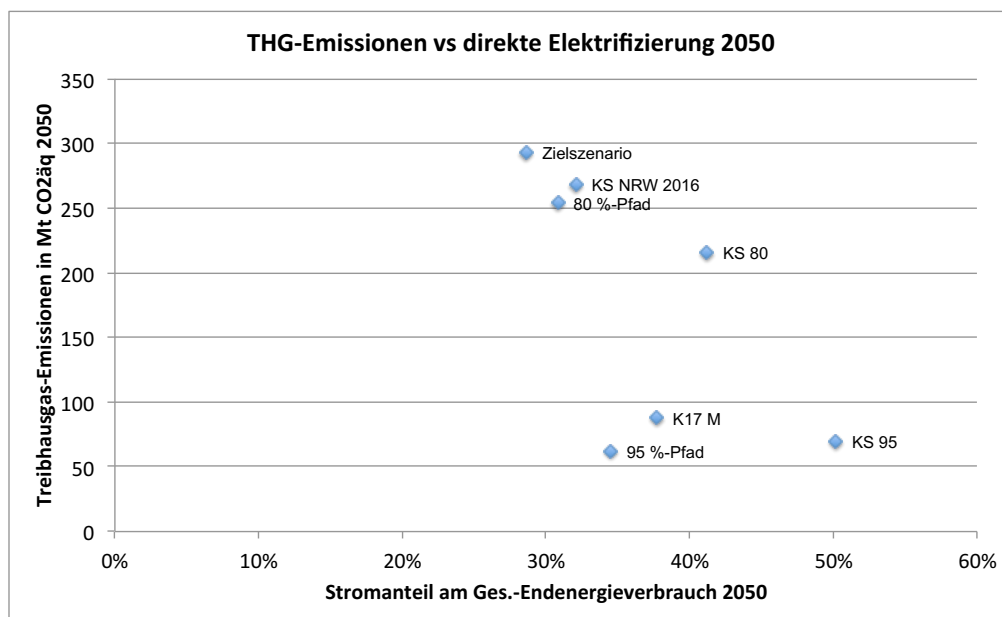


Abbildung 35 Treibhausgasemissionen im Vergleich zu Elektrifizierung im Jahr 2050 (oben: direkt, unten: indirekt mit PtG)

Quelle: Eigene Darstellung

2.2.5 Treibhausgasemissionen im Szenariovergleich

Die zuvor dargestellten Szenario-Strategien und –Ergebnisse zeigen auf, wie sehr und unterschiedlich sich die Energieversorgung in Deutschland zur Erreichung der verschiedenen Klimaschutzziele ändern müsste. Nun fehlt nur noch der Blick darauf, in welchem Umfang dadurch die jährlichen THG Emissionen in den Szenarien gesenkt werden können und welchen Anteil die Industrie daran hat. Dazu zeigt Abbildung 36 die sektoralen THG Emissionen in Deutschland für die Jahre 2030 und 2050 und für das „aktuelle“ Jahr 2015²³. Im Referenzjahr 1990 für die Klimaschutzziele betragen die deutschen THG Emissionen ca. 1251 Mio t CO₂-äq (UBA 2017a).

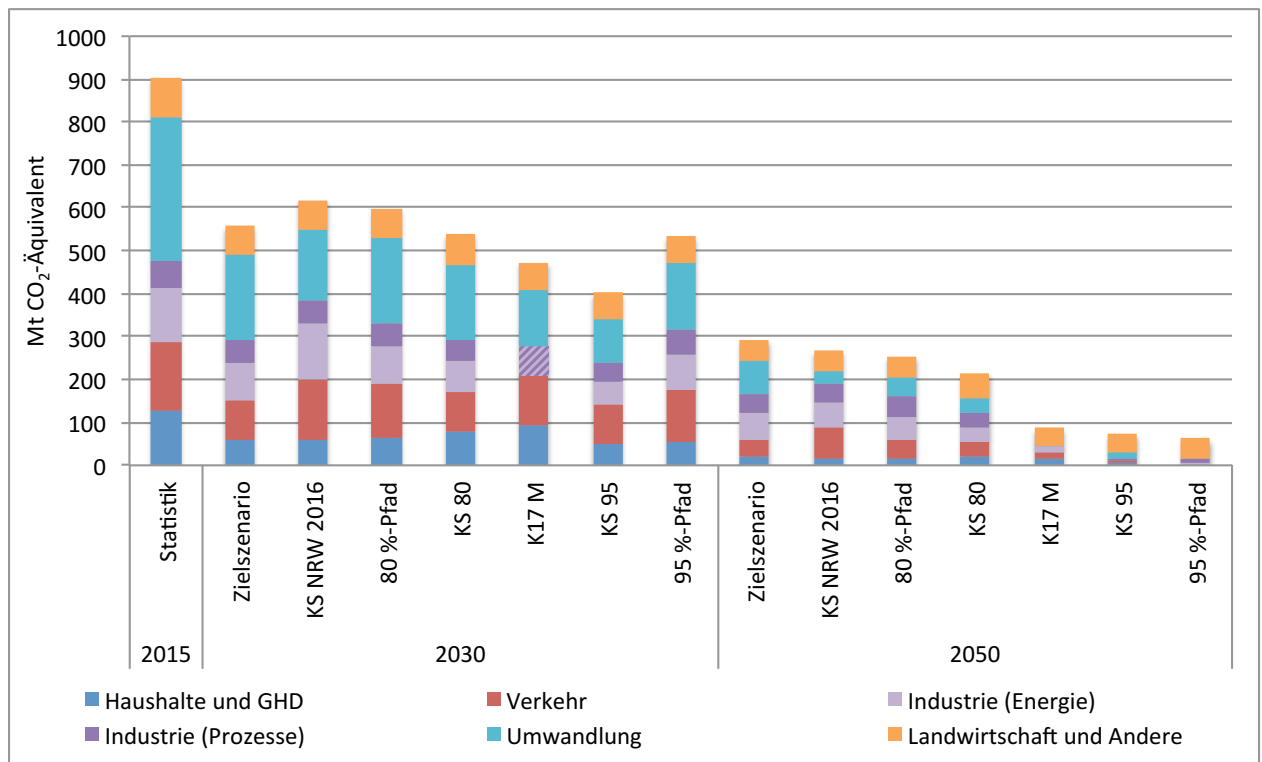


Abbildung 36 THG-Emissionen von Deutschland nach Sektoren und Szenarien in den Jahren 2030 und 2050

Quelle: Eigene Darstellung

Langfristig (bis 2050) können die THG Emissionen insgesamt um wenigstens -77 % auf 293 Mio t CO₂ (Zielszenario) bis zu -95 % auf nur noch 62 Mio t CO₂ (95 %-Pfad) gesenkt werden. Da die beiden Szenarien „Zielszenario“ und „KS NRW 2016“ knapp nicht die nationalen Mindestziele der Bundesregierung erfüllen²⁴, werden sie bei den anschließenden Diskussionen nicht weiter vertieft betrachtet.

Die im Jahr 2050 verbleibenden Emissionen der Industrie betragen je nach Szenario²³:

²³ Für das GreenEe-Szenario fehlen entsprechend konsistente THG-Daten für das Jahr 2050, daher wird es in der Abbildung nicht mit dargestellt. Insgesamt soll mit diesem Szenario in 2050 eine THG Minderung von 95 % ggü. 1990 erreicht werden, wobei die energiebedingten Emissionen vollständig vermieden werden sollen.

²⁴ Sie erfüllen die Ziele „nur“ bezogen auf die energiebedingten THG-Emissionen.

- nur noch gut 1 Mio t CO₂-äq im KS 95²⁵
- ca. 12 Mio t CO₂-äq im K17M und ca. 17 Mio t CO₂-äq im 95 %-Pfad
- rd. 70 Mio t CO₂-äq im KS80 und rd. 98 Mio t CO₂-äq im 80 % Pfad.

Sie zeigen damit eine sehr große und zudem sehr ungleich verteilte Bandbreite, die aus etwa drei Gruppen verschiedener Größenordnungen bestehen. Dahinter verbergen sich die oben bereits qualitativ dargestellten unterschiedliche Annahmen zu Rahmenbedingungen, Strategien und Entwicklungen (siehe Tabelle 10). Besonders interessant und aufschlussreich ist zunächst ein Vergleich zwischen den Szenariovarianten KS 95 und KS 80 sowie 95 %- und 80 %-Pfad, da diese jeweils einen gleichen Rahmen haben.

Die deutlich niedrigeren THG-Emissionen im KS 95-Szenario im Vergleich zu KS 80 resultieren vor allem aus den folgenden Unterschieden:

- Im Industriesektor wird im KS 95-Szenario CCS in Kombination mit einer Substitution von Kohle und Erdgas durch Biomasse eingesetzt. Dies führt zu einer erheblichen Reduktion sowohl der energetischen als auch der prozessbedingten THG-Emissionen der Industrie, die damit aus energetischer Sicht sogar zu einer Senke wird. Insgesamt werden in dem Szenario im Jahr 2050 rund 40 Mt CO₂ abgeschieden und sequestriert (Öko-Institut e.V und Fraunhofer ISI 2015 S. 114 f.; 430).
- Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien liegt mit 734 TWh im KS 95 Fall um 234 TWh über der im KS 80 Fall und ermöglicht damit eine höhere Elektrifizierung (50 % statt 41 %) des Endenergieverbrauchs (Öko-Institut e.V und Fraunhofer ISI 2015 S. 280 f.).
- U. a. die höhere Stromerzeugung ermöglicht es im KS 95-Szenario außerdem, einen nennenswerten Anteil der Endenergie (ca. 4 %) über synthetische Kraftstoffe aus Power-to-Liquid zu decken. Dabei wird allerdings die Hälfte des inländischen Bedarfs an synthetischen Kraftstoffen aus dem Ausland importiert (Öko-Institut e.V und Fraunhofer ISI 2015 S. 299 f.).
- Im KS 95-Szenario werden zudem – insbesondere im Verkehrssektor – deutlich weitergehende energiebedarfsreduzierende Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen angenommen als im KS 80-Szenario. So wird eine stärkere Verlagerung des Personenverkehrs hin zu den energieeffizienteren Verkehrsmitteln des Umweltverbundes angenommen, außerdem eine höhere durchschnittliche Auslastung von Autos sowie ein generelles Tempolimit auf Autobahnen unterstellt. Zudem wird angenommen, dass die durchschnittlichen Raumtemperaturen im Winter moderat gesenkt werden (Öko-Institut e.V und Fraunhofer ISI 2015 S. 115, 119).

Die großen Unterschiede bei den THG-Emissionen im Jahr 2050 im KS 80- und KS 95-Szenario rühren daher im Wesentlichen aus dem Einsatz von Industrie-CCS und ambitionierterer EE-Stromerzeugung – im Zusammenspiel mit einer ambitionierteren direkten und indirekten Elektrifizierung der Endenergiesektoren – her. **Der Einsatz von CCS in der Industrie** stellt dabei eine kritische Pfadabhängigkeit für

²⁵ Der geringe Netto-Wert resultiert aus negativen, energetischen Emissionen

ein Gelingen dieses Szenarios dar. Zudem sind für einen Einsatz folgende, nicht unerhebliche Voraussetzungen nötig bzw. Hemmnisse zu überwinden:

- Umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur großtechnischen Realisierung von Abscheidungsanlagen für Industrieprozesse und bei der Speicherung (Öko-Institut e.V und Fraunhofer ISI 2015 S. 283)
- Änderung des bestehenden CCS-Gesetzes bezogen auf die jährlichen Höchstmengen von 4 Mio. t CO₂ für eine Speicherung (Öko-Institut e.V und Fraunhofer ISI 2015 S. 327)
- Erreichung ausreichend hoher CO₂-Preise (ebda.)
- Synchronisation von langen Vorlaufzeiten für die Genehmigung von CO₂-Speichern mit den langen Re-Investitionszyklen von Industrieanlagen, so dass ein Einsatzbeginn ab dem Jahr 2030 erreicht wird (ebda.)
- Akzeptanz von CCS bei Stahl und Zement (Öko-Institut e.V und Fraunhofer ISI 2015 S. 435 f.)
- Marktreife der CCS-Technologie bis zum Jahr 2030 (ebda.)

Ähnliche Gründe erklären den bedeutenden Unterschied der THG-Emissionen im Jahr 2050 zwischen dem 80 %-Pfad und dem 95 %-Pfad der Studie im Auftrag des BDI:

- Nur im 95 %-Pfad kommt CCS im Industriesektor zum Einsatz, um Prozessemissionen in der Stahl- und Zementproduktion, der Dampfreformierung in der Chemie sowie Emissionen in verbliebenen Raffinerien und bei der Müllverbrennung zu eliminieren. Dabei wird CCS noch intensiver eingesetzt als im KS 95-Szenario. So werden im 95 %-Pfad im Jahr 2050 über 90 Mt CO₂ abgeschieden und sequestriert.
- Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im 95 %-Pfad ist höher als im 80 %-Pfad und ermöglicht somit nicht nur einen kompletten Verzicht auf fossile Energieträger in der Stromerzeugung, sondern eine zusätzliche Bereitstellung von Strom für einen weiteren Anstieg der Elektrifizierung in den Endenergiesektoren.
- Hinzu kommt im 95 %-Pfad im Gegensatz zum 80 %-Pfad ein bedeutender Import von synthetischen Kraft- und Brennstoffen in Höhe von rund 1.200 PJ. Diese im Ausland über erneuerbaren Strom generierten Energieträger werden in dem Szenario v. a. im Verkehrssektor, aber auch in der Industrie sowie in der Stromerzeugung genutzt, um fossile Energieträger zu ersetzen.

2.2.6 Schlussfolgerungen aus der Szenariovergleichsanalyse

Die zuvor dargestellte Metaanalyse von verschiedenen aktuellen Energieszenarien für Deutschland bis zum Jahr 2050 zeigt auf, mit welchen Entwicklungen für das Energiesystem und den Industriesektor langfristig zu rechnen ist und welche unsicher sind bzw. voneinander abhängen. Daraus werden die folgenden Schlussfolgerungen und Fragestellungen für die Forschung im Hinblick auf den Industriesektor im Rahmen der Energiewende gezogen.

Bislang gibt es relativ **wenige industriespezifische Szenariostudien**, die die Industrie explizit und differenziert bzw. vertieft berücksichtigen. Dies scheint sich aber zu ändern, da zuletzt auch brancheneigene Studien (von BDI und Dechema) er-

schiene. Ein Einsatz von LCBTT in der energieintensiven Industrie spielt dabei bisher so gut wie keine Rolle und wird nur in einem Szenario explizit berücksichtigt.

- Es sind zusätzliche Szenariostudien und Systemanalysen notwendig, die die Anforderungen, Potenziale und Rollen der Industrie sowie von LCBTT innerhalb und für die Energiewende betrachten.
- Die neuen brancheneigenen Studien zeigen, dass eine Dekarbonisierung von Industriebranchen bzw. des Industriesektors keine Frage des „Ob...?“ mehr ist, sondern „nur“ noch eine des „Wie...?“.
- Wie können sowohl der Industriesektor als auch energieintensive Branchen künftig besser in Energieszenarien berücksichtigt und integriert werden? Welche Mindestanforderungen sind dabei zu beachten? Wie können tiefgehende branchenspezifische und energiesystemische Szenariostudien miteinander gekoppelt, d. h. gegenseitig nutzbar gemacht werden? Welche globalen Entwicklungen sind für den Industriesektor zu berücksichtigen?
- Welche Rolle können LCBTT für die jeweiligen Industriebranchen, die Minderung der THG Emissionen und die Effizienz bzw. Flexibilisierung (in Szenarien) sowie die Wertschöpfung spielen? Mit welchen trade-offs ist diesbezüglich zu rechnen? Wie sehen diesbezüglich die Referenzsysteme aus und welche windows-of-opportunities oder lock-ins sind wann zu erwarten?

Die 80 % Studien sehen im Vergleich zu den 95 % Studien nur moderate Minderungen bei den **THG-Emissionen der Industrie**, wobei vor allem die prozessbedingten Emissionen nur geringfügig gemindert werden. Die 95 %-Studien gehen darüber hinaus sogar bis hin zur vollständigen Vermeidung von Emissionen in 2050 aus.

- Der 80 %-Pfad ist mit Effizienzanstrengungen zu erreichen, dabei ist eine Aktivierung der Effizienz-Potenziale aus volkswirtschaftlicher Sicht am günstigsten.
- THG Minderungen in der Industrie sind das Gegenteil einer Low-Hanging-Fruit
- Für die Vermeidung von Prozessemissionen sind entweder teure bzw. noch nicht einsatzfähige Technologien (wozu auch CCS gehört) notwendig. Geht man davon aus, dass die Untergrenze der deutschen Klimaziele (80 %) nicht ausreicht, um das *Paris Agreement* zu erfüllen, bedeutet das aber, dass auch dieser „letzte Schritt“ gegangen werden muss.
- Wie können die prozessbedingten THG-Emissionen möglichst auch ohne Einsatz von CCS reduziert werden, um lock-in Effekte zu vermeiden? Welche Wechselwirkungen (und Pfadabhängigkeiten) bestehen zwischen Minderungsstrategien mit und ohne CCS bzw. mit und ohne P2X?
- Welche lock-in Effekte entstehen durch weniger ambitionierte -80 % THG Minderungsstrategien, die dann eine Umsetzung von ambitionierteren (>-95 %) Strategien erheblich erschweren bzw. zu stranded investments führen?
- Wie sehen no-regret Strategien für möglichst weitreichende (agile) THG-Minderungen im Industriesektor aus?

Die **Strategien und Entwicklungen in den Szenarien** hängen stark vom angestrebten Zielniveau der nationalen THG Minderungen ab und unterscheiden sich mit zunehmendem Niveau wesentlich. Die für den Industriesektor relevanten Unterschiede betreffen vor allem die (indirekte) Elektrifizierung, den Import von Wasser-

stoff bzw. synthetischen Energieträgern und CCS Einsatz in der Industrie. Die Strategien zur Effizienzsteigerung und zur Nutzung von erneuerbaren Energien sind dagegen übergreifend sehr wichtig.

- Effizienzsteigerungen und die Nutzung von erneuerbaren Energien sind daher auf jeden Fall von der Industrie weiter zu verfolgen und so weit möglich zu intensivieren. Je mehr, desto besser. Ansonsten muss von den anderen o. g. Strategien viel stärker Gebrauch gemacht (werden), zumindest dann, wenn auch ambitioniertere THG-Senkungen möglich bleiben sollen.
- Wie können die Potenziale zur Effizienzsteigerung und Energie- bzw. Stromeinsparung in der Industrie möglichst sicher und rechtzeitig gehoben werden? Welche Rahmenbedingungen sind hierfür zu schaffen? Welche Wirkungen haben erfolgreiche Effizienzsteigerungen auf die (möglichen und benötigten) industriellen Flexibilisierungspotenziale für das Stromsystem?

Der **Brennstoffverbrauch des Industriesektors** wird bis 2050 im Vergleich zum Stromverbrauch deutlich stärker gesenkt, sodass der Stromanteil am industriellen Energieverbrauch steigt. Dabei sieht in 2050 sogar eines der betrachteten Szenarien (GreenEe) gar keine Nutzung mehr von fossilen Brennstoffen in der Industrie vor. Dies wird durch sehr große direkte und indirekte Elektrifizierung des gesamten Energiesystems sowie durch sehr große Nettoimporte an strombasierten Energieträgern erreicht. Eine (deutliche) **Steigerung der Nettoimporte** von Energieträgern nach Deutschland (je nach Szenario Strom oder strombasierte Brennstoffe) wird darüber hinaus von mehreren, insbesondere den ambitionierteren Szenarien gesehen.

- Diese Entwicklungen werden vor allem in Regionen mit hohem Industrieanteil zu unterschiedlichen Anforderungen und ggf. damit verbundenen Anpassungen bei den entsprechenden Energienetzen führen. Dies gilt auch für den künftigen Bedarf und die Auslastung von industriellen Infrastrukturen. Dabei ist insbesondere die Unsicherheit darüber, welche Anteile auf Strom und auf strombasierte Brennstoffe entfallen, zu beachten.
- Der Verzicht auf fossile Brennstoffe stellt quasi eine sichere Strategie zur Erfüllung auch von sehr ambitionierten Klimaschutzstrategien dar. Daher sollte dieser Ansatz als Referenz für andere Strategien herangezogen und weiter untersucht werden. Dabei ist vor allem auf Anschlussfähigkeit und Synergien zu achten.
- Welche (regionalen) Auswirkungen haben Senkungen des Brennstoffverbrauchs und Elektrifizierungsstrategien auf die (regionalen) Energienetze und ihre Ausbaupläne? Wie sehr sind Elektrifizierungsstrategien von den Verzögerungen beim Ausbau der Stromnetze betroffen? Welche Alternativen sind möglich, falls der Ausbau nicht in dem geplanten Umfang (rechtzeitig) realisierbar ist?
- Welche Import- und Pfadabhängigkeiten sowie Synergien und Konflikte sind bei einer verstärkter Nutzung von verschiedenen strombasierten Brenn- und Kraftstoffen durch verschiedene Branchen zu beachten? Wie kann diesbezüglich eine faire Verteilung von knappen Kapazitäten (z. B. EE-Strom und CO₂-Quellen) erfolgen?

- Welche Wirkungen haben die grundlegenden Veränderungen der gesamten Energieversorgung (auf Angebots- und Nachfrageseite sowie bei den Infrastrukturen) auf die künftigen Standortentscheidungen von Industriebranchen?

Die **Elektrifizierung** des Endenergieverbrauchs wird gemäß Szenariovergleich langfristig und in Abhängigkeit der THG-Zielniveaus zunehmend wichtig. Ambitioniertere THG Minderungen benötigen zusätzlich indirekte Elektrifizierung mittels Power-to-X, wobei der nötige Umfang von Power-to-X offenbar vom CCS-Einsatz in der Industrie abhängt und ohne CCS stark ansteigen wird (muss). Dabei ist dieser Einsatz noch von vielen Voraussetzungen abhängig und damit unsicher.

- Der Einsatz von CCS in der Industrie will wohlüberlegt sein, weil er zu Weichenstellungen führt, die nicht oder nur wenig kompatibel mit der Elektrifizierung ist. Diese Strategie stellt eine kritische Pfadabhängigkeit für ein Gelingen dieses Szenarios dar.
- Im Hinblick auf eine sichere Erfüllung auch von ambitionierten Klimaschutzziele sollten daher neben einem Einsatz von CCS in der Industrie in jedem Fall auch Strategien zur Elektrifizierung entwickelt und begonnen werden.

- Wie können angesichts der vielfältigen, teils synergetischen, teils antagonistischen, teils abhängigen und teils unabhängigen Entwicklungen und Strategien, die für die Erreichung der unterschiedlich ambitionierten THG Minderungsziele nötig sind, die damit verbundenen trade-offs so weit wie möglich reduziert und damit möglichst robuste Entscheidungen getroffen werden?
- Welche Beiträge können diesbezüglich multi-objective-optimization und –decision-making für die Abbildung des Industriesektors in Energiemodellen und szenarien leisten?

Darüber hinaus sehen die meisten Szenarien sowohl im Verkehr als auch in der Industrie die Notwendigkeit zur Elektrifizierung sowie teilweise zum Einsatz synthetischer Brenn- und Kraftstoffe.

- Hiermit sind sowohl mögliche Synergien als auch Konflikte verbunden, die noch genauer zu analysieren sind.

Alle betrachteten Studien gehen langfristig von einem sehr hohen Anteil fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugung aus, so dass der Lastausgleich, insbesondere auch **Flexibilitäten in der Industrie**, wichtiger für die Stabilität des Energiesystems werden. Eine Flexibilisierung des Industriesektors erfolgt in den Szenarien jedoch nur vereinzelt in Form von Power-to-X und am häufigsten in Form von DSM (als *low hanging fruit*).

- Der mögliche Beitrag des Industriesektors zur Sektorkopplung und zum Ausgleich der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeugung wird damit unterschätzt. Eine stärkere Flexibilisierung (und ggf. Elektrifizierung) der Industrieprozesse kann zusätzlich, ggf. besser zur Stabilisierung der Stromversorgung und zur Integration von EE-Strom beitragen. Allerdings kann dies parallel zu Nachteilen bei der Effizi-

enz und der Wirtschaftlichkeit führen, sofern diesbezüglich keine geeigneten Rahmenbedingungen (Marktwerte für Flexibilitäten) geschaffen werden. Die Vor- und Nachteile sind gegeneinander abzuwägen.

- Wie können verschiedene industrielle Flexibilitäten standortübergreifend synergetisch gebündelt werden? Welche Voraussetzungen und Rahmenbedingungen sind dafür nötig? Welche Flexibilitäten führen wie stark zu Effizienz- bzw. Qualitätseinbußen? In welchem Maße ist das vertretbar bzw. inwiefern wird es dadurch zu einer Abkehr von inflexiblen, da hochintegrierten Verfahren, zu flexibleren und damit einfacheren Verfahren kommen oder einer Verlagerung von Standorten kommen?
- Wie passen grundlastartige Industrieprozesse (langfristig) mit fluktuierendem Stromangebot zusammen? Wie werden diesbezüglich die Strommärkte umgestaltet und welche Auswirkungen hat dies auf die industriellen Stromverbraucher bzw. die Strombeschaffung?

2.3 Generische Zielszenarien zur Technologieauswahl

Zur Auswahl der genauer zu untersuchenden Technologieoptionen wurde der aktuelle Wissensstand zu möglichen Strategien und Technologien in mögliche Zukunftsbilder einer weitgehend treibhausgasneutralen energieintensiven Grundstoffindustrie in NRW dargestellt und die hierfür zur Anwendung kommenden Technologien identifiziert. Die dafür vom Wuppertal Institut entwickelten Szenarien sind exemplarische, in sich konsistente Zukunftsbilder, die jeweils einen Extremfall des Technologie- und Strategieansatzes darstellen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Bandbreite der möglichen eingesetzten Technologien abzubilden und stellt noch keine optimierte oder in Sektoren jenseits der Industrie und des Verkehrs eingebettete Gesamtstruktur dar.

Mit Hilfe der Szenariotechnik wurden konsistente Systeme einer dekarbonisierten Grundstoffindustrie in NRW entworfen. Die Industrien werden dabei möglichst bottom-up abgebildet, d. h. explizit in Bezug auf die eingesetzten Produktionstechnologien und Energieträger. Dabei wurde der Möglichkeitsraum weit gespannt, d. h. die Szenarien sind als prototypische Abbildungen eines Systems im Zeitraum zwischen 2040 und 2060 zu sehen, nicht als optimierte (Misch-)Systeme mit einer festen Zieljahreszahl. Die Systemprototypen sollen Vor- und Nachteile jeder Art aufzeigen und auf mögliche Barrieren beim Übergang vom heutigen System in das zukünftige System hinweisen sowie mögliche Koevolutionen und Lock-ins aufdecken.

Im Rahmen dieses Kapitels wurden keine Pfade mit Stützjahren (z. B. 2030, 2040) erarbeitet, dies könnte in späteren Arbeitsschritten erfolgen, was dann auch eine Analyse der Entwicklung auf der Zeitachse ermöglichen würde.

Die Szenarien können somit

- prototypische in sich stimmige Zielzustände einer zukünftigen LC Industrie in NRW aufzeigen,
- Hinweise auf die potenzielle Relevanz einzelner Technologien und Infrastrukturen geben,
- eine Basis bilden für die Diskussion möglicher Wechselwirkungen mit der (Transport-) Infrastruktur für Energieträger (bzw. Produkte) sowie
- eine Analyse der Relevanz regionaler Konzentration in Produktionsclustern ermöglichen.

2.3.1 Systemausschnitt und Ableitung von Dekarbonisierungsstrategien

Für die Dekarbonisierung der energieintensiven Grundstoffindustrien werden unterschiedliche technische Lösungen in der Literatur diskutiert (s. beispielsweise Bataille 2018). Die technischen Lösungen sind nur Teil der Gesamtlösung, die auch nachfrageseitige Strategien sowie die Schließung von Stoffkreisläufen (circular economy) umfasst. Die Diskussion in diesem Bericht abstrahiert hiervon, indem sie sich auf technische Lösungen mit ihren infrastrukturellen Anforderungen konzentriert und

ansonsten von weitgehend konstanten Produktionsmengen (mit Ausnahme bei Kraftstoffen) ausgeht.²⁶

Es wurden drei prototypische zukünftigen Systeme identifiziert, die jeweils eine individuelle technische Strategie darstellen, die alle in der aktuellen Szenario-Literatur diskutiert werden (s. Abbildung 37):

- Carbon Capture and Storage (CCS) in der Industrie (Szenario "iCCS"),
- indirekte Elektrifizierung (Power-to-X, Szenario "P2X") und
- direkte Elektrifizierung (Szenario "all-electric")

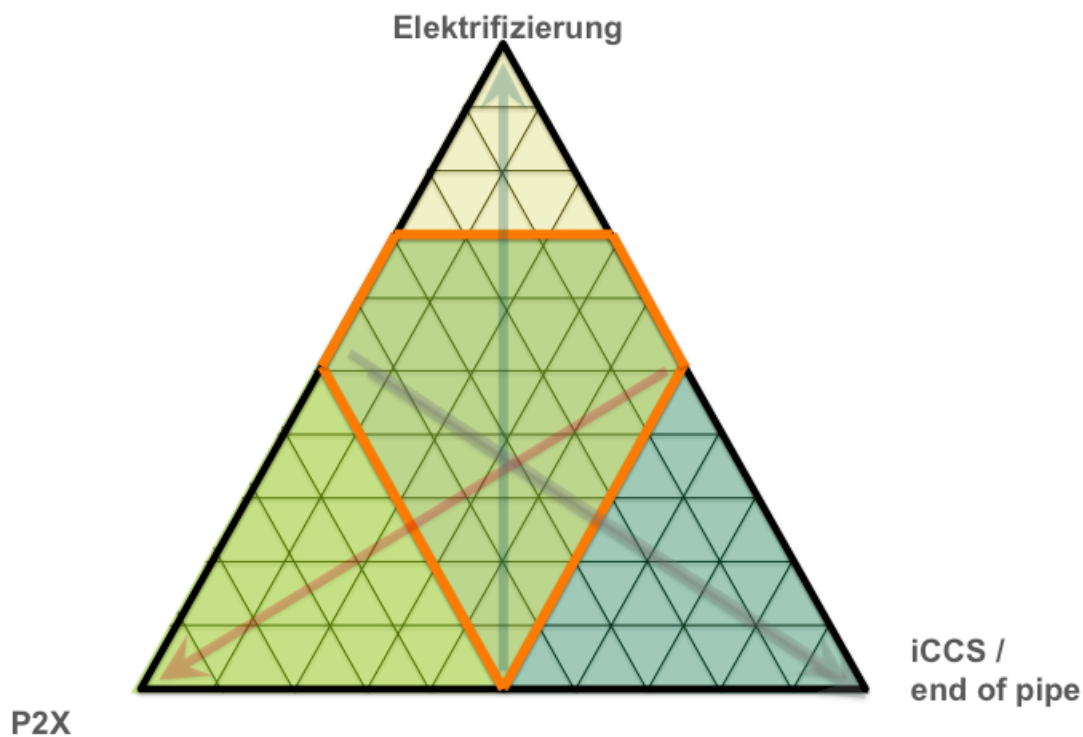


Abbildung 37 Der (technologische) Möglichkeitsraum für eine LC Industrie

Quelle: Eigene Darstellung

CCS ist eine sehr prominente Strategie in der internationalen Diskussion über THG-Minderung im Energie- und Industriesektor. Der IPCC (Fischedick et al. 2014b) betont die Bedeutung dieser Strategie und viele Modelle, darunter das Energiesystemmodell der IEA, weisen CCS als die wirtschaftlichste Strategie zur Erreichung ehrgeiziger Klimaschutzziele aus (z. B. das sogenannte "Beyond two degrees scenario" (BY2DG); (IEA 2017)). Eine jüngste Synthese länderspezifischer, tiefer Dekarbonisierungspfade verdeutlicht auch die Bedeutung von CCS als Strategie (SDSN und IDDRI 2015).

²⁶ Selbst eine solche Annahme für NRW muss nicht inkonsistent sein mit einer circular economy, denn aufgrund der räumlichen Ballung könnte eine weitere Konzentration der Produktion innerhalb Deutschlands oder gar Nordwest-Europas in NRW stattfinden. Allerdings steht NRW hier in Konkurrenz mit anderen wettbewerbsfähigen Standorten in Flandern und Südholland. Aufgrund der bestehenden engen infrastrukturellen Verflechtung sind jedoch auch symbiotische Beziehungen (ähnlich wie heute) denkbar.

Bei der Umsetzung sieht es allerdings noch deutlich schwieriger aus. Weltweit gibt es bisher jedoch keine großtechnische Anwendung von CCS in Kraftwerken. Insbesondere in der EU sind F&E-Aktivitäten für CCS stark herunter gefahren worden. In Deutschland gibt es nur noch ein größeres Forschungsprojekt (Post-combustion am Kraftwerk Niederaußem) (Markewitz et al. 2017).

Auch die *Elektrifizierung* ist eine wichtige Strategie in der Szenarioliteratur. Die Erzeugung von Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse wird jedoch oft als "Nebenprodukt" des Ausbaus der regenerativen Stromerzeugung zur Nutzung der "Überschussproduktion" beschränkt – zumindest für entwickelte Regionen außerhalb des Sonnengürtels der Erde. Elektrofahrzeuge sind eine weitere Option, die endenergetisch weitaus effizienter ist als der Einsatz von Verbrennungsmotoren (Internal Combustion Engine, ICE). Tiefgreifende Kostensenkungen bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien haben die Elektrifizierung nun attraktiver gemacht und die Diskussion geht von der Annahme des Einsatzes von "überschüssigem Strom" hin zu Szenarien, die zusätzliche elektrische Kapazitäten für eine weitgehende Dekarbonisierung durch Elektrifizierung vorsehen.

Die Elektrifizierungsdiskussion geht dabei in zwei Richtungen (siehe z. B. (Lechtenböhrer et al. (2017)): Die erste ist die indirekte Nutzung von Elektrizität, die Strom in einen anderen (wasserstoffbasierten) Energieträger (*P2X*) umwandelt, der ähnliche Eigenschaften wie Erdgas oder Erdölprodukte aufweisen kann. Eine solche *P2X*-Strategie wird beispielsweise dezidiert im aktuellen Szenario 95 %-Klimapfad einer Studie von BCG und Prognos (2018) im Auftrag des BDI modelliert. Die zweite Möglichkeit der Elektrifizierung ist die *direkte Umwandlung von Strom in Nutzenergie*, z. B. in Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV), Wärmepumpen und Elektrokesseln oder elektrischen Öfen. Diese Strategie wird für die europäische Schwerindustrie von Lechtenböhrer et al. (2016) und für Deutschland von Guminski (2015) diskutiert. Die meisten aktuellen Szenarien wurden anhand von Modellen mit Optimierungsansätzen bestimmt, ohne jedoch Infrastrukturen explizit abzubilden. Solche Szenarien enthalten oft beide Richtungen der Elektrifizierung in Mischformen (z. B. E-Autos und Autos mit Verbrennungsmotoren).

Die Nutzung von *Biomasse* ist die vierte technische Kernstrategie, die in der Dekarbonisierungsliteratur diskutiert wird. Allerdings zeigt die Potenzial- und Szenariodiskussion auch die deutlichen Beschränkungen für nachhaltig erzeugte Biomasse auf. Biomasse alleine reicht deshalb als Dekarbonisierungsstrategie nicht aus. Aus diesem Grund wurde kein eigenes Biomasse-Szenario entwickelt, allerdings wird diese Strategie in allen drei Systemen berücksichtigt. Das vollelektrische „all-electric“ Szenario verzichtet zwar auf Biomasse beim Endenergieeinsatz, benötigt aber andererseits große Mengen an erneuerbarem Strom im Land, so dass Biomasse dann der heimischen Stromerzeugung zugeführt werden könnte.

Die Analyse beschreibt den stationären Zustand eines kohlenstoffarmen Energiewirtschafts-Infrastruktursystems für das Land NRW. Je nach Zielsetzung der THG-Minderung könnte ein solches System bis 2040, 2050 oder sogar 2060 bestehen. Wir verwendeten 2050 als Szenariojahr unter Verwendung von 2050 Szenario-Daten aus anderen Studien.

Insgesamt besteht das analysierte System aus den wichtigsten Energienachfragesektoren des Energiesystems, d. h. dem verarbeitenden Gewerbe (einschließlich der Versorgung mit Brennstoffen), dem Verkehrssektor und dem Bausektor. Aber nur das verarbeitende Gewerbe und der Verkehrssektor wurden szenariospezifisch analysiert. Hauptgrund dafür ist die starke Verflechtung von Chemie und Verkehr über die Raffinerien und die Petrochemie sowie ein möglicher Wettbewerb um knappe Energieressourcen wie Biomasse - was eine integrierte Bewertung erforderlich macht.

Nordrhein-Westfalen ist der Brennpunkt der energieintensiven Industrie innerhalb Deutschlands, wie die Karte links in der folgenden Abbildung zeigt, auf der die absoluten Energiebedarfe der energieintensiven Grundstoffindustrien nach Standorten abgetragen sind.²⁷ Keine andere Region Deutschlands weist eine solche räumliche Konzentration auf wie die Rheinschiene zwischen Köln und Duisburg sowie das östlich angrenzende nördliche Ruhrgebiet.

Räumliche Verteilung des Energiebedarfs der energieintensiven Grundstoffindustrien in Deutschland

Standorte der energieintensiven Grundstoffindustrien in NRW nach Branchen

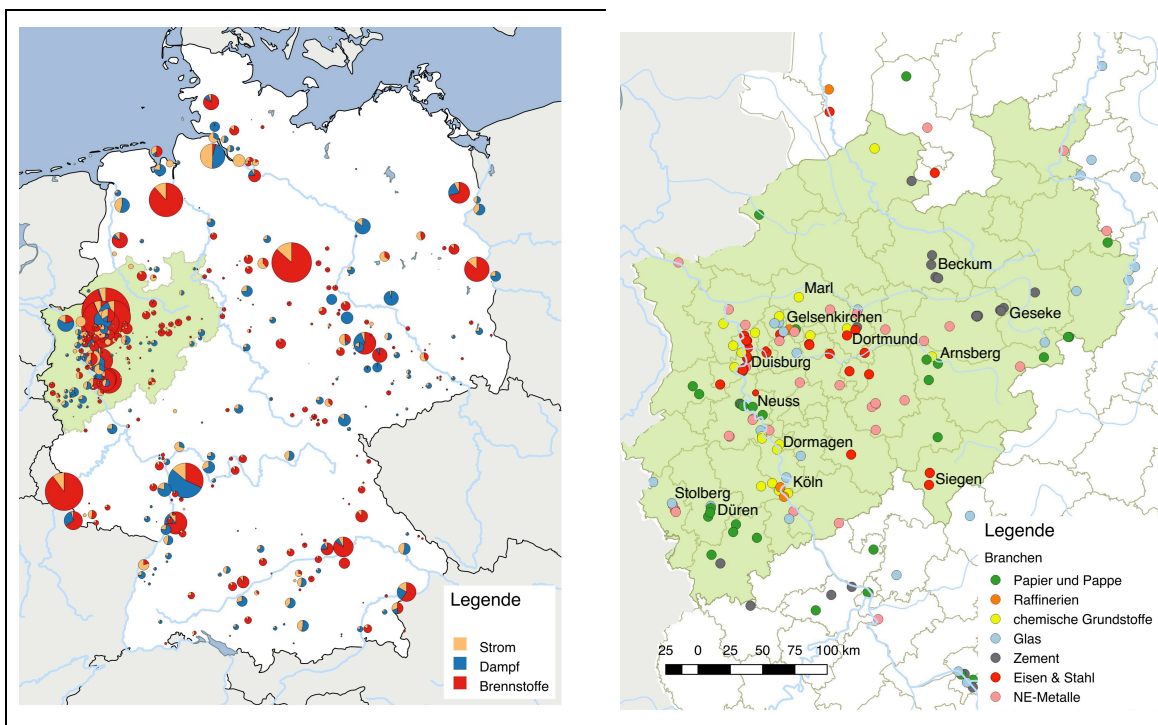


Abbildung 38 Räumliche Aspekte der energieintensiven Grundstoffindustrien in Deutschland und NRW

Quelle: Eigene Darstellung nach der Datenbank des Energiesystemmodells WISEE ESM

²⁷ Es handelt sich hierbei um modellierte Daten für 2015. Der stoffliche Energiebedarf ist nicht enthalten und hat seinen Schwerpunkt an den Raffineriestandorten.

Die daneben stehende Karte weist die Standorte der Industrien nach Branchen innerhalb NRWs aus. Hier wird deutlich, dass NRW auch als Labor für eine Dekarbonisierung der energieintensiven Grundstoffindustrien insgesamt betrachtet werden kann, denn das gesamte Spektrum der Branchen (mit Ausnahme der Zellstoffindustrie) ist dort vertreten.

Die standortscharfe Abbildung der Industrien mit GIS-Koordinaten innerhalb der Prozess-Datenbank des Energiesystemmodells WISEE ermöglicht die spätere Infrastrukturanalyse.

Folgende Prozesse wurden im Rahmen der Szenarioerstellung explizit unter Annahme physischer Produktionsmengen bottom-up abgebildet.

Tabelle 11 In der Modellierung explizit abgebildete Produktionsprozesse

Papier und Papppe	Mechanische Zellstoffherstellung Papierrecycling Papiermaschinen
Raffinerien	Bereitstellung von Kraftstoffen Bereitstellung von petrochemischen Feedstocks
Chemische Grundstoffe	Plattformchemikalien für Kunststoffe Ammoniak
Mineral	Containerglas Flachglas Zementklinker Branntkalk
Metallindustrie	Oxygenstahl Recyclingstahl Warmwalzen von Stahl Aluminiumelektrolyse Aluminiumrecycling Aluminiumverarbeitung

Quelle: Eigene Darstellung

Der Energiebedarf und die Kohlenstoffbilanz der Produktion von dreizehn energieintensiven Materialien und vier verschiedenen Brennstoffen wurden unter Berücksichtigung prozessspezifischer Daten bottom-up berechnet. Der sonstige Energiebedarf (z. B. für weniger energieintensive Industrieprozesse und Gebäude) wurde einem vom Wuppertal Institut entwickelten und in Görner et al. (2018) beschriebenen Klimaschutzszenario entnommen. Die CO₂-Bilanz berücksichtigt nicht nur die energie-

bedingten CO₂-Emissionen in die Atmosphäre (ein Standardmerkmal eines jeden Energiesystemmodells), sondern auch den gesamten Kohlenstoffumsatz innerhalb des Energiesystems, einschließlich fossilen, atmosphärischen und biogenen Kohlenstoffs. So kann auch gespeicherter Kohlenstoff in Produkten oder geologischen Speichern berücksichtigt werden.

Die Berechnung für die drei zukünftigen Systeme erfolgte in einem Tabellenkalkulationsmodell unter Verwendung der physikalischen Produktionsmengen in der Industrie sowie der Laufleistung von Pkw und Lkw als Aktivitätsindikatoren. Diese wurden mit geeigneten Energieintensitäts- und Kohlenstoffintensitätsindikatoren multipliziert, um Energie- und CO₂-Ströme abzuleiten. Die Intensitätsindikatoren für die Industrie (inkl. Brennstoffversorgung) wurden aus der WISEE-ESM-Industry-Stock-Datenbank (Schneider et al. 2014) extrahiert, wo Daten zu heutigen Standardtechnologien, Best-Verfügbare-Technologie (BVT) sowie Zukunftstechnologien (entwickelt und erprobt, aber noch nicht wirtschaftlich) verfügbar sind. Diese Indikatoren wurden bereits in verschiedenen Projekten unter paralleler Analyse von Produktions-, Energie- und THG-Statistiken verwendet und validiert sowie mit Stakeholdern und Experten diskutiert.²⁸

Technische (Effizienz-)Parameter für den Verkehrssektor wurden aus einer Studie des JRC (2013) für einen generischen Pkw-Typ (für die Jahre 2020+) und aus (Wietschel et al. 2017) für leichte und schwere Nutzfahrzeuge („Szenario Pkw 2030“) abgeleitet. Effizienzindikatoren für Luftfahrt und Binnenschifffahrt wurden aus dem von Görner und Lindenberger (2018) beschriebenen Szenario extrahiert.

Die unterschiedlichen szenariospezifischen Annahmen für Industrie und Verkehr wurden mit nur einem gemeinsamen Szenario für Gebäude in NRW aus einer anderen Studie (Görner und Lindenberger 2018) kombiniert, das aus einem Mischsystem mit Wärmepumpen, Fernwärme und Gasversorgung besteht und somit über die drei Szenarien hinweg gleich ist.

Energieeffizienzsteigerungen werden in allen drei Szenarien als bestverfügbare Technologieanwendungen als Standard für die Reinvestition in alle Anwendungen berücksichtigt.

Die Stromerzeugung wurde als 100 % erneuerbar und damit klimaneutral angenommen, im iCCS-Szenario jedoch gibt es zwei Ausnahmen: industrielle Kraft-Wärme-Kopplung, die fossil befeuert (mit CCS) und Stromerzeugung aus Abfallverbrennung (mit CCS), die beide einen Teil des Strombedarfs in diesem Szenario decken.

Um die Komplexität zu reduzieren, wurde angenommen, dass die physische Produktion energieintensiver Güter der heutigen Produktion in Nordrhein-Westfalen entspricht. Weitere Aktivitätsdaten wie "sonstiger Energiebedarf" der Industrie oder die Laufleistung von Autos und Flugzeugen wurden einem NRW-spezifischen Energies-

²⁸ Siehe z. B. die Projekte „Dynamische Betrachtung der THG-Emissionen und von Klimaschutzmaßnahmen für den Klimaschutzplan NRW“ (<https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/395/>), „Klimaschutzkonzept Rheinland-Pfalz“ (<https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/506/>) und „Klimaschutzszenarien für die Hafenregion Rotterdam“ (<https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/628/>).

zenario des Wuppertal Instituts entnommen, das in Görner und Lindenberger (2018) beschrieben ist.

Tabelle 12 fasst die Technologieannahmen für jedes der drei Szenarien zusammen. Die jeweilige Szenariostoryline wird im Folgenden beschrieben.

Tabelle 12 Matrix der in den Szenarien abgebildeten Technologien

Energiedienstleistung	iCCS	P2X	all-electric
Verkehr			
Pkw und LNF	Biomethan, importiert	Methanol ICE (importiert)	Batteriefahrzeuge
SNF	Biodiesel, importiert	Methanol ICE (importiert)	Oberleitungs-Lkw mit Methanol fuelled range extender
Binnenschifffahrt	Biodiesel, importiert	Methanol (importiert)	Methanol
Flugverkehr	Synthetisches Kerosin, importiert	Synthetisches Kerosin, importiert	Synthetisches Kerosin
Gebäude	gleiche Annahmen für alle Szenarien		
Verarbeitendes Gewerbe			
Oxygenstahl	Schmelzreduktion mit CCS	DRI mit Wasserstoff (importiert)	DRI mit Wasserstoff
Kunststoffe	Steam Cracking mit CCS	power-to-plastics via (importiertem) Methanol	power-to-plastics via Methanol
große Industrieöfen	erdgas- und kohlegefeuerte Oxyfuelöfen mit CCS	Biomethan, importiert	Elektrische Öfen (power-to-heat)
Dampf	Erdgas-KWK mit CCS oder mit Biomethan (importiert) gefeuerte Dampfkessel	Biomethan, importiert	Elektrodenkessel, Hochtemperatur-Wärmepumpen ^{*)}
anderer industrieller Wärmebedarf	Biomethan, importiert	Biomethan, importiert	Elektrodenkessel, Hochtemperatur-Wärmepumpen ^{*)}
Stromerzeugung	erneuerbar; Ausnahme: zentrale KWK mit Erdgas und CCS und Abfallverbrennung mit CCS	erneuerbar	erneuerbar

^{*) Hochtemperatur-Wärmepumpen könnten mit industrieller Abwärme und/oder geothermischer Energie betrieben werden. Mit anschließender Brüden-Verdichtung lässt sich Dampf in beliebiger Form (Temperatur/Druck) bereitstellen.}

Quelle: Eigene Darstellung nach der Datenbank des Energiesystemmodells WISEE ESM

2.3.2 Szenario „iCCS“

Das iCCS-Szenario ist dem heutigen System am ähnlichsten, da es überwiegend auf den heute verwendeten Technologien aufbaut und CCS als End-of-the-Pipe-Technologie ansetzt. Für die von CCS betroffenen Teile der industriellen Produktion

müssen die Anlagenbestände jedoch teilweise angepasst werden, um CO₂-Abscheideraten von nahezu 100 % zu erreichen. Ein Beispiel ist Primärstahl, der heute im Hochofen/Konverter (BF/BOF) hergestellt wird. Dieser Prozess wird im Szenario auf den Schmelzreduktionsprozess umgestellt, der einen höheren Gesamtwirkungsgrad und eine höhere CO₂-Konzentration in den Abgasströmen aufweist, was eine effizientere Abscheidung von CO₂ bei hohen Abscheideraten ermöglicht als die BF/BOF-Route. Eine weitere Annahme ist, dass Oxyfuel-Brenner bestehende Brenner in Industrieöfen der Glas- und Zementindustrie ersetzen werden. Ein solcher Ersatz sollte gegen Ende des Szenariohorizonts abgeschlossen werden, aber andere (Nachrüst-)Optionen zur CO₂-Abscheidung können eher eingeführt werden, um eine frühzeitige Einführung von CCS zu ermöglichen.

Für den Verkehr gibt es keinen realistischen Weg für CCS, so dass zusammen mit der Verbesserung der Energieeffizienz eine Umstellung auf Biodiesel oder Biomethan angenommen wird. Im Hinblick auf das erwartete starke Wachstum in der Luftfahrt wurde dort keine Nutzung von (knapper) Biomasse angenommen. Da Biokraftstoffe der ersten Generation ohnehin nicht in Flugzeugturbinen eingesetzt werden können, muss ein synthetisches Kerosin bereitgestellt werden.

Eine in der Szenario-Literatur (z. B. (IEA 2017)) häufig beschriebene Alternative wäre die Kompensation des fossilen Energieverbrauchs im Verkehr durch den Einsatz von Biomasse-CCS in Kraftwerken (BECCS). Letzteres mit Nettonegativ-Emissionen ermöglicht dann eine Netto-Klimaneutralität. Da CCS für Kraftwerke ausgeschlossen wurde, wurde diese Option nicht in Betracht gezogen.

Bereits erwähnt wurde der Einsatz von CCS in der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung als eine Ausnahme für Kraftwerks-CCS in diesem Szenario. So kann der erhebliche Dampfbedarf in den Chemieparks und Papierfabriken in NRW über fossile Brennstoffe und CCS gedeckt werden, was eine gewisse Eigenproduktion von Strom ermöglicht.

Kohlenwasserstoffprodukte (z. B. Kunststoffe) werden wie heute auf Basis von Ölderivaten als Rohstoff hergestellt. Um die Klimaneutralität zu gewährleisten, werden die Produkte nach Ablauf ihrer Lebensdauer in Müllverbrennungsanlagen mit CCS verstromt. Eine weitere Option, die prinzipiell mit dem iCCS-Fall vereinbar wäre, wäre die Nutzung von heimischer Braunkohle als Kohlenstoffquelle für Kohlenwasserstoffe. Aufgrund des ungünstigeren Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnisses der Braunkohle würde ihr Einsatz jedoch zu zusätzlichem CO₂ (das gespeichert werden müsste) oder zu einem zusätzlichen Bedarf an (Elektrolyse-)Wasserstoff führen.

2.3.3 Szenario „P2X“

Das P2X-Szenario hat auch viele Ähnlichkeiten mit der heutigen Deckung des Endenergiebedarfs, aber auch einige große Unterschiede dazu. Kraftstoffe bleiben in diesem Szenario flüssig. Zur Komplexitätsreduktion wurde in diesem Szenario synthetisches RES-basiertes Methanol als universeller "Referenz"-Energieträger angenommen, der auf dem Weltmarkt gehandelt, über Tanker nach Europa verschifft und in Pipelines in den NRW-Markt eingespeist wird.

Das RES-basierte Methanol kann im Sonnengürtel der Welt (z. B. Nordafrika, Mittlerer Osten, Australien) mit Strom aus günstigen Wind- und Sonnenquellen sowie CO₂ aus der Luft erzeugt werden.

Methanol kann in modifizierten Benzin- oder Dieselmotoren von Pkw und Lkw eingesetzt werden. Für die Luftfahrt wird die Verwendung von synthetischem Kerosin angenommen (wie in den beiden anderen Szenarien). Diese könnte entweder importiert oder durch Hydrierung in einer Anlage in einem Seehafen (z. B. Rotterdam) oder in NRW aus Methanol gewonnen werden.

Der Dampfbedarf von Industrieparks und Papierfabriken wird mit methanbefeuchten Kesseln (ohne Kraft-Wärme-Kopplung) gedeckt. Es wurde davon ausgegangen, dass das bestehende Gasnetz genutzt wird, um Biomethan (d. h. Biogase, die aus Holzbiomassen gewonnen und nach den Vorgaben des NG-Netzes an die Industriekunden konditioniert werden) zu liefern. Biomethan wird über bestehende Erdgaspipelines, z. B. aus Osteuropa, importiert.

Der neue Referenzenergieträger Methanol wird auch zur Versorgung von kohlenwasserstoffbasierten Materialien (z. B. Kunststoffe und Lösungsmittel) eingesetzt. Das Szenario geht davon aus, dass das importierte Methanol innerhalb NRWs zu Olefinen und Aromaten verarbeitet wird, den entscheidenden Bausteinen der organischen Chemie. Eine weitere Möglichkeit wäre der direkte Import von Olefinen wie Ethylen und Propylen über Schiffe und (teilweise vorhandene) Pipelines.

Da die Vergasung von Kunststoffabfällen eine recht effiziente Möglichkeit ist, Synthesegas für die Methanolproduktion zu liefern (Brems et al. 2013), wird davon ausgegangen, dass die Vergasung und die Umwandlung in Methanol an den bestehenden petrochemischen Clustern in NRW stattfinden wird.

NRW ist das wichtigste stahlerzeugende Bundesland innerhalb Deutschland. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass die Stahlproduktion auf die wasserstoffbasierte Direktreduktion von Eisenerz zu Eisenschwamm und die Weiterverarbeitung zu Rohstahl in einem Elektrolichtbogenofen verlagert wird (Fischedick et al. 2014a). Um den Wasserstoffbedarf der Stahlindustrie (und einen zusätzlichen Bedarf in der chemischen Industrie) zu decken, wird in diesem Szenario Wasserstoff nach NRW importiert.

2.3.4 Szenario „all-electric“

Das Szenario "all-electric" geht von den größten Veränderungen der Infrastruktur- und Technologiebestände innerhalb der in diesem Beitrag analysierten Szenarien aus: Das gesamte Straßentransportsystem (d. h. alle Pkw, Busse und Lkw) sowie der gesamte industrielle Produktionsbestand wird auf den Einsatz eines anderen Energieträgers, d. h. Strom, umgestellt. Für einige Anwendungen werden Reinvestitionen in elektrische Anwendungen günstiger sein als herkömmliche Technologien. Insbesondere Elektro-Öfen sind typischerweise einfacher aufgebaut und können energieeffizienter betrieben werden als Öfen mit Brennern (siehe z. B. Schüwer et al. 2018, Guminski 2015).

Es liegt jedoch auf der Hand, dass ein solch radikaler Umbau des Energiesystems auch neue Infrastrukturen erfordert, d. h. ein deutlich leistungsfähigeres Stromnetz

auf allen Spannungsebenen (einschließlich eines paneuropäischen Hochspannungs-Gleichstromnetzes) sowie zusätzliche Speicherkapazitäten für elektrische Energie.

In dem hier skizzierten System importiert NRW auch Strom zur Erzeugung von Methanol im Inland für die Materialversorgung, was eine eher radikale Annahme ist. Da dies ohnehin eine indirekte Art der Stromnutzung ist, hätte auch von einem Import dieses P2X-Produkts ausgegangen werden können, ohne die Konsistenz eines voll-elektrischen Szenarios zu gefährden. Der Grund für die Annahme der Inlandsproduktion war jedoch eine Abschätzung der maximal möglichen Stromeinfuhren, wenn die industrielle Wertschöpfung in NRW so weit wie möglich erhalten bliebe.

2.4 Kohlenstoffbilanz der Szenarien

Abbildung 39 zeigt die Kohlenstoffbilanzen der drei Szenarien und gibt den jährlichen Kohlenstoffumsatz innerhalb des Energie- und Produktsystems an (angegeben durch die Höhe der "Energiesystembox"). Der Kohlenstoffumsatz kann auf der Quelleseite definiert werden als

- die Menge an Kohlenstoff (CO₂-Äquivalent) bei der Gewinnung fossiler Rohstoffe (Brennstoffe, Kalkstein) plus
- Kohlenstoff (CO₂-Äquivalent), gespeichert in (Kunststoff-)Abfälle, die in das Energiesystem zurückgeführt werden plus
- CO₂ aus der Atmosphäre durch Biomasseanbau oder Abscheidung aus der Luft (direct air capture, DAC).

Auf der Seite der Senken wird der Kohlenstoffumsatz widergespiegelt durch

- CO₂ (und CO) Emissionen (auch aus biogenen Quellen) plus
- Speicherung von Kohlenstoff in Produkten (z. B. Kunststoffen) plus
- geologische Speicherung von CO₂ (CCS).

Das "all-electric" Szenario (auf der rechten Seite der Abbildung) ist offensichtlich der einzige echte Low-Carbon-Fall - die beiden anderen sind dagegen netto kohlenstoffarm. Der Kohlenstoffumsatz im all-electric-Szenario beträgt 31 Mio. t/a und beschränkt sich auf den prozessbedingten Kohlenstoffeinsatz und den Einsatz von Kohlenwasserstoffen, insbesondere die Rückführung von Kunststoffabfällen in das System sowie die absoluten Bestandserhöhungen bei Kunststoffen (19 Mio. t/a). Aufgrund der für alle drei Szenarien gültigen Gesamtannahme eines gemischten Systems im Gebäudesektor kommt es auch zu einer gewissen Nutzung von Biogas mit entsprechender CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre und entsprechenden Emissionen.

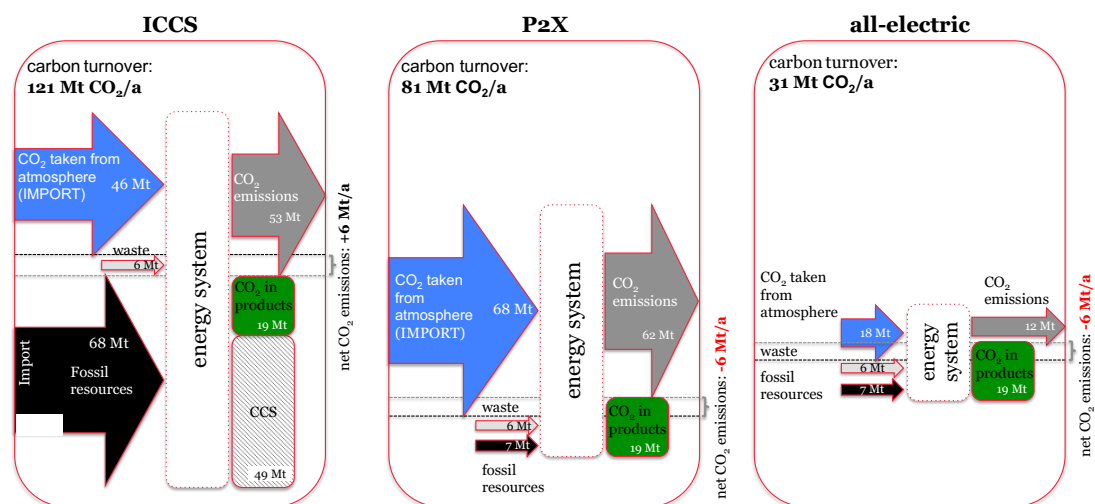


Abbildung 39 Kohlenstoffbilanzen der drei untersuchten Systemen (Jahresflüsse)

Quelle: Eigene Darstellung

In allen drei Szenarien gibt es die gleiche Menge an Kohlenstoff im (Kunststoff-) Abfall, die nach Ablauf der Nutzung in das Energiesystem zurückfließt (6 Mio. t/a). Die Menge an Kohlenstoff, die bei der jährlichen Neuproduktion von Kunststoffwaren

gebunden wird, wird ebenfalls in allen drei Szenarien als gleich angenommen (19 Mio. t/a), was einen massiven jährlichen Bestandsanstieg von Kunststoffen auf heutigen Niveau bedeutet.

Prozessbedingte CO₂-Emissionen in Höhe von 7 Mio. Tonnen CO₂/a aus dem Kohlenstoffeinsatz in der Sekundärstahl- und Aluminiumelektrolyse, der Kalk- und Zementklinkerproduktion sowie der Glasproduktion sind in allen drei Fällen gleich hoch.

Abgesehen von diesen Gemeinsamkeiten herrschen die Unterschiede jedoch vor: Im iCCS-Fall ist der größte Teil des in das System eingeleiteten Kohlenstoffs fossilen Ursprungs, der zu 90 % durch den Einsatz von CCS kompensiert wird. Die CO₂-Emissionen aus dem Kraftstoffverbrauch von Verbrennungsmotoren und der dezentralen Wärmeversorgung werden durch den biogenen Kohlenstoffeinsatz kompensiert, so dass die Nettobilanz der CO₂-Entnahmen aus der Atmosphäre und der jeweiligen CO₂-Emissionen dieser Anwendungen neutral ist. Die verbleibenden Netto-CO₂-Emissionen stellen den gesamten Nettostrom zwischen fossil gebundenem Kohlenstoff und Kohlenstoff in der Atmosphäre innerhalb eines Jahres dar. Sie sind als Delta zwischen den beiden gestrichelten Linien sichtbar. Die schwarz gestrichelte Linie zeigt die Höhe des fossilen CO₂-Eintrags und die grüne die Höhe der CO₂-Speicherung an. Übersteigt die Menge an fossilem Input das Niveau der Speicherung, entstehen jährliche Netto-Emissionen.

Im iCCS-Fall stellen die (positiven) Netto-Emissionen den Anteil der nicht abgeschiedenen fossilen CO₂-Ströme in der Industrie dar. Bereits oben wurde festgestellt, dass die Netto-Emissionen in diesem Fall durch den Einsatz von BECCS kompensiert werden könnten, z. B. durch Biogas statt Erdgasfeuerung in industriellen KWK-Anlagen mit CCS.

Der PtX-Fall zeigt fast keinen Eintrag von fossilem Kohlenstoff in das System. Aber auch der Brutto-Kohlenstoffumsatz ist niedriger als im iCCS-Fall, was auf die folgenden Punkte zurückzuführen ist:

- Wasserstoff wird in der Primärstahlproduktion anstelle von Kohle/Koks eingesetzt,
- Die Produktion von Olefinen und Aromaten wird vom Steam Cracken (mit Verbrennung eines Teils der fossilen Rohstoffe) auf die Produktion auf Methanolbasis verlagert,
- Keine KWK (kein Gasverbrauch für die Stromerzeugung im KWK-Betrieb),
- Höhere "Kohlenstoff-Effizienz" im Transport durch Methanoleinsatz statt Biodiesel und Biogas.

Die negativen Netto-CO₂-Emissionen von 6 Mio. t/a deuten darauf hin, dass die "Speicherung" von Kohlenstoff in Gütern (über das Netto-Bestandswachstum) die fossilen Einträge in das System durch den Kohlenstoffeinsatz in der Metallindustrie und die Verwendung von Kalkstein überwiegt. Wäre der Netto-Bestandzuwachs bei Kunststoffen wesentlich geringer, könnten jedoch auch hier positive Netto-CO₂-Emissionen auftreten.

2.5 Auswirkungen der Szenarien auf das Energiesystem und die Infrastruktur

Auch nach dem Ausstieg aus dem Steinkohlenbergbau in NRW im Jahr 2018 werden der Braunkohlebergbau und umfangreiche Infrastrukturen für den Transport und die Energieumwandlung erhalten bleiben. Steinkohle für Kraftwerke und Stahlproduktion wird in großen Schiffen entlang des Rheins zu den Kraftwerken und Stahlwerken transportiert. Erdgas wird über ein leistungsfähiges Gasnetz importiert und Erdöl sowie flüssige und gasförmige Ölprodukte werden über zwei Pipelines, die die Raffineriestandorte NRWs mit dem Hafen von Rotterdam sowie dem Südwesten Deutschlands verbinden, zu den drei Raffineriestandorten transportiert. NRW ist ein wichtiger Nettoexporteur von Strom (vor allem in das übrige Deutschland und die Niederlande). So gibt es bereits ein starkes Stromnetz, das Kraftwerke, energieintensive Grundstoffindustrien (wie die Primäraluminiumproduktion) und die angrenzenden Regionen miteinander verbindet. Zusätzlich verbindet ein regionales Wasserstoffnetz die relevanten Raffinerie- und Chemiecluster in der Rhein-Ruhr-Region.

Die Betrachtung der Infrastrukturen waren nicht Bestandteil des Projektes Landscaping, daher erfolgt an dieser Stelle lediglich die summarische Darstellung der zentralen Infrastrukturen, die bei der Transformation der energieintensiven Grundstoffwirtschaft in Nordrhein-Westfalen eine zentrale Rolle spielen.

2.5.1 Elektrische Energieübertragung

2.5.1.1 Transportnetz

Strom ist ein Energieträger, dessen Leistung sich als Produkt aus Strom und Spannung berechnet. Mit höherer Spannung gehen niedrigere Verluste einher, weswegen Transport von Strom bei hohen Spannungen, Verteilung und Nutzung bei niedrigeren Spannungen stattfindet.

Das Transport- bzw. Übertragungsnetz ist das so genannte Höchstspannungsnetz mit den Spannungsebenen 220 kV und 380 kV. Vorwiegend werden Freileitungen genutzt, nur für einzelne kürzere Teilstrecken Kabel. Das Netz wird mit Wechselstrom (AC) betrieben, nur auf einzelnen Strecken (insb. zur Anbindung von Offshore-Windparks) wird Gleichstromübertragung (DC, HGÜ) eingesetzt. AC-Leitungen bestehen aus drei Leiterseilen, jedes Dreileitersystem ist mit ca. 1,4-3 GW belastbar. Die Übertragungsverluste liegen bei ca. 1 % – 3 % pro 100 km (Görner und Lindenberg 2015).

Das Transportnetz in NRW ist geprägt von Ballungsräumen, energieintensiven Industrien und Kraftwerksstandorten. Die Netzdichte in NRW ist deutlich höher als im deutschen Mittel, insbesondere im Ruhrgebiet und entlang der Rheinschiene.

Das Transportnetz verbindet die Kraftwerksstandorte mit dem Verteilnetz. Größter Abnehmer von Strom ist die Industrie (>50 % des Nettostromverbrauchs), gefolgt von den Haushalten (ca. 25 %). In NRW findet sich eine sehr hohe Dichte an konventionellen Kraftwerken, insb. findet sich im rheinischen Revier etwa die Hälfte der deutschen Braunkohlekapazitäten, auch ca. 45 % der deutschen Erzeugungskapazitäten aus Steinkohle sind hier angesiedelt. NRW ist Nettoexporteur von Strom.

2.5.1.2 Verteilnetz

Das Verteilnetz umfasst die Hochspannung (in Deutschland meist 110 kV) für die Grobverteilung elektrischer Energie, Mittelspannung (meist 10 kV oder 20 kV) für die weitere Verteilung und zur Anbindung großer Einzelverbraucher, sowie die Niederspannung (230 V bzw. 400 V im Dreileitersystem) für die Anbindung der kleineren Abnehmer. Je niedriger die Spannungsebene ist, desto höher ist der Anteil der Leitungen, die als Kabel statt als Freileitung ausgeführt werden. Regenerative Stromerzeugungsanlagen speisen, abgesehen von großen Windparks, die teilweise direkt an das Transportnetz angeschlossen sind, in das Verteilnetz ein.

Die Struktur des Verteilnetzes in NRW ist geprägt durch die Kombination industriell geprägter Ballungsgebiete und ländlicher Regionen. In städtischen Regionen ist das Netz stark vermascht, in ländlichen Bereichen gibt es hingegen häufig nur einzelne Stickleitungen. Das Netz ist im Mittel überdurchschnittlich dicht: In NRW befinden sich 17 % des deutschen Verteilnetzes (Stromkreislänge), obwohl NRW nur ca. 10 % der Fläche einnimmt. Da in städtischen Gebieten bevorzugt Kabel statt Freileitungen verlegt werden, ist auch der Verkabelungsgrad höher als im deutschen Durchschnitt.

2.5.1.3 Grenzkuppelstellen

Als Grenzkuppelstellen werden die über die Bundesgrenzen hinausgehenden Leitungen des Höchstspannungs- bzw. Transportnetzes bezeichnet. Sie sind üblicherweise als Wechselstromleitungen mit 220 kV oder 380 kV ausgeführt, nach Skandinavien gibt es darüber hinaus HGÜ-Anbindungen. Der Begriff Grenzkuppelstellen bezieht sich allerdings häufig nicht auf die einzelnen Leitungen, sondern auf die Gesamtübertragungskapazität aller Leitungen einer Landesgrenze, die mittels der Net Transfer Capacity (NTC) charakterisiert wird. Bei der Betrachtung von Energiemengen über Grenzkuppelstellen müssen die gehandelten und die physikalischen Strommengen, die aus technischen Gründen davon abweichen können, unterschieden werden.

Nordrhein-Westfalen ist über Grenzkuppelstellen bislang ausschließlich mit den Niederlanden verbunden, darüber hinaus ist eine HGÜ-Leitung nach Belgien in Planung. Der Energieaustausch ist im Wesentlichen unidirektional, NRW exportiert zur Zeit ca. 16 TWh Elektrizität pro Jahr in die Niederlande (<10 % des jährlichen Strombedarfs NRWs), Importe sind sehr geringfügig. Daher spielen die Grenzkuppelstellen bisher keine Rolle zur Sicherstellung der Versorgung NRWs mit Elektrizität. Technisch sind bidirektionale Leistungsflüsse allerdings möglich.

2.5.2 Gasförmige Energieträger

2.5.2.1 Erdgas: Transport- und Ortsnetz

Erdgas ist ein gasförmiger, fossiler Energieträger, der überwiegend aus Methan besteht. Es wird in NRW zu gleichen Teilen in der Industrie sowie zur Wärmeerzeugung in privaten Haushalten, zu einem nur geringen Anteil für die Stromerzeugung eingesetzt. Aufbereitetes Biomethan ist Gas biogenen Ursprungs, das die gleiche Beschaffenheit wie Erdgas aufweist. Es kann daher als Austausch-Gas in beliebigen Mengen im bestehenden Erdgasnetz transportiert werden.

Der Erdgastransport erfolgt ausschließlich in Pipelines. Das Pipeline-Netz gliedert sich in Transportnetze (Hochdruck, 80 bar), regionale (Mitteldruck, ca. 16 bar) sowie Orts-Verteilnetze (Niederdruck ca. 20 mbar) und ist in Deutschland nahezu flächendeckend verfügbar. Es werden zwei Marktgebiete, auch anhand der Gasqualität L- (lower calorific value; aus inländischer und niederländischer Förderung) und H- (high calorific value; Importe)-Gas, unterschieden.

Das Orts- und Verteilnetz von NRW stellt 21 % des gesamtdeutschen Ortsnetzes. NRW verfügt damit im Vergleich zu anderen Bundesländern über ein sehr weit ausgebauten Niederdrucknetz, das eng mit dem hohen Anteil an Privatkunden korreliert.

In der Gaswirtschaft insgesamt (Transportnetz) wird bundesweit und auch in NRW der größte Anteil des verbrauchten Erdgases für die Wärmeversorgung privater Haushalte genutzt (BRD 40 %; NRW 44 %). Den nächstgrößeren Block stellt die Industrie (Rohstoffe & Prozesswärme; BRD 39 %; NRW 36 %) (energiestatistik-nrw.de o. J.). Betrachtet man nur das Orts- und Verteilnetz, nimmt der Anteil der Industrie ab (BRD 25 %; NRW 24 %) und die privaten Haushalte bilden den dominantesten Block (energiestatistik-nrw.de o. J.).

2.5.2.2 Erdgas: Speicher

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen kleinen oberirdischen und großen unterirdischen Speichern. Die erstgenannten Speicher dienen vor allem lokal zum Bedarfsausgleich im Tagesbereich, während die größeren Speicher genutzt werden können, um den Verbrauch von der geförderten bzw. importierten Menge zu entkoppeln (tages- und jahreszeitlicher Ausgleich). Aufgrund dieser Entkopplung sowie ihres Beitrags zur Versorgungssicherheit (Vorhalten einer „strategischen Reserve“ an Erdgas) wird diesen Speichern strategische Bedeutung beigemessen.

Man unterscheidet zwischen Poren- und Kavernenspeichern, wobei in NRW aus geologischen Gründen nur Kavernenspeicher in Betrieb sind. Der weltweit größte Kavernenspeicher (Stand 2016) ist Epe in NRW (energiestatistik-nrw.de o. J.).

In NRW gibt es zwei Standorte für Erdgas-Kavernenspeicher, nämlich Epe mit insgesamt 74 Einzelspeichern sowie Xanten mit insgesamt 8 Einzelspeichern.

Aufgrund ihrer geologischen Randbedingungen werden Kavernenspeicher für hohe Gasmengen, die sich schnell ein- und ausspeichern lassen, für den Ausgleich hoher Bedarfsschwankungen genutzt. Porenspeicher im Unterschied eignen sich eher für saisonalen Ausgleich, sind aber in NRW nicht in Betrieb.

2.5.3 Wasserstoffinfrastruktur

2.5.3.1 Wasserstoff: Transportnetz

Wasserstoff (H_2) kann sowohl als vielfältig einsetzbarer chemischer Grundstoff als auch als Energieträger genutzt werden. Weder seine Elektrizität erzeugende Umwandlung in Brennstoffzellen oder Verbrennung zu Wasser (H_2O), noch sein Entweichen in Reinform stellt ein Risiko hinsichtlich Giftigkeit oder Klimaschädlichkeit dar. Allerdings bildet Wasserstoff mit dem Sauerstoff der Luft hochexplosives Gemisch

(Knallgas), weshalb besondere Anforderungen an Transport und Lagerung zu stellen sind.

Es sind bis 2 % H₂ ohne regulatorische Änderungen ins Erdgasnetz einspeisbar (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) 2013; energiestatistik-nrw-de o. J.), 10 % sind auf den meisten Abschnitten prinzipiell technisch möglich (energiestatistik-nrw-de o. J.). Die Anpassungskosten werden auf 3,73 Mrd. € geschätzt (energiestatistik-nrw-de o. J.). Bei 5 % Beimischung ist die Einspeisung von 12,8–17,8 TWh/a möglich (energiestatistik-nrw-de o. J.).

Der Energietransport über ein Gasnetzwerk erfolgt mit wesentlich weniger Verlusten (<0,1 %) als bei einem Stromnetzwerk (8 %) (energiestatistik-nrw-de o. J.), wobei die Investitionskosten von ca. 650 €/m 30cm-H₂-Pipeline (Linde schreibt von 300–500 €/m) relevant sind; Im Allgemeinen sind Pipelines für kleine Distanzen wirtschaftlicher als LKWs, sowie in Kombination mit großen Bedarfen (> 50 t H₂ /Tag) auch bei großen Distanzen (>200 km) (Krieg 2012; van der Zwaan et al. 2011).

Derzeit ist eine Wasserstoffinfrastruktur in NRW nur geringfügig vorhanden, ein überregionales Netz inkl. größerer Speicher existiert nicht (LBEG 2016). Sowohl in NRW als auch in mehreren anderen innerdeutschen und europäischen Regionen bestehen H₂-Leitungen, die ausgewählte Chemieparks miteinander verbinden (LBEG 2016). Der Großteil des aktuell aus Erdgas gewonnenen H₂ wird allerdings innerhalb eines Chemieparks transportiert und ohne große Speicherkapazitäten direkt weiter verwendet.

Bei einer weitgehenden Dekarbonisierung der Grundstoffindustrie (v. a. bei Chemie und Stahl) werden große Mengen H₂ zur stofflichen Nutzung benötigt. Darüber hinaus bietet H₂ die Möglichkeit, Energie für Stunden bis Monate zwischen zu speichern und damit die Volatilität der Erneuerbaren Energieerzeugung (EE) abzuf puffern.

Bei erhöhten Anforderungen an die Entschwefelung von Erdöldestillaten (z. B. für Schiffstreibstoffe) ist mehr H₂ im Raffinerieprozess vonnöten. Ebenso ist bedeutet ein stärkerer Shift zu kurzkettingen Kohlenwasserstoff-Produkten mit höherem H-Anteil einen erhöhten Bedarf in Hydrocrackern. Teilweise wird dieser über einen Feedstockwechsel hin zu Erd- bzw. Schiefergasfraktionen (Methan und Ethan) ausgeglichen, die von sich aus einen höheren H-Anteil aufweisen.

Da die Raffinerien in NRW zumindest bei BAU-Bedingungen (ohne angenommenen starken Strukturwandel) durch ihre starke Integration zur Versorgung der weitergehenden Wertschöpfungsketten kontinuierlich benötigt werden („must run“), besteht ein erhöhter Anspruch an die Sicherstellung deren Versorgung. Entsprechend ist eine gute Einbindung in ein weitreichendes Versorgungsnetz vonnöten. Ähnliches gilt auch, sofern sich eine Stahlerzeugung mittels Wasserstoffdirektreduktion von Eisenerz (H-DRI) (DIN 51624:2008-02: 2008; LBEG 2016) als marktfähige Technologie etablieren sollte.

2.5.3.2 Wasserstoff: Speicher

Es besteht die Möglichkeit, größere Mengen H₂ (38 TWh) in Kavernenspeichern bei 13,5 MPa (ca. 135 bar) Druck in Salzformationen zu speichern (v.a. in Nord-D möglich) (LBEG 2016). Erfahrungen gibt es in den USA und GB (Forsberg 2006), wo

Speicher in Größen von 25-92 GWh genutzt werden (DIN 51624:2008-02: 2008). Alternativ sind diese auch für Erdöl/Erdgas nutzbar.

Bergwerkstollen sind nur mit großem Umbauaufwand nutzbar, geringe Mengen können in Kugelspeichern als (betriebliche) Kleinspeicher oberirdisch gelagert werden (Ausfelder et al. 2015).

Derzeit ist eine Wasserstoffinfrastruktur in NRW nur geringfügig vorhanden, größere Speicher existieren nicht (DIN 51624:2008-02: 2008). Die Firma AirLiquide betreibt 240 km H₂-Pipelines im Rhein-Ruhr-Gebiet und nochmals über 200 km in den Benelux-Statten; Linde betreibt 135 km in Mittel-/Ostdeutschland (DIN 51624:2008-02: 2008). Diese dienen primär der Vernetzung und Versorgung von Chemieparks. Der Großteil des aktuell aus Erdgas gewonnenen H₂ wird allerdings innerhalb eines Chemieparks transportiert und ohne große Speicherkapazitäten direkt weiter verwendet.

Bei einer weitgehenden Dekarbonisierung der Grundstoffindustrie (v. a. bei Chemie und Stahl) werden große Mengen H₂ zur stofflichen Nutzung benötigt. Darüber hinaus bietet H₂ die Möglichkeit, Energie für Stunden bis Monate zwischenzuspeichern und damit die Volatilität der Erneuerbaren Energieerzeugung (EE) abzupuffern.

2.5.4 CO₂-Transportnetz

Kohlenstoffdioxid (CO₂) tritt als Produktgas v. a. durch Verbrennung als derzeitiges Abfallprodukt auf. Daneben kann es ebenfalls als Rohstoff für diverse chemische Prozesse genutzt werden.

Derzeit wird CO₂ in Nordrhein-Westfalen nicht in relevanter Menge abgeschieden und aufgefangen, sondern direkt in die Atmosphäre emittiert. Eine CO₂-Infrastruktur nennenswerter Größe hinsichtlich der anfallenden Emissionen existiert entsprechend nicht.

2.5.5 Wärme

2.5.5.1 Wärmenetze

Als „Fernwärme“, „Nahwärme“ oder auch „leitungsgebundene Wärme“ wird der Transport von Wärmeenergie mit Hilfe eines flüssigen oder gasförmigen Wärmeträgermediums durch thermisch isolierte Rohrsystem („Wärmenetze“) bezeichnet. In der Regel wird Heißwasser oder Dampf, in seltenen Fällen auch Sole als Medien benutzt. Der Transport erfolgt in Form von sensibler (fühlbarer) und / oder latenter Wärme. Als Primärenergiequelle für Fernwärme kommen nahezu alle Energieträger in Frage, sowohl die (heute dominierenden) fossilen Energien Kohle, Erdgas und Öl als auch Biomasse / Biogase, Abfälle, erneuerbare Gase (EE-H₂, EE-Methan), (erneuerbarer) Strom (via Power-to-Heat) und erneuerbare Wärme aus Solarstrahlung, Umgebungs- oder geothermischer Wärme.²⁹

²⁹ Ein weiterer wichtiger Wärmelieferant kann die Sekundärenergie „Abwärme“ sein, die wiederum aus zahlreichen Primärenergiequellen entstehen kann.

Die Wärmenetzstruktur unterscheidet sich nach Länge, Ausdehnung und Verzweigung, Volumenstrom, Temperatur- und Druckniveau sowie Art des Mediums. Heute übliche Fernwärmenetze erstrecken sich über mehrere Kilometer bzw. Quadratmeter und liegen häufig im Temperaturbereich von 80-130 °C im Vorlauf, Dampfnetze noch darüber. Die Netztemperaturen liegen - angepasst an den Bedarf - im Sommer und bei kleinere Netzen („Nahwärme“³⁰) deutlich niedriger. Spezialfälle sind „Kalte Nahwärme“ mit Temperaturen unter 20 °C sowie Latentwärmenetze.

NRW ist geprägt durch eine hohe Bevölkerungs- und Industriedichte mit Schwerpunkten an Standorten von (fossilen) Großkraftwerken und der energieintensiven Industrie, insbesondere im Ruhrgebiet und Rheinland. Beides sind ökonomisch günstige Voraussetzungen für den Einsatz von Wärmenetzen. Dementsprechend liegen 24,5 % oder 4.652 km von insgesamt 19.026 km der bundesdeutschen Trassenlänge in NRW. Der Anteil der 103.526 Hausübergabestationen in NRW liegt mit 32,1 % noch höher.

Fernwärme wird im Bereich der öffentlichen Versorgung zur Bereitstellung von Raumwärme und zur Warmwasserbereitung genutzt, im industriellen und gewerblichen Bereich außerdem zur Bereitstellung von Prozesswärme und Prozessdampf.

2.5.6 Flüssige Grund- und Brennstoffe

2.5.6.1 Rohstoffpipelinennetz

Deutschland ist in ein europaweites Netz an Ölpipelines eingebunden, NRW wird hierbei primär aus Hamburg und Rotterdam versorgt, die Verbindungen aus Norddeutschland, Belgien und den Niederlanden haben entsprechend große Relevanz. Süddeutschland hat eine separate, nicht mit NRW verknüpfte Ölpipelineinfrastruktur, die mit den südfranzösischen Mittelmeerhäfen verbunden ist.ii Hauptakteure sind RRP (Rotterdam-Rhein-Pipeline) und NWO (Nord-West-Oelleitung GmbH).

Da die Chemieindustrie in NRW überproportional stark auf die Erzeugung von Basisschemikalien aus Erdöl ausgerichtet ist (ecspp o. J.), kommt den Erdöl- und Erdöl-derivatpipelines hier eine besonders wichtige Rolle zu. Die größten Raffineriestandorte in NRW sind Gelsenkirchen (Bedarf: ca. 13 Mt Rohöl) und Köln (ca. 16,5 Mt Rohöl) (energiestatistik-nrw-de o. J.; MVV o. J.).

2.5.6.2 Zwischenproduktpipelinennetz

Die prinzipiell für Pipelines geeigneten flüssigen Petrochemie-Produkte sind Benzin, Naphtha, Kerosin, Diesel, Heizöl EL und S, Bitumen, Ethylen, Propylen.

NRW ist an das Westeuropäische Ethylen-Pipelinennetz angeschlossen, sowie an die Propylenversorgung aus Rotterdam über Antwerpen. Entlang der Propylenleitung wurden um 2009 zudem CO-, H₂-, Erdgas- und Synthesegaspipelines errichtet (ChemCologne o. J.; Kobiela und Vallentin 2016). Es bestehen ferner Rohrleitungen für Stickstoff und Sauerstoff (oftmals auf den gleichen Strecken wie H₂).

³⁰ Die Grenzen zwischen „Nahwärme“ und „Fernwärme“ sind fließend, es gibt keine einheitliche Definition.

Chemiestandorte in Ostdeutschland (u. a. Leuna) sind bei Ethylen nicht mit NRW verbunden, allerdings mit Hamburg/Stade und Tschechien (DIN 51624:2008-02: 2008).

Da die Chemiecluster in NRW (Köln und Ruhrgebiet) sowohl intern sehr integriert sind als auch viele Zwischenprodukte austauschen, existieren hier schon diverse Produkt-Pipelines. Dieser enge Austausch dürfte sich noch verstärken und bietet zugleich eine erhöhte Flexibilität NRWs bei einem Übergang hin zu Power-to-Chemicals (P2C).

Die für NRW wesentlichen Komponenten des westeuropäischen Ethylenpipelinennetzes sind die RMR (Pipeline von/nach Rotterdam über Antwerpen und Oel in NRW bis Karlsruhe in Baden-Württemberg) und das Pipelinennetz der Äthylen-Rohrleitungsgesellschaft (ARG) (ecspp o. J.; Kobiela und Vallentin 2016; MVV o. J.). Teilhaber der ARG sind Westgas GmbH & Co KG, Bayer AG, DSM Hydrocarbons B.V., Sasol Germany GmbH, BASF AG, und BP (im Namen der Veba Oel Refining & Petrochemicals) (ecspp o. J.).

Ferner betreibt die Bayer AG eine CO-Pipeline, Synthesegas wird von BOC transportiert, Öl-Derivate von der Rhein- Main-Rohrleitungstransportgesellschaft m.b.H (RMR).

Es besteht ein Heizöl-Verteilnetz zu allen Städten in NRW, das bei langfristiger Umstellung auf andere Heizungssysteme zur anderweitigen Verfügung frei werden dürfte.

Da die Chemieindustrie in NRW überproportional stark auf die Erzeugung von Basischemikalien ausgerichtet ist (Kobiela und Vallentin 2016), kommt den Produktpipelines hier eine besonders wichtige Rolle zu, die Vernetzung von Standorten liefert (noch) Wettbewerbsvorteile gegenüber anderen Weltregionen.

2.5.6.3 *Methanol-Pipelines*

Methanol als flüssiger Energieträger ist prinzipiell dafür geeignet in langen Rohrleitungen transferiert zu werden. Beispielsweise ist bereits 1986 in Kanada bewiesen worden, dass dies technisch möglich ist (Fischedick und Fink 2018). Allerdings sind die aktuell benötigten und produzierten Methanolmengen in Deutschland zu gering, dass eine reine Methanolpipeline sich wirtschaftlich rentiert.

In Nordrhein-Westfalen gibt es zwei große Methanol Standorte. Zum einen ist das die Shell Raffinerie Wessling (435 kt Methanol/a) mit dem Werk Nord in Köln-Godorf und das Werk Süd in Wessling und zum anderen die BP Raffinerie in Gelsenkirchen (300 kt Methanol/a) mit den Werken in Scholven und in Horst (Fischedick, und Fink 2018). Auf dem Raffineriegelände selbst wird das Methanol während des gesamten Methanolsynthese-Prozesses in Pipelines geführt. Außerdem sind die jeweiligen Werke beider Raffinerien, aufgrund ihrer räumlichen Nähe, mit Methanolpipelines miteinander verbunden. Aufgrund der geringen Produktionsmenge wird ein Großteil des Methanols per Binnenschifffahrt an die Kunden geliefert – z. B. rheinaufwärts. Die Raffinerie Wessling ist direkt am Rhein gelegen und nutzt hierfür den Raffinerieeigenen Hafen Wessling sowie den Hafen Köln-Godorf. Die beiden Werke in Gelsenkirchen betreiben Rohrleitungen zu dem Bottroper- und Gelsenkirchnerhafen, da diese nicht unmittelbar an der Ruhr gelegen sind. Des Weiteren werden

Rohrleitungen zu ausgewählten Großabnehmern, welche räumlich sehr nahe gelegen sind, unterhalten – beispielsweise der Chemiepark in Marl oder Ineos Phenol in Gladbeck (Müller-Syring und Henel 2014).

Da die Chemieindustrie bzw. die Methanolproduktion und ihre Nachfrage in NRW gesehen an der gesamtdeutschen Produktion sehr hoch (ca. 70 %) ist haben sich einige wenige kurze Rohrleitungssysteme herausgebildet (Müller-Syring und Henel 2014). Die durch die räumliche Nähe entstandene Vernetzung von Produzenten stellt einen starken Wettbewerbsvorteil für den Standort Nordrhein-Westfalen dar. An den Standorten ist somit auch schon gewisses Know-How für die Anforderungen an Methanolpipelines vorhanden.

2.6 Zentrale Szenarienergebnisse

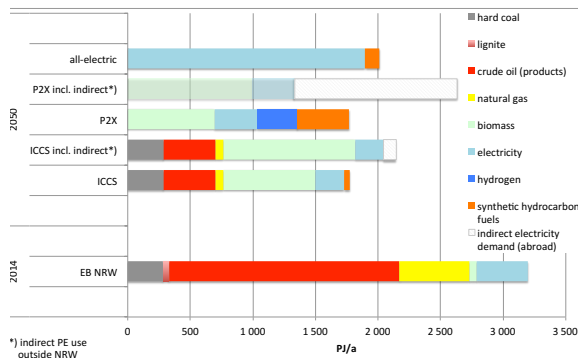
Alle Szenarien zeigen, dass die zukünftigen Primärenergiebilanzen der dekarbonisierten Energiesysteme deutlich von der heutigen Situation abweichen werden, wie in Abbildung 2a dargestellt. Die Primärenergieversorgung der drei Sektoren Verkehr, Industrie und Gebäude zeigt in allen drei Szenarien deutliche Nachfragerückgänge gegenüber der heutigen Situation, sowie starke Unterschiede in der jeweiligen Rolle der Energieträger.

Die iCCS-Strategie ersetzt in der Regel den Ölverbrauch im Verkehr durch (importierte) Biomasse, wendet CCS auf die großen zentralen Punkte der Energienutzung an und nutzt Biogas, um den Rest der dezentralen Nachfrage in Industrie und Gebäuden zu decken. Damit wächst die Biomassenutzung erheblich, aber das Wachstum entspricht immer noch anderen Szenarien, die stark auf Biomasse und CCS angewiesen sind (z. B. das Szenario „B2DS“ in (IEA 2017)).

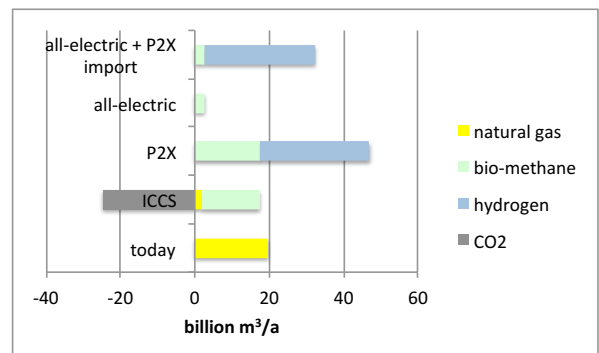
Das P2X-Szenario geht von einer Mischung aus Biomasse und synthetischen Kraftstoffen auf Strombasis mit der gleichen Menge an Biomasse aus wie im "iCCS", jedoch mit einer anderen Struktur, wobei mehr Biomasse in der Industrie und weniger im Verkehrssektor verwendet wird (in der Abbildung nicht dargestellt).

Die all-electric Strategie schließlich zeigt sich so monolithisch wie der Name des Szenarios vermuten lässt. Hier müssen über 500 TWh (1.800 PJ) Strombedarf in NRW gedeckt werden, was massive Importe bedeutet. Das Landesumweltamt NRW hat ein inländisches technisches Potenzial von 169 TWh erneuerbarer Stromerzeugung errechnet, d. h. 83 TWh aus Wind, 72 TWh aus PV, 13 TWh aus Biomasse und 0,6 TWh aus Wasserkraft (LANUV NRW 2012, 2013, 2014, 2017). Auch das geothermische Energiepotenzial wurde von (LANUV NRW 2015) bewertet, aber das gesamte NRW-Potenzial wurde der Wärmeversorgung zugewiesen. Das technisch erschließbare Erzeugungspotenzial liegt also nur bei rund einem Drittel des errechneten Bedarfs im Szenario.

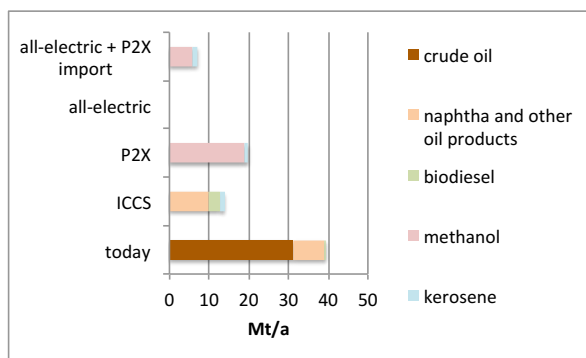
40a: Primärenergiebilanz der Energieträgerbereitstellung für Verkehr, Gebäude und Verarbeitendes Gewerbe in NRW



40b: Netto-Gas-Importe



40c: Nettoimporte flüssiger Kohlenwasserstoffe



40d: Netto-Stromimporte

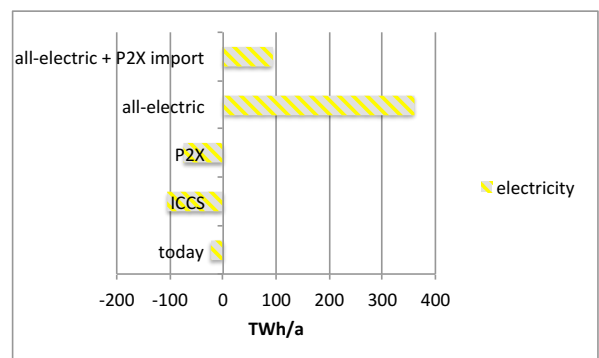


Abbildung 40(a-d) Primärenergiebilanz NRW und resultierende jährliche Energieträgerimportströme gegenüber heute

Quelle: Eigene Darstellung nach IT.NRW (2014)

Die Veränderungen in der Primärenergiebilanz haben auch Auswirkungen auf die Energieimport- und -exportbilanzen (siehe Abbildung 40b-d): Heute importiert NRW jährlich 39 Milliarden Normkubikmeter Erdgas (Abbildung 40b), exportiert aber auch 20 Milliarden m³. Im Übertragungsnetz wird Erdgas in der Regel auf rund 100 bar komprimiert, um die Pipelines effizienter zu nutzen. Der daraus resultierende jährliche Nettoimportstrom beträgt 20 Milliarden Normkubikmeter pro Jahr (siehe Abbildung 40b).

Zwei Szenarien (iCCS und P2X) zeigen einen ähnlichen Bedarf an gasförmigen (Methan-)Importen in der Zukunft (Summe aus Erdgas und Biomethan), der fast so hoch ist wie der heutige Erdgasimport. Beide benötigen jedoch zusätzliche gasführende Pipeline-Infrastrukturen: Je nach Zeitpunkt der Einführung von CCS in NRW könnten die CO₂-Speicherstätten im iCCS-Fall in diesem Szenario bereits bis 2050 gefüllt sein, so dass die gesamte jährlich zu speichernde CO₂-Menge (49 Mio. t/a oder 25 Mrd. Normkubikmeter/a) "exportiert" werden muss, z. B. in die nordholländischen Gasfelder oder norddeutschen Salzsedimente. Das P2X-Szenario hingegen erfordert einen massiven Import von Wasserstoff. Da das bestehende Erdgasnetz noch mit dem Transport von Methan ausgelastet ist (und daher nicht umgerüstet werden kann), ist eine zusätzliche Wasserstoffleitung (bzw. ein Netz) erforderlich, die die Stahlwerke und Raffinerien am Rhein mit möglichen Standorten der Wasserstoff-

zeugung (z. B. an der Nordseeküste) oder Import-Hubs (z. B. Antwerpen oder Rotterdam) verbindet. Im Gegensatz dazu wird im vollelektrischen Fall die Gasinfrastruktur nicht mehr benötigt. Der verbleibende Gasbedarf (des Gebäudebereichs) könnte sogar durch NRW-Biogasanlagen gedeckt werden (nicht Teil der Analyse).

Fast 40 Millionen Tonnen flüssige Kohlenwasserstoffe wurden 2014 über Pipeline, Binnenschifffahrt und Eisenbahn nach NRW importiert (Abbildung 40c), wobei Pipelines der Hauptverkehrsträger für die Standard-Energieträger wie Rohöl, Naphtha oder Kerosin sind. Die Verlagerung von Pkw und Lkw auf die Schiene und die Binnenschifffahrt sowie Effizienzverbesserungen in den Flotten sind in den Szenarien die Haupttreiber für eine schrumpfende Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen. So würde die vorhandene Infrastruktur ausreichen, um zukünftige Importe von flüssigen Brennstoffen in allen analysierten Szenarien zu transportieren, wenn die Rohölpipelines auf die jeweiligen Energieträger wie Ölprodukte oder Methanol umgestellt werden. Im Szenario iCCS wird noch Naphtha aus fossilem Rohöl zur Herstellung von Petrochemikalien in NRW Steamcrackern importiert. Auch hier wird das all-electric Szenario bis 2050 keine Pipelines für den Import von Flüssigkeiten mehr erfordern, so dass auch die hierfür heute bestehende Importinfrastruktur stillgelegt werden könnte.

Die Analyse des Stromimportbedarfs zeigt erwartungsgemäß genau das Gegenteil (Abbildung 40d): massive Nettostromimporte im all-electric-Fall, während NRW in den beiden anderen Szenarien die inländischen Stromerzeugungspotenziale nicht einmal voll ausschöpfen müsste. Es liegt auf der Hand, dass eine solche Kombination aus relativ teurer regenerativer Stromerzeugung in NRW (abseits der Küste und abseits des Sonnengürtels) und gleichzeitiger Nichtnutzung der Flexibilitätsoptionen von P2X innerhalb des Landes nicht sinnvoll ist. Unter den unter iCCS und P2X beschriebenen Szenarien würde das Potenzial der regenerativen Stromerzeugung in NRW wahrscheinlich nicht in vollem Umfang ausgeschöpft - oder durch eine kleinere Inlandsnutzung von P2X (z. B. für Power-to-Heat in der Industrie) ergänzt und damit der Nettostromexport reduziert.

Die drei Diagramme (Abbildung 40b-d) teilen einen Befund bezüglich des Falles „all-electric“: Die vorhandene Infrastrukturen reicht für eine solche Entwicklung nicht aus bzw. wären nicht mehr erforderlich. Bestehende Gas- und Ölinfrastrukturen würden bis 2050 überflüssig, während das heutige Stromnetz viel zu schwach wäre. Wie bereits erwähnt, würde der Import von P2X-Produkten anstelle der inländischen Produktion aus importiertem Strom zu einer geringeren Stromnachfrage führen, aber dennoch zur allgemeinen Storyline des Szenarios passen. Aus diesem Grund wurde eine zusätzliche Sensitivität "all-electric+P2X-Import" analysiert, wobei ein Import von P2X-Produkten (d. h. Methanol und Wasserstoff) angenommen wurde. Auf der Seite des Endenergiebedarfs bleiben alle Technologien gegenüber dem Basisszenario „all-electric“ unverändert.

Die Sensitivität passt sich deutlich besser in die bestehenden Infrastrukturen ein: Die bestehende Gastransportinfrastruktur könnte zum Teil für den Transport von Wasserstoff genutzt werden und die Ölproduktpipeline könnte auf den Transport von Methanol umgestellt werden. Wäre NRW keine Energietransitregion mehr (abhängig von der zukünftigen Entwicklung in Südwestdeutschland), würde die Nutzung der

heute verfügbaren Bruttoimportkapazitäten (mindestens die Menge von 39 Mrd. m³, die 2014 nach NRW importiert wurden) eine Verdoppelung der Nettoimportkapazitäten bedeuten.

Die Nettostromimportnachfrage bleibt in der Sensitivität "rein elektrisch+P2X-Import" jedoch hoch und wird voraussichtlich noch einen Netzausbau erfordern, allerdings in deutlich geringerem Umfang als im Basisfall. Genauere Schätzungen des Netzanpassungsbedarfs würden eine zusätzliche Simulation durch Modelle mit hoher zeitlicher Auflösung erfordern.

Unter Berücksichtigung des Primärenergieverbrauchs der gesamten Wertschöpfungskette zeigt die Sensitivität einen höheren Gesamtstrombedarf, da sie nicht auf heimische CO₂-Quellen (wie im rein elektrischen Fall) z. B. in der Zementindustrie zurückgreift, sondern auf das weniger effiziente Direct Air Capture Verfahren (DAC) setzt, das als Referenzanwendung für die P2X-Produktion im Ausland angenommen wird.

Daraus lässt sich schließen, dass jedes Szenario mit unterschiedlichen infrastrukturellen Herausforderungen im Hinblick auf den Import von Energieträgern konfrontiert ist, die eindeutig der jeweiligen Hauptstrategie zuzuordnen sind: Im iCCS-Fall besteht die Notwendigkeit, ein CO₂-Netz aufzubauen, im P2X-Fall ein Wasserstoff-Importnetz aufzubauen und im vollelektrischen Fall das Stromnetz deutlich auszubauen.

2.7 Low-Carbon-Break-Through-Technologien (LCBTT) für den Industriesektor

Die in den Szenarien angenommenen Technologien werden hier genauer beschrieben und anhand von gleichen Kriterien dargestellt. Bestandteile der Beschreibung sind:

- **Technologiebeschreibung**
 - Kurze Beschreibung der Technologie inklusive Edukt und Produkt sowie Rolle in der Wertschöpfungskette
- **Systemvoraussetzungen**
 - Beschreibung, welche Systemvoraussetzungen und zentralen Annahmen für die Einführung der Technologie hinterlegt sind, insbesondere wenn dadurch alternative Technologien ausgeschlossen sind (z. B. Annahme eines großflächigen H₂/Synfuel-Importes)
- **Infrastrukturbedarfe**
 - Auflistung der verschiedenen Infrastrukturbedarfe, die die Implementierung der Technologie mit sich bringen würde
- **Stand der Technik/Markteinführung**
 - Kurze Darstellung der technologischen Entwicklung und Markteinführungsreife der Technologie, Beschreibung und Technology Readiness Level (TRL)
- **Zentrale offene Forschungsfragen**
 - Kurze Darstellung der derzeit absehbaren zentralen Forschungsbedarfe, um die Technologie zur Marktreife zu entwickeln
- **Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte**
 - Kurze Darstellung der derzeit bekannten Anlagen/Projekte mit Link

Im Anschluss sind die einzelnen Technologien kurz dargestellt. Die vollständigen Technologiesteckbriefe befinden sich im Anhang zum Bericht.

2.7.1 LCBTT für die Stahlbranche

2.7.1.1 ST 1 Primärstahl durch alkalische Eisenelektrolyse

Die alkalische Eisenelektrolyse mit in Natronlauge gelöstem Eisenerz bei einer Prozesstemperatur von 110 °C (Electrowinning) ermöglicht die Reduktion von Eisenerzen zu Roheisen unter Verzicht auf kohlenstoffhaltige Reduktionsmittel. Das Verfahren verspricht eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz gegenüber der Hochofen-Konverter-Route. Zudem kann die alkalische Eisenelektrolyse in Abhängigkeit vom genutzten Strom CO₂-frei sein (European Commission 2016b S. 5; Fishedick et al. 2014a S. 565). Neben der Erzeugung mit Eisenerzen unterschiedlicher Qualitäten kann die alkalische Eisenelektrolyse eingesetzt werden, um etwa eisen- und titanhaltiges Restmaterial (red slurry) aus dem Bayer-Prozess zur Aluminiumerzeugung sowie solches aus anderen metallurgischen Prozessen zu verwerten.

2.7.1.2 ST 2 Direktreduktion mit Wasserstoff

Bei der Direktreduktion von speziell entwickelten Eisenerzpellets mit H_2 wird bei Temperaturen unter denjenigen im Hochofen das Erz in festem Zustand reduziert. Hierbei entsteht Eisenschwamm (Direct Reduced Iron DRI) sowie als Nebenprodukt Wasser. Der Eisenschwamm kann anschließend in einem Schmelzofen zu Stahl verdelt werden, woran sich die übliche Weiterverarbeitung anschließt. Das Ausmaß der CO_2 -Minderung durch die Direktreduktion mit H_2 ist abhängig von der H_2 -Vorkette. Im günstigsten Fall wird das H_2 mittels regenerativem Strom erzeugt, was bezüglich der Dekarbonisierung bei einer Reduktion der CO_2 -Emissionen gegenüber der Hochofen-Konverter-Route um 100 % einen Durchbruch darstellt (Fischedick et al. 2014a S. 565).

2.7.1.3 ST 3 Elektrostahl per Lichtbogen- oder Induktionsofen

Neben der Hochofen-Konverter-Route stellt das Elektrostahlverfahren mittels Lichtbogen- oder Induktionsofen das derzeit gängigste Verfahren zur Rohstahlerzeugung dar. Einsatzstoffe sind vor allem Schrott und Eisenschwamm sowie Roheisen aus konventionellen Hochöfen. Dabei sind in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des verfügbaren Schrotts nicht alle in gewünschter Weise legierten Stahlqualitäten herstellbar. Zugleich werden durch das Schrottreycling wichtige Legierungselemente rohstofflich gesichert. Das Elektrostahlverfahren erfordert den Einsatz erheblicher Strommengen, die durch die Zugabe von nicht erhitzten Einsatzstoffen (Schrott, Eisenschwamm) in der Chargenproduktion sowie prozessstypisch starken Schwankungen unterliegen. Schließlich findet gegenwärtig auch bei der Produktion von Elektrostahl eine Zufeuerung mittels Erdgas im Umfang von rund 20 % des gesamten Energieeinsatzes statt und werden pro Tonne Elektrostahl 4,4 kg Kohlenstaub zwecks Bildung der prozessverbessernden Schaumschlacke beigegeben, worauf entsprechende CO_2 Emissionen (47 kg je t Stahl) entfallen.

Im Falle des Lichtbogenofens wird durch das Anlegen einer Spannung zwischen dem Schmelztiegel und über dem Schmelzgut befindlichen Graphit-Elektroden ein Lichtbogen erzeugt, der das Schmelzgut aufheizt. Beim Induktionsofen bewirken dagegen Ströme durch Wicklungen um den Schmelztiegel Wirbelströme, die das Schmelzgut erhitzen. Der Induktionsofen weist gegenüber dem Lichtbogenofen eine bessere Materialeffizienz auf und vermeidet die CO_2 -Emissionen aus dem Abbrand der Graphit-Elektroden.

Als weiteres denkbare Verfahren wird die Ergänzung eines Lichtbogenofens um eine Aufheizereinheit per Mikrowellenstrahlung diskutiert, da Eisenerz und Kohle Mikrowellen sehr gut absorbieren und so das eigentlich auf die Verwertung von Schrott fokussierte Elektrostahlverfahren integriert auch für die Roheisenerzeugung mit Erzen verwendet werden könnte.

2.7.1.4 ST 4 Schmelzreduktion mit Kohle (und optional CCS/CCU)

Bei der Schmelzreduktion werden die geschmolzenen Erze zu Eisenschwamm reduziert und anschließend unter Zugabe von Kohle und Sauerstoff zu Roheisen weiterverarbeitet. Ein wesentlicher Vorteil der Schmelzreduktion liegt in der Minderung der Emission klassischer Luftschadstoffe, wohingegen sich bei den CO_2 -Emissionen keine Verbesserungen ergeben.

2.7.1.5 ST 5 Hochofen mit CCS

Bei der konventionellen CO₂-intensiven Hochofen-Konverter-Route wird Eisenerz mit Koks-kohle im Hochofen zu Roheisen reduziert und anschließend in einem Sauerstoffblaskonverter zu Stahl veredelt. Ohne Kohlenstoff kann diese Art der Reduktion nicht stattfinden und daher geht es bei der Dekarbonisierung dieser Route der Roheisen- und Stahlerzeugung darum, die Effizienz der Kohlenstoffverwendung bei der Reduktion zu steigern sowie das Reaktionsprodukt CO₂ abzutrennen und dauerhaft einzulagern. Hierzu dienen die Hochofengas-Rezyklierung (Top Gas Recycling TGR) sowie CCS-Technologien zur Abtrennung und Einlagerung des CO₂.

Integrierte Hüttenwerke kombinieren die Prozesse der Verkokung von Koks-kohle (Kokerei) und der Reduktion von Erzen im Hochofen, wobei die jeweiligen gasförmigen Reaktionsprodukte im Verbund optimal genutzt werden können. Große integrierte Hüttenwerke erzeugen somit ein erhebliches Aufkommen an relativ reinem CO₂.

Für die Abtrennung und Einlagerung von CO₂ (CCS) ist die Kombination des Hochofens mit einer Anlage zur Rezyklierung von Hochofengasen sinnvoll (TGR). Dabei werden zunächst CO und H₂ abgetrennt, die dem Hochofen wieder zugeführt werden und so für die Reduktion von Erzen zur Verfügung stehen (European Commission 2016b S. 5; Fishedick et al. 2014a S. 565). Damit steigt zugleich der CO₂-Gehalt in den verbleibenden Abgasen für dessen Abtrennung.

Mittels TGR und CCS lassen sich durchaus ambitionierte CO₂-Minderungen bei der Hochofen-Konverter-Route umsetzen. Bei CCS wird das abgetrennte CO₂ in eine geologisch geeignete Formation eingebracht. Hierbei standen bislang Aquifere sowie Öl- und Gaslagerstätten im Vordergrund des Interesses. Die langfristige Sicherheit der Einlagerung ist aber neueren Erkenntnissen aus Island zufolge durch dessen Mineralisation in Basaltformationen größer (Snæbjörnsdóttir und Gislason 2016).

2.7.1.6 ST 6 HISarna® mit CCS

Beim HISarna®-Verfahren handelt es sich um eine Fortentwicklung der HISMelt-Technologie. Das Verfahren kombiniert die Kohle-Vorheizung und partielle Pyrolyse in einem Reaktor mit einem Zyklon-Konverter-Ofen (Quader et al. 2016 S. 543; Quader, M. Abdul et al. 2015 S. 605). Der Zyklon-Konverter-Ofen wird von oben mit Eisenerz befüllt. Das Eisenerz wird im oberen Bereich des Konverterofens verflüssigt und partiell reduziert und im unteren Bereich mit Kohlenstaub versetzt und vollständig zu Roheisen reduziert. Durch den Verzicht auf die Verarbeitung von Kohle zu Koks und die Vorbehandlung von Eisenerz wird die Energieeffizienz gesteigert und die CO₂-Emissionen werden so um rd. 20 % abgesenkt (Burchart et al. 2015 S. 120). Das HISarna®-Verfahren eignet sich wegen des relativ reinen CO₂-Abgasstroms (N₂-frei) besonders für die Kombination mit CCS und so lassen sich ambitionierte CO₂-Minderungen (80 %) umsetzen. Zudem können mindere Qualitäten von Erz und Kohle verarbeitet werden. Dem Erz können bis zu 50 % Schrott beigemischt werden.

2.7.2 LCBTT für die Aluminiumbranche

2.7.2.1 A 1 Flexibilisierung der Elektrolyse zur Herstellung von Primäraluminium

Die Elektrolyseöfen werden üblicherweise unter möglichst konstanten Prozessbedingungen betrieben, da sie sensibel auf Änderungen der Betriebsstromstärke reagieren. Durch Umrüstung der Elektrolysesysteme soll zukünftig eine **flexiblere Betriebsweise** und damit eine flexiblere Lastabnahme ermöglicht werden. In Abhängigkeit des Stromeintrages ändert sich sowohl der Wärmehaushalt als auch die Stärke des Magnetfeldes im Elektrolyseprozess. Erstes soll durch die Nachrüstung von Wärmetauschern (sogenannter Shell-Heat-Exchanger), zweites durch zusätzliche Stromschienen zur Magnetfeldkompensation beherrschbar werden. Durch die flexiblere Fahrweise sollen neben höheren Lastreduktions- und Erhöhungsanteilen auch deutlich längere Verschiebedauern als in der bisher angewandten Lastflexibilisierung der Aluminiuelektrolyse möglich werden. Die so entstehende „virtuelle Batterie“, die bei flächendeckendem Einsatz der Aluminiuelektrolyse in Deutschland eine Speicherkapazität von ca. 13 GWh bei einer Speicherleistung von 275 MW erreichen könnte (Hauck 2017), soll zu einer effizienten und kostengünstigen Integration hoher Anteile fluktuierender erneuerbarer Stromeinspeiser und damit einer Minderung der THG-Emissionen beitragen.

2.7.2.2 A 2 Power-to-Heat als Option beim Schmelzen und Erwärmen)

Bei der Produktion von Sekundäraluminium wird Aluminiumschrott neu verarbeitet. Die energieaufwendige Elektrolyse ist im Gegensatz zur Primäraluminiumproduktion nicht notwendig. Das Material wird bei ca. 700 °C neu eingeschmolzen, wobei für eine Tonne etwa 650 kWh Energie aufgewendet werden müssen (Jaroni und Friedrich o. J.; Lechtenböhrer et al. 2015a).

Aufbauend auf das Schmelzen des Aluminiums gibt es zahlreiche Weiterverarbeitungsprozesse und Prozessschritte, die ebenfalls eine Erwärmung – wenn auch auf ein niedrigeres Temperaturniveau – benötigen.

Warmwalzen ist eines der Umformverfahren, das sich dem Urformen (Blockguss od. Strangguss) anschließt. Kriterium für den Warmwalzprozess ist, dass die Umformtemperatur oberhalb der Rekristallationstemperatur liegt. Hierfür wird das im Vormateriallager erkaltete Walzgut wieder auf Temperaturen von etwa 300 bis 620 °C in Wiedererwärmungsöfen erwärmt und im Walzspalt durch Druck auf die vorgegebene Dicke reduziert.

Ein weiterer Wärmeprozess der Aluminiumverarbeitung ist das Erwärmen von Aluminiumstangen. Auf Grund von vielfältiger Einsatzgutabmessungen, Materialzusammensetzungen und unterschiedlicher Chargengrößen müssen die dafür genutzten Öfen möglichst variabel sein.

Die eingesetzten Öfen, sowohl für das Schmelzen, als auch verschiedene Weiterverarbeitungsprozesse nutzen aktuell in der Regel Gas als Brennstoff, wobei auch elektrisch betriebene Induktionsöfen technologisch verfügbar sind.

2.7.3 LCBTT für die Chemiebranche

2.7.3.1 C 1 Carbon Capture am Steam Cracker

Steam Cracker werden zumeist dazu verwendet um große Mengen Naphtha durch schlagartige Erhitzung zu spalten. Unter den kürzerkettigen Kohlenwasserstoff-Produkten befinden sich auch ökonomisch niederwertige Brenngase (Nebenprodukt), welche als Brennstoffe für den Hochofen Verwendung finden. Durch die Verbrennung entsteht Kohlenstoffdioxid. Auch wenn das Abgas qualitativ wenig CO₂ (hoher Wasserstoffgehalt) gegenüber beispielsweise der Verbrennung von Erdöl freisetzt, so stellt der Steam Cracker als Einzeltechnologie den größten CO₂-Emittenten in der Chemieindustrie dar. Aktuell sind die Post-Combustion-Verfahren (chemische Filterung oder Wäsche nach dem eigentlichen Verbrennungsprozess) und die Pre-Combustion-Verfahren (basiert auf dem Prinzip der physikalischen Absorption) die vielversprechendsten CCS-Optionen. Vor allen Dingen die Aminwäsche (Post-Combustion), welche schon heute in einigen (wenigen) Prozessen der Chemieindustrie kommerzielle Anwendung findet, gilt anhand der möglichen hohen Durchsatzmenge, des hohen Abscheidegrads und der möglichen Nachrüstbarkeit bestehender Anlagen als vielversprechend (Markewitz et al. 2017; Schneider und Schüwer 2017).

2.7.3.2 C 2 Änderung des Ausgangsmaterials (Edukt) am Steam Cracker

Neben Erdöl als Rohstoffbasis für synthetische Kraftstoffe kann auch mittels GtL (Gas-to-Liquid) Erdgas, CtL (Coal-to-Liquid) Kohle und BtL (Biomass-to-Liquid) Biomasse genutzt werden. Die Vergasung von Kohle und Gas wurden vor allen Dingen dann genutzt, wenn Erdöl knapp war, z. B. zur Zeiten des Nationalsozialismus in D (CtL) und zur Zeiten der Apartheid in Südafrika (CtL und GtL). Das bekannteste und älteste Verfahren ist die Fischer-Tropsch-Synthese, in welcher zunächst durch Vergasung des jeweiligen Stoffes (Kohle, Erdgas oder Biomasse) Synthesegas entsteht. Nach anschließender Gasreinigung findet im zweiten Verfahrensschritt die eigentliche Fischer-Tropsch-Synthese statt, indem das reine Synthesegas heterogenkatalytisch (Katalysatoren: meist Cobalt oder auch Eisen) zu gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen (Paraffine) reagiert. Die Paraffine dienen dann als Rohstoffbasis für eine Vielzahl von Anwendungen in der Petrochemie. Auch eine direkte Synthese von Kraftstoff ohne Zwischenprodukte (Paraffine) ist möglich (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung et al. 2016).

2.7.3.3 C 3 Ablösung der Olefinproduktion im Steam Cracker durch andere Verfahren, z. B. auf Basis Methanol (MTO)

In der Petrochemie werden kurzkettige Kohlenwasserstoffe mit mindestens einer C-C-Doppelbindung als Olefine bezeichnet welche herkömmlicherweise aus Erdöl, aber auch Kohle und Erdgas erzeugt werden.. Industriell von besonderer Bedeutung sind hierbei kurzkettige Olefine..Sie stellen hierbei einen Großteil der Grundstoffe für die Petrochemie dar. So ist beispielsweise Ethylen (C₂H₄) als einfachstes Olefin mit einer weltweit jährlichen Produktionsmenge von 160 Mt (Stand 2015), Ausgangsstoff für über 30 % aller produzierten Petrochemikalien. Zur Zeit wird Ethylen vorwiegend aus leichten Erdölfraktionen (vor allem Naphtha) mittels Steamcracking gewonnen. Mittels MTO (Methanol-to-Olefines) lässt sich aus Erdgas, Kohle oder Biomasse ge-

wonnes Methanol zu Olefinen mittels eines Wirbelschichtreaktors umsetzen (Arnold et al. 2017).

2.7.3.4 C 4 Nutzung von Membranverfahren zur Stofftrennung statt thermischer Trennverfahren

Als Membranen werden semipermeable Schichten bezeichnet, welche zumeist sehr dünn sind um eine möglichst hohe Permeabilität zu erreichen. Für die Produktion von Grundstoffen (z. B. Ethylen und Propylen) ist es eine der Hauptaufgaben der chemischen Industrie gasförmige oder flüssige Gemische aufzutrennen. Die konventionellen Verfahren, wie z. B. die Rektifikation und Destillation, sind meist sehr energieaufwendig und verursachen, dem hohen Energieverbrauch entsprechend, hohe Kosten. Membrantrennprozesse gelten hierbei als energiesparende und preisweitere Trennverfahren gegenüber den konventionellen Trennverfahren und können somit durch Prozessoptimierung einen Beitrag zur CO₂-Vermeidung beitragen. Das aufzutrennende Fluid wird hierbei über die semipermeable Membran geleitet und in zwei Teilstoffe (Permeat und Retentat) separiert. Allgemein wird in poröse- und Lösungs-Diffusions-Membranen (auch dichte Membranen) unterschieden. Je nach Anforderung eines Prozesses, werden unterschiedliche Membrantechnologien sowie Membranarten benötigt. Aktuell wird die organophile Nanofiltration (bezieht sich auf organische Verbindungen und Abtrennung von organischen Lösungsmitteln, auch als Hybridverfahren möglich) als energieeffiziente Membrantrenntechnologie gesehen (Bettermann et al. 2010; Hauke 2015).

2.7.3.5 C 5 Power-to-Heat mit dem Schwerpunkt auf die Dampferzeugung

Als Power-to-Heat (PtH) werden Umwandlungstechnologien bezeichnet, bei denen elektrischer Strom in Wärme umgewandelt wird. PtH ist damit eine Sektorenkopplung zwischen Strom und Wärme. In der Industrie kann hierbei der Wasserdampf mit unterschiedlichen Technologien (z. B. Elektro-Kessel, Elektro-Ofen als indirekte elektrische Verfahren und der Elektrodenkessel als direktes elektrisches Verfahren) erzeugt werden (Schneider und Schüwer 2017).

2.7.3.6 C 6 Wasserstoff aus Elektrolyse als Edukt statt Steam Reforming bzw. partielle Oxidation

Generell ist die Wasserstoffgewinnung mit Hilfe von Elektrolyseuren auch als Power-to-Gas (PtG) bekannt. Die grundlegende Idee ist es generierte Stromüberschüsse aus hauptsächlich erneuerbaren Energien in Gas (Wasserstoff oder auch durch Veredelung Methan) umzuwandeln und so nutzbar zu machen. Hierbei wird der in der Brennstoffzelle ablaufende Prozess umgekehrt (Elektrolyseur), d. h. mit Hilfe von Gleichstrom werden Wassermoleküle in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt. Es gibt drei Arten von Wasser-Elektrolyseuren, welche sich nach der Art der verwendeten Elektrolyte unterscheiden:

- 1 | Die Alkalische Elektrolyse, welche mit einer wässrigen Kali- oder Natronlauge betrieben wird
- 2 | Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse, welche eine protonleitende Membran aufweist

- 3 | Feststoff-Oxid-Hochtemperatur-Elektrolyse, die über eine keramische ionenleitende Membran verfügt.

2.7.4 LCBTT für die Zementbranche

2.7.4.1 Z 1 CO₂-Capture Post-Combustion (Aminwäsche-Nachrüstung an konventionellen Zementöfen)

Die Technologie *CO₂-Capture Post-Combustion* beschreibt das Einfangen prozess- und brennstoffbedingter CO₂-Emissionen mit Hilfe einer nachgeschalteten CO₂-Wäsche auf Aminbasis. Das abgeschiedene Kohlendioxid wird anschließend eingelagert (CCS - Carbon Capture and Storage) oder genutzt (CCU - Carbon Capture and Utilisation). Da der CO₂-Anteil im Abgas von Zementwerken mit ca. 25 % deutlich höher liegt als im Abgas von Kraftwerken (ca. 14 %), ist der apparative und energetische Aufwand für die Abscheidung entsprechend geringer (Schüwer et al. 2015 S. 6).

2.7.4.2 Z 2 CO₂-Capture Oxyfuel (Ofenneubau)

Die Technologie *CO₂-Capture Oxyfuel* beschreibt das Einfangen der prozess- und brennstoffbedingten CO₂-Emissionen mit Hilfe einer nachgeschalteten physikalischen CO₂-Abtrennung. Das abgeschiedene Kohlendioxid wird anschließend eingelagert (CCS - Carbon Capture and Storage) oder genutzt (CCU - Carbon Capture and Utilisation).

Beim Oxyfuel-Verfahren wird (im Gegensatz zum Post-Combustion-Verfahren) Sauerstoff anstelle von Luft für die Verbrennung eingesetzt. Dadurch entfällt das apparativ-technisch teure und energetisch aufwändige Durchschleusen von Luft-Stickstoff (Anteil in der Luft rund 78 %) durch den Verbrennungsprozess. Das Abgas besteht daher hauptsächlich aus CO₂ und Wasserdampf, welcher durch Kühlung relativ einfach auskondensiert werden kann. Allerdings ist die Bereitstellung des benötigten (mind. 95 %igen) Sauerstoffs – i. d. R. mittels einer kryogenen Luftzerlegungsanlage³¹ - technisch, energetisch und von den Kosten her aufwändig.

Da die Verbrennung mit reinem Sauerstoff zu deutlich höheren Verbrennungstemperaturen führt, ist aufgrund der geänderten wärme- und strömungstechnischen Randbedingungen eine Modifikation der Brenner und des Feuerraumes erforderlich. Ein Teil des CO₂-reichen Verbrennungsgases muss in den Feuerungsraum zurückgeführt werden, um die Feuerungstemperaturen zu begrenzen (Markewitz et al. 2017 S. 10 ff., 21 f.).

2.7.4.3 Z 3 Elektrifizierung des Wärmeeintrags (PtH) im Sinterprozess und/oder bei der Kalzinierung

Das hier beschriebene Power-to-Heat-Verfahren (PtH) für die Zementherstellung ist sowohl für die Kalzinierung im *Kalkofen* als auch für die gekoppelte Kalzinierung und Sinterung im *Zementofen* (Drehrohrofen) anwendbar. Die derzeitige Referenztechnologie ist die Brennertechnologie mit Kohlestaub, Ersatzbrennstoff (EBS) oder

³¹ Alternativ kann der Sauerstoff auch durch Wasserelektrolyse erzeugt werden. Dies hätte den Vorteil, dass zusätzlich Wasserstoff als Nebenprodukt gewonnen werden kann (siehe dazu den Technologie-Steckbrief Z4: *Synergetische Konzepte - Oxyfuel-Verfahren & PtG*).

Erdgas als Energieträger. Die Elektrifizierung des Wärmeeintrags kann in monovalente und hybride Elektrifizierung unterteilt werden.

Die *hybride* elektrische Luftvorwärmung kann (mit Anpassungen) in bestehende Systeme integriert werden. Die Umsetzung erfolgt hierbei durch das Einblasen elektrisch erhitzter Luft oder den direkten Einsatz von Widerstandsheizelementen. Ein Hybridkonzept ließe sich beispielsweise relativ einfach für erdgasbefeuerte Heißgaserzeuger umsetzen (Zementexperte 2017).

Die *monovalente* Elektrifizierung erfordert eine komplette Neukonstruktion der Anlage. Die Nutzung von CO₂ im Kreislauf als Wärmeträger (an Stelle von Verbrennungsluft und Verbrennungsgasen) macht eine CO₂-Gaskühlung mit CO₂-Wärmetauschern erforderlich. Diejenige CO₂-Menge, die dem Prozess durch Kalkstein neu hinzugeführt wird, muss wieder ausgeschleust werden. Der apparative Aufwand für eine monovalente Elektrifizierung wird als einfach(er) angesehen als bei konventionellen Zementöfen mit Verbrennung, da u. a. keine Zuluft- und Brenngaskonditionierung erforderlich ist.

Der Vorteil monovalenter elektrischer Systeme ist, dass reine CO₂-Ströme aufgefangen werden können, da keine Verbrennungsluft bzw. -gase entstehen oder durchgeschleust werden. Es entsteht eine hochreine CO₂-Quelle, welche in relevanten Mengen zur Gas-Synthese mit EE-H₂ genutzt werden könnte. Es würden sich Möglichkeiten für die Synergien von PtH und PtG ergeben, da allein in NRW in 10 Anlagen ca. 7,9 Mt/a reines CO₂ produziert werden könnte (Schüwer et al. 2015 S. 6).

2.7.4.4 Z 4 Synergetische Konzepte: Oxyfuel-Verfahren & PtG

Das Konzept beschreibt die (räumliche und stoffliche) Kombination der drei Verfahren

- a) Wasserelektrolyse
- b) Oxyfuel-Zementproduktion (Kalzinierungs- und/oder Sinterprozess) und
- c) Methanisierung (optional).

Ziel der Kombination von Power-to-Gas- und Oxyfuel-Verfahren ist die Nutzung von reinem Sauerstoff, der als Co-Produkt der Wasserstoffelektrolyse entsteht, direkt vor Ort für die Zementproduktion im Oxyfuel-Verfahren. Beim Oxyfuel-Verfahren wird der Brennstoff mit reinem Sauerstoff anstelle von Luft verbrannt (s. Steckbrief Z2). So lassen sich einerseits höhere Flammtemperaturen erreichen, die sich über eine Abgas-Rezirkulation regulieren lassen. Insbesondere aber entfällt das apparatetechnisch teure und energetisch aufwändige Durchschleusen von Luft-Stickstoff (Anteil in der Luft rund 78 %) durch den Verbrennungsprozess. Das Abgas besteht daher hauptsächlich aus CO₂ und Wasserdampf, welcher durch Kühlung relativ einfach auskondensiert werden kann. In einem dritten Schritt kann das auf diese Weise abgeschiedene CO₂ zur Veredelung des Wasserstoffs aus der Elektrolyse zu Methan (oder anderen Brenn- oder Rohstoffen) verwendet werden.

2.7.4.5 Z 5 Alternative Zemente (Klinkersubstitute)

Alternative Zemente bzw. Klinkersubstitute verfolgen den Ansatz der Herabsetzung des sogenannten „Klinkerfaktors“ (= kg Zementklinker / kg Zement) durch Verwen-

dung alternativer Zementbestandteile. Durch die Herabsetzung des Klinkeranteils reduzieren sich die hohen rohstoff- und brennstoffbedingten CO₂-Emissionen der Zementklinker-Produktion (UBA 2014a S. 173).

Das CO₂-Reduktionspotential dieser Variante würde laut World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) und IEA bei einer Reduktion des Klinkerfaktors von 0,77 in 2010 (= Referenztechnologie) auf 0,71 in 2050 bei 60 kg/t liegen.

Laut dem Bericht „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ vom Umweltbundesamt (UBA), würde für Deutschland bei gleichbleibender Produktionsmenge eine Reduktion des Klinkerfaktors auf 0,6 (- 22 %) in 2050 2,75 Mio. t rohstoffbedingter und 1,86 Mio. t brennstoffbedingter CO₂-Einsparung entsprechen. Die spezifische Reduktion ist 70 % rohstoffbedingt und 50% energiebedingt (thermisch und elektrisch). Das UBA geht davon aus, dass „die „grünen“ Zemente der Zukunft den größten Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie leisten werden" (UBA 2014a S. 173f).

3 AP 3: Rezeption und Gestaltung der Rahmenbedingungen

Thomas Adisorn, Dr. Dagmar Kiyar, Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer, Sabine Nanning

3.1 Einführung

Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius, wie sie im Abkommen von Paris verabschiedet wurde, stellt hohe Anforderungen an die energieintensive Industrie (Energy-intensive Processing Industries (EPIs)), an die Politik und an die Gesellschaft. So erfordert die klimaneutrale Ausgestaltung energieintensiver Prozesse eine verstärkte Diffusion von Technologien, wie etwa der Energieeffizienz (z. B. Anlagen, Prozesse), die Entwicklung neuer, klimaneutraler Technologien und Verfahren wie auch Strukturen (z. B. Ausbau erneuerbarer Energien, Kreislaufwirtschaft). Der starke globale Wettbewerb, zum Teil langfristige Investitionszyklen sowie spezifische ökonomische Strukturen in der Branche erschweren die Umsetzung von notwendigen Innovationen zudem.

Der vorliegende Bericht stellt dar, in welchen übergeordneten (oder globalen) Rahmenbedingungen sich die EPI bis 2050 aus heutiger Sicht bewegen kann, wenn sie bis dahin klimaneutral sein soll. Der Fokus liegt dabei auf politischen Rahmenbedingungen. Diese können u. a. zentrale Politikinstrumente, -programme, Zielsetzungen und Institutionen umfassen. Auch wichtige wirtschaftliche oder gesellschaftliche Entwicklungen können als Rahmenbedingungen einfließen. Abschließend werden erste Überlegungen angestellt, welche Elemente ein zukünftiges Politikpaket zur klimaneutralen Gestaltung der EPI beinhalten kann und sollte.

Die Identifikation der Rahmenbedingungen erfolgt in erster Linie aus Sicht der deutschen und europäischen EPI. Internationale Beispiele von fortschrittlichen Politikmaßnahmen vermitteln einen Eindruck, wie sich Rahmenbedingungen in Deutschland und Europa unter realistischen Bedingungen entwickeln können, um die notwendigen Zielzustände bis 2050 zu erreichen und so die klimaneutrale Transformation der EPI erfolgreich zu gestalten.

Zur Systematisierung der Rahmenbedingungen wurden sechs notwendige operationale Zielzustände entwickelt, die bis 2050 erreicht sein müssen, damit der Wandel zu einer klimaneutralen, zirkulären Grundstoffindustrie (EPI) gelingen kann. Diese Zielzustände ergeben sich aus einer Synthese der gegenwärtigen Herausforderungen für die Transformation der EPI. Der globale Klimaschutz gibt an dieser Stelle die grundlegende Richtschnur für die Ableitung von Zielzuständen und Entwicklung von Rahmenbedingungen vor.

Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, umfassen diese Zielzustände die Gestaltung von internationalem Wettbewerb, Infrastrukturentwicklung, Technologieentwicklung, gesellschaftlicher Akzeptanz, Risikoabsicherung von Investitionen sowie die Gewährleistung der Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten. Das Erreichen dieser Zielzustände ist gleichermaßen grundlegende Bedingung für die erfolgreiche Transformation der EPI, wie auch politische Gestaltungsaufgabe.

Tabelle 13 Übersicht der relevanten Zielzustände zur erfolgreichen Transformation der energieintensiven Industrie bis 2050

Relevante Zielzustände in 2050 zur Erreichung der Klimaschutzziele	Beschreibung des Zielzustands
Oberziel: Klimaneutrale, zirkuläre Grundstoffindustrie	Eine klimaneutrale, zirkuläre Grundstoffindustrie (EPI), die die (noch) benötigten Grundstoffe des globalen Wirtschaftens bzw. Wohlstands klimaneutral und zu möglichst geringen Anteilen aus primären Rohstoffen und in ökoeffizienter internationaler Arbeitsteilung bereitstellt.
Operationale Unterziele:	
<ul style="list-style-type: none"> Gestaltung von internationalem Wettbewerb 	Der internationale Wettbewerb ist in einer Art und Weise gestaltet, dass der Ausstoß klimaschädlicher Emissionen vermieden und nicht nur verlagert wird.
<ul style="list-style-type: none"> Risikoabsicherung von Investitionen 	Das Risiko für Investitionen in etablierte und neue Maßnahmen, die eine klimafreundliche Herstellung von Produkten der EPI ermöglichen, ist minimiert.
<ul style="list-style-type: none"> Nachfragen nach klimafreundlichen Produkten 	Klimafreundliche Endprodukte der EPI werden in hohem Maße nachgefragt.
<ul style="list-style-type: none"> Technologieentwicklung 	Zur Marktreife entwickelte (Break-through) Technologien ermöglichen es, klimaschädliche Emissionen zu vermeiden.
<ul style="list-style-type: none"> Infrastrukturentwicklung 	Weiter oder neu entwickelte (Energie-)Infrastrukturen ermöglichen es, klimaschädliche Emissionen zu vermeiden, zu recyceln oder zu speichern und zu nutzen.
<ul style="list-style-type: none"> Gesellschaftliche Akzeptanz 	Die mit einer klimafreundlichen Produktion einhergehende Einbindung und Nutzung neuer Infrastrukturen, Technologien, Verfahren und Grundstoffe, ist gesellschaftlich weitestgehend akzeptiert.

Quelle: Eigene Darstellung

Innerhalb dieser sechs Zielzustände werden die vom Wuppertal Institut als zentral angesehenen Rahmenbedingungen in ihrer gegenwärtigen Ausprägung und Wirkung auf die EPI beschrieben. Dabei fließen Diskussionen um die zukünftige Gestaltung dieser und möglicher weiterer Rahmenbedingungen ebenfalls ein.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Zielzustände nicht notwendigerweise eine trennscharfe Zuordnung von politischen Rahmenbedingungen zulassen. So können beispielsweise breit angelegte Demonstrationsprogramme Technologien oder Verfahren direkt in der EPI befördern, aber gleichzeitig auch Effekte auf die Infrastrukturentwicklung haben. Die Darstellung der identifizierten Rahmenbedingungen ist nicht abschließend, sondern dient der intensiven Diskussion mit Vertreterinnen und Vertretern der EPI.

3.2 Rahmenbedingungen

3.2.1 Gestaltung von internationalem Wettbewerb

Die Industrie bewegt sich auf internationalen Märkten – mit den damit verbundenen Chancen und Risiken. Den langfristigen Herausforderungen durch den Klimawandel werden politische Rahmenbedingungen entgegengesetzt, die einen Einfluss auf die Industrien und ihre Marktpositionen haben werden. Energie- und klimapolitische Instrumente können (müssen aber nicht notwendigerweise) Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von EPI haben. Aufgrund der Bedeutung für die Beschäftigung werden Instrumente häufig in einer Form gestaltet, um die Auswirkungen auf die EPI zu begrenzen. Dies kann durchaus auch zu Implikationen für andere Akteure führen.

Einen zentralen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit hat das so sogenannte **Carbon Pricing**. Für die EPI bedeutet dies auf den ersten Blick, dass Kosten durch verursachte Emissionen auf die Unternehmen zukommen. Grundsätzlich gibt für das Carbon Pricing zwei zentrale politische Gestaltungsmöglichkeiten: ein „**Emission Trading System**“ (ETS) oder die **Besteuerung von klimaschädlichen THG-Emissionen**. Ziel des Emissionshandelssystems ist, die Atmosphäre im Hinblick auf die Emission von THG in ein kostenpflichtiges Gut zu verwandeln. Für den Ausstoß an Emissionen müssen Emissionsrechte oder Zertifikate gekauft werden, so dass ein Anreiz für Investitionen in kohlenstoffarme Technologien gesetzt wird. Das Emissionshandelssystem der EU (ETS) wurde in 2005 umgesetzt. Betreiber großer Verbrennungsanlagen und energieintensive Industrieanlagen nehmen gegenwärtig am Emissionshandel teil. Allerdings führt das derzeitige Überangebot von Zertifikaten zu niedrigen Zertifikatspreisen, so dass die Anreize für Investitionen zur klimafreundlichen Gestaltung für die Teilnehmer des ETS gering sind. Ab 2021 geht der EU ETS in seine 4. Phase. Hierfür sieht ein Reformvorschlag der EU Kommission eine jährliche Verknappung der zugänglichen Zertifikate von gegenwärtig 1,74 % auf 2,2 % ab 2021 vor. Eine begrenzte Anzahl von Sektoren und Sub-Sektoren, die besonders von Carbon Leakage betroffen sind, sollen Zertifikate weiterhin kostenfrei zugeteilt erhalten (EU Parlament 2018).

Carbon oder auch Investment Leakage meint, dass Unternehmen ihren Standort in Länder verlagern, die über keine strengen Emissionsauflagen verfügen. Durch die kostenfreie Zuteilung von Zertifikaten im Rahmen des ETS werden gerade die Forderungen wichtiger Industrieverbände erfüllt (z. B. (CEMBUREAU o. J.)). Allerdings gibt es auch Einschätzungen, die die Gefahr des Carbon Leakage als überschätzt einordnen; in diesem Zusammenhang wird Carbon Leakage z.T. sogar als „Mythos“ bezeichnet (Carbon Market Watch 2015)).

Es kann davon ausgegangen werden, dass der EU ETS langfristig ein wichtiges Instrument zur Gestaltung einer kohlenstoffarmen Wirtschaft bis 2050 bleiben wird (KOM 2011); so haben sich die Europäische Kommission, der Rat und das Europäische Parlament im November 2017 auf eine Reform des Europäischen Emissionshandels für die vierte Handelsperiode geeinigt (2021 bis 2030) (BMWi 2018; Europäischer Rat 2017). Durch die absehbare Verknappung von Zertifikaten kann sich die Situation für ETS-Sektoren langfristig verschärfen, wobei das Carbon Leakage Risiko das ETS-Design voraussichtlich auch langfristig prägen wird. Zu berücksichtigen ist,

dass zunehmend Carbon Pricing Mechanismen weltweit implementiert werden (ICAP 2016; World Bank und ECOFYS (Firm) 2015), so dass in einigen Städten, Regionen oder Ländern der Ausstoß von CO₂ ebenfalls teurer wird und das Carbon Leakage Risiko entsprechend sinken kann. Beispielsweise wurde nach einer ETS-Pilotphase in verschiedenen chinesischen Städten ein nationaler ETS in China in 2018 umgesetzt. Bisher deckt der chinesische ETS nur den Stromsektor ab; sukzessive sollen allerdings auch Unternehmen der EPI in das System eingebunden werden (ICAP 2018), so dass zukünftig sowohl chinesische als auch europäische Unternehmensstandorte der EPI von entsprechenden Mechanismen reguliert werden. In Abhängigkeit von der Gestaltung der unterschiedlichen Carbon Pricing Mechanismen weltweit (insbesondere mit Blick auf die Kosten für verursachte Emissionen), kann sich zukünftig ein fairerer globaler Wettbewerb herausbilden.

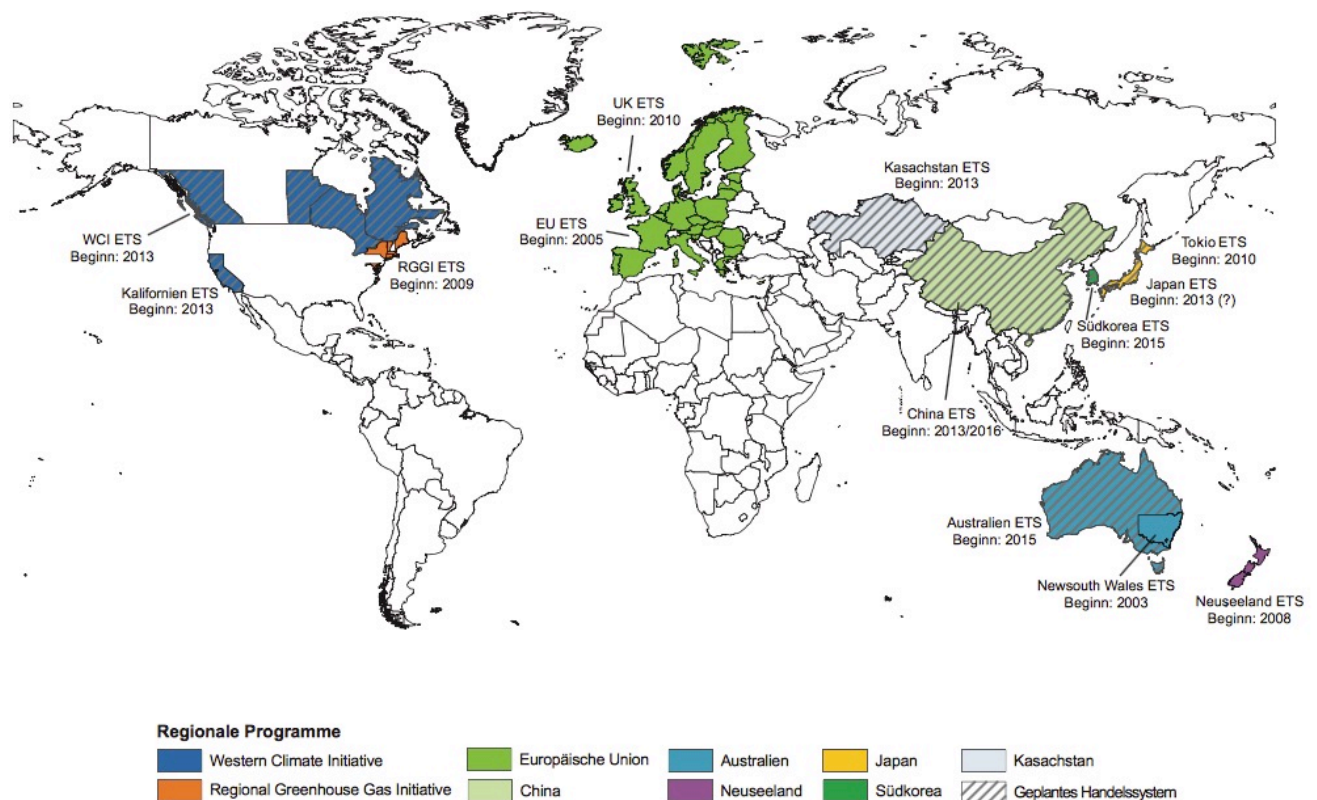


Abbildung 41 Weltweite Emissionshandelssysteme

Quelle: Emissionshandelssysteme online unter https://www.cesifo-group.de/DocDL/ifosd_2012_17_4.pdf

Zum Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit wurde 2014 die **Besondere Ausgleichsregel im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)** getroffen. Das EEG ermöglicht durch Zusatzbeiträge auf den Strompreis für Endkunden den Ausbau erneuerbarer Energien. Durch die Besondere Ausgleichsregel werden EPI hiervon weitestgehend ausgenommen. Einer der Gründe für die besondere Ausgleichsregelung besteht aus Sicht der Bundesregierung und dem Verband für energieintensive Industrien (EID 2012) darin, dass die Energiekosten in Deutschland bereits ohne das EEG vergleichsweise hoch sind – durch die Zusatzbeiträge würde sich die Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu europäischen und inter-

nationalen Konkurrenten verschlechtern. Das EEG ist eng verknüpft mit den nationalen Zielen für erneuerbare Energien (§1 EEG) und entsprechenden Ausbaupfaden (§ 4 EEG) und impliziert somit eine langfristige Perspektive bis 2050. Kritik bezieht sich vor allem darauf, dass durch die Besondere Ausgleichsregelung insbesondere Haushalte die Zusatzbeiträge für den Ausbau erneuerbarer Energien aufbringen müssen. Im neuen Koalitionsvertrag betont die Bundesregierung ausdrücklich die „Gewährleistung der Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Industrien“ (CDU, CSU und SPD 2018), so dass zunächst von einer Fortführung der EEG-Ausgleichsregelung ausgegangen werden kann.

Insgesamt stellen die **Regeln der WTO** für verschiedene energie- und klimapolitische Instrumente einen relevanten Rahmen dar. Beispielhaft sei hier nur auf das Inländerprinzip (Artikel 3 GATT) verwiesen, demzufolge ausländische Waren sowie deren Anbieter nicht ungünstiger behandelt werden als einheimische Waren und deren Anbieter. Die freie Zuteilung von Zertifikaten könnte als Subvention für die EPI bewertet werden, da für das erforderliche Zertifikat kein finanzieller Beitrag geleistet werden musste. Beim Export hätten dann ETS-regulierte Waren der EPI einen Vorteil in Empfängerländern. Holzer (2016) argumentiert allerdings, dass nur solche Länder eine Auseinandersetzung vor der WTO suchen würden, die selbst einen rein auf Auktionen basierenden ETS umgesetzt haben; also keine Zertifikate zuteilen. Aufgrund der geringen Fallzahl an umgesetzten ETS weltweit, erscheint dieses Risiko allerdings gegenwärtig eher begrenzt. Da es bisher keine Auseinandersetzungen vor der WTO im Zusammenhang mit bestehenden ETS gab, ist eine Einschätzung zur Auslegung und Entwicklung der WTO-Regeln schwierig (Holzer 2016).

Zudem werden **Border Carbon Adjustments (BCAs)** diskutiert (Condon und Ignaciuk 2013; McKibbin et al. 2017; Mehling et al. 2017). Das Grundprinzip ist, die Kosten für eingeführte Waren zu erhöhen, wenn sich die Umweltbilanz von Importen schlechter darstellt als von Produkten des Binnenmarkts. Die Verteuerung erfolgt durch eine Import-/CO₂-Steuer oder ähnliche Mechanismen. Kurzum: „BCAs seek to achieve symmetry in the treatment of domestic and foreign products by including imports in, or exempting exports from, a carbon constraint“ (Kortum und Weisbach 2017). Emanuel Macron betonte in 2017, dass durch BCAs ein „level playing field“ für zentrale Industrieunternehmen der EU erreicht werden kann (Macron 2017). Im gleichen Jahr hat auch der italienische Senat die EU dazu aufgefordert, BCAs auf Tauglichkeit hin zu überprüfen (Carbon Pulse 2017). Obwohl bisher keine nennenswerten Formen von BCAs umgesetzt wurden, deuten Aussagen hochrangiger europäischer Entscheidungsträger an, dass dieses Politikinstrument in Zukunft eine Rolle spielen wird. Gefürchtet wird allerdings, dass BCAs als ein Instrument unfairen Protektionismus eingesetzt werden können (Åhman et al. 2017). Gleichwohl deuten Forschungsarbeiten an, dass BCAs durchaus mit Regeln der World Trade Organization (WTO) vereinbar sind (Horn und Mavroidis 2011).

Sogenannte „**Sectoral Approaches**“ für die EPI mit unterschiedlichen Ausprägungen wurden im Rahmen internationaler Klimaverhandlungen diskutiert. Ideen aus Japan und der EU enthielten Emissionsreduktionsziele für die EPI. Japans Vorschlag machte dabei keine Unterscheidung hinsichtlich Industrie- und Schwellen- bzw. Entwicklungsländern. Nicht-Annex I Länder lehnten sektorale Emissionsreduktionsziele ab und bezogen sich dabei auf das Prinzip der „common but differentiated

responsibility“ (Åhman et al. 2017). Aufgrund aufgezeigter und weiterer Schwierigkeiten zur Umsetzung sektoraler Ansätze argumentieren (Åhman et al. 2017) für eine internationale Berichterstattungspflicht mit Blick auf Technologieentwicklung in EPI. Hierdurch könnten zukünftig indirekt Anreize für höhere Investitionen in die Technologieentwicklung weltweit gesetzt werden, welche als erforderlich angesehen wird, um die EPI kohlenstoffarm zu gestalten.

Im Rahmen einer Studie (UBA 2017b) wurden neben anderen Instrumenten auch Energieeffizienzpolitiken mit Blick auf die Industrie untersucht. So könnte die **Öko-Design-Richtlinie der EU**, die Effizienzmindeststandards für einige „serienmäßig gefertigte Anlagenkomponenten“ (z. B. Motoren, Ventilatoren) setzt, auch auf Produktionsanlagen ausgeweitet werden, um höhere Einsparungen zu ermöglichen.

Für den Erfahrungsaustausch im Themenkomplex Energieeffizienz wurde die **Initiative Energieeffizienz-Netzwerke** ins Leben gerufen; durch den Austausch soll die Umsetzung von Energieeffizienz-Maßnahmen erleichtert werden (dena 2017). Nicht-KMU sind nach §§ 8 - 8d des Energiedienstleistungsgesetzes verpflichtet, ein periodisches Energieaudit durchführen zu lassen oder ein Energiemanagementsystem zu installieren. Hierdurch können Einsparpotenziale identifiziert und potenziell auch realisiert werden. Durch die Verpflichtung entstehen für alle EPI ähnliche Kosten für die Audits in Deutschland.

Synthese, Ausblick und Forschungsbedarfe

Die Gewährleistung der Wettbewerbsfähigkeit der EPI im internationalen Vergleich stellt sowohl für die (neue) Bundesregierung aber auch für europäische Entscheidungsträger ein Ziel von großer Bedeutung dar. Die Besondere Ausgleichsregelung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) sowie der Spitzenausgleich bei der Energiesteuer erscheinen hierfür auch zukünftig seitens der Politik als wichtige Säule gesehen zu werden. Eine grundsätzliche Abkehr von diesem Instrumenten-Design ist daher unwahrscheinlich, auch wenn die Kritik zur überproportionalen Belastung für Haushalte im Rahmen des EEG durchaus vorhanden ist. Sollten Entscheidungsträger mittelfristig auf diese Kritik eingehen und z. B. die Besondere Ausgleichsregelung novellieren, wird es für Unternehmen der EPI unumgänglich sein, die Stromintensität noch stärker zu senken als bisher. Ähnlich wie beim EEG profitieren die EPI durch besondere Regelungen im Rahmen des EU ETS. Dies bezieht sich v. a. auf die Zuteilung von Zertifikaten, was auch für die 4. Phase geplant ist. Allerdings werden hierfür Zertifikate jährlich verknappt; es kommt also durchaus zu einer (etwas) strengeren Auslegung dieses Instruments. Forderungen nach Verschärfungen des ETS wie etwa eine Löschung überschüssiger Emissionshandelszertifikate werden u. a. vom WWF artikuliert (WWF 2016). Inwiefern EEG und EU ETS die Wettbewerbsfähigkeit reduzieren, hängt nicht zuletzt von den jeweiligen Ausnahmen ab. BCAs könnten für den Vertrieb von Waren auf dem europäischen Binnenmarkt wiederum europäische EPI-Unternehmen stärken, da ausländische Produkte teurer werden. Der Einsatz dieses Instruments müsste allerdings sehr genau abgewogen werden, da es aufgrund seiner protektionistischen Orientierung Implikationen für den Welthandel und die europäische Beschäftigungspolitik haben kann.

Insgesamt ergeben sich mit Blick auf Politikinstrumente verschiedene Forschungsbedarfe:

- Welche „good practice“ Instrumente und Ansätze des Carbon Pricing bestehen weltweit zur klimafreundlichen Gestaltung der EPI unter Beachtung von Gesichtspunkten des Wettbewerbs?
- Unter welchen Umständen ist ein phasing out der Besonderen Ausgleichsregelung des EEG oder der Ausnahmetatbestände bei der Energiesteuer möglich und wie müsste dies gestaltet sein, auch damit deutsche Unternehmen der EPI in klimafreundliche Technologien und Verfahren investieren?
- Verringern die EEG-Ausgleichsregelungen den Druck, notwendiger Effizienzinvestitionen oder Investitionen in alternative Prozesse? Verschieben sie diese Investitionen nach hinten?
- Wie sieht eine wirksame Gestaltung von BCAs aus, damit die Wettbewerbsfähigkeit der EPI im europäischen Binnenmarkt gestärkt wird ohne dabei internationale Handelskonflikte zu forcieren? Welche Waren und auch Endprodukte müssen hiervon reguliert werden?
- Wie muss eine wirksame Verknappung der jährlichen ETS-Zertifikate aussehen, damit zwar carbon leakage vermieden wird, aber klimafreundliche Investitionen attraktiviert werden?
- Können BCAs einen wirksamen Beitrag zur klimaneutralen Gestaltung nicht-europäischer Unternehmen der EPI leisten?
- Wie kann ein „sectoral approach“ aussehen, der die Interessen unterschiedlicher Länder vereint?

3.2.2 Risikoabsicherung für Investitionen

In diesem Teilkapitel geht es vorwiegend um Investitionen in klimaschonende Technologien, die bereits heute, oder aber als Resultat von F+E etc. prinzipiell am Markt verfügbar sind. Dies können auch zukünftig marktreif werdende Technologien sein. Prinzipiell wirken die hier diskutierten Rahmenbedingungen für Investitionen auch bei Investitionen in die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien. Hierfür gibt es aber zusätzlich spezifische Rahmenbedingungen und Politikinstrumente, die in Kapitel 2.4 analysiert werden.

Ein wesentliches Hemmnis dafür, in die Entwicklung und den Einsatz dekarbonisierter Techniken, Technologien und Verfahren zu investieren, liegt darin, dass die notwendigen Kapitalrückflüsse nicht garantiert sein könnten. Die Entwicklung von entsprechenden intelligenten Mechanismen zur Risikoabsicherung bzw. -reduktion ist damit eine wesentliche Herausforderung. Bei der Investition in klimafreundliche Technologien und Verfahren von Seiten der EPI kann der Staat eine mehr als bedeutsame Rolle spielen und somit zur Transformation der verschiedenen Branchen beitragen. Dies gilt gleichermaßen für Investitionen am Standort Deutschland wie auch international.

In Deutschland gilt das Sondervermögen „**Energie- und Klimafonds**“ (**EKF**) als zentrales Finanzierungsinstrument. Von Seiten der Unternehmen wird häufig kritisiert, dass der EKF nicht auf eine verlässliche und langfristige Finanzierung ausgelegt ist (UBA 2017b), was u. a. daran liegt, dass die Finanzierung des EKF von Preisen für die Auktionieren von CO₂-Zertifikaten des EU-ETS abhängig ist. Im Rahmen des EKs wurde u.a. zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie beim BMWi der sogenannte „Energieeffizienzfonds zur Förderung der rationellen und sparsamen

Energieverwendung“ aufgelegt. Durch diesen Energieeffizienzfonds werden unter anderem durch die BAFA energieeffiziente Querschnittstechnologien gefördert. Mit der Aktualisierung der Förderrichtlinie in 2016 ist es nun auch größeren Betrieben mit mehr als 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter möglich, sich auf Fördermittel zu bewerben. Die Förderhöhe kann bis zu EUR 150.000 für investive Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz durch den Einsatz von hocheffizienten am Markt verfügbaren Querschnittstechnologien (z. B. Motoren, Antriebe, Pumpen, Optimierung technischer Systeme) umfassen. Das Programm läuft vorerst bis 2019. Im Gegenzug endete ein durch den Projektträger Karlsruhe umgesetzte Programm „Energieeffiziente und klimaschonende Produktionsprozesse“ in 2017. Dieses Programm förderte exklusiv Unternehmen der energieintensiven Industrie mit bis zu EUR 1,5 Millionen pro Unternehmen für investive Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung (BMWi 2016). Weiterhin können über die KfW bis zu EUR 25 Millionen für technologieoffene Investitionen in die Modernisierung, die Erweiterung oder den Neubau von Anlagen zur Vermeidung oder effizientere Nutzung von Abwärme finanziert werden; ein Tilgungszuschuss von 40 % kann bspw. für die außerbetriebliche Abwärmenutzung gewährt werden. In Teilen können die genannten Finanzierungsprogramme auch von Contractoren/ Energiedienstleistungsunternehmen abgerufen werden, wenn diese im Rahmen eines speziellen Auftrags handeln. Ein weiteres Instrument zur Förderung stromeffizienter Technologien und Verfahren ist das wettbewerbliche Programm STEP up, im Rahmen dessen die „beantragte Fördersumme ins Verhältnis zu der erwarteten Stromeinsparung („Förder-Euro“ pro eingesparter kWh Strom)“ gesetzt wird (BMWi o. J.). Neben Ausschreibungen, die für alle Akteure und Sektoren offen sind, bestehen auch geschlossene Verfahren, wodurch Akteure gezielt angesprochen und Hemmnisse adressiert werden. Gegenwärtig läuft eine geschlossene Ausschreibungsrunde zu Energieeffizienzmaßnahmen in der Wasser- und Abwassertechnik. Ab 2019 soll STEP up fortgeführt und die aktuell verfügbare Fördersumme von EUR 300 Millionen mglw. auch aufgestockt werden.

Im Zuge der Konstitution der neuen Bundesregierung soll ein „Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie“ aufgelegt werden, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen zu stärken. Obwohl die genaue Ausgestaltung des Förderprogramms bisher nicht weiter spezifiziert worden ist, kann eine mögliche Initiative der Bundesregierung vorsehen, „bis zu 50 Prozent der Kosten [zu] erstatten, wenn ein Unternehmen eine alternative Technologie mit emissionsfreier Energie entwickelt“ (Rheinische Post Online 2018).

Box 1 Steuerliche Anreize – die Beschleunigte Abschreibung in Irland

Seit 2008 können in Irland ansässige Unternehmen durch die „Accelerated Capital Allowance (ACA)“ die vollen Kosten für den Kauf von energieeffizienten Produkten von den zu versteuernden Erträgen des Unternehmens im Jahr der Anschaffung abziehen.

Ein Beispiel: Bei jährlichen Erträgen des Unternehmens von 100.000 EUR und dem Kauf von förderfähigen, energieeffizienten Produkten im Wert von 20.000 EUR muss lediglich die Differenz zwischen Ertrag und Produktkosten, also 80.000 EUR regulär versteuert werden. Bei einem Steuersatz von 12,5 % müssten lediglich 10.000 EUR an Steuern abgeführt werden.

Bei der Standardbesteuerung können zwar auch die vollen Kosten für Maschinen und Produkte abgesetzt werden, allerdings nur über einen Zeitraum von acht Jahren. Neben diesen „beschleunigten“ Abschreibungsmöglichkeiten können durch die Anschaffung energiesparender Produkte laufende Kosten gesenkt werden. Förderfähige Produkte sind durch das irische „Triple E“ Label gekennzeichnet und können so schnell identifiziert werden. „Triple E“ erfasst die 10-15 % energieeffizientesten Produkte einer Gruppe und somit die Top-Performer. Die Liste enthält Gebäudeenergiemanagementsysteme, Beleuchtung, Motoren, uvm (UBA 2017b).

Auch international kann die Bundesregierung dazu beitragen, die Kosten und damit auch die Risiken für das jeweilige Unternehmen zu reduzieren. Hier stehen der Bundesregierung über die KfW und ihrer für Auslandsinvestitionen wichtigen Tochterunternehmen KfW IPEX, DEG und Entwicklungsbank verschiedene Finanzierungsinstrumente zur Verfügung. Dazu zählen **Zuschüsse, Kredite und Bürgschaften**. Letztere werden als sogenannte Hermes-Deckungen bezeichnet und können einer Prüfung der Umwelt-, Sozial- und Menschenrechtsaspekte (USM) unterliegen. Für Projekte, die potenziell signifikant negative USM-Auswirkungen haben, kann ein Umwelt- und Sozialgutachten erforderlich sein (BMWi o. J.). Beispiele wie die Exporthilfe zur Finanzierung eines Zementwerks in Namibia (siehe Box 2) zeigen, dass die Nutzung klimafreundlicher Technologien beim Zugang zu staatlichen Mitteln zur Realisierung EPI-bezogener Auslandsinvestitionen eine wichtige Rolle spielen kann.

Box 2 Finanzierung eines Zementwerks in Namibia – Exporthilfen der DEG

Der deutsche Zementhersteller Schwenk beschloss 2008 eine Zementfabrik in Namibia zur Versorgung des lokalen und regionalen Markts zu realisieren. Die Investition wurde auch durch die Deutsche Investitions- und Entwicklungsgesellschaft (DEG) ko-finanziert. Die DEG ist ein Tochterunternehmen der staatlichen Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). Ein wesentlicher Beweggrund für die DEG zur Finanzierung des Zementwerks in Höhe von über EUR 30 Millionen beizutragen, war dessen klimafreundliche Gestaltung; bspw. wurden Walzenmühlen eingesetzt, die im Vergleich zu Kugelmühlen Stromeinsparungen von bis zu 30% realisieren können. Die Anlage in Namibia verfügt zudem über die Zertifizierungen ISO 9001:2008 (Qualitätsmanagement) und ISO 14001:2009 (Umweltmanagementsystem) (DEG 2015)

Um Investitionen in gewünschte Bahnen zu lenken und um umweltschädliche Subventionen und Anreize abzubauen, wurden in Deutschland die **Leitlinien der Bundesregierung zur Finanzierung von Kohlekraftwerken** überarbeitet. Obwohl bisher für die Übernahme von Exportkreditgarantien keine technischen Prüfstandards von THG-Emissionen fossiler Kraftwerke bestehen, werden solche Optionen diskutiert (BMWi o. J.).

In diesem Zusammenhang ist auch der erkennbare Trend zum Ausstieg von institutionellen wie privaten Investoren und Finanzdienstleistern aus der Finanzierung von fossilen Energietägern (Kohle, Öl und Gas) von Relevanz. Dies geschieht unter dem Stichwort **Carbon Divestment**. Divestment, also der bewusste Abzug von Kapital

(bspw. in Aktien oder Fonds) aus Unternehmen, hat es in der Vergangenheit u. a. in den Bereichen Tabak oder im Zusammenhang mit Unternehmen, die das Apartheids-Regime in Südafrika unterstützt haben, gegeben. Basierend auf der naturwissenschaftlichen Erkenntnis, dass nicht alle gesicherten Reserven fossiler Energieträger extrahiert werden können, wenn das 2°C-Ziel erreicht werden soll (McGlade und Ekins 2015; Meinshausen et al. 2009), veröffentlichte der Umweltaktivist und Gründer der Organisation 350.org Bill McKibben 2012 im Rolling Stone Magazine einen Artikel (McKibben 2012). Die entstandene Divestment-Kampagne, die zunächst vor allem an US-amerikanischen Universitäten (Beispiel Universität Stanford, die 2014 ankündigte, ihr Vermögen von 22 Milliarden US-Dollar nicht mehr in Kohle investieren zu wollen) und bei kirchlichen Einrichtungen (Beispiel Church of England, die 2015 bekanntgab, 12 Millionen £ aus Kohlekraftwerke und den besonders klimaschädlichen Teersanden abzuziehen), fand rasch Zuspruch durch die Vereinten Nationen (The Guardian 2015). Im Dezember 2017 gab zuletzt die Weltbank bekannt, ab 2019 keine Upstream-Tätigkeiten im Bereich Öl- und Gaswirtschaft zu finanzieren (World Bank 2017).

Dass THG-Emissionen oder deren Vermeidung ein ausschlaggebendes Kriterium für die finanzielle Unterstützung von Investitionen werden, kann gegenwärtig nicht abgeschätzt werden. Gleichwohl hat bereits die Verabschiedung des Paris Agreement ein neues Momentum ausgelöst: eine ambitionierte Klimapolitik führt zu einer Neubewertung von Unternehmen im Bereich der fossilen Brennstoffe. Unter den Stichworten „Unburnable Carbon“, „Stranded Assets“ und „Carbon Bubble“ („Kohlenstoffblase“) werden die finanziellen Risiken von Investitionen in die entsprechenden Unternehmen untersucht (u. a. fossilfreeindexes.com, die Carbon Tracker Initiative oder das Stranded Assets Programme an der Smith School of Enterprise and the Environment an der Universität Oxford). Divestment beschränkt sich derzeit auf Unternehmen im Bereich Kohle, Öl und Gas. Gleichwohl hängen energieintensive Industrien unmittelbar von der Versorgung mit fossilen Energieträgern ab.

Zur Finanzierung von Energieeffizienzprojekten wurde der **Europäische Energieeffizienzfonds (EEEF)** in 2011 initiiert. Energieeffizienz in der Industrie wird allerdings lediglich mittelbar adressiert, da „in der Regel kommunale, lokale und regionale Behörden in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union sowie öffentliche und private Unternehmen, die im Auftrag dieser Behörden handeln“ antragsberechtigt sind (BMW i 2017). Zudem ist der EEEF mit geringen Mitteln ausgestattet (UBA 2017b). Zur Identifizierung und Vorbereitung möglicher Investitionen dienen Energieanalysen („Energieraudits“) und Energiemanagementsysteme. Das oben erwähnte Energiedienstleistungsgesetz wurde nach Artikel 8 der Energieeffizienzrichtlinie (EED) umgesetzt. Diese wird gegenwärtig überarbeitet. Voraussichtlich werden Anforderungen für Nicht-KMU zur periodischen Durchführung von Audits fortgesetzt (CAN 2018).

Synthese, Ausblick und Forschungsbedarfe

In Deutschland bestehen vielfältige Instrumente um das Risiko von Investitionen zu verringern oder abzusichern. Hierzu zählen Finanzierungsinstrumente von KfW und BAFA, wodurch das finanzielle Risiko für Investitionen in klimafreundliche Technologien gesenkt werden kann. Durch STEP up können Investitionen von Unterneh-

men der EPI in Konkurrenz gesetzt werden – je stromeffizienter die Idee, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit auf eine Förderung.

Insgesamt ergeben sich mit Blick auf Politikinstrumente verschiedene Forschungsbedarfe:

- Die energieintensive Industrie gehört zu den klimasensitiven Sektoren – welche Offenlegungspflichten kommen aktuell und künftig auf die Unternehmen zu?
- Wie werden sich Investoren verhalten, wenn die Preise für fossile Energie ansteigen bzw. die Preise für erneuerbare Energien weiter fallen?
- Werden diejenigen Unternehmen anders bewertet, die sich durch Energieeffizienz, den Umstieg auf erneuerbare Energien und Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft von ihren Mitbewerbern abheben?
- Ermöglichen die deutschen Förderinstrumente für Unternehmen der EPI Investitionen in etablierte und neue klimafreundliche Technologien und Verfahren? Welche Rolle spielen in diesem Zusammenhang weitere Instrumente der EU oder der Länder? Wie lassen sich die Instrumente wirksam optimieren?
- Welche Möglichkeiten bestehen, die Förderstandards zur Risikoabsicherung von Investitionen im Ausland zu ändern, um diese Investitionen nachhaltiger zu gestalten?
- Wie kann ein Divestment oder Reinvestment speziell auf die EPI ausgerichtet werden, um so sukzessive ausschließlich klimafreundliche Investitionen zu ermöglichen?
- Welche möglichen stranded assets gibt es im Bereich der energieintensiven Industrien, wie werden diese durch Finanzmärkte bewertet?

3.2.3 Gewährleistung der spezifischen Produktnachfrage

Eine weitere Herausforderung besteht darin, die Absatzmärkte der Endprodukte der EPI zu sichern.

Erste Ansätze **grüner Beschaffung** für Stahl wurden kürzlich im US-Bundesstaat Kalifornien umgesetzt (siehe Box 3). Hiervon profitiert u. a. eine klimafreundliche Stahlfabrik im Bundesstaat, die beispielsweise für die Herstellung von Stahlbeton deutlich weniger THG-Emissionen verursacht als eine vergleichbare Fabrik in einem benachbarten Bundesstaat; auch weil sie recycelten Stahl verwendet (Deaton 2017). Kritik an dem Ansatz erfolgte bereits von Seiten der Zementindustrie, die auch in die Beschaffungsrichtlinie eingebettet werden möchte. Kalifornien gilt als Vorreiter für klimafreundliche Politikinstrumente. Weitere Bundesstaaten könnten den neuen Beschaffungsansatz bald übernehmen.

Box 3 Grüne Beschaffung in Kalifornien – der *Buy Clean California Act*

Nach der Verabschiedung des *Buy Clean California Act* in 2017 erfolgt die Beschaffung von Stahl, Glass und Mineralwolle im US-Bundesstaat auch unter dem Gesichtspunkt der THG-Emissionen, die im Zusammenhang mit der Fertigung entstanden sind. Ab Juli 2019 werden für die genannten Materialien spezifische Grenzwerte hinsichtlich ihrer CO₂-Intensität wirksam. Unternehmen, die sich um öffentliche Aufträge bemühen, müssen durch eine Lebenszyklusanalyse nachweisen, dass ihre Produkte die Grenzwerte einhalten.

Ähnlich wie in der EU werden Unternehmen der EPI auch durch einen ETS (teil-)reguliert. Der *Buy Clean California Act* gibt diesen Unternehmen einen zusätzlichen Anreiz für Investitionen in klimaneutrale Technologien und Verfahren (Deaton 2017).

In Deutschland wird im Rahmen der „**Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland**“ das „Maßnahmenprogramm Nachhaltigkeit“ umgesetzt. Ein Teil dieses Programms bildet die Ausrichtung von Bundesliegenschaften an das „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ (BNB) (Bundesregierung 2016). Durch die Kaufkraft der öffentlichen Hand kann hierdurch die Nachfrage nach nachhaltigen Produkten geschaffen werden.

Umweltkennzeichnungen und -deklarationen können Behörden und weitere Kunden der EPI durch die Bereitstellung von produktbezogenen Informationen zu den Umweltauswirkungen in der Beschaffung klimafreundlicher Produkte unterstützen. Wichtige Instrumente sind gegenwärtig das **europäische Energielabel**, welches vor allem Informationen zum Energieverbrauch eines Produkts enthält. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden erste Ansätze zur Ressourcenpflichtkennzeichnung entwickelt (z. B. Anteil Recyclingmaterial, Anteil zertifizierte Rohstoffe, Integration der Herstellungsenergie in bestehende Energiekennzeichen). Aufgrund vielfältiger Restriktionen empfiehlt die Studie, Ressourcenaspekte vorerst in bestehende Label zu integrieren (UBA 2016). Neben dem europäischen Energielabel wird die Nachfrage nach energieeffizienten Produkten auch durch die **Ökodesign-Richtlinie** reguliert. Sie legt gegenwärtig Mindestanforderungen für den Energieverbrauch von verschiedenen Produktgruppen fest. Derzeit wird diskutiert, die Anforderungen auszuweiten und um Ressourcenaspekte zu erweitern (Dalhammar et al. 2014). Unter Einbeziehung kreislaufwirtschaftlicher Aspekte wäre es dann langfristig nur noch möglich, ressourceneffiziente Produkte im europäischen Binnenmarkt zu vertreiben. Zudem könnte eine Steuer oder Abgabe auf die Nutzung von – aus Ressourcenperspektive – ineffizienten und klimaschädlichen Gütern den Kauf von klimafreundlichen Endprodukten attraktiver machen. Denkbar ist alternativ oder gleichzeitig eine Förderung von klimaneutralen Produkten.

Box 4 Der Kühlschrank-Austausch der Caritas als richtungsweisendes Beispiel zur Förderung klimaneutraler Produkte

Über ein vom BMWi unterstütztes Angebot des Sozialverbands Caritas können einkommensschwache Haushalte finanzielle Unterstützung in Höhe von EUR 150 für den Kauf eines hocheffizienten Kühlschranks beziehen; hierfür müssen sie gleichzeitig ihren mindestens zehn Jahre alten Kühlschrank austauschen.

Als zentrales Auswahlkriterium für den Kühlschrankkauf dient das europäische Energielabel und die Klassifizierung A+++ , welches ausschließlich an besonders energieeffiziente Kühlschränke vergeben wird. Wird das Energielabel um Ressourcen-Aspekte erweitert, könnte die Förderung entsprechend angepasst werden.

Auf europäischer Ebene nimmt die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft zu. In dem 2015 verabschiedeten „**Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft**“ geht es beispielsweise darum „den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen“ (KOM 2015). Die Schwerpunkte des Aktionsplan sind u. a. Kunststoffe und Bau- und Abbruchabfälle. Mit Blick auf Kunststoffe wurde in 2018 eine „europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft“ entwickelt, auch um die Nachfrage nach recycelten Kunststoffen zu stärken (KOM 2015). Grundsätzlich unterstützt der Verband der Europäischen Chemischen Industrie (CEFIC) den Übergang in eine Kreislaufwirtschaft (Cefic o. J.). Durch Verfahren des Recyclings kann der Abbau von nicht-nachwachsenden Rohstoffen reduziert werden, welcher mit CO₂-Emissionen verbunden sein kann. Gleichzeitig gilt es zu berücksichtigen, dass zum Recyceln von Produkten auch Energie aufgewendet werden muss.

Neben einer Strategie zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft wird es erforderlich sein, Material- und Informationsflüsse besser zu koordinieren. Mit Blick auf Zwischen- und Endprodukte werden vor allem Informationen über Qualität und Quantität enthaltener Rohstoffe von enormer Bedeutung sein; zudem müssen diese Informationen bereitgestellt werden. Nur so können Märkte für Recyklate geschaffen werden. Denkbar ist die Einführung von Quotensystemen, die ebenso solche Informationsaufbereitungssysteme erfordern. Durch die digitale Transformation können Informationen durch ein Tracking und Tracing besser bereitgestellt werden. Ein funktionierendes Wertschöpfungsnetz kann nur in Kooperation zwischen der Industrie, Abfallwirtschaft und IKT-Unternehmen erfolgen.

Box 5 Die Rolle cyber-physikalischer Systeme und der Digitalisierung für die Kreislaufwirtschaft

Cyber-physikalische Systeme ermöglichen es Produkten, Informationen durch den gesamten Produktionsprozess zu transportieren. So können Daten über Qualität und Inhaltsstoffe gespeichert und transportiert werden. In einem solchen intelligenten integrierten System wäre es sogar denkbar, dass sich über das Internet der Dinge automatisch ein eigener Markt durch Austauschplattformen auf der Basis von Informationen über Zusammensetzung und Einsatzmöglichkeiten ergibt. Einige Recyclate sind bereits günstiger als Primärmaterialien, und die Idee der automatisierten "Selbstvermarktung" könnte diesen Trend noch verstärken. Die Recyclingfähigkeit würde dann zu einem technischen Wettbewerbsvorteil.

Synthese, Ausblick und Forschungsbedarfe

Die Bundesregierung unternimmt den Versuch, über ihre Bundesliegenschaften die Nachfrage nach klimafreundlichen Waren zu gewährleisten, beispielsweise über das

BNB für Gebäude. Gegenwärtig werden Produktkennzeichnungen vor allem dafür genutzt, den Energieverbrauch offenzulegen. Das „Blaue Engel“ Kennzeichen erscheint in diesem Zusammenhang als eine positive Ausnahme für einige Produktgruppen. Gegenwärtige Diskussionen um europäische Instrumente (z. B. Energiekennzeichnung, Öko-Design) werden sich mittelfristig mit hoher Wahrscheinlichkeit auch ressourcen-relevanten Aspekten annehmen, auch wenn sie die Produkte der EPI weniger direkt betreffen.

Insgesamt ergeben sich mit Blick auf Politikinstrumente verschiedene Forschungsbedarfe:

- Welche Möglichkeiten und Hemmnisse bestehen für die öffentliche Hand, aber auch andere Auftraggeber (z. B. Elektro-, Fahrzeug- oder Maschinenbauunternehmen, die die EPI als Vorlieferanten in die Pflicht nehmen könnten), vollständig klimaneutrale Produkte unmittelbar von Unternehmen der EPI sowie von weiterverarbeitenden Unternehmen (z. B. IKT) zu beziehen? Wie können diese Hemmnisse überwunden werden?
- Welche Rolle kann eine klimaneutrale Beschaffung der öffentlichen Hand auf Bundesebene für die Nachfragesicherung spielen?
- Wie könnte eine Produktkennzeichnung für klimaneutrale EPI-Produkte aussehen? Welcher Sub-Sektor der EPI könnte hier vorangehen?
- Welche Schlüsse lassen sich aus bestehenden Vorhaben zur Rückverfolgung der Materialquantität und –qualität ziehen?
- Welche Ideen bestehen, Bau- und Abbruchabfälle in ein kreislaufwirtschaftliches System zu überführen?

3.2.4 Technologieentwicklung

Bis 2050 müssen wesentliche technologische Innovationen für die EPI den wirtschaftlichen Durchbruch erreicht haben, damit die klimaneutrale Entwicklung gelingt. Einige wichtige Technologien mit unterschiedlichen technologischen Reifegraden (engl.: *technology readiness levels*, TRL) sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 14 Vorläufig betrachtete Technologien im Landscaping Projekt

Industriezweig	Technologie
Primär-Rohstahlerzeugung:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ST 1 Primärstahl durch alkalische Eisenelektrolyse ▪ ST 2 Direktreduktion mit Wasserstoff ▪ ST 3 Elektrostahl per Lichtbogen- oder Induktionsofen ▪ ST 4 Schmelzreduktion mit Kohle (und optional CCS/CCU) ▪ ST 5 Hochofen mit CCS ▪ ST 6 HISarna® mit CCS
Zement:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Z 1 CO₂-Capture Post-Combustion (Aminwäsche-Nachrüstung an konventionellen Zementöfen) ▪ Z 2 CO₂-Capture Oxyfuel (Ofenneubau) ▪ Z 3 Elektrifizierung des Wärmeeintrags (PtH) im Sinterprozess und/oder bei der Kalzinierung ▪ Z 4 Synergetische Konzepte: Oxyfuel-Verfahren & PtG ▪ Z 5 Alternative Zemente (Klinkersubstitute)
Chemie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ C 1 Carbon Capture am Steam Cracker ▪ C 2 Änderung des Ausgangsmaterials (Edukt) am Steam Cracker ▪ C 3 Ablösung der Olefinproduktion im Steam Cracker durch andere Verfahren, z.B. auf Basis Methanol (MTO) ▪ C 4 Nutzung von Membranverfahren zur Stofftrennung statt thermischer Trennverfahren ▪ C 5 Power-to-Heat mit dem Schwerpunkt auf die Dampferzeugung ▪ C 6 Wasserstoff aus Elektrolyse als Edukt statt Steam Reforming bzw. partielle Oxidation
Alu:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ A 1 Flexibilisierung der Elektrolyse zur Herstellung von Primäraluminium ▪ A 2 Power-to-Heat als Option beim Schmelzen und Erwärmen

Quelle: Eigene Darstellung

Industrievertreterinnen und Industrievertreter nehmen Innovationen häufig als riskant und kostspielig wahr (Wesseling et al. o. J.). Zur Finanzierung von F&E – von der Grundlagenforschung bis hin zur Demonstration – kann der Staat einen wesentlichen Beitrag leisten, um die Kosten für die Forschung oder für die Umsetzung von Forschungsergebnissen zu senken. Gerade Demonstrationsvorhaben in der EPI können zur Erprobung von Innovationen unter Realbedingungen laut (Elkerbout 2017) bis zu EUR 1 bis 2 Milliarden verschlingen.

In Deutschland und in der EU bestehen verschiedene Instrumente zur Finanzierung von F&E bzw. der einzelnen Forschungsphasen. So setzt die Bundesregierung gegenwärtig beispielsweise das **6. Energieforschungsprogramm (EFP)** um, welches die zentralen Entwicklungsphasen innovativer Komponenten, Prozesse und Verfahren im industriellen Bereich fördert. Förderung – in Form von nicht-rückzahlbaren Zuschüssen – im Bereich Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistung konzentriert sich auf den Bereich der Energieeffizienz. Unternehmen können mit einem Förderanteil 30 % bis 50 % gefördert werden. Förderfähig sind die zentralen Entwicklungsphasen innovativer Komponenten, Prozesse und Verfahren: Forschung, Entwicklung und Demonstration (BMW i 2017). Von der neuen Bundesregierung wird das 7. EFP voraussichtlich in der zweiten Jahreshälfte verabschiedet. Hierzu erfolgt gegenwärtig eine systematische Neubewertung und Aktualisierung hinsichtlich des Entwicklungsstatus und der Perspektiven verschiedener Technologien sowie ihres potenziellen Beitrags zur Energiewende.

In den USA werden bereits seit den 1990er Jahren **Technologiefade (engl.: Technology Roadmaps)** erstellt, um so zu einer zwischen der Industrie und der Regierung geteilten Zielvorstellung mit Orientierungswirkung für zukünftige F&E zu gelangen (Wesseling et al. o. J.). Dieses Instrument ist mittlerweile eine gängige Praxis aus Sicht von Nationalstaaten und internationalen Organisationen wie der Internationalen Energieagentur, um Transformationen zu steuern (McDowall 2012).

Box 6 Entwicklung von Technologiefaden – Das Forschungsprojekt „Technologien für die Energiewende“

In dem aktuellen Forschungsprojekt „Technologien für die Energiewende“ bewertet ein Konsortium von drei Verbundpartnern und zehn Technologiepartnern unter der Federführung des Wuppertal Instituts seit Herbst 2016 den mittelfristigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die zentralen Technologien, die im Rahmen der Energiewende derzeit und zukünftig benötigt werden. Insgesamt werden 31 Technologiefelder aus sechs Technologiebereichen analysiert. Zu den Technologiebereichen zählen beispielsweise Infrastruktur, Technologien für die Sektorkopplung und Energie- und Ressourceneffizienz in der Industrie.

Im Zusammenhang mit der Verabschiedung des 7. EFP fordert der (BDI o. J.) u. a. eine verstärkte Hinwendung zu technologieoffenen Förderinstrumenten, diese geben „ein Förderungsziel vor, nicht aber das Mittel bzw. die Technologie zur Zielerreichung.“ Laut einer von der (OECD 2016) durchgeführten Studie zu den OECD-Mitgliedsstaaten wird F&E in 28 Ländern durch **steuerliche Vergünstigungen** gefördert: neben Mexiko gehört nur Deutschland nicht dazu. Innerhalb der EU gibt es auch in Estland kein entsprechendes Instrument (Bundestag 2015). In keinem OECD- und EU-Mitglied werden steuerliche Vergünstigungen zwar ausschließlich für KMU genutzt, doch werden diese Unternehmenstypen häufig in besonderer Weise begünstigt (wissenschaftliche Dienste des Bundestags 2015). Einige wesentliche Herausforderungen von F&E-Förderung durch steuerliche Anreize sind laut (Belitz 2015) die Gefahr von Mitnahmeeffekten, Unsicherheiten der Gesamtkosten und Verkomplizierung des Steuersystems. Eine Bedeutungszunahme von steuerlichen Anreizen für F&E ist generell festzustellen (OECD 2016). Laut wissenschaftlicher Dienste des (Bundestag 2015) erscheint die **Steuerzugschrift (engl.: tax credit)** als wahrscheinlichstes Model für eine Einführung in Deutschland (siehe Box 7. Für (Eisenhauer und Garland 2003) erscheinen diese allerdings wenig vielversprechend für EPI aufgrund des spezifischen Investitionsbedarfs für F&E. Inwiefern Technologiezuliferer, die häufig eng mit der EPI kooperieren (Wesseling et al. o. J.), hiervon profitieren können, ist bisher unklar.

Box 7 Steuerliche Anreize für F&E – Gestaltungsmöglichkeiten

Laut wissenschaftlicher Dienste des deutschen Bundestag (2015) bestehen verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten für die Umsetzung von steuerlichen Anreizen für F&E:

- Steuergutschrift,
- Bemessungsgrundlagenbegünstigung (erhöhte Betriebsausgaben, Sonderabschreibungen, erhöhte oder beschleunigte Abschreibungen, Investitionsfreibeträge),
- steuerliche Vergünstigungen bei der Beschäftigung von F&E-Personal,
- ermäßigte Besteuerung der wirtschaftlichen Verwertung von F&E-Ergebnissen (Patent Box, Innovation Box),
- Steuererleichterungen für qualifizierte F&E-Zentren/-Cluster,
- Steuervergünstigungen für Anteilseigner bestimmter F&E-intensiver Unternehmen,
- persönliche Steuervergünstigungen für „Wissensträger“.

Für die Anwendung von Steuergutschriften in Deutschland sprechen die relativ einfache Umsetzung und Verwaltung, keine großen Konflikte mit bestehenden Regelungen, eine hohe Anreizwirkung im Vergleich zu anderen Instrumenten, die Erfahrungen von anderen Ländern sowie der Neutralitätsgrad der Förderung. Allerdings sind die Kosten schwierig abzusehen, da privatwirtschaftliche Ausgaben nicht vorhergesehen werden können.

Ein weiteres Instrument steuerlicher Vergünstigung zur Förderung von F&E ist die sogenannte **Patentbox** – ein Kästchen auf dem Steuerformular, um Einkünfte aus geistigem Eigentum (z. B. Patente) freizustellen. Nationale Regelungen ermöglichten es, „Gewinne durch Lizenzzahlungen in Staaten mit besonderen Präferenzregelungen“ zu verlagern (Der Betrieb 2017). Dieses Problem soll im Zuge des Projekts *Base Erosion and Profit Shifting*, an dem 62 Länder mitgewirkt haben, spätestens ab 2021 verhindert werden.

Auch auf europäischer Ebene bestehen verschiedene Instrumente zur Förderung von Innovationen. So stellt das Programm **Horizon 2020 (H2020)**, das mit rund EUR 75 Milliarden ausgestattet ist, das zentrale Instrument zur Finanzierung von Forschungsvorhaben für den Zeitraum von 2014 bis 2020 dar. Es ist in drei Schwerpunktbereiche unterteilt: Wissenschaftsexzellenz, Industrieführerschaft und gesellschaftliche Herausforderungen. Letzterer Schwerpunktbereich gliedert sich in sieben Themengebiete, von denen insbesondere zwei der sieben Fördergebiete für EPI relevant erscheinen (KOM 2018), so dass insgesamt von einer hohen Konkurrenz zwischen Forschungsthemen ausgegangen werden kann. Das für die EPI relevante Fördergebiet *secure, clean and efficient energy* enthält Ausschreibung zur Entwicklung von Geschäftsfeldern für die industrielle Kälte- oder Wärmerückgewinnung und zur Nutzung von Solarenergie, weiterentwickelter Biokraftstoffe oder CCS/CCU in industriellen Prozessen. Im Bereich *climate action, environment, resource efficiency and raw materials* werden beispielsweise innovative Ideen zur Recyclierbarkeit von Rohstoffen (inkl. Metallen, Papier) gefördert. Mit Blick auf die Beteiligung der Industrie im Rahmen von H2020 empfiehlt eine Zwischenevaluierung der (Bundesregierung 2017) u. a. Beteiligungshürden zu senken, die sich insbesondere aus der hohen Überzeichnung von Ausschreibungen ergeben sowie durch die Dauer bis zur Gewährung von Mitteln. In dem Zusammenhang gibt der (BDI 2015) an, dass im Vorläuferprogramm von fünf Anträgen einer gewährt wurde, während in den ersten drei Jahren der Umsetzung von H2020 lediglich einer von acht Anträgen erfolgreich war. Zentraler Grund hierfür ist auch, dass nationale Forschungsbudgets v. a. in den Ländern Südeuropas zurückgefahren wurden.

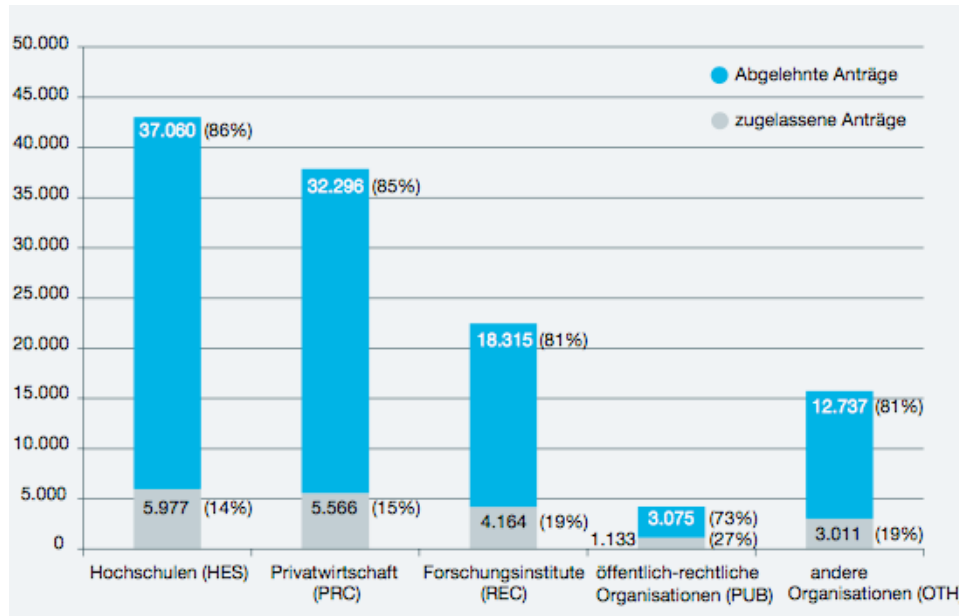


Abbildung 42 Anträge im Rahmen von Horizon 2020

Quelle: BDI (2015)

Eine Differenzierung zwischen verschiedenen Industriesektoren hinsichtlich der Erfolgsquote für H2020-Ausschreibungen wurde nach Kenntnis der Autorinnen und Autoren nicht vorgenommen. Über die Ausrichtung des zukünftigen Forschungsrahmen der EU liegen bisher keine Informationen vor.

Allerdings erfolgten erste Schritte für die Verhandlungen zum Gesamtbudget der EU, welches den übergeordneten Rahmen für den Nachfolger von H2020 darstellt. Im Zusammenhang mit dem sogenannten *Multiannual Financial Framework* (MFF) für den Zeitraum von 2020 bis 2027 wurden bereits erste Prioritäten erörtert. Aus Sicht der Kommission zählt hierzu weiterhin F&E (KOM 2018) – eine deutliche Aufstockung der Fördermittel scheint einen hohen Stellenwert einzunehmen (siehe Textbox 8). Dies könnte dazu beitragen, dass die vom (BDI 2015) kritisierten Beitrittschürden in Teilen gesenkt werden.

Box 8 Textauszug aus „A new, modern Multiannual Financial Framework for a European Union that delivers efficiently on its priorities post-2020“ zur Priorisierung von F&E

What research budget should it have in the future? Maintaining or even lowering current investment levels would not address the problem of underfunding. This would have knock-on effects on national and private investment, and undermine efforts to reach the target set by the Europe 2020 strategy of investing 3% of Gross Domestic Product in research and development. The Union would fall further behind compared to the world leaders. Research support to other EU policies would be reduced.

An increase in the Framework Programme by 50% to EUR 120 billion would create an estimated additional 420,000 jobs by 2040 and increase Gross Domestic Product by around 0.33% over the same period. [...] Doubling the Framework Programme to EUR 160 billion would create an estimated 650,000 jobs by 2040 and add around 0.46% to Gross Domestic Product over the same period. It would enable the EU to emerge as a global leader in large-scale initiatives, preparing full market deployment of solutions in areas like batteries, infectious diseases, smart and clean buildings and vehicles, decarbonisation technologies, circular economy, solutions for plastic waste and connected/automated cars.

Spätestens mit der Veröffentlichung verschiedener Berichte zur **mission-oriented innovation** scheint sich ein neuer Ansatz in der europäischen Innovationspolitik herauszubilden (European Commission und Directorate-General for Research and Innovation 2018; Mazzucato et al. 2018; Velte et al. 2018). Sogenannte Missionen sollen dazu beitragen, *grand challenges* zu überwinden. Hierzu zählen z. B. der Klimawandel oder die Ozeanverschmutzung. Missionen dienen dabei nicht nur als eine Art Orientierungsrahmen für öffentliche und private Forschung, Entwicklung und Investitionen, sondern sollen auch Einbindung unterschiedlicher Akteure befördern. Da das europäische Innovationssystem eher fragmentiert ist als z. B. das in den USA oder in China, sollen über den Missionsansatz kreativere, sektorübergreifende Projekte initiiert und Lösungen gefunden werden. Als Beispiele für Missionen führt (Mazzucato et al. 2018) die deutsche Energiewende an. Im Rahmen der Energiewende wurden Anreize für den Stahlsektor geschaffen, die Umwandlung von Schmelzgas aus der Stahlproduktion in Basischemikalien mit erneuerbaren Energien zu erproben (siehe auch die Fallstudie zur Energiewende als *mission* in (Velte et al. 2018)). Aufgrund der Vielzahl an kürzlich erschienen Studien erscheint der Missionsansatz auf europäischer Ebene an Fahrt zu gewinnen, wodurch deutliche größere Anreize für F&E entstehen können.

Box 9 Europäische Emissionsreduktionsziele für PKW als Mission?

Ende 2017 wurde von der Europäischen Kommission der Vorschlag unterbreitet, dass in 2030 Emissionen von neuen PKW um 30 % geringen sein müssen. Dies würde dazu beitragen, „grand challenges“ wie Klimawandel oder saubere Luft in Städten zu überwinden. Falls es zur Verabschiedung dieses Ziels kommt, würden sich vielfältige Kooperationsmöglichkeiten zwischen Akteuren unterschiedlicher Sektoren ergeben (müssen) – auch z. B. aus der Grundstoffindustrie mit Autoherstellern und ihren Zulieferern. Möglicherweise würde es auch zu einer entsprechenden Ausrichtung nationaler und europäischer Forschungsprogramme kommen.

Neben H2020 erfolgt auf europäischer Ebene die Innovationsförderung auch durch den **NER300**. Hierdurch werden Demonstrationsprojekte finanziert in den Bereichen erneuerbare Energien und CCS/CCU. Im Rahmen des Programms können bis zu 300 Millionen Emissionszertifikate verkauft werden; dieser Verkauf ermöglicht die Projektfinanzierung. Das Programm soll im Zuge der Überarbeitung des ETS durch einen **ETS Innovation Fund (IF)** für den Zeitraum 2021 bis 2030 abgelöst

werden. Die Detailgestaltung des neuen Innovationsfonds ist noch nicht klar. Öffentliche Konsultationen laufen (Velte et al. 2018). Der IF soll zukünftig aber ebenfalls die Finanzierung von Demonstrationsvorhaben bahnbrechender technischer Innovationen in der Industrie von Fördermitteln ermöglichen. Damit werden Innovationen adressiert, die sich in fortgeschrittenen TRL-Phasen befinden (siehe Abbildung 43) aber noch nicht über eine kommerzielle Marktreife verfügen. Insgesamt sollen 450 Millionen Emissionszertifikate zur Verfügung stehen und veräußert werden können (European Commission 2017)

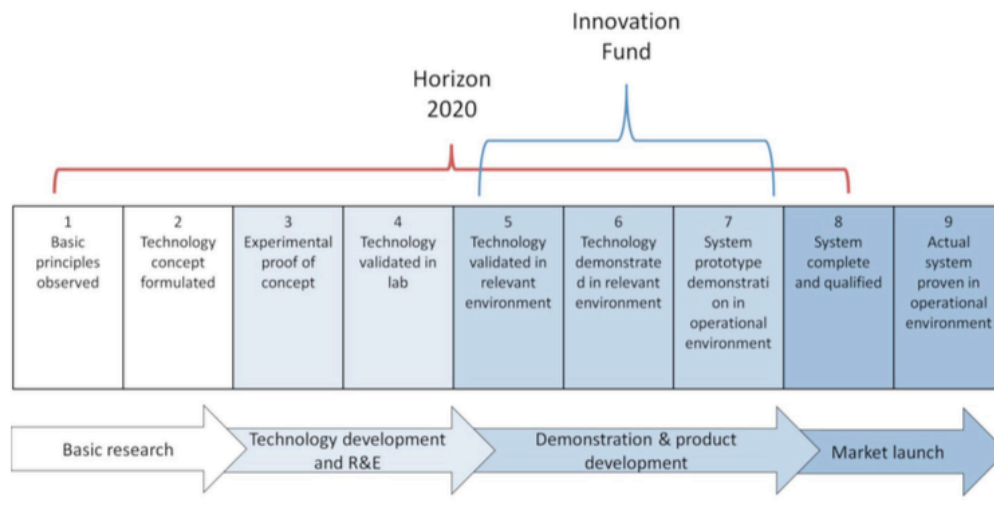


Abbildung 43 Technologiereifegrade und mögliche Anwendungsfelder der zentralen EU-F&E-Förderprogramme

Quelle: UBA (2018)

Durch den Fokus auf die Demonstrationsphase, ermöglicht der IF den EPI neue Finanzierungsoptionen für kostspielige Innovationen ab 2021. Abhängig von der genauen Ausgestaltung des IF, aber auch von den Preisen für Emissionszertifikate und Energie, ergeben sich ab 2021 neue Potenziale, um Demonstrationsvorhaben im Industriesektor auf europäischer Ebene zu stemmen. Obwohl laut (UBA 2018). Das Interesse der EPI gering zu sein scheint, klimaneutrale Technologien zu entwickeln, scheint der IF diese Einstellung – mit entsprechender finanzieller Ausstattung – ändern zu können. (Elkerbout 2017) hebt in diesem Zusammenhang positiv hervor, dass aufgrund der Zeitspanne von zehn Jahren eine Perspektive für die Einführung von relevanten Technologien geschaffen wird, so dass Unternehmen sich möglicherweise auch mehrfach auf den Innovationsfonds bewerben können.

Im Idealfall dient eine einzelne Institution für die Beantragung von unterschiedlichen Fördermitteln. Ein solcher „One-Stop-Shop“ existiert für das Mehrebenen-System der EU bisher nicht. Die Bundesregierung hat hierfür allerdings eine Förderberatung „Forschung und Innovation“ umgesetzt, die Unternehmen und andere Forschungseinrichtungen bei der Suche nach geeigneten Fördermöglichkeiten des Bundes, der Länder und der EU unterstützt (Bundesregierung o. J.). Hierdurch werden Transaktionskosten gesenkt, die aber vermutlich im Verhältnis zu Investitionen in innovative Technologien der EPI vernachlässigbar sind.

Netzwerke können unterschiedlich ausgestaltet sein und unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen. Ein Beispiel für ein solches Netzwerk im Industriesektor wurde 2016 in Deutschland initiiert. Das sogenannte **Forschungsnetzwerk Energie** in Industrie und Gewerbe dient als Schnittstelle zwischen Politik, Forschung und Wirtschaft und unterstützt u. a. die Entwicklung zukünftiger Förderstrategien zur erfolgreichen Gestaltung der Energiewende in Deutschland. Sieben themenspezifische Forschungsfelder bilden die Grundlage für den wissenschaftlichen Austausch. Hierzu zählt auch das Forschungsfeld „Eisen und Stahl“ (BMW i o. J.; PTJ 2016). Auf europäischer Ebene besteht das Netzwerk SPIRE – *Sustainable Process Industry through Resources and Energy Efficiency*. Auch nicht-staatlich organisierte Forschungsnetzwerke bestehen, wofür beispielhaft der Zusammenschluss zur Entwicklung des „Ultra Light Steel Auto Body“ angeführt werden kann. Ziel des großen Konsortiums bestehend aus weltweit agierenden Unternehmen (u. a. ThyssenKrupp Stahl AG, U.S. Steel Group) war es, das Gewicht des im PKW genutzten Stahls zu reduzieren, ohne dabei die Leistung zu verschlechtern (World Auto Steel o. J.). In der chemischen Industrie bestehen der *Green Chemistry & Commerce Council* (GC3) und das in Deutschland ansässige und durch das BMUB und UBA geförderte *International Sustainable Chemistry Collaborative Centre* (ISC3). Im Rahmen solcher Kollaborationen können unterschiedliche gesellschaftliche Akteure Erfahrungen austauschen oder gemeinsame Forschungsagenden und Zielvorstellungen entwickeln, auch um sich auf das Ziel einer nachhaltigen Transformation der EPI zu verständigen.

Synthese, Ausblick und Forschungsbedarfe

Das vorliegende Kapitel hat einen groben Überblick über relevante Politikinstrumente zur Technologieentwicklung in der EPI in Deutschland und der EU geben können. Die nachstehende Abbildung zeigt die diskutierten Instrumente, verortet diese im Mehrebenen-System und im Zeitverlauf, hebt den Status der Umsetzung hervor und gibt eine erste Einschätzung zur Relevanz.

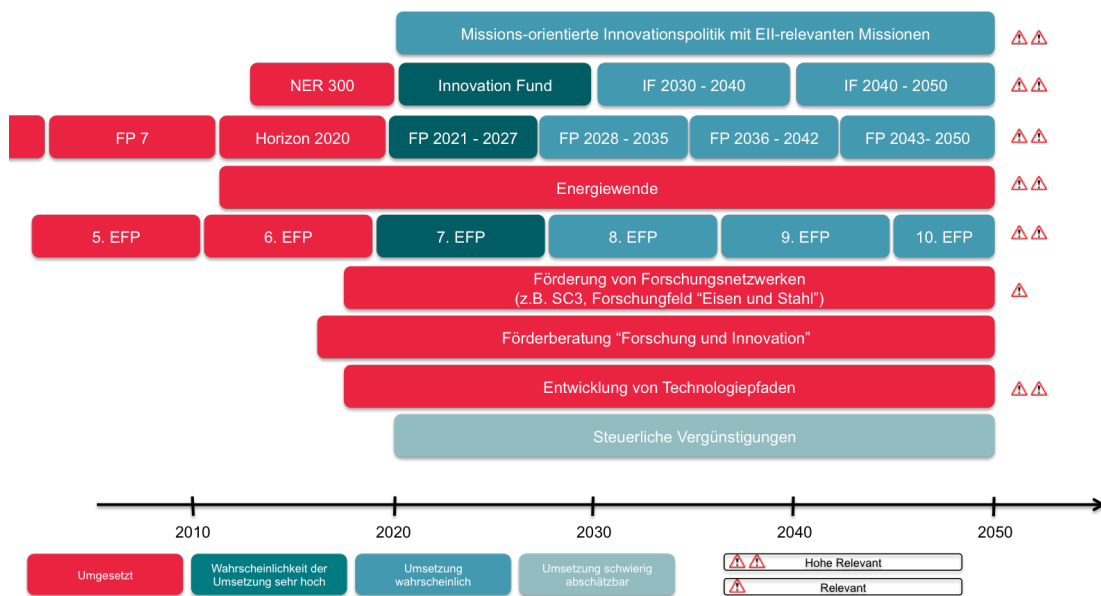


Abbildung 44 Überblick zu Instrumenten zur Technologieentwicklung für die EPI

Quelle: Eigene Darstellung

Mit Blick auf die zukünftigen Rahmenbedingungen bis 2050 kann angenommen werden, dass die bereits langjährig wirkenden und somit institutionalisierten Forschungsprogramme in Deutschland (EFP) und in der EU (H2020) auch langfristig fortgesetzt werden. Aufgrund der engen Verzahnung des IF mit dem ETS kann angenommen werden, dass auch dieses Instrument weiterlaufen wird. Allerdings ist selbst die genaue Gestaltung des IF noch nicht gänzlich geklärt; dass der IF aber in jedem Fall industrielle Demonstrationsvorhaben fördern soll, macht ihn nicht zuletzt wegen seiner potenziellen Ausstattung zu einer bedeutsamen Rahmenbedingung für EPI. Aufgrund der Veröffentlichungen zur Missions-orientierten Innovationspolitik der EU ist davon auszugehen, dass hier ein neuer innovationspolitischer Ansatzpunkt identifiziert wurde, um die *grand challenges* zu lösen. Die Energiewende ist in diesem Zusammenhang als eine solche Mission gerahmt und analysiert. Der Ansatz zielt darüber hinaus darauf ab, das fragmentierte Innovationssystem in Europa zu stärken. Mit Blick auf weitere Rahmenbedingungen wie die Förderung von Forschungsnetzwerken oder die Förderberatung sind den Autoren keine Daten bekannt, zu denen diese auslaufen sollen, so dass angenommen wird, dass diese auch zukünftig bestehen werden. Die Förderberatung, die vorwiegend auf KMU und junge Unternehmen abzielt, sowie das Instrument steuerlicher Vergünstigungen erscheinen aus Sicht der EPI eher für Technologiezulieferer relevant. Der Entwicklung von Technologiepfaden wurde im Projekt „Technologien für die Energiewende“ eine hohe Bedeutung zugemessen. Im Idealfall findet hier ein ständiger Rückkopplungsprozess statt, der die regelmäßige Weiterentwicklung dieser Technologiepfade ermöglicht.

Insgesamt ergeben sich mit Blick auf Politikinstrumente verschiedene Forschungsbedarfe:

- Welche Rolle spielen die einzelnen Instrumente (EFP, H2020, Netzwerke) zur Forschungs- und Technologieförderung ganz konkret für die EPI? Wie müssten die Instrumente zukünftig gestaltet werden, um für die EPI attraktiv(er) zu werden?
- Wie hoch ist der Anteil des Budgets der verschiedenen Förderinstrumente, der für die EPI vorgesehen und bereitgestellt wird? Ist die Höhe auch unter Berücksichtigung der verschiedenen Phasen der Technologieentwicklung sowie die Laufzeit der Instrumente angemessen?
- Welche Rolle spielen steuerliche Anreize für die EPI und dessen Technologiezulieferer? Würde eine Umsetzung in Deutschland die Technologieentwicklung im Sektor beschleunigen?
- Welche weiteren europäischen und internationalen Politikinstrumente zur Technologieentwicklung für EPI können als good practice in Deutschland oder Europa zur Transformation beitragen?
- Gibt es Möglichkeiten, wie die Bundesregierung die Förderung internationaler Forschungsnetzwerke unterstützen kann? In welchen Bereichen sollten diese Forschungsnetzwerke initiiert werden?
- Wie könnten Effizienznetzwerke entwickelt und gestaltet werden (als Pilotprojekt entsprechend einer zukünftigen europäischen Regulierung => Wettbewerbsvorteil)?

3.2.5 Infrastrukturentwicklung

Zur Entwicklung einer klimaneutralen EPI müssen umfassende und mehrdimensionale, infrastrukturelle Leistungen geschaffen werden. Solche Infrastrukturinvestitionen werden in erster Linie – wie im Bereich des Straßenbaus – von staatlicher Seite getätigt. Für die EPI relevante Infrastrukturen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 15 Wichtige Infrastrukturen für die Nutzung von Low Carbon Technologien in NRW

Zentrale Infrastrukturen für NRW	
Elektrische Energieübertragung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transportnetz ▪ Verteilnetz ▪ Grenzkuppelstellen
Gasförmige Energieträger	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erdgas Transport- und Ortsnetz ▪ Erdgas Speicher ▪ H₂-Leitungen ▪ H₂-Speicher ▪ CO₂-Transportnetz
Wasserstoffinfrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transportnetz ▪ Speicher
Wärme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmenetze
Flüssige Grund- und Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rohstoffpipelinennetz ▪ Zwischenproduktpipeline-netz ▪ Methanol-Pipelines

Quelle: Eigene Darstellung

Mit Blick auf die verschiedenen Infrastrukturen, die für die EPI relevant sind oder werden, können einige Instrumente beispielhaft hervorgehoben werden. Für die Bereiche Strom und Gas sind im Wesentlichen die Leitungsbetreiber in Zusammenarbeit mit der Bundesnetzagentur (BNetzA) verantwortlich. Im Bereich Strom agieren vier Übertragungsnetzbetreiber (ÜBN). Diese sind nach §12a Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) seit 2012 dazu verpflichtet, den sogenannten **Netzentwicklungsplan Strom (NEP-S)** zu erarbeiten. Dieser wird im zwei Jahres-Rhythmus veröffentlicht und zeigt, in welchem Umfang der Netzausbau in den nächsten 15 Jahren geschehen muss. Seit 2013 wird komplementär zum NEP der Offshore-Netzentwicklungsplan (NEP-O) mit Fokus auf Windkraftanlagen erstellt. Wie im Stromsektor wird auch im Bereich Gas ein **Netzentwicklungsplan (NEP-G)** durch die Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) erstellt. Die BNetzA betreut und prüft die Netzentwicklungspläne. Auf europäischer Ebene wird die sogenannte **Trans-European Networks for Energy (TEN-E)** Strategie zur Integration der Energieinfrastrukturen umgesetzt. Die neun Schwerpunktkorridore von TEN-E bestehen in den Bereichen Strom, Gas, Öl; die thematischen Schwerpunkte bilden die Bereitstellung von Smart Grids, Stromautobahnen und die Entwicklung eines grenzübergreifenden CO₂-Netzwerks aus CCS) (European Commission o. J.). Der Verband der europäischen Stromübertragungsnetzbetreiber (ENTSOE) und der Verband der europäischen Gasfernleitungsnetzbetreiber (ENTSOG) sind für die entsprechenden Infrastrukturplanungen relevant und arbeiten mit nationalen Betreibern zusammen. Der Ausbau

grenzüberschreitender Leitungen bildet den Schwerpunkt der sogenannten „Ten Year Network Development Plan“. Durch die Kooperation auf europäischer Ebene besteht die Möglichkeit, den Ausbau zu optimieren; beispielsweise mit Blick auf eine Anbindung Süddeutschlands an Leitungsnetze aus den Nachbarländern.

Zur Beschleunigung des Ausbaus von bundesländer- und grenzübergreifenden Höchstspannungsleitungen wurde in 2013 das **Netzausbaubeschleunigungsgesetz (NABeG)** verabschiedet. Hierdurch wird für Netzausbau-Vorhaben das Planfeststellungsverfahren beschleunigt. Die neue Bundesregierung möchte das NABeG novellieren – eine Einschätzung darüber, wie diese „Novellierung“ gestaltet sein könnte, ist gegenwärtig nicht möglich. Gerade eine Vereinfachung des NABeG würde von Industrieverbänden begrüßt werden (BDEW 2018).

Die Finanzierung zur Identifikation von Infrastrukturpotenzialen mit Blick auf Speicherstandorte und Speicherpotenziale für CO₂ wird in Deutschland durch die Bundesregierung gewährleistet. Für die Abschätzungen wurde die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) als institutionell verankerter Akteur beauftragt (Markewitz et al. 2017). Die Rolle von CCS für eine kohlenstoffarme Wirtschaft wird durch die „Roadmap for moving to a low-carbon economy in 2050“, die „Energy Roadmap 2050“, den „Strategic Energy Technology“ (SET) Plan und eine Mitteilung der Kommission von 2014 bestätigt. Derzeit erscheint der Einsatz der CCS-Technologie zur Abscheidung und Lagerung von Treibhausgasen aus der Strom- und Wärmeerzeugung in Deutschland als nicht umsetzbar. Dies liegt vor Allem an starken Akzeptanzproblemen in den Bundesländern, in denen eine Speicherung von CO₂ möglich wäre. Zusätzlich existieren für den Ersatz der Strom- und Wärmeerzeugung gangbare technische Alternativen in den erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz, so dass die Notwendigkeit die CCS-Technologie für diesen Zweck einzusetzen derzeit gering ist. Anders verhält es sich mit den prozessbedingten Emissionen, die zum Beispiel in der Zement- oder Stahlherstellung entstehen und nicht durch einen Wechsel auf erneuerbaren Energien vermindert werden können. CCS in der Industrie ist derzeit eine von mehreren diskutierten Technologiealternativen für diese Branchen. Die bei diesen Prozessen entstehenden CO₂-Emissionen sind um Größenordnungen geringer als bei der Strom- und Wärmeerzeugung, daher ist hier auch eine andere Akzeptanz möglich. Dieses Feld muss aber noch weiter untersucht werden.

Zur Finanzierung von relevanten Infrastrukturvorhaben stehen verschiedene Programme bereit. Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang das **Rahmenforschungsprogramm der EU**; so wurde hierüber das „e-Highway2050“ Projekt zwischen 2013 und 2015 gefördert, dessen Ziel es war, eine Planungsmethodik zur Entwicklung eines Ausbauplans für das gesamteuropäische Übertragungsnetz von 2020 bis 2050 zu entwickeln (UBA 2014b). Daneben stehen durch die **Europäischen Struktur- und Investitionsfonds (ESIF)**, der insgesamt sechs individuelle Fonds umfasst, auch Fördermittel für eine kohlenstoffarme Wirtschaft bereit. Hierzu zählt auch der European Regional Development Fund, der für den Zeitraum zwischen 2014 und 2020 über ein Budget von etwa EUR 280 Milliarden verfügt und auch für Deutschland Projekte Mittel bereitstellt. Eine genaue Betrachtung, inwiefern Mittel des ESIF zur klimafreundlichen Gestaltung der EPI beitragen, liegt nicht vor; die folgende Grafik zeigt die Themen, die gegenwärtig priorisiert gefördert werden. Das Thema „Low-Carbon Economy“ steht dabei schon an dritter Stelle. In wel-

cher Form die ESIFs weitergeführt werden, wird im Rahmen der Verhandlungen zum Multiannual Financial Framework (MFF) diskutiert. Im Mai 2018 soll der Vorschlag für den MFF für die kommenden sieben Jahre veröffentlicht werden. Fest steht allerdings bereits, dass mit dem Vereinigten Königreich ein wichtiger Beitragszahler aus der EU und aus dem MFF ausscheidet (European Commission 2018).

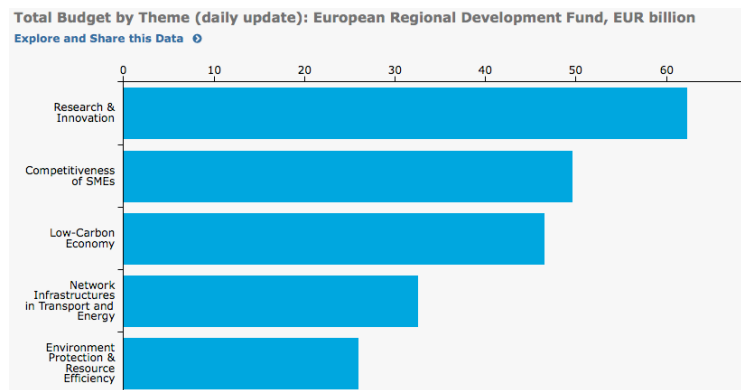


Abbildung 45 Übersicht zu Fördermitteln des European Regional Development Fund in fünf thematischen Bereichen (Stand: 20. März 2018; in Milliarden Euro)

Quelle: ESI FUNDS (2018)

Neben dem ESIF stellt die „**Connecting Europe Facility**“ (**CEF**) EUR 30 Milliarden für den grenzüberschreitenden Netzausbau zwischen 2014 bis 2020 bereit. Hierauf dürfen sich nur sogenannte „Projects of Common Interest“ aus den o. g. Schwerpunktkorridoren der TEN-E Strategie bewerben (u. a. Strom, Gas, Öl, Smart Grids, Stromautobahnen, CO₂-Netzwerke). Weitere öffentliche Mittel stehen zur Finanzierung von CCS und CCS-Infrastruktur auf europäischer Ebene über den NER300 zur Verfügung, wobei der Mittelabfluss vor allem aufgrund von Akzeptanzproblemen in der Vergangenheit gering war. Der NER300 wird durch den Innovation Fund (IF) abgelöst (siehe Kapitel zu „Technologieentwicklung“).

Im Bereich internationale Kooperation kann die Zusammenarbeit zwischen Russland und der EU hervorgehoben werden. Hier besteht seit 2013 die „Roadmap 2050“ zur EU-Russland Energiekooperation in den Bereichen Strom, Gas, Öl, erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Die hohe Abhängigkeit von russischen Energieimporten in den europäischen Binnenmarkt sorgt vielfach für Diskussionen zwischen den EU-Mitgliedstaaten. Mit Blick auf den für Mai 2018 geplanten Baubeginn der Pipeline Nord Stream 2 sehen beispielsweise Polen und die baltischen Staaten ihre Interessen untergraben. So hat Polen beispielsweise in einen Flüssiggas-Terminal an der Ostseeküste investiert, der von den USA beliefert werden soll (Deutsche Wirtschaftsnachrichten 2018).

Synthese, Ausblick und Forschungsbedarfe

Eine nicht-erschöpfliche Übersicht an Instrumenten konnte im vorangegangenen Kapitel gegeben werden. Dabei stellt sich v. a. der Umfang an unterschiedlichen Infrastrukturanforderungen als besondere Herausforderung dar. Insbesondere mit Blick auf den Ausbau von Strom- und Gasinfrastruktur bestehen relativ langfristige Perspektiven, die in periodischen Abständen aktualisiert werden und wiederum in europäische Strategien eingebettet sind oder sein können. Die im Koalitionsvertrag verabredete Novellierung des NABeGs hebt die Bedeutung des Netzausbaus für die

Bundesregierung hervor. Fördermittel werden über die Bundesregierung aber auch die EU bereitgestellt, um die Finanzierung wichtiger Infrastrukturen zu gewährleisten.

Insgesamt ergeben sich mit Blick auf Politikinstrumente verschiedene Forschungsbedarfe:

- Welche Rolle(n) spielen Bund, Länder und Kommunen für den Ausbau der Infrastruktur für iCCS?
- Welche Implikationen birgt das neue MFF für den Infrastrukturausbau?
- Welche Notwendigkeiten und Herausforderungen für den Infrastrukturausbau ergeben sich aus Sektorkopplung und dem Bedarf an Flexibilitätsoptionen?
- Was kann die Bundesregierung bei der Instrumentenentwicklung zum Ausbau von Infrastrukturen, die für die EPI relevant sind, von anderen Ländern lernen?
- Welche Rolle spielen europäische und deutsche Fördermittel für welchen Bereich relevanter Infrastrukturen und wie können die Fördermittel optimiert werden, damit die klimafreundliche Gestaltung der EPI gewährleistet ist?

3.2.6 Gesellschaftliche Akzeptanz

Für die Entwicklung und Gestaltung einer dekarbonisierten Industrie ist die gesellschaftliche Akzeptanz der dafür notwendigen technologischen, ökonomischen, geologischen und politisch-rechtlichen Anforderungen ein entscheidender Erfolgsfaktor. Teilweise kann die Befürwortung der Öffentlichkeit sogar eine Voraussetzung dafür sein, dass die Gestaltung der notwendigen rechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen überhaupt stattfinden kann. Fokussiert werden müssen aus heutiger Sicht bspw. Optionen wie die Schaffung erforderlicher Infrastrukturen (z. B. beim Ausbau erneuerbarer Energien), die notwendige Substitution von Grundstoffen (z. B. durch Recycling) und die Einführung neuer Techniken, Technologien und Verfahren (z. B. CCS, CCU) mit gesellschaftlicher Zustimmung erfolgen kann. Andernfalls können Sicherheitsbedenken, Landnutzungskonkurrenzen, Arbeitsplatzeffekte oder auch NIMBY-Effekte (not in my backyard) eine fehlende gesellschaftliche Akzeptanz zur Folge haben.

Ausgehend von Untersuchungen der öffentlichen Wahrnehmung um die Debatte zu CCS- und iCCU-Technologien lassen sich grundlegende Voraussetzungen zum Erreichen gesellschaftlicher Akzeptanz bei der Einführung neuer Technologien, Verfahren und Strukturen ableiten. So konnte in Deutschland das CCS-Gesetzgebungsverfahren, das die EU-CCS Richtlinie aus 2008 in nationales Recht umsetzt, mit dem Erlass des Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) erst 2012 abgeschlossen werden; in seiner jetzigen Ausgestaltung führt das Gesetz allerdings dazu, dass diese Technologie in Deutschland kaum eine Chance haben wird. Die lange Dauer des Gesetzgebungsverfahrens ist insbesondere auf ganz erhebliche Akzeptanzprobleme der Technologie in der Öffentlichkeit zurückzuführen. Die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS ist insbesondere abhängig von der subjektiven Wahrnehmung des individuellen und gesellschaftlichen Nutzens der Technologie, den ihr zugeschriebenen Risiken und dem Vertrauen in die relevanten Akteure (Pietzner und Schumann 2012; Scheer und Renn 2014). CCS-Technologien werden allgemein als „Risikotechnologien“ wahrgenommen. Als besonders risikoreich werden nicht nur die CO₂-Abscheidung, sondern auch die Prozessstufen Transport und Speicherung

von CO₂ angesehen. Von der Öffentlichkeit wurden erhebliche Zweifel geäußert, ob CO₂ dauerhaft, sicher und ohne Schäden für Mensch und Umwelt gelagert werden kann. Ursache hierfür könnten die unterschiedlichen Positionen der Wissenschaft zur Sicherheit der Technologie sowie zu den Potenzialen der Lagerstätten sein. Außerdem werden CCS, wie auch die damit in enger Wechselbeziehung stehenden CCU-Technologien, in der Öffentlichkeit auch als „Feigenblatt“ für die Weiternutzung fossiler Ressourcen verstanden. Zu berücksichtigen ist, dass der Fokus der Diskussion und des Gesetzgebungsverfahrens nur auf die Anwendung von CCS in der Stromerzeugung in fossilen Kraftwerken (vor allem Kohlekraftwerken) lag. Insbesondere die vier großen Energieversorger haben in der öffentlichen Wahrnehmung mit erheblichen Vertrauensdefiziten zu kämpfen, auch weil sie als wesentliches Hemmnis bei der Entwicklung zum vollständigen Ausbau der regenerativen Stromversorgung angesehen werden (Wuppertal Institut o. J.). Es gibt Hinweise, dass die Bewertung von CCS positiver ausfällt, wenn das CO₂ aus energieintensiven Industrieprozessen und Biomassekraftwerken stammt oder für EGR (Enhanced Gas Recovery) -Prozesse genutzt wird (Dütschke et al. 2016), insbesondere wegen der geringen Menge der CO₂-Emissionen aus Industrieprozessen im Vergleich zur enormen Emissionsmenge im Kraftwerksbereich. Es zeigt sich außerdem, dass die subjektive Risikowahrnehmung der Technologie nicht identisch mit deren objektivem Risikoprofil ist: Bei den Prozessstufen Transport und Speicherung gibt es keinen Unterschied, ob das CO₂ aus fossilen Kraftwerken stammt oder aus Industrieprozessen (Frauenhofer ISI et al. 2014). Ein weiterer Faktor, der bei der Debatte um CCS eine wichtige Rolle spielte, ist die Frage der Verteilungsgerechtigkeit: Nutzen und Risiken fallen geographisch deutlich auseinander, da die Kraftwerksstandorte, bei denen die Emissionen anfallen, hauptsächlich im bevölkerungsreichen Westen und Süden liegen und die Speicherung eher im bevölkerungsarmen Norden und Osten erfolgen soll. Diese räumliche Ungleichverteilung von Nutzen und Risiken kann auch auf iCCUS-Technologien übertragen werden, da vermutlich die Prozessemissionen an einem anderen Standort anfallen als sie gespeichert oder als Ausgangsstoff wieder genutzt werden könnten. Ein anderer Aspekt tangiert den Flächenbedarf, der mit dem Bau von CO₂-Abscheideanlagen und der insgesamt zu entwickelnden Infrastruktur verbunden ist, wobei für den CO₂-Transport teils bereits bestehende Pipelines z. B. für CO, H₂ genutzt werden können. Bei sämtlichen Maßnahmen muss die jeweilige direkte und indirekte Betroffenheit sowohl der Akteure als auch der Anwohner und der Zivilgesellschaft insgesamt berücksichtigt werden. Maßgeblich für die Wahrnehmung von CCU-Technologien ist auch der Nachweis, dass das CO₂ in den damit hergestellten Produkten durch ihre Produktnutzungs- bzw. Produktlebensdauern sehr lange gebunden wird.

Wenn CCU und iCCS-Verfahren eine nachweislich notwendige und zeitlich begrenzte Brückentechnologie bis zur Einführung weitestgehend dekarbonisierter Technologien darstellen und damit eine THG-Verminderung verbunden ist, könnte dies möglicherweise zu einer aufgeschlosseneren gesellschaftlichen Wahrnehmung dieser Verfahren führen. Entscheidende Voraussetzung ist der Nachweis, dass das Transformationspotenzial zur Verminderung bzw. Beseitigung der Prozessemissionen bereits ausgenutzt wurde und dass die Möglichkeit, durch die Substitution von Ausgangsmaterialien die Prozessemissionen zu reduzieren, ausgeschöpft wurden.

Ausschlaggebende Faktoren für die Akzeptanz neuer Verfahren/Technologien oder der Verwendung alternativer Ausgangsstoffe sind:

- Umfassende und sehr frühzeitige Information der wesentlichen Akteure der gesamten Wertschöpfungskette, der Politik, der Verbände und der Zivilgesellschaft
- Offene und transparente Diskussion aller Kosten, Risiken und Nutzen
- Berücksichtigung sämtlicher Nutzungspfade und jeweils möglicher alternativen Optionen im Gesamtkontext der Dekarbonisierung
- transparente Überprüfung von kritischen Argumenten
- aktive und offene Strategie der Risikominimierung

Für den Ausbau der Strom- und Gasinfrastruktur müssen umfassende **Konsultationsverfahren** initiiert werden. Gerade sichtbare Leitungen erschweren die gesellschaftliche Akzeptanz aufgrund von Auswirkungen auf Menschen, die Natur und das Landschaftsbild (UBA 2014c). Die folgende Grafik zeigt, dass interessierte Bürgerinnen und Bürger sich an den wichtigen Wegmarken des Ausbaus beteiligen können.



Abbildung 46 Netzausbau-Verfahren

Quelle: BNetzA (o. J.)

Laut aktuellem Koalitionsvertrag sollen darüber hinaus die **Bürgerinteressen** stärker beim Infrastrukturausbau berücksichtigt werden. Hierfür wird u. a. auf Erdverkabelung gesetzt (CDU, CSU und SPD 2018). Obwohl die Sichtbarkeit reduziert wird, sind Erdkabel vergleichsweise teuer, technisch aufwendig und greifen in die Bodenökologie ein (UBA 2014d), was die Umsetzung dieses Aspekts des Koalitionsvertrags erschwert.

Sowohl die Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung als auch die Substitution erdölbasierter durch biobasierte Rohstoffe (auch deren Herstellung) bei entsprechender Anpassung der Technologien (insbesondere in der chemischen Industrie) sind wesentliche Stellschrauben zur Dekarbonisierung. Hierbei sind begrenzte Flächen- /Bodenverfügbarkeiten, evtl. direkte oder indirekte Landnutzungsänderungen gerade in Ländern unzureichendem good governance, Landnutzungskonkurrenzen

und auch die Art der Bodennutzung (bzgl. Umweltaspekten) zu berücksichtigen. Biomasse bzw. biobasierte Rohstoffe stellen damit eine begrenzte Ressource dar, entsprechend ist die sektorenübergreifende Betrachtung notwendig.

Auf europäischer Ebene ist die Schaffung einheitlicher Standards für Energieeffizienz z. B. durch die Erweiterung der Ökodesign-RL auch für Maschinen und standardisierbare Teilprozesse möglich. Denkbar wäre auch eine separate neue Regulierung mit diesem Fokus (IREES 2017).

Synthese, Ausblick und Forschungsbedarfe

Die gesellschaftliche Akzeptanz ist auch ein wichtiges Querschnittsthema. Beispielsweise kann hierdurch der Ausbau relevanter Infrastrukturen insgesamt (z. B. CCS) oder spezifischer Infrastrukturprojekte (z. B. Nord-Süd-Leitungen) verhindert oder verzögert werden. Hierfür erscheint es wesentlich zu sein, umfassende partizipative Ansätze zu wählen. Mit Blick auf die Energieinfrastruktur können Unternehmen der EPI selbst tätig werden durch Investitionen in energieeffizientere Verfahren und Technologien, um so einen Beitrag zur Reduktion großskalierter Infrastrukturbedarfe zu leisten. Auch können Herstellungsverfahren und Materialzusammensetzungen gesellschaftlich nicht akzeptiert sein, wie das Beispiel der Substituierung erdölbasierter durch biobasierte Rohstoffe zeigt. Insofern sollten Substitutionsverfahren Landnutzungsveränderungen und weitere negative Externalitäten begrenzen.

Insgesamt ergeben sich mit Blick auf Politikinstrumente verschiedene Forschungsbedarfe:

- Welche Aspekte von Akzeptanz sind für den Ausbau von Infrastrukturen und klimaneutralen Prozessen in der EPI selbst relevant? Welche Probleme können daraus erwachsen, welche Lösungen sind möglich?
- Welche biobasierten Rohstoffe können in der chemischen Industrie (spezifisch) in welcher Menge zukünftig eingesetzt werden?
- Welche Abfallprodukte aus welchen Sektoren sind hierfür geeignet?
- Welche Flächenbedarfe für Biomasse als Energieträger und biogene Rohstoffe gibt es mit welchen Konkurrenzen?

3.3 Ausblick auf ein mögliches Politikpaket

Die Unternehmen der EPI können einen wesentlichen Beitrag zu den Klimaschutzzielen bis 2050 (zentrales Ziel) leisten. Im Rahmen des vorliegenden Dokuments wurden sechs dem 2050-Ziel untergeordnete Zielzustände erarbeitet (im Folgenden Z1 bis Z6 abgekürzt, in der Reihenfolge der Teilkapitel von Kapitel 2). Das heißt, bis 2050 muss gewährleistet sein, dass diese untergeordneten Zielzustände erreicht sind, damit Grundstoffe klimaneutral hergestellt werden können. Es wurden Rahmenbedingungen identifiziert, die für das Erreichen der sechs Zielzustände bereits heute oder zukünftig eine Rolle spielen können. Im Kontext der Studie sind Rahmenbedingungen in erster Linie Politikinstrumente, aber auch Trends.

Basierend auf der vorangegangenen Betrachtung von Zielzuständen erscheinen folgende Kategorien für Politikinstrumente besonders relevant:

Ziele, Strategien und Konzepte: Zielsetzungen für die EPI sind bisher ein wenig genutztes Politikinstrument, wobei die Ausbaupfade für erneuerbare Energien durchaus auch für die Entwicklung relevanter Infrastrukturen für die EPI relevant sind (Z5). Zielsetzungen und umfassendere Konzepte könnten insbesondere auf europäischer (idealerweise auf internationaler) Ebene für EPI die Gefahr von Preisdumping minimieren, da relevante Akteure auf ein Ziel (Klimaneutralität) hinarbeiten (Z1, Z2). Seit einigen Jahren rückt auf europäischer Ebene die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft in den Fokus. Für Plastik besteht bereits eine konkretere Strategie. Auf nationaler Ebene kann eine Roadmap zur klimaneutralen Gestaltung der EPI ein wichtiger Schritt sein.

Förderung und Finanzierung: Auf europäischer und deutscher Ebene bestehen einerseits verschiedene Instrumente zur Finanzierung von F&E und von Demonstrationsvorhaben. Hierdurch wird sowohl die Technologie- und Verfahrensentwicklung (Z4) vorangetrieben, die für Unternehmen der EPI als solche relevant sind, aber auch die Infrastrukturentwicklung (Z5). Andererseits existieren verschiedene Förderprogramme für Unternehmen der EPI, die Kredite oder Zuschüsse für energieeffiziente Technologien und Verfahren bereitstellen und so die Risikowahrnehmung von Unternehmen auf Investitionen reduzieren (Z2). Die Nachfrage nach energieeffizienten (End-)Produkten (z. B. Kühlschränke) wird gegenwärtig beispielsweise durch ein Programm der Caritas gestärkt (Z3). Sobald die Voraussetzungen geschaffen sind, um energie- und ressourcenschonende Produkte zu identifizieren, erscheint eine Ausweitung des Programms auf klimaneutralere Produkte sinnvoll. Da klimaneutrale Endprodukte mglw. mit höheren Investitionskosten einhergehen, kann staatliche Unterstützung auch die Akzeptanz solche Produkte stärken (Z6). Das gleiche gilt, wenn auch vermutlich abgeschwächt, hinsichtlich der Akzeptanz von Investitionen in klimaneutrale Prozesse und die erforderlichen Infrastrukturen. Carbon Pricing erhöht ebenfalls die Investitionssicherheit für klimaneutrale Technologien (Z2, Z4).

Regulierung: Das EEG und der EU ETS erfassen zwar strom- bzw. energieintensive Branchen, ermöglichen ebendiesen aber Ausnahmen (z. B. besondere Ausgleichsregelung, Zertifikatszuteilung). Eine Novellierung dieser Instrumente hin zu deutlich strengeren Auflagen für die EPI ist zwar gegenwärtig nicht absehbar, könnte durchaus Anreize schaffen, um klimafreundliche Investitionen zu beschleunigen, sofern

ein Carbon Leakage vermieden werden kann. BCAs können die Wettbewerbsfähigkeit von klimafreundlichen, europäischen Waren im Binnenmarkt stärken (Z1) und könnten wiederum als relevante Einnahmequelle für Finanzierungsinstrumente zur klimaneutralen Gestaltung der EPI dienen. Eine Ausweitung relevanter europäischer Richtlinien (v. a. Öko-Design, Energiekennzeichnung, EED z. B. mit Blick auf Audits) auf das Thema Ressourceneffizienz kann gleichzeitig den europäischen Markt vor nicht-ressourceneffizienten Waren schützen (Z1), erleichtert die Identifikation relevanter Produkte für die öffentliche Hand und andere Endverbraucher (Z3) und schafft Akzeptanz (Z6), wodurch wiederum die Entwicklung von klimaneutralen Technologien und Verfahren (Z4) attraktiver werden kann. Auch Regeln für die öffentliche Beschaffung hinsichtlich Anforderungen oder Bevorzugung klimaneutraler Produkte wirken in diese Richtung (vgl. das Beispiel aus Kalifornien). Novellierungen von Gesetzen wie dem NABeG bergen das Potenzial, den Ausbau relevanter Infrastrukturen voranzutreiben.

Energiemanagement, Information und Kapazitätenentwicklung: Informatorische Instrumente bestehen gegenwärtig für Unternehmen zur Unterstützung in der Identifikation geeigneter Fördermittel, zum Austausch von good practices im Rahmen von Energieeffizienznetzwerken oder zur verpflichtenden Durchführung von Energieaudits oder Energiemanagementsystemen für nicht-KMU. Hierdurch kann die Technologiediffusion erleichtert werden (Z4), aber auch Risiken können für Investoren besser abgewogen werden (Z2). Auch speziell auf den Energieverbrauch ausgegerichtete Instrumente bestehen etwa in Form von Energieauditverpflichtungen. Durch weitere informatorische Instrumente oder Technologien (z. B. cyber-physikalische Systeme) für Endverbraucher wird die Nachfrage nach entsprechenden Produkten erleichtert (Z3) und die Akzeptanz erhöht (Z6). Insbesondere durch transparente Planung und Konsultationsverfahren können relevante Infrastrukturen ohne Verzögerungen durchgeführt werden (Z5). Sollten sectoral approaches ein Austauschformat zwischen internationalen Unternehmen ermöglichen, könnten internationale Ansätze zur klimaneutralen EPI entwickelt werden (Z1).

(Internationale) Kooperation und Netzwerke: In Deutschland können sich Unternehmen aus verschiedenen Bereichen (auch EPI) im Rahmen von Netzwerken zusammenschließen. Darüber hinaus besteht bereits das sogenannte SPIRE-Forschungsnetzwerk auf europäischer Ebene; es nimmt dabei die sowohl Aspekte der Energie- als auch der Ressourceneffizienz in den Fokus. Sektorale Kooperations- bzw. Netzwerkansätze stellen die Entwicklung des „Ultra Light Steel Auto Body“ und die BMU-/UBA-geförderte Initiative des GC3 dar. Abhängig von der spezifischen Ausgestaltung solcher Kooperationsformate kann so Bedenken zur Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der Konkurrenz (Z1) reduziert, Technologien entwickelt (Z4) und weitere Informationen z.B. zur Risikoabsicherung ausgetauscht werden (Z2). Es liegt nahe, dass solche Kooperationen auf für die Entwicklung von Infrastrukturen bestehen (Z5).

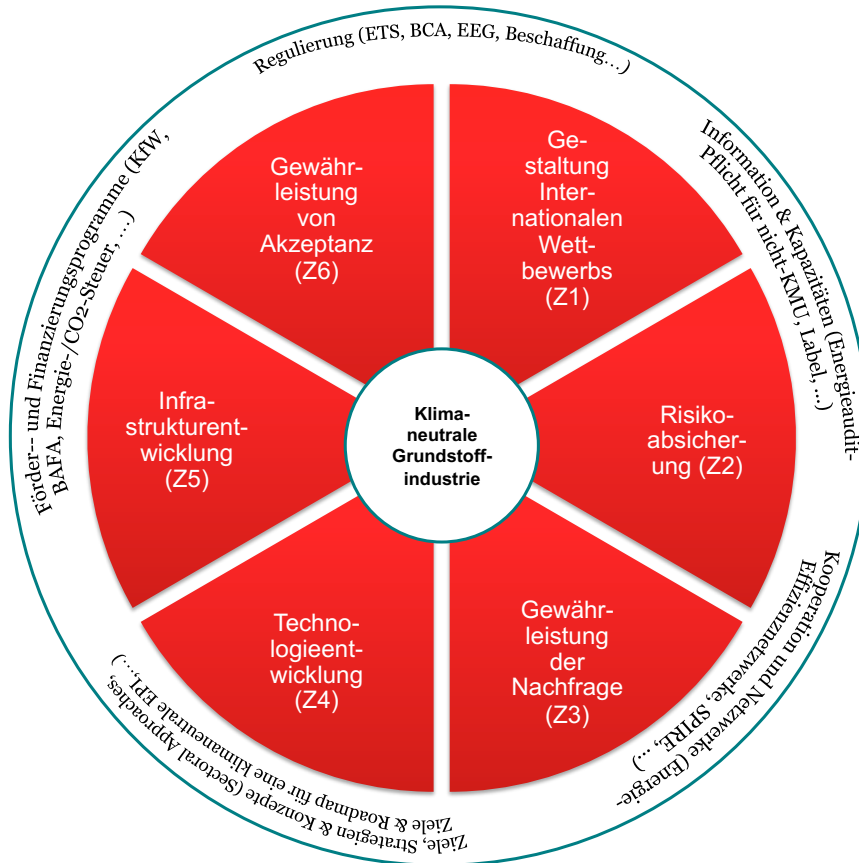


Abbildung 47 Rahmenbedingungen und Politikinstrumente im Überblick

Quelle: Eigene Darstellung

Der zuvor und in der gezeigten Abbildung zusammengestellte erste Überblick an Rahmenbedingungen ist noch nicht erschöpflich und erfordert weitere Forschung, auch zur weiteren Systematisierung bzw. Differenzierung von Politikinstrumenten (äußerer Kreis der Abb. 6). Insgesamt erscheint eine Vielzahl an Instrumenten einen Fokus auf energetische Aspekte zu haben, wobei gegenwärtig Diskussionen um wichtige Instrumente wie etwa die Öko-Design-Richtlinie hinsichtlich einer Ausweitung ihrer Anwendung geprüft werden. Gesetze aus Kalifornien zur Beschaffung von Stahl, Glass und Mineralwolle haben dies bereits zu einem gewissen Grad realisiert. Diese und weitere Beispiele (z. B. das SPIRE-Netzwerk) können auch dazu anregen, andere Instrumente entsprechend auf eine Ausweitung des Anwendungsbereichs hin zu prüfen.

4 AP 4: Kooperationsansätze und Industriesymbiose

Dr. Karin Arnold, Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer

4.1 Einleitung

Im Kontext einer „nachhaltig“ werdenden Industrie sind Schlagwörter wie *industrial ecology*, *industrial symbiosis*, etc. viel gehört und genutzt. Damit verbindet sich die Idee, dass eine **vernetzte Industrie**, die über unterschiedliche Branchen hinweg Ressourcen, Infrastrukturen, aber auch Information und Wissen austauscht, effizienter arbeiten kann als in stand-alone Anlagen.

Diese Effizienz schlägt sich im benötigten Input an Rohstoffen, im verringerten Energiebedarf sowie - mit beiden verbunden – in einem verringerten Ausstoß an Emissionen nieder. Zudem wird erwartet, dass es positive Effekte auch für die Produktivität und damit auf Beschäftigungseffekte und Wettbewerbsfähigkeit gibt.

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich daher mit der Frage, welchen Beitrag eine verstärkte Integration bzw. Vernetzung (energieintensiver) Industrien in NRW im Rahmen einer weitreichenden Treibhausgasminderungsstrategie der Grundstoffindustrie in NRW haben könnte. Dies konkretisiert sich in der Frage, wie und ob industrielle Netzwerke (*industrial ecology*, *industrial symbiosis*) Beiträge zu einer zukünftig weitestgehend treibhausgasneutrale Industrielandschaft in NRW leisten könnte und welche Effekte sich hierdurch erzielen lassen könnten.

Die angesprochene treibhausgasneutrale Industrie basiert definitionsgemäß (siehe auch das Kapitel zu Szenarien) im langfristigen Ausblick auf *Low Carbon Breakthrough Technologies* (LCBT). Damit werden Technologien bezeichnet, welche technische Lösungen bieten, um die Produktionsprozesse der energieintensiven Grundstoffindustrie treibhausgasneutral zu gestalten. Ein prominentes Beispiel dafür stellt etwa die Direktreduktion von Stahl mittels Wasserstoff dar.

Diese technischen Lösungen sind aber nur ein Teil des Gesamtbilds einer treibhausgasneutralen Industrielandschaft. Auf der anderen Seite der Produktionsprozesse ist grundsätzlich auch die Nachfrageseite zu berücksichtigen, welche über Bedarfsstrategien wie z.B. eine Circular Economy und verstärktes Recycling abgebildet werden kann. Diese Aspekte gehen allerdings über den Rahmen des zugrundeliegenden Projekts hinaus. Dagegen adressiert das vorliegende Kapitel Strategien, um durch eine Vernetzung der Grundstoffindustrie Energie, Stoffströme und auch Materialien nicht nur treibhausgasneutral, sondern auch effizienter einsetzen zu können – wie es das Konzept der Industriesymbiose generell verspricht.

Zu diesem Zweck werden mögliche Netzwerke bzw. Beispiele vernetzter Industrien respektive von Industriesymbiose exemplarisch und generisch aus den Szenarien, die für und im Projekt gebildet worden sind, abgeleitet und vorgestellt (Kapitel 4.2). Diese Beispiele werden mit der einschlägigen Literatur aus dem weiten Forschungsbereich „*industrial symbiosis*“ und den dort beschriebenen Konzepten und Definitionen abgeglichen (Kapitel 4.3). Treiber für die Ausgestaltung sowie die erzielbaren Potenziale für den Klimaschutz werden betrachtet bzw. hinterfragt (Kapitel 4.4 und 4.5).

Abschließend werden Forschungsfragen definiert (Kapitel 4.6), die künftig weiter verfolgt werden sollten, um das Potential industrieller Vernetzung für NRW in einem zukünftig dekarbonisierten Energiesystem weiter zu erforschen.

4.2 Low Carbon Breakthrough Technologien und ihre Netzwerke

Im Zuge der Szenarien-Beschreibung sind für verschiedene Industrie-Branchen die zukünftig einzusetzenden Low Carbon Breakthrough Technologien (LCBT) beschrieben worden. Vielen von diesen ist gemeinsam, dass sie in weiten Teilen elektrifiziert sind sowie verstärkt auf Wasserstoff und Kohlendioxid als Rohstoffe setzen. Diese Rohstoffe bilden damit einen Grundstock für die folgenden Überlegungen.

Eine mögliche zentrale Annahme für die Betrachtung von zukünftigen IndustriemNetzwerken ist damit, dass es eine oder mehrere Power-to-X-Anlagen geben wird, die großmaßstäblich arbeiten und mehr als nur einen direkten Kunden beliefern. Diese PtX Anlagen stellen als neue Akteure den Nukleus eines industriellen Netzwerks dar, um den sich die anderen Branchen herum gruppieren. Dabei ist die Anordnung - die PtX Anlagen im „Zentrum“ und die anderen Akteure kreisförmig darum – nur als schematische Skizze zu verstehen und nicht als tatsächliche räumliche Verortung. Abbildung 48 zeigt exemplarisch die Verknüpfungen einiger beispielhafter Industrieanlagen (Zement, Glas, Papier, Chemie, Stahl) mit PtX Anlagen.

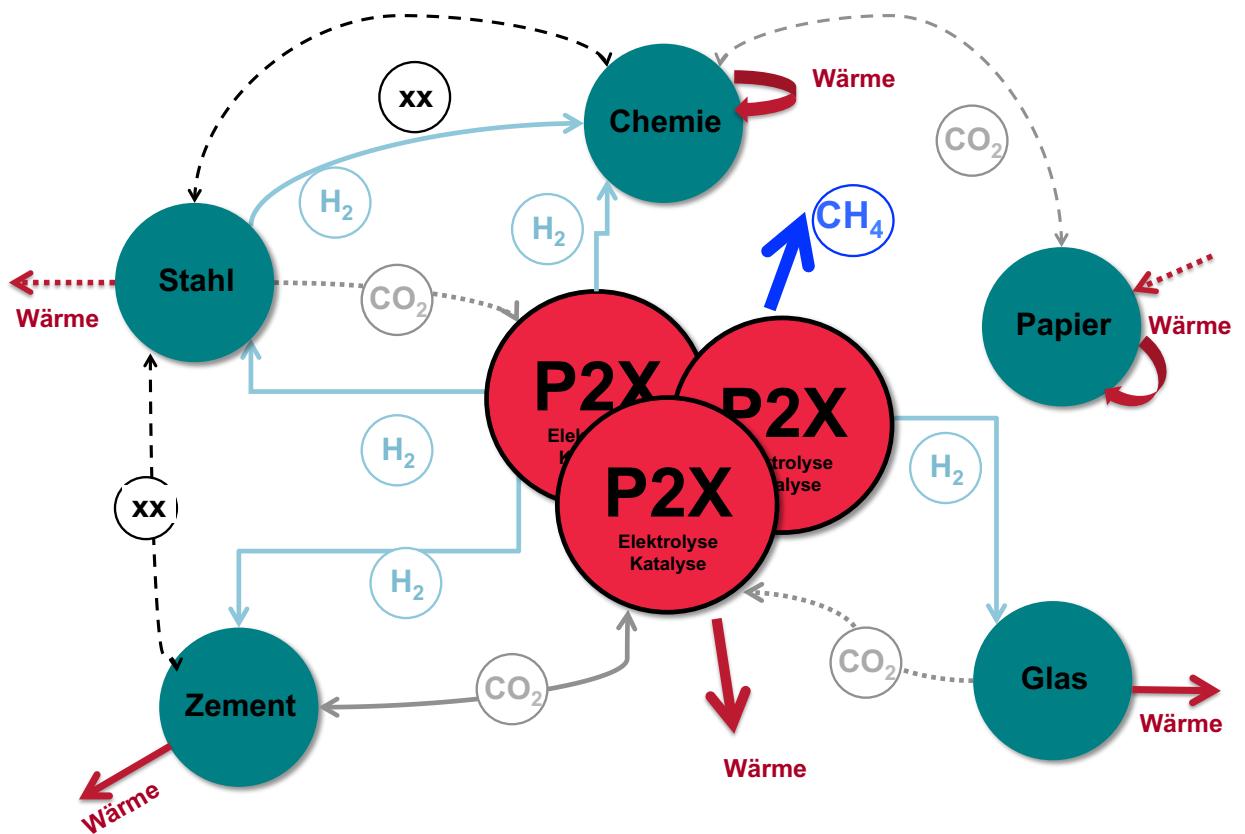


Abbildung 48 Schema eines zukünftigen LCBT Netzwerks

Quelle: Eigene Darstellung

Die Produktionsprozesse der meisten Grundstoffindustrien werden zukünftig Wasserstoff benötigen, um treibhausgasneutral arbeiten zu können (Ausnahme: Papier-Industrie). Der Ausstoß von CO₂ bzw. der Rückfluss an die PtX Anlagen wird entsprechend abnehmen (im Fall von Stahl und Glas als punktierte Linie dargestellt),

aber aufgrund von prozessbedingten Emissionen etwa aus der Zement-Herstellung nicht komplett versiegen.

Mit der Umstellung der Prozesse wird fallweise auch der Wärmehaushalt umgestellt; aus der Stahlherstellung wird etwa weniger Wärme frei werden. In der chemischen Industrie sowie der Papierherstellung wird auch heute schon ein hoher Anteil der Wärme zurückgeführt und genutzt, dies wird bei zukünftigen LCBT weiterhin erwartet. Die Papierindustrie kann zudem in noch stärkerem Maße Wärme aus anderen Industrien aufnehmen. Aus den Prozessen der Zement- sowie der Glas-Herstellung und auch aus der PtX Anlage selbst wird voraussichtlich Wärme frei, die entweder in anderen Industrie-Branchen oder auch im kommunalen Bereich genutzt werden sollte.

Die PtX Anlagen stellt nicht nur Wasserstoff und Sauerstoff als Rohstoffe zur Verfügung, sondern nimmt auch CO₂ auf, das für eine Methanisierung des Wasserstoffs genutzt werden kann. Damit wird zudem das Produkt CH₄ generiert, das den Industrien im Netzwerk, aber auch darüber hinaus (z.B. als Kraftstoff) zur Verfügung gestellt wird.

Die Darstellung ist im Kontext der Dekarbonisierung des Energiesystems (im Sinne der Aufgabenstellung des vorliegenden Projekts) auf die genannten Rohstoff-Ströme plus Wärme und Strom vereinfacht; weitere Stoffströme wie Wasser, Materialien, Produkte, aber auch Information und Dienstleistungen sind nicht dargestellt, sondern nur im Fall Zement-Stahl und Stahl-Chemie angedeutet.

Um einen Austausch dieser Stoff- und Energieströme zu ermöglichen, ist eine entsprechende Infrastruktur wesentlich. Dieser kommt eine so hohe Bedeutung zu, dass die Realisierung von Netzbildung und industrieller Symbiose entscheidend davon abhängt, ob und unter welchen Rahmenbedingungen eine Infrastruktur bereits vorhanden ist oder aber aufgebaut werden kann. Diesem Aspekten widmet sich daher ein eigenes Kapitel bzw. Forschungsvorhaben; es wird an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

4.3 Literaturrecherche und Begriffsdefinitionen

Industrial symbiosis (IS) ist ein Teilbereich der *industrial ecology*, oder auch von Öko-Innovationen (Massard et al. 2014) - ein weites Forschungsfeld, das sich unter anderem auch mit den Konzepten *circular economy*, Dematerialisierung, Eco-Industrial Parks (EIP; Öko-Industriepark) oder dem *polluter-pays-principle* beschäftigt. Inspiriert von Prinzipien aus der Biologie und Ökologie wird der Gedanke der effizienten Ressourcen-Nutzung durch Kreislaufführung und Wiederverwendung auf industrielle Prozesse übertragen.

Es wird im Folgenden ein kurzer Aufriss von ausgewählter relevanter Literatur und den dort erarbeiteten Definitionen und Konzepten von industrieller Symbiose gegeben. Dieser erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da im Rahmen des vorliegenden Projekts vor allem die darauf folgenden Überlegungen zur Anwendbarkeit der Konzepte auf die zukünftige Situation der dekarbonisierten Industrie in NRW im Vordergrund stehen. Vorweggenommen sei, dass es durchaus üblich ist, verschiedene Begriffe synonym zu verwenden. In dieser Arbeit werden im Folgenden vor allem die Ausdrücke „industrielle Symbiose“ und „Öko-Industriepark“ genutzt. Letzteres ist aber deutlich zu unterscheiden von der derzeit etablierten Industrieparks, die ebenfalls vernetzt arbeiten und Energie- und Stoffströme austauschen, sich aber vor allem selbst nicht unbedingt als „Öko“-Industriepark begreifen³².

(Yu et al. 2013) haben die veröffentlichte Literatur des Forschungsfelds aufgearbeitet. Demzufolge gehen erste Publikationen in die 1990er Jahre zurück und beschreiben erste Cluster, in denen sich industrielle Zusammenarbeit symbiotisch entwickelt hat. In der wissenschaftlichen Literatur lassen sich laut (Yu et al. 2013) zwei Phasen unterscheiden: in der ersten, etwa von 1997 bis 2005 findet vorrangig eine Beschäftigung mit dem Konzept der industriellen Symbiose statt, indem erste entstehende Eco-Industrie-Parks beobachtet und beschrieben werden. Die Bildung neuer Netzwerke, oftmals um die Abfall- und Nebenprodukt-Nutzung sowie zum Recycling steht im Vordergrund. In der zweiten Phase von 2005 bis 2012 (dem Zeitpunkt, zu dem die Untersuchung stattfand) nimmt die Zahl der wissenschaftlichen Publikationen zu. (Yu et al. 2013) beobachten eine deutliche Erweiterung der Theorie-Bildung durch eine systematischen Untermauerung. Der Fokus der Wissenschaft hat damit von der Untersuchung eines Phänomens zur Erläuterung der zugrundeliegenden Mechanismen gewechselt. Passend dazu schreiben (Daddi et al. 2015), *industrial ecology* sei sowohl als politisches Instrument als auch als akademische Theorie präsent.

Eigene Literaturrecherche hat ergeben, dass nach 2012 verschiedene Publikationen sich mit dem Thema der internationalen Vergleichbarkeit von industrieller Symbiose beschäftigen. Exemplarisch genannt sei der Artikel von (Boons et al. 2016).

Beides – sowohl die eher theoretische Untermauerung als auch Fragen der internationalen Äquivalenz – sind für die Betrachtung der Frage, ob und in welcher Form Konzepte der industriellen Symbiose zu einer dekarbonisierten Industrielandschaft in NRW 2050 beitragen können, von geringerer Bedeutung. Daher wird zum einen auf

³² Das Selbstverständnis, durch die Vernetzung einen positiven Beitrag für Klima und Umwelt zu leisten, ist ein wesentlicher Teil der Definition als „Industrielle Symbiose“.

eine umfassende Beschäftigung mit der theorie-bildenden Literatur verzichtet; zum anderen werden praxisnahe Erfahrungen aus der nicht peer-reviewed Forschung aufgegriffen, etwa die Dokumentationen von Workshops aus dem Virtuellen Institut „Transformation – Energiewende NRW“, in denen Akteure sich unter anderem über mögliche Netzbildung ausgetauscht haben (VI Transformation 2016, 2017).

Eine Beschäftigung mit dem Forschungsfeld ist nicht vollständig ohne die Erwähnung von Kalundborg³³, in dem seit 1972 industrielle Prozesse von verschiedenen Unternehmen und Energieversorgern in einem Netzwerk „symbiotisch“ miteinander verknüpft sind. Die „Kalundborg Symbiose“ ist in der gleichnamigen Ortschaft in Dänemark ansässig und gilt als die erste Ausgestaltung des Konzepts der industriellen Symbiose und wird als solche auch aktiv weiter kommuniziert. Als eine der ersten und grundlegenden Publikationen zum Thema gilt (Frosch und Gallopoulos 1989).

Die Begriffe „industrial symbiosis / industrial ecology“ sowie „eco-industrial park / eco-industrial network“ sind nicht immer klar voneinander abgegrenzt und werden oft synonym benutzt (Chertow und Ehrenfeld 2012). In der Konsequenz werden auch die dahinterliegenden Konzepte vielfach unterschiedlich interpretiert und inkonsistent genutzt (Lombardi und Laybourn 2012).

Zu den am meisten beachteten und weit anerkannten Publikationen gehört (Chertow 2000), deren viel zitierte Definition durch (Lombardi und Laybourn 2012) an die Weiterentwicklung der Konzepte und auch der beobachteten Praxis angepasst worden ist. Dabei sind vor allem Aufweitungen von Begrifflichkeiten erfolgt; etwa ist „industries“ durch „organisations“ ersetzt worden sowie der Fokus von Material, Energie, Wasser und Nebenprodukten auf Wissen, Information und Erfahrung erweitert worden.

Das weite Feld der industrieller Symbiose kann nach (Daddi et al. 2015; Lombardi und Laybourn 2012) auch nach den Haupt-Themen 1) Abwasser-Aufbereitung, 2) Energie-Effizienz, 3) Behandlung fester Abfälle, 4) Selbst-Organisation von IS Systemen und 5) Politikgestaltung und Evaluierung von IS und EIP aufgespannt werden.

In ähnlicher Weise sind die von (Chertow 2000) in einer Klassifizierung eingeführten fünf verschiedenen Typen von industrieller Symbiose im Wesentlichen durch darauf aufbauende Literatur bestätigt worden, wenn auch in leichten Abwandlungen bzw. Anpassungen und / oder Vereinfachungen bzw. Ergänzungen.

Es lässt sich nach mehreren Aspekten unterscheiden; einige Beispiele (mit beispielhafter Nennung der Quelle, in der die Kategorisierung vorkommt) sind in Tabelle 16 Beispiele für die Kategorisierung von IS aufgelistet.

³³ <http://www.symbiosis.dk/en/>

Tabelle 16 Beispiele für die Kategorisierung von IS

		Beispielhafte Nennung der Quelle
Stoff-Flüsse	Austausch von Nebenprodukten, Reststoffen & Abfall, Energie, Produkten, Dienstleistungen, Infrastrukturen, etc.	(Branson 2015; Chertow 2007)
Art der Industrie	Schwer- / Grundstoffindustrie; Mischkonzepte; Austausch von Reststoffen	(Corder et al. 2014)
räumliche Verknüpfung	Innerhalb einer Firma / Organisation; zwischen Firmen in räumlicher Nähe im EIP; ohne räumliche Nähe; virtuell über weite Region	(Chertow 2000)
Art der Kooperation	industriell getriebene Kooperation; Kooperation durch F&E Projekte; regional gesteuerte Kooperation	(VI Transformation 2016, 2017)

Quelle: Eigene Darstellung

Dabei kann ein industrielles Netzwerk quer über diese Auflistung organisiert sein bzw. werden wahrscheinlich Aspekte aus den Zeilen miteinander verbunden: ein Netzwerk kann sich von anderen unterscheiden sowohl aufgrund der Stoff-Flüsse, der räumlichen Verknüpfung und der Art der Kooperation. Auf der anderen Seite sind vielleicht nicht alle diese Aspekte klar definiert, sondern können die Teilnehmer über die Zeit auch in ein Netzwerk ein-oder austreten und so z.B. die Art der beteiligten Industrie sich ändern.

Wichtige Hinweise, ob und um welche Form von industrieller Symbiose es sich im betrachteten Fall handelt, gibt (Branson 2015): beim Austausch von Energie, Produkten oder auch Abfall gegen eine Gegenleistung handelt es sich, auch wenn diese innerhalb eines Eco-Industrie Parks statt findet, nicht automatisch um einen Beitrag zur industriellen Symbiose, sondern diese Transaktion kann durchaus auch eine „normale Geschäftsbeziehung“ sein. In der teils herrschenden Euphorie der Debatte ist dieser Hinweis ein wesentlicher Beitrag zu einer sachlichen Bewertung, der als solcher stets im Hinterkopf behalten werden sollte.

Das im vorigen Kapitel skizzierte „Netzwerk“ von dekarbonisierten Industrien kann nach den obigen Ausführungen als eine Form eines Öko-Industrie-Parks gesehen werden.

Zur räumlichen Nähe können keine Aussagen gemacht werden, da aus dem gezeigten Schema (noch) keine konkrete Angaben zu Standorten und deren potentieller Nähe zueinander abgeleitet werden können. Laut (Branson 2015; Lombardi und Laybourn 2012 und anderen) stellt die räumliche Nähe aber auch kein Entscheidungskriterium für die Zuordnung zur industriellen Symbiose dar.

Einschränkend ist festzuhalten, dass ein Netzwerk laut (Chertow und Ehrenfeld 2012) über mindestens drei Akteure verfügen muss, die miteinander interagieren – sonst ist es kein Netzwerk, sondern „nur“ eine bilaterale Kooperation. In Kapitel 4.2 ist festgestellt worden, dass es sich bei den dargestellten Beziehungen nicht unbe-

dingt um multi-laterale, sondern eher um multiple bilaterale Beziehungen handelt. Allerdings ist dies nach den eher kritischen Analysen von (Branson 2015) auch in Kalundborg der Fall. Für den Zweck des vorliegenden Berichts kann in Anlehnung daran auch in dem skizzierten Fall von „Netzwerk“ gesprochen werden, zumal die angedeuteten Kooperationen ja nur wenige Stoffströme betreffen und weitere Kooperationen (z.B. bezüglich Wasser, Infrastrukturen, Produkten etc.) noch nicht einbezogen worden sind.

In dem beispielhaften Öko-Industrie-Park sind verschiedene Organisationen – in diesem Fall alles Industrie-Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen – miteinander verknüpft und tauschen sowohl „inputs“ als auch „non-product output (hier: CO₂)“ miteinander aus. Verbindend ist zudem der Wille, zu Öko-Innovationen (konkret zum Klimaschutz) beizutragen und dazu Wissen zu generieren und zu teilen – also einen Beitrag zu leisten, der über eine konventionelle Geschäftsbeziehung hinaus geht. Dies entspricht im Groben der Definition von (Lombardi und Laybourn 2012). Eine detaillierte Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Definitionen und Konzepten steht noch aus; sie ist Teil der weiterführenden Forschungsfragen (siehe Kapitel 4.6).

4.4 Lessons learnt – Hemmnisse und Treiber für industrielle Symbiose

Im vorigen Kapitel 4.3 sind verschiedene Definition von industrieller Symbiose aus der Literatur vorgestellt worden. Aus diesen lässt sich ableiten, aus welchen Elementen eine IS zusammengestellt werden kann. Unmittelbar daran schließt sich die Frage an, welche Erfahrungen sich aus den bisher realisierten Beispielen ableiten lassen. Welche Treiber, Erfolgsfaktoren und Hemmnisse sind für die Gestaltung von neuen EIP oder IS zu beachten?

Diese und ähnliche Fragestellungen sind in der Literatur ebenfalls untersucht worden, wobei die Autoren der hier zitierten Artikel durchaus auch zu unterschiedlichen Antworten kommen.

Im europäischen Kontext ist und bleibt Kalundborg der wesentlichste Referenzpunkt, der vielfach in der Literatur abgebildet worden ist. Die Hoffnung, dass sich aus diesem Fall eine „Blaupause“ für weitere EIP ableiten lassen, wird von (Yu et al. 2013) gedämpft: aufgrund von mehreren spezifischen Randbedingungen, die in Kalundborg günstig ineinander gegriffen haben, ist dieses Konzept nicht ohne weiteres auf andere Standorte übertragbar. Zu den Schwierigkeiten gehören die Kosten für Transaktionen, die Suche nach geeigneten Nebenprodukten bzw. geeigneten Abnehmern dafür, die Kontinuität der Stoffströme etc.

(Corder et al. 2014) hat für drei verschiedene Ausprägungsraten von IS in Australien (Schwerindustrie, gemischte Standorte, Abfall) sieben verschiedene Kategorien von Hemmnissen identifiziert, nämlich Regulierung, Information, Gemeinschaft, Ökonomie, Technik, Kooperation und Vertrauen sowie Engagement für nachhaltige Entwicklung. Ihre Analyse kommt zu dem Schluss, dass für Schwerindustrie sowie gemischte Standorte die wesentlichen Hemmnisse in der Regulierung, Information sowie der Ökonomie liegen, während ökonomische und technische Hindernisse den Austausch von Reststoffen und Abfällen erschweren. Dabei ist zu beachten, dass Regulierung wahrscheinlich in allen Ländern und Regionen ein Thema sein werden, die Ausgestaltung aber von Land zu Land unterschiedlich gehandhabt wird und daher keine verallgemeinernden Schlüsse daraus gezogen werden sollten.

Uneinigkeit besteht in der Literatur bezüglich der Frage, ob die Motivation (etwa ein Engagement für den Klimaschutz) ein Treiber für industrielle Symbiose ist oder nicht. Positiv sprechen sich etwa (Branson 2015; Massard et al. 2014) aus: der Zweck hinter der Vereinbarung sei ein wesentlicher Treiber für IS, der hilft, das Konzept auch in der Praxis umzusetzen. Dabei sehen beide Quellen nicht nur ein Engagement für Umwelt und Klima, sondern durchaus auch ökonomische Interessen als Motivationselemente an. Umgekehrt sind nach (Chertow und Ehrenfeld 2012; Lombardi und Laybourn 2012) Öko-Effizienzgewinne ganz klar ein Ergebnis der IS und kein Treiber.

(Massard et al. 2014) betont zudem, dass Umweltvorschriften für den Einsatz zur Öko-Effizienz hilfreich sind. (Branson 2015) betont, dass bei der Ausgestaltung aber auch bei der Motivation der Beteiligten die Perspektive des Anbieters von Stoffströmen getrennt von der Perspektive des Nutzers betrachtet werden muss, da beide unterschiedliche Motivationen haben.

Für die Bildung von Netzwerken ist es wichtig, dass eine gewisse soziale Komponente zwischen den Beteiligten vorhanden ist. Diese wird teils als „short mental distance“ oder „mental proximity“ bezeichnet (Branson 2015; Chertow 2007; Massard et al. 2014 und andere); teils wird die persönliche Ebene oder auch informelle Kanäle herausgestellt. In einigen Fällen gehen die Autoren der Artikel soweit, eine spontane und ungeplante Netzwerkbildung zu postulieren, die sich kaum oder nur schlecht vorhersagbar planen lässt. So sprechen (Chertow und Ehrenfeld 2012) insbesondere in der ersten Phase der Ausgestaltung von IS davon, dass diese oftmals von Zufällen geprägt ist. Es wird sehr stark auf die Selbst-Organisation von IS und EIP fokussiert, die sich deutlich an die freie Marktwirtschaft anlehnt, indem Eingriffe abgelehnt werden. Demzufolge neigen geplante EIP zum Scheitern. Diese These wird von (Lombardi und Laybourn 2012) gestützt, die nur eingeschränkten Erfolg in zentraler Planung erkennen.

Es ist allerdings fraglich, ob Mechanismen, die an die freie Marktwirtschaft angelehnt sind, tatsächlich geeignet sind, ein starkes Engagement für Klima und Umwelt in ausreichendem Maße zu fördern, um ein so ambitioniertes Ziel wie die vollständige Transformation zu einem nachhaltigen Energiesystem zu meistern.

Grundsätzlich ist es aber unstrittig, dass die Wirtschaftlichkeit und Profitabilität für die beteiligten Industrieunternehmen ein wichtiger Faktor ist. Auch (Branson 2015) erkennt die wirtschaftliche Nähe, einschließlich der „short mental distance of managers“ als wesentlich an.

Trotz der Ablehnung von zu viel Planung und Steuerung lässt sich aber doch ein Faktor herauslesen, der die Ausgestaltung von IS begünstigen kann. Die Literatur fokussiert in vielen Fällen auf die Nutzung bzw. Lenkung von Abfallströmen bzw. Reststoffen als Kristallisationspunkt für IS. (Chertow und Ehrenfeld 2012) haben herausgefunden, dass das Thema Abfall oftmals auf einer eher niedrigen Hierarchiestufe in Industrieunternehmen angesiedelt war und daher wenig im Fokus der Aufmerksamkeit stand. Aus diesem Grund ist es bei strategischen Diskussionen nicht immer einfach zu platzieren. Daraus wird gefolgert, dass die Platzierung des Themas auf höheren Hierarchiestufen helfen kann, einfacher in Kooperationen zu gelangen.

Der Gedanke findet sich auch bei (Massard et al. 2014) wieder, wo der Posten eines „Koordinators“ angedacht wird. Umgangssprachlich ist in früheren Arbeiten des Wuppertal Instituts zum Thema Energiemanagement vom „Kümmerer“ gesprochen worden. Eine Idee bzw. den Willen zum Engagement frühzeitig auf die Agenda eines Unternehmens zu heben und eine konkrete Person mit der Ausgestaltung zu betrauen kann also durchaus zum Erfolg führen.

4.5 Potenziale für den Klimaschutz und die Industrie

Die vorliegende Untersuchung hat das Ziel, weitergehende Forschungsfragen zur Sinnhaftigkeit von industriellen Symbiose in NRW als ein Instrument des Klimaschutzes herauszustellen. Damit wird bereits impliziert, dass IS zur Reduktion von Treibhausgasen beitragen kann.

„Potenziale“ aufgrund von IS können in unterschiedlichen Aspekten liegen, etwa in der Einsparung von Emissionen, Energie und Ressourcen, aber auch in der Ökonomie und Profitabilität sowie der (internationalen) Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen. Im vorliegenden Rahmen ist der Fokus auf der Reduktion von Treibhausgasen. Wechselwirkungen bestehen dabei zu Energie- und Ressourceneinsparungen.

In der untersuchten Literatur besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass aufgrund der Ausgestaltung der Industrie in öko-industriellen Netzwerken oder Parks, also durch Anwendung des Konzepts der industriellen Symbiose positive Effekte für Umwelt und Klima, aber auch für die beteiligten Unternehmen selbst erzielt werden. (Chertow und Ehrenfeld 2012) sehen als ein Umsetzungs-Hemmnis, dass die Vorteile durch IS von den Unternehmen nicht immer direkt als solcher erkannt werden, stellen aber nicht grundsätzlich in Frage, dass diese sich realisieren lassen.

Auch aus dem Kreis derzeit agierender Unternehmer, die nicht aus dem wissenschaftlichen Umfeld stammen, ist im Rahmen eines der bereits genannten Workshops ein wirtschaftlicher Vorteil von industrieller Symbiose verneint worden. Dahinter steckten „kaum tragfähige Geschäftsmodelle“, sondern ein Austausch von Abfall- bzw. Rohstoffen über die normalen Marktmodelle (VI Transformation 2016). Ebenfalls weniger euphorisch ist die Einschätzung eines Teilnehmers der industriellen Kooperation zwischen Stahl- und Chemieindustrie, „Carbon2Chem³⁴“, in dessen Rahmen Hüttengase eines Stahlwerks zu chemischen Produkten aufbereitet werden sollen. Auch hier wird ein konkreter Beitrag zur Treibhausgas-Reduktion geleistet, der in der Größenordnung von rund 14 % erwartet wird (Bender 2017).

Um eine validierte Antwort auf die Frage nach Existenz und Umfang von Klimaschutz-Potenzialen zu geben, müssen zunächst einige grundlegende Annahmen und Rahmenbedingungen geklärt werden.

Die Kriterien für eine solche Untersuchung müssen transparent festgelegt werden. Wesentlich ist die Definition eines Referenzsystems, das sich nach der Ausgestaltung der zu untersuchenden Industriesymbiose richtet. Es müsste aber, grob gesagt, eine industrielle Anlage oder ein Standort sein, das sich nicht an industrieller Symbiose oder sogar an industrieller Kooperation beteiligt.

Im Bereich der chemischen Industrie ist so ein Referenzfall zumindest für Deutschland und Europa nicht einfach zu finden, da sich die Produktion von chemischen Erzeugnissen seit den 1980er Jahren ganz überwiegend in Verbundstandorten abspielt (VCI 2016). In diesem Kontext ist auch die Definition von „Nebenprodukten“ nicht ganz einfach, wie auch (Chertow und Ehrenfeld 2012) schreiben, da der Austausch

³⁴ <https://www.bmbf.de/de/mit-abgas-das-klima-retten-3044.html>

von Material, Zwischenprodukten und Produkten z.B. für die (Petro-)Chemie gängiges Geschäft ist.

Nach Festlegung der Kriterien und des Referenzsystems müssten die vermiedenen Emissionen berechnet werden, um quantifizierbare Aussagen über die Höhe des Klimaschutz-Potenzials zu gewinnen. Wahrscheinlich bietet es sich an, das Instrument der Life-Cycle-Analyse (LCA) anzuwenden. Die Herausforderung wird dabei in der sinnvollen Wahl der Systemgrenzen liegen. Die LCA sollte sich ja nicht nur auf ein Produkt beziehen, da so wahrscheinlich die Effekte durch den Zusammenschluss zu einem Öko-Industrie-Park nicht sichtbar werden.

In der Literatur finden sich verschiedene weitere, detailliert ausgearbeitete Indikatoren zur Bewertung der Auswirkungen von industrieller Symbiose: der *Industrial Symbiosis Indicator* (ISI), der *Eco-Connectance Indicator* und der *By-product and Waste Recycling Rate indicator* (verschiedene Quellen, zitiert in Mantese und Amaral 2017). Modellierung von EIP oder industrieller Symbiose sind unter anderem von (Mantese und Amaral 2017) mittels Agentenbasierter Modellierung (ABM) durchgeführt worden, wobei zwar alle drei zuvor genannten Indikatoren für einen virtuellen Öko-Industriepark berechnet werden konnten. Die Aussagekraft ist allerdings eingeschränkt, da verschiedene Teil-Ergebnisse im Nachhinein interpretiert werden mussten – aufgrund von Besonderheiten im Modellverlauf ist die reine Quantifizierung nicht immer zielführend.

Auch in China erkennt bzw. erwartet man offenbar eine hohe Relevanz für Öko-Industrie-Parks (EIP). Durch das *National Demonstration Eco-Industrial Parks Programm*³⁵ sollen Unternehmen angereizt werden, sich zu eben diesen EIP zusammenzuschließen. (Fan et al. 2016) haben zwar ebenfalls Schwierigkeiten bei der Bewertung der Effekte benannt, aber trotzdem das Potenzial, zur Nachhaltigkeit der Region beizutragen, in mehreren Kategorien quantifiziert. Es ist allerdings fraglich, ob eine solche Rechnung auch auf deutsche und europäische Standorte übertragbar ist.

³⁵ http://english.sepa.gov.cn/Resources/standards/others1/others3/201603/t20160303_331236.shtml

4.6 Weiterführende Forschungsfragen

Rund um das Konzept der industriellen Symbiose spannt sich ein weiter Forschungsfeld auf, das in vielen Aspekten auch schon intensiv bearbeitet wird. Im vorliegenden Bericht wird dieses Feld jedoch noch um eine zusätzliche Dimension erweitert, indem die zukünftige und dekarbonisierte Industrielandschaft in den Fokus gerückt wird.

Mit dem Blick in die Zukunft besteht die bisher nicht dagewesene Gelegenheit, Industrien zu einer Zusammenarbeit im Sinne der Nachhaltigkeit zu bewegen und industrielle Symbiose im Vorfeld anzustoßen und zu entwickeln.

Konzepte zur Neugestaltung von Öko-Industrie-Parks gibt es und sind auch schon untersucht, etwa als „*build and recruit*“ Modelle von (Chertow und Ehrenfeld 2012). Diese haben aber nicht die Möglichkeit, über einen Zeitraum von rund 30 Jahren gezielt in die Richtung von industrieller Symbiose gelenkt zu werden, da solche langfristigen Zielvorstellungen selten vorkommen.

Zum Ziel-Zeitpunkt, etwa um das Jahr 2050, soll die Energiewende in NRW soweit umgesetzt sein, dass sowohl das Energiesystem als auch die Industrie weitgehend emissionsfrei sind. Auch dann wird das Thema der Energie- und Ressourceneinsparung weiterhin von Bedeutung sein, so dass auch unter diesen äußerst ambitionierten Rahmenbedingungen die Ausgestaltung der Industrie als EIP sinnvoll ist – wenn sich die positiven Effekte bestätigen lassen.

Für die beteiligten Unternehmen wird eine Erhöhung der Profitabilität und der Wettbewerbsfähigkeit ebenso ein gern gesehener Effekt sein.

Vor diesem Hintergrund stellen sich die **folgenden Forschungsfragen**:

- Welche Konzepte der industriellen Symbiose versprechen die meisten Potenziale in Bezug auf IS als Instrument des Klimaschutzes? Wie können diese Effekte quantifiziert und überwacht werden, um sicherzustellen, dass sie auch tatsächlich effektiv auftreten?
- Wie sind diese IS Konzepte ausgestaltet? Welche Formen der Zusammenarbeit sollten gewählt werden? Welche Treiber, aber auch Hemmnisse sind zu beachten?
- Welche Schritte können heute unternommen werden, um die bestehende Industrie in NRW zum einen zu dekarbonisieren, zum anderen zur Zusammenarbeit in den als zielführend erkannten IS Konzepten zu bewegen? Welche Voraussetzungen sind dafür erforderlich? Welche Akteure müssen beteiligt werden?
- Welche Potenziale industrieller Symbiose ergeben sich aus künftigen treibhausneutralen Prozesstechnologien in der Grundstoffindustrie und ihren Infrastrukturbedarfen?
- Welche weiteren Potenziale für IS ergeben sich unter intensiver Einbeziehung der Strategien des Recycling (und der Circular Economy) und gibt es hier potenzielle neue Synergien, die in heutigen Produktionssystemen nicht bestehen.
- Wie wirken sich künftige Veränderungen in Produkt-, Beiprodukt-, energie- und Abfallströmen sowie deren Preisrelationen aus in Bezug auf mögliche Potenziale von IS?

- Welche veränderten Stoffströme sind aus heutiger Sicht in einer weitgehend klimaneutralen Industrie in NRW 2050 gegenüber heute zu erwarten und welche Industrieprozesse oder neue Produkte könnten am Standort NRW davon profitieren?
- Welchen Herausforderungen und Veränderungsprozessen sind vor diesem Hintergrund die vorhandenen Industrieparks in NRW ausgesetzt?

Diese Fragestellungen sind zum Teil in der bestehenden Literatur schon (in unterschiedlichem Maße) bearbeitet worden. Die Erkenntnisse werden aber an die besondere Situation in NRW 2050 angepasst werden müssen.

Es wird daher vorgeschlagen, sich im Rahmen eines einzurichtenden Wissenschaftszentrums NRW mit den skizzierten Forschungsfragen zu beschäftigen.

5 AP 5: Internationaler Austausch zu Good Practise der weitgehenden Emissionsminderung in der energieintensiven Wirtschaft

Katharina Knoop, Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer, Dr. Dagmar Kiyar

Die Industrie in Nordrhein-Westfalen ist ohne eine globale Perspektive nicht zu denken. Rohstoffe und Vorprodukte werden im großen Umfang importiert, die hergestellten Produkte werden in alle Welt exportiert. Die nordrhein-westfälische Wirtschaft exportierte allein im Februar 2018 Waren im Wert von 16,2 Milliarden Euro (IT.NRW 2018). Bei der Transformation in eine möglichst klimaneutrale Industrie in Nordrhein-Westfalen muss daher die europäische und globale Wettbewerbssituation immer mit betrachtet werden, Nordrhein-Westfalen steht dort auch im Wettbewerb um die Ansiedlung zukünftiger Produktlinien und Prozesse. Allerdings ist die Transformation hin zu einer möglichst klimaneutralen Industrie eine globale Herausforderung, die die verschiedenen Industrieregionen und –unternehmen nicht allein bewältigen können und die auf verschiedenen Ebenen auch Austausch- und Zusammenarbeitsperspektiven ermöglicht. Für Nordrhein-Westfalen sind dabei insbesondere Beispiele interessant, die entweder technologisch analog zu den bestehenden Industrien in NRW sind oder die in ein ähnliches regionales Umfeld wie NRW eingebettet sind. Die im Rahmen dieses Arbeitspaketes zu behandelnden Fragestellungen richten sich daher an ein komplexes Netzwerk aus Industrie, Politik und Wissenschaft.

In den Zeitraum der Bearbeitung dieses Arbeitspaketes fiel die vom 6. bis 17. November 2017 in Bonn stattfindende UN-Weltklimakonferenz (COP23). Das Thema der Dekarbonisierung von Industrieprozessen spielte auf der COP eine wichtige Rolle und bot dem Projekt einen idealen Ansatz zur inhaltlichen Vertiefung, zur Diskussion und zur Dissemination eigener Inhalte auf einer globalen Bühne. Das wurde zusätzlich dadurch verstärkt, dass auch das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen diesen Prozess aktiv nutzte, um die eigenen Inhalte dort zu präsentieren. Dieses sehr positive Zusammenspiel war bei der Antragstellung des Projektes noch nicht absehbar. Das Wuppertal Institut hat diese einmalige Gelegenheit ergriffen und den Rahmen der COP zur inhaltlichen Diskussion und Sammlung von Akteursrückmeldungen sowie Best Practice Beispielen genutzt. Für das Projekt war die COP ideal geeignet: Wesentliche Entscheidungsträger aller politischen Ebenen, Vertreter von Industrie und Verbänden, von Nichtregierungsorganisationen wie aus der Wissenschaft waren vor Ort. Mit dem COP-Konzept „eine Konferenz – zwei Zonen“ wurde zudem deutlich die besondere Rolle nicht-staatlicher Akteure für Klimaschutzaktivitäten betont. Parallel zu den Arbeiten in diesem Projekt hat das Wuppertal Institut die COP23 inhaltlich begleitet (Wuppertal Institut 2017, 2018).

Zusätzlich führte das Land Nordrhein-Westfalen (NRW) in Kooperation mit der EnergieAgentur.NRW und dem Wuppertal Institut die "NRW Climate Lounge" im Post Tower in Bonn durch. An neun Abenden bot diese Veranstaltungsreihe mit einem täglichen Update Einblicke in den aktuellen Stand der Verhandlungen und stellte zudem jeden Abend ein wichtiges Klimaschutz-Thema in den Mittelpunkt, über das mit NRW-Akteurinnen und -Akteuren aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft

sowie internationalen Gästen diskutiert wird. Die Veranstaltungen begannen in der Regel jeweils mit einem einführenden Vortrag des Wuppertal Instituts, der das Tagesgeschehen auf der COP selbst abbildete; anschließend folgten Vortrags- und Diskussionsformate zu den einzelnen Themen (Wuppertal Institut o. J.).

Aus diesem Grund hat es Verschiebungen in den Schwerpunkten der Bearbeitung der Arbeitspakete 5 und 6 gegeben, damit diese Gelegenheit auch genutzt werden konnte.

Die internationale Fachkonferenz "Klimaschutz in der Industrie" am **10. November 2017**, war in die vom Land Nordrhein-Westfalen in Kooperation mit der Energie-Agentur.NRW und dem Wuppertal Institut ausgerichtete „NRW Climate Lounge“³⁶ eingebettet. Die ganztägige Veranstaltung richtete sich an verschiedene Zielgruppen: Zum einen waren Vertreterinnen und Vertreter der (materialverarbeitenden) Industrie angesprochen, zugleich aber auch politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger und Nicht-Regierungsorganisationen, vornehmlich aus Staaten bzw. Regionen, in denen die Industrie angesiedelt ist. Wissenschaftler und Journalisten, die sich einen umfassenden und zugleich komprimierten Überblick über dieses zunehmend an Bedeutung gewinnende Themenfeld verschaffen wollten, bildeten die dritte Zielgruppe. Der Bonner Post Tower, in dem die NRW Climate Lounge residierte, lag mittig und in fußläufiger Entfernung zwischen der Bula Zone, in der die Klimaverhandlungen stattfanden, als auch der Bonn Zone, in denen die Side-Events abgehalten und die Pavillons der staatlichen wie nicht-staatlichen Akteure untergebracht waren. Zudem war keine Akkreditierung für die COP selbst notwendig, sodass Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Konferenz, aber auch nicht-akkreditierte Interessierte teilnehmen konnten. Die wichtige Thematik, die bei dieser hochrangig besetzten Konferenz behandelt wurde, war zudem ein Signal für die Verhandler der Klimakonferenz: die Politik ist maßgeblich gefordert, um die notwendige Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen zu gewährleisten.

Für die vier Panels konnten eine Reihe hochrangiger Referentinnen und Referenten gewonnen werden, insbesondere aus Deutschland und dem europäischen Ausland. Zudem gab es einen Referenten aus Japan und eine Referentin aus Indien. Unter den Diskutanten gab es viele Industrievertreter, aber auch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, sowie politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger. Die nachstehende Tabelle bietet einen ersten Überblick über den Hintergrund der Panelisten. Zudem findet sich eine detaillierte Übersicht im Anhang 3.

³⁶ Die Veranstaltungsreihe im Bonner Post Tower behandelte an jedem Abend ein wichtiges Klimaschutz-Thema, das mit NRW-Akteurinnen und -Akteuren aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowie internationalen Gästen diskutiert wurde.

Tabelle 17 Panelisten der internationale Fachkonferenz "Klimaschutz in der Industrie" am 10. November 2017 zur COP 23

TeilnehmerIn, Institution	Panel	Land	Industrie (I)/ Pol. Entscheider (POL)/ Wissenschaft (W)
Dr. Dolf Gielen, IRENA Innovation and Technology Centre	1	DEU	W
Dr. Martin Porter, European Climate Foundation (ECF)	1	BEL	W
Dr. Christoph Sievering, Covestro	1	DEU	I
Nico van Dooren, Port of Rotterdam	1	NLD	I
Tomas Wyns, Institute for European Studies	2	BEL	W
Eva Blixt, Swedish Steel Industry Organisation	2	SWE	I
Dr. Henning Wilts, Wuppertal Institut	2	DEU	W
Prof. Dr. Görge Deerberg, Fraunhofer UMSICHT	2	DEU	W
Dr. Brigitta Huckestein, BASF	2	DEU	I
Dr. Artur Runge-Metzger, EU COM DG Climate Action	3	BEL	POL
Johannes Kerner, BMWi	3	DEU	POL
Michael Theben, MWIDE	3	DEU	POL
Dr. Gerhard Dell, Land Oberösterreich	3	AUT	POL
Shiro Kobayashi, Nippon Sheet Glass Co. Ltd	3	JPN	I
Dr. Reinhold Achatz, thyssenkrupp AG	4	DEU	I
Prof. Dr. Stefan Lechtenböhmer, Wuppertal Institut	4	DEU	W
Prof. Dr. Joyashree Roy, Jadavpur University und IPCC	4	IND	W
Eva Svedling, State Secretary to the Minister for International Development Cooperation and Climate	4	SWE	POL

Quelle: Eigene Darstellung

Die jeweiligen Chairs Prof. Dr. Lars J. Nilsson, Lund University (Panel 1 und 4), Dr. Bettina Wittneben, University of Oxford (Panel 2), Dr. Chris Bataille, IDDRI (Panel 2), Dr. Christoph Wolff, European Climate Foundation (Panel 3), Timon Wehnert, Wuppertal Institut (Panel 3) und Dr. Martin Porter, ECF (Panel 4) führten durch die folgenden etwa 1,5-stündigen Panels:

Tabelle 18 Zentrale Inhalte der internationale Fachkonferenz "Klimaschutz in der Industrie" am 10. November 2017 zur COP 23

Panel-Titel	Inhalt
Introduction and setting the stage on near-zero carbon emission strategies for materials processing industries	Im ersten Panel wurde die Bedeutung der materialverarbeitenden Industrie für das Klimaziel 2050 herausgestellt. Industrievertreter machten deutlich, dass die benötigten Technologien für eine Low-Carbon-Industrie vorhanden bzw. entwickelt werden können. Mit Blick auf den langfristigen Innovationsprozess ist allerdings der politische wie gesellschaftliche Wille und Rückhalt zwingend notwendig. Nicht nur Risiken, sondern auch Möglichkeiten sind mit der Entwicklung zu einer Low-Carbon-Industrie verbunden
On the road to near-zero carbon processing industries: technologies, infrastructure and pilots	Im zweiten Panel standen wegweisende Pilotprojekte im Mittelpunkt. Anhand dieser wurde aufgezeigt, wie eine Transformation zu einer klimaneutralen Industrie möglich ist. Dabei wurde auf die Herausforderungen der Industrie verwiesen und die von der Politik benötigte Unterstützung aufgezeigt.
How to spur industrial progress: roadmaps, funding and cooperation	Im dritten Panel kamen vor allem Policymaker zu Wort, die ihrerseits das politische Handlungsfeld auf verschiedenen Ebenen (NRW, Deutschland, EU und der Beispielregion Oberösterreich) vorgestellt haben. Es wurde deutlich, dass die politische Herausforderung erkannt ist und nach gemeinsamen Lösungen gesucht wird.
Make it happen: The role of (international) innovation, trade, industry, energy and climate policies	Das vierte Panel fasste die Ergebnisse der Konferenz zusammen. Eine Reihe hochrangiger Vertreter aus Industrie, Wissenschaft und Politik boten hierzu noch wesentliche abschließende Hinweise/ Einblicke.

Quelle: Eigene Darstellung

Durchgängig wurde betont, dass das Thema in der jüngsten Vergangenheit an Bedeutung gewonnen hat, der Industriesektor mit Blick auf die Erreichung des Klimaziels zentral ist. Insgesamt wurde auf der Konferenz deutlich, dass wir vor einer großen Herausforderung stehen, die aber durch die Bildung neuer Netzwerke und Kooperationen über Grenzen und herkömmliche Akteurskonstellationen hinweg, erfolgreich angegangen werden kann. Hierfür ist ein neues Leitbild einer dekarbonisierten Industrie und einer integrierten Industriepolitik mit einem klaren Bekenntnis zu einer emissionsneutralen Industrie vonnöten.

Die auf der Konferenz vorgestellten Beispiele aus Industrie, Politik und Wissenschaft machen deutlich, dass es bereits zahlreiche Vorreiter auf diesem Weg gibt. Dabei wurde insbesondere deutlich, dass Kollaborationen zwischen Industrie, Wissenschaft, Politik wie auch Gesellschaft die notwendigen neuen Netzwerke und Lösungen bilden.

Die auf der Konferenz vorgestellten Beispiele sind hier kurz dargestellt und die dahinterliegenden Präsentationen der Konferenzteilnehmer verlinkt:

CARBON2CHEM

Vortrag: Prof. Dr. Görge Deerberg, Fraunhofer UMSICHT. Abrufbar unter:
https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/misc/COP23_Fachkonf_Panel2_171110_Deerberg.pdf

Das Verbundprojekt Carbon2Chem wurde 2016 ins Leben gerufen. Acht Industrieunternehmen aus der Chemie- und Stahlindustrie entwickeln unter der Koordination der thyssenkrupp AG, dem Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion und dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT mit weiteren Forschungsinstituten und Universitäten daran, eine weltweit einsetzbare Lösung zu finden, um die Abgase der Hochöfen in Vorprodukte für Kraftstoffe, Kunststoffe oder Dünger umzuwandeln. Die Idee ist mit Hilfe einer cross-industriellen Kooperation, unterschiedliche Kompetenzen erfolgreich zu bündeln und zu einem neuen System zu vereinen. Gefördert wird das Projekt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Die beteiligten Partner planen Investitionen von mehr als 100 Millionen Euro bis 2025. Zudem ist für die kommerzielle Realisierung mehr als eine Milliarde Euro vorgesehen.

HYBRIT – Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology (HYBRIT)

Vortrag: Eva Blixt, Swedish Steel Industry Organisation. Abrufbar unter:
https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/misc/COP23_Fachkonf_Panel2_171110_Blixt.pdf

Das Joint Venture zwischen dem schwedischen Stahlhersteller SSAB, dem Bergbauunternehmen LKAB und dem Energieversorger Vattenfall plant im nordschwedischen Luleå die weltweit erste Pilotanlage zur fossilfreien Stahlgewinnung mit Hilfe von Wasserstoff. Das Projekt HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) zielt darauf, statt wie bei der heutigen Stahlherstellung in der Prozessstufe der Eisenerzreduktion das Eisenerz durch Kohle und Koks zu reduzieren, Wasserstoff zu nutzen, der mit Strom aus fossilfreien schwedischen Quellen erzeugt wird. So bleibt als Restprodukt statt CO₂ nur Wasser. Langfristiges Ziel ist es, Stahl bis 2035 komplett fossilfrei zu produzieren. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie hat sich u.a. gezeigt, dass fossilfreier Stahl unter aktuellen Marktbedingungen noch rund 20-30 Prozent teurer wäre als herkömmlich produzierter Stahl. Doch mit sinkenden Energiekosten und steigenden Emissionshandelspreisen kann langfristig fossilfreier Stahl wettbewerbsfähig werden. Mit Hilfe des Projektes sollen die schwedischen CO₂-Emissionen um bis zu 10 Prozent reduziert werden.

Japan Climate Leaders' Partnership (Japan-CLP)

Vortrag: Shiro Kobayashi, Nippon Sheet Glass. Abrufbar unter:
https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/misc/COP23_Fachkonf_Panel3_171110_Kobayashi.pdf

Das Netzwerk, das zur Zeit aus 43 Unternehmen besteht (Stand September 2017), wurde 2009 gegründet. Mit dem Verständnis, dass eine kohlenstoffarme Entwicklung die notwendige Bedingung für wirtschaftliches Handeln ist, ist es das erklärte Ziel, eine Net-Zero-Gesellschaft zu erreichen. Jedes Mitgliedsunternehmen verankert dieses Ziel und trägt durch sein unternehmerisches Handeln dazu bei, den Wandel voranzutreiben. Die Unternehmen des JCLP betonen darüber hinaus die unternehmerischen Möglichkeiten, die sich durch die Entwicklung zu einer low-

carbon-Gesellschaft ergeben. Auch aus diesem Grund wird proaktiv mit der Politik, der Industrie und der Gesellschaft in Asien zusammengearbeitet und sich für eine starke Klimapolitik eingesetzt.

6 AP 6: Publikation zu Emissionsminderungsnotwendigkeiten und -optionen

Dr. Dagmar Kiyar, Katharina Knoop, Prof. Dr. Lechtenböhrer

Die hohe Qualität der im Rahmen des Arbeitspaketes 5 ausgerichteten Konferenz mit renommierten Wissenschaftlern, hochrangigen Vertretern aus Politik wie Industrie erbrachte sowohl eine gute Übersicht über die anstehenden Anforderungen im Bereich der Dekarbonisierung in der Industrie als auch über aktuelle Aktivitäten und Projekte im In- und Ausland. Dies wurde u.A. durch die auf den Panels vertretenden Personen deutlich (so bspw. Dr. Reinhold Achatz, thyssenkrupp oder Dr. Christoph Sievering, Covestro), die mit Ihren Beiträgen die Frage nach Innovationen in ihren jeweiligen Unternehmen behandelt haben.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 wurden diejenigen Technologien identifiziert und beschrieben, die für den aufgespannten Szenariorahmen in Nordrhein-Westfalen für die energieintensive Grundstoffindustrie relevant sind. Bestandteil dieser Beschreibung sind auch Angaben zu aktuell laufenden oder geplanten Pilot- und Demonstrationsprojekten der jeweiligen Technologie. Diese Übersicht wurde auf Basis der Ergebnisse aus den Gesprächen im Laufe der COP und weiterer Kontakte mit der Industrie erstellt und durch Literaturanalysen erweitert und floss in die Technologiesteckbriefe aus AP 2 ein.



Abbildung 49 Titelbild der Image-Broschüre „Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries“

Quelle: Wuppertal Institut

Um die Bedeutung des Themas Dekarbonisierung der energieintensiven Industrie hervorzuheben, sind im Rahmen des AP 6 drei Produkte entstanden, die im Folgenden vorgestellt werden:

Zum einen gibt es eine druckfertige 12-seitige Image-Broschüre (siehe Anhang) in der die wesentlichen Ergebnisse der Konferenz, wie auch der einzelnen Panels festgehalten wurden.

Die Broschüre fasst jeweils auf einer Doppelseite die Konferenz insgesamt als auch die einzelnen Panels zusammen und bietet einen aktuellen Überblick über die Thematik. Mit zahlreichen Fotos und Zitaten der Teilnehmerinnen und Teilnehmer geben die hochkarätigen Vertreterinnen und Vertreter aus Industrie, Politik und Wissenschaft anschauliche Statements ab und die wesentlichen Aussagen der einzelnen Panels der Konferenz sind hier knapp und übersichtlich dargestellt. Die Image-Broschüre findet sich online unter:

<https://wupperinst.org/themen/wirtschaft/energieintensive-industrie/>

und unter:

<https://wupperinst.org/en/topics/economy/energyintensive-industry/>

Neben dieser Image-Broschüre ist ebenfalls im Rahmen der Konferenz ein rund dreieinhalbminütiger Film entstanden. Dieser fasst die wesentliche Botschaft der Konferenz zusammen, stellt die teilnehmenden Panelisten aus aller Welt kurz vor, die hier auch noch einmal prominent ihre Statements zum Thema einbringen. Zudem greift er die gute Stimmung der Konferenz auf.

Der Film ist wie die oben beschriebene Image-Broschüre auf den Internetseiten des WI zu finden. Hier einige visuelle Eindrücke:



**What do we need for the industrial transition
towards climate neutrality?**

Abbildung 50 Screenshots aus dem Film „Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries“

Quelle: Wuppertal Institut



Abbildung 51 Screenshots aus dem Film „Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries“

Quelle: Wuppertal Institut

Eine ausführliche Broschüre, in der alle Beiträge der Konferenzteilnehmer zusammengefasst zu finden sind, ist das dritte Produkt dieses Arbeitspakets. Hier finden sich nicht nur Zusammenfassungen aller Panelisten, sondern auch fünf Artikel von Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Konferenz, die sich im Nachgang bereit erklärt hatten, ihre Konferenzbeiträge aufzubereiten und auszuführen. Diese Beiträge decken dabei sowohl den Bereich Industrie (Eva Blixt und Dr. Brigitta Huckestein), Wissenschaft (Dr. Dolf Gielen und Dr. Henning Wilts) als auch Politik (Eva Svedling) ab und bieten wesentliche Einblicke in den aktuellen Stand der Dekarbonisierung in der Industrie im In- und Ausland.

- Eva Blixt, Research Manager and Senior Advisor Environmental Issues, Swedish Steel Industry Organisation, stellt in ihrem Beitrag die Strategie der schwedischen Stahlindustrie bis 2050 vor. Die Stahlindustrie bekennt sich zu den Klimazielen des Pariser Abkommens und den 17 Zielen für Nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen und möchte einen aktiven Beitrag in der Transformation leisten. Sie tut dies beispielsweise durch gemeinsame Projekte mit dem Stockholm Environment Institute (SEI) mit dem ein so genannter „10 point action point strategic plan“ entwickelt wurde, um die langfristigen Klimaziele der Industrie zu erreichen. Ein anderes Projekt ist die zwischen SSAB (einem Stahlunternehmen, dessen Produktion auf Eisenerz basiert), LKAB (einem Bergbauunternehmen, das Eisenerz fördert) sowie Vattenfall (schwedischer Energieversorger) in 2016 etablierte Zusammenarbeit, um Möglichkeiten für eine CO₂-freie Stahlerzeugung zu finden. Ziel ist es Wasserstoff anstelle von Koks für die Reduktion des Eisenerzes zu nutzen, sodass am Ende nur Eisen und Wasser entstehen. Dies ist ein sehr anspruchsvolles Unterfangen, bei dem eine Zusammenarbeit zwischen Industrie, Wissenschaft und Politik gefragt ist.
- Dr. Brigitta Huckestein, Senior Manager Energie- und Klimapolitik, BASF SE, betont die Herausforderungen der Klimaschutzziele für die chemische Industrie. In vielen Bereichen helfen chemische Produkte bereits CO₂-Emissionen zu senken. Doch für die Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens müssen die Emissionen aus Produktionsprozessen reduziert werden. Grundlegende neue Produktionsprozesse sind hierfür vonnöten, da Effizienzpotenziale über die Jahre bereits ausgeschöpft wurden. Dies zeigt sie anhand der Entwicklung der CO₂-Emissionen bei BASF seit 1990 auf: Während die Emissionen um rund 50% zurückgegangen sind, ist die Produktion verdoppelt worden. Für die Zukunft sind daher insbesondere große Mengen kostengünstiger und verfügbarer CO₂-armer Energie nötig. Nur mit einem geeigneten langjährigen und nachhaltigen politischen Rahmen können die neuen Prozesse auch zu business cases werden, die sich am Markt durchsetzen.
- Dr. Dolf Gielen, Direktor Innovation and Technology, International Renewable Energy Agency (IRENA), konzentriert sich auf die Bedeutung der erneuerbaren Energien, Carbon Capture and Storage (CCS) und der Energieeffizienz als wichtige Grundlage für die Reduzierung der Emissionen in der Industrie und damit der Erreichung des Pariser Klimaabkommens. Dabei geht er auf die Unterschiede der verschiedenen Sektoren ein und führt anhand der IRENA's Renewable Energy Roadmap auf, dass beispielsweise in der Zement-Industrie eine Reduktion von 35% der Emissionen durch CCS möglich ist. Um die Ziele für 2050 zu erreichen, ist die Erreichung eines weit höheren Anteils an erneuerbaren Energien in der Industrie ausschlaggebend. Doch auch er betont, dass der benötigte Anteil von 38%-46% nur erreicht werden kann, wenn die entsprechenden politischen Maßnahmen umgesetzt werden, um die wirtschaftliche Grundlage für die Investitionen der Industrie zu gewährleisten.

- Dr. Henning Wilts, Leiter Geschäftsfeld Kreislaufwirtschaft, Wuppertal Institut, hebt die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft für die Umgestaltung hin zu einer CO₂-armen energieintensiven Industrie hervor. Er zeigt auf, dass beispielsweise in Deutschland nur rund 14% der Rohstoffe aus dem Recycling-Prozess stammen und der große Rest noch Primärrohstoffe sind. Durch eine Verbesserung würde nicht nur die Wertminderung vermieden werden, sondern auch die Ressourcenproduktivität verbessert sowie die Abhängigkeit vom volatilen Rohstoffmarkt und die Umweltbelastung verringert werden. Grundlegende Idee der Kreislaufwirtschaft ist der lange Werterhalt und die längstmögliche Nutzung von Produkten und Komponenten. Damit dies gelingen kann, ist ein integrierter Ansatz notwendig, der die Recycelbarkeit der Produkte von der Design-Phase, während ihrer Verwendung und nach der Verwendung im Blick hat. Die digitale Transformation spielt hier eine entscheidende Rolle: durch sie kann die entscheidende Herausforderung, nämlich die Generierung, das Sammeln und Verarbeiten sowie die Bereitstellung der Informationen zu den Materialien und ihrer einzelnen Komponenten bewerkstelligt werden.
- Eva Svedling, Staatssekretärin der schwedischen Ministerin für internationale Entwicklungszusammenarbeit und Klima, stellt den Industrial Leap vor, ein Programm, das die schwedische Regierung aufgesetzt hat, um die notwendigen technologischen Neuerungen für die Erreichung der Klimaziele in der Industrie zu erreichen. Hintergrund ist das im Juni 2017 verabschiedete sehr ambitionierte Klimaschutzgesetz: Bis 2045 möchte Schweden die erste CO₂-neutrale Volkswirtschaft der Welt sein. Derzeit stammen rund ein Drittel der schwedischen Emissionen aus der Industrie. Da diese in den vergangenen Jahren ihre Effizienz bereits deutlich gesteigert ist, ohne zusätzliche Maßnahmen aber steigende Emissionen in den kommenden Jahren zu erwarten sind, sind neue technische Lösungen zu finden. Mit rund 300 Mio. SEK (rund 30 Mio. Euro) jährlich fördert die schwedische Regierung ab 2018 Maßnahmen, die helfen sollen die prozessbedingten Emissionen in der Industrie deutlich zu senken. Das Programm ist langfristig aufgelegt und soll bis zum Jahr 2040 in Kraft bleiben. Finanziert werden nicht nur die Investitionen der Industrie in die Technologie, sondern beispielsweise auch vorbereitende Studien.

Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries



Implications for Policy,
Industry and Research

Stefan Lechtenböhrer
Dagmar Kiyar
Katharina Knoop

With contributions from:
Dolf Gielen
Eva Blitt
Henning Wilts / Holger Berg
Brigitte Huckestein
Eva Swedling

Die Landesregierung
Nordrhein-Westfalen



EnergieAgentur NRW

Wuppertal
Institut

Abbildung 52 Titelbild der Broschüre „Deep Decarbonisation of Materials Processing Industries“

Quelle: Wuppertal Institut

Die einzelnen Materialien (Image-Broschüre, ausführliche Broschüre und Film) wurden und werden vom Wuppertal Institut dazu genutzt, das Thema Deep Decarbonisation mit besonderem Blick auf die Industrie in Nordrhein-Westfalen in die Öffentlichkeit zu tragen:

- Informationen zu dem Thema und den Produkten über
 - Die Themenseiten des Wuppertal Instituts
(<https://wupperinst.org/themen/wirtschaft/energieintensive-industrie/> und
<https://wupperinst.org/en/topics/economy/energyintensive-industry/>)
 - Twitter (über den offiziellen Twitter-Kanal des Wuppertal Instituts
<https://twitter.com/Wupperinst>)
 - Über die WI-Seiten bei Xing und LinkedIn
 - Newsletter des Wuppertal Institut (rund 10,000 Abonnenten in deutsch und englisch insgesamt)
 - Interne Verteilung in die Fachöffentlichkeit der WI eigenen Projekte mit wissenschaftlichen Partnern
 - Hinweise auf die Ergebnisse in WI-eigenen Publikationen und Vorträgen

Aufgrund der schnelllebigen inhaltliche Änderungen und der zunehmen elektronisch erfolgenden Kommunikation wurde im Verlaufe des Projektes auf eine Drucklegung der Broschüre verzichtet, entsprechende Finanzmittel wurden daher auch nicht abgerufen.

7 Literaturverzeichnis

- ACTL (o.J.):** The Alberta Carbon Trunk Line Project Fact Sheet.
- Åhman, M.; Nilsson, L. J.; Johansson, B. (2017):** Global climate policy and deep decarbonization of energy-intensive industries. *Climate Policy* 17(5)634–649. doi: 10.1080/14693062.2016.1167009.
- Alexis Michael Bazzanella; Florian Ausfelder (2017):** Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. DEHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Allwood, J. M.; Cullen, J. M.; Carruth, M. A. (2012):** Sustainable materials: with both eyes open ; [future buildings, vehicles, products and equipment - made efficiently and made with less new material]. Cambridge: UIT Cambridge.
- Armbruster, H.; Bikfalvi, A.; Kinkel, S.; Lay, G. (2008):** Organizational innovation: The challenge of measuring non-technical innovation in large-scale surveys 28644–657.
- Arnold, K.; Kobiela, G.; Pastowski, A. (2017):** Technologiebericht 4.3 Power-to-liquids/-chemicals innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/605D04BB3D300366E0539A695E860862/live/document/4.3_Power-to-liquids_chemicals.pdf
- Ausfelder, F.; Beilmann, C.; Bertau, M.; Bräuninger, S.; Heinzl, A.; Hoer, R.; et al. (2015):** Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung. *Chemie Ingenieur Technik* 87(1–2)17–89. doi: 10.1002/cite.201400183.
- Bazzanella und Krämer (2017):** DEHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie (Eds.), 2017. Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz - chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂: Ergebnisse der BMBF-Fördermaßnahme. DEHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V, Frankfurt am Main.
- BCG; Prognos (2018):** Klimapfade für Deutschland.
https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf
- BDEW (2018):** Kommentierung des Koalitionsvertrages zwischen CDU, CSU und SPD. Berlin.
https://www.bdew.de/media/documents/20180209_BDEW_Komentierung-Koalitionsvertrages-Sicht-Energiewirtschaft.pdf
- BDI (2015):** Positionspapier - Erfahrungen der deutschen Industrie zwei Jahre nach Programmstart von Horizont 2020. Berlin.
- BDI (2018):** Product Environmental Footprint (PEF): Industrie am weiteren Prozess angemessen beteiligen! Bundesverband der Deutschen Industri e. V.
<https://bdi.eu/artikel/news/product-environmental-footprint-pef-industrie-am-weiteren-prozess-angemessen-beteiligen/>
- BDI (o. J.):** Strukturelle Anforderungen der deutschen Industrie an das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Berlin.
https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/56B7B1C60A7A7B96E0539A695E865857/live/document/BDI_Energieforschung_Positionspapier_WEB.pdf

- Belitz, H. (2015):** Steuerliche Förderung von Forschung und Entwicklung – Erfahrungen aus dem Ausland.
https://www.diw.de/de/diw_01.c.520333.de/presse/diw_roundup/steuerliche_foerderung_von_forschung_und_entwicklung_erfahrungen_aus_dem_ausland.html
- Bender, M. (2017):** Synthetische Kraftstoffe aus Hüttengasen. 1. Konferenz zur Nachhaltigen, Chemischen Konversion in der Industrie. Düsseldorf: BASF SE.
- Bernstein, L.; Bosch, P.; Canziani, O.; Chen, Z.; Christ, R.; Davidson, O.; Hare, W. (2007):** Climate Change 2007: Synthesis Report. Assessment Report No. 4. Valencia, Spain: IPCC. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf. Last access: 20 November 2014.
- Bettermann, I.; Katarzynski, D.; Staudt, C. (2010):** Membranverfahren zur Auftrennung von gasförmigen und flüssigen Stoffgemischen. Erkrath, Dassel, Düsseldorf. <https://www.analytik-news.de/Fachartikel/Volltext/uniduesseldorf1.pdf>
- BMWi (2016):** Bekanntmachung der Änderung der Richtlinie für die Förderung von energieeffizienten und klimaschonenden Produktionsprozessen. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- BMWi (2017):** 6. Energieforschungsprogramm - Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.
<http://www.foerderdatenbank.de/Foerder-DB/Navigation/Foerderrecherche/suche.html?get=views;document&doc=7510&typ=RL>
- BMWi (2018):** Emissionshandel ist fit für 2030.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2018-01-emissionshandel-ist-fit-fuer-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- BMWi (o. J.):** Prüfung der Umwelt-, Sozial- und Menschenrechtsaspekte (USM).
<https://www.agaportal.de/main-navigation/exporte-exportkreditgarantien/verfahren-exportkreditgarantien/umwelt-sozialpruefung-exportkreditgarantien>
- BMWi (o. J.):** Bericht der Bundesregierung zur internationalen Kohlefinanzierung für den Wirtschaftsausschuss des Deutschen Bundestages.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bericht-der-bundesregierung-zur-internationalen-kohlefinanzierung-fuer-den-wirtschaftsausschuss-des-deutschen-bundestages.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- BMWi (o. J.):** Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe.
<https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/industrie-und-gewerbe>
- BNetzA (o. J.):** Netzausbau-Verfahren. Bundesnetzagentur.
https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Poster_Beteiligung.pdf?__blob=publicationFile
- Boin (2000):** Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie, Monographien / Umweltbundesamt. Umweltbundesamt, Wien.
- Boomsma, P.; Oosterhaven, J. (1992):** A DOUBLE-ENTRY METHOD FOR THE CONSTRUCTION OF BI-REGIONAL INPUT-OUTPUT TABLES*. Journal of Regional Science 32(3)269–284. doi: 10.1111/j.1467-9787.1992.tb00186.x.
- Boons, F.; Chertow, M.; Park, J.; Spekkink, W.; Shi, H. (2016):** Industrial Symbiosis Dynamics and the Problem of Equivalence Proposal for a Comparative Framework. Journal of Industrial Ecology 21938–952.
- Branson, R. (2015):** Re-constructing Kalundborg: the reality of bilateral symbiosis and other insights. Journal of Cleaner Production 1124344–4352.

- Brems, A.; Dewil, R.; Baeyens, J.; Zhang, R. (2013):** Gasification of plastic waste as waste-to-energy or waste-to-syngas recovery route. *Natural Science* 05(06)695–704. doi: 10.4236/ns.2013.56086.
- Brinner, A.; Schmidt, M.; Schwarz, S.; Wagener, L.; Zuberbühler, U. (2018):** Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff), Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.), Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- Brunke (2017):** Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland: Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven. Stuttgart.
- Bundesregierung (2016):** Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2016. Berlin.
- Bundesregierung (2017):** Zwischenevaluierung von Horizont 2020 - Positionspapier der Bundesregierung. Berlin.
https://www.bmbf.de/files/2017_01_12_Positionspapier_Zwischenevaluierung_Horizont%202020.pdf
- Bundesregierung (o. J.):** Tipps und Wegweiser zur Forschungs- und Innovationsförderung. <https://www.foerderinfo.bund.de/de/profil-752.php>
- Bundestag (2015):** © 2015 Deutscher Bundestag WD 4 - 3000 - 059/15 Ausgewählte Fragen zu einer steuerlichen Förderung von Forschung und Entwicklung (FuE) - Internationaler Vergleich, Abgrenzungsfragen, Administration. Berlin.
<https://www.bundestag.de/blob/408034/8d53abf5583ec23147bcc86e7dde53c9/wd-4-059-15-pdf-data.pdf>
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (2013):** Gasstatistik 133. Bundesrepublik Deutschland - Berichtsjahr 2011. Bonn: Wirtschafts- u. Verlagsges. Gas u. Wasser.
- Burchart, D.; Pichlak, M.; Kruczek, M. (2015):** Innovative Technologies For Greenhouse Gas Emission Reduction In Steel Production. *METALURGIJA* 55(55)119–122.
- Bürkle und Neises-von Puttkamer (2015):** Mit Sonnenenergie Aluminium schmelzen – Deutsche und südafrikanische Forscher entwickeln neues Verfahren.
- CAN (2018):** All you need to know about the last phase of the Energy Efficiency Directive negotiations. Climate Action Network Europe.
<http://www.caneurope.org/publications/blogs/1552-all-you-need-to-know-about-the-last-phase-of-the-energy-efficiency-directive-negotiations>
- Carbon Market Watch (2015):** Carbon leakage myth buster.
<https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2015/10/CMW-Carbon-leakage-myth-buster-WEB-single-final1.pdf>
- Carbon Pulse (2017):** Italian lawmakers urge EU to introduce carbon border adjustment to protect industry. <https://carbon-pulse.com/39798/>
- CDU, CSU und SPD (2018):** Ein neuer Aufbruch für Europa Eine neue Dynamik für Deutschland Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Berlin.
https://www.cdu.de/system/tdf/media/dokumente/koalitionsvertrag_2018.pdf?file=1
- Cefic (o. J.):** Cefic views on the circular economy. Brüssel: European Chemical Industry Council. <http://www.cefic.org/Documents/RESOURCES/PositionPapers/Circular-Economy-Cefic-Position-Paper-2015.pdf>
- CEMBUREAU (o. J.):** Low carbon economy. <https://cembureau.eu/policy-focus/climate-energy/>

- ChemCologne (o. J.):** Erfolgsfaktor für die Region - Verbundproduktion.
<http://www.chemcologne.de/investieren-im-rheinland/verbundproduktion.html#prettyPhoto>
- Chertow, M. (2000):** Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment* 313–337. doi: 10.1146/annurev.energy.25.1.313.
- Chertow, M. (2007):** „Uncovering“ industrial symbiosis. *Journal of industrial ecology* 11–30.
- Chertow, M.; Ehrenfeld, J. (2012):** Organizing Self-Organizing Systems - Toward a Theory of Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology* 16(1)13–27. doi: 10.1111/j.1530-9290.2011.00450.x.
- Condon, M.; Ignaciuk, A. (2013):** Border Carbon Adjustment and International Trade: A Literature Review. Paris: OECD Publishing. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/5k3xn25b386c-en.pdf?expires=1525784947&id=id&accname=guest&checksum=2301080274AF16F57F1C493AA9BBAECB>
- Corder, G. D.; Golev, A.; Fyfe, J.; King, S. (2014):** The Status of Industrial Ecology in Australia: Barriers and Enablers. *Resources* 3340–361. doi: 10.3390/resources3020340.
- Daddi, T.; Iraldo, F.; Frey, M.; Gallo, P.; Gianfrate, V. (2015):** Regional policies and eco-industrial development: the voluntary environmental certification scheme of the eco-industrial parks in Tuscany (Italy). *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.060.
- Dalhammar, C.; Machacek, E.; Bundgaard, A.; Zacho, K. O.; Remmen, A. (2014):** Addressing resource efficiency through the Ecodesign Directive: a review of opportunities and barriers.
- Deaton, J. (2017):** California seeks to lead on emissions with program that will boost U.S. steel - California lawmakers are debating a bill that could increase demand for U.S. steel. <https://thinkprogress.org/buy-clean-california-act-3b354e8d5e71/>
- DEG (2015):** Arbeitskraft und Ressourcen vor Ort erfolgreich nutzen - Ein Zementhersteller nutzt das Potenzial lokaler und nationaler Arbeitskraft und Ressourcen und kurbelt damit die Entwicklung in Namibia an. Deutsche Investitions- und Entwicklungsgesellschaft. https://www.deginvest.de/DEG-Dokumente/Die-DEG/Was-wir-bewirken/Fallstudie_OHORONGO_DE_2015_09.pdf
- dena (2017):** Gemeinsam für mehr Energieeffizienz. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Strom/Initiative_EnergieEffizienz_-_Unternehmen_und_Institutionen/IEEN-Informationenflyer_Web.pdf
- Der Betrieb (2017):** BMF: Lizenzschanke gegen Steuergestaltung internationaler Konzerne. https://der-betrieb.owlit.de/document/zeitschriften/der-betrieb/2017/heft-04/steuerrecht/nachrichten/bmf-lizenschanke-gegen-steuergestaltung-int/MLX_0264?authentication=none
- Deutsche Wirtschaftsnachrichten (2018):** Polen fordert US-Sanktionen gegen Nord Stream 2. <https://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/2018/01/29/polen-fordert-us-sanktionen-gegen-nord-stream-2/>
- Dewald, U.; Achternbosch, M. (2016):** Why more sustainable cements failed so far? Disruptive innovations and their barriers in a basic industry. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1915–30. doi: 10.1016/j.eist.2015.10.001.
- DIN 51624:2008-02: (2008):** Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Erdgas – Anforderungen und Prüfverfahren. <https://www.beuth.de/de/norm/din-51624/104466710>

DVGW (2015): Wo aus Wind und Sonne grüner Strom wird - DVGW.

Dütschke, E.; Wohlfarth, K.; Höller, S.; Viebahn, P.; Schumann, D.; Pietzner, K. (2016): Differences in the public perception of CCS in Germany depending on CO₂ source, transport option and storage location. International Journal of Greenhouse Gas Control 53(10)149–159. doi: 10.1016/j.ijggc.2016.07.043.

ECRA (2017a): CCS-ECRA-online-Dez17 [WWW Document]. CCS - Eur. Cem. Res. Acad. URL <https://ecra-online.org/research/ccs> (accessed 4.23.18).

ECRA (2017b): Presentations and Posters from the 2nd ECRA/CEMCAP Workshop on CCS 2017 in Düsseldorf [WWW Document]. Present. Posters ECRACEMCAP Workshop 2017. URL <https://ecra-online.org/research/ccs/presentations-and-posters/> (accessed 4.24.18).

ECRA (2017c): Development of state of the art-techniques in cement manufacturing: Trying to Look Ahead (2017) (CSI/ECRA-Technology Papers). European Cement Research Academy (ECRA), Düsseldorf, Geneva.

ECRA (2012): ECRA CCS Project – Report on Phase III (Technical Report No. TR-ECRA-119/2012). European Cement Research Academy (ECRA), Düsseldorf, Geneva.

Ecspp (o. J.): An Overview of the Pipeline Networks of Europe.

EID (2012): Argumente zur Energiekostendebatte. Berlin. http://www.energieintensive.de/fileadmin/user_upload/2310_01_WVM_Argue_Cards.pdf

Eisenhauer, J.; Garland, B. (2003): Understanding R&D Investment Trends in Energy-Intensive Industries. https://aceee.org/files/proceedings/2003/data/papers/SS03_Panel6_Paper_06.pdf#page=1

Elkerbout, M. (2017): Transforming Energy-Intensive Industries - Reflections on innovation, investment and finance challenges. Brüssel. https://www.ceps.eu/system/files/PI2017_44ME_TransformingEnergyIntensiveIndustries.pdf

Energiestatistik-nrw-de (o. J.): Erdgas. <http://www.energiestatistik-nrw.de/themen/gas>

EU Parliament (2018): Revision of the EU Emission Trading System for the 2021-2030 Period. <http://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-resilient-energy-union-with-a-climate-change-policy/file-revision-of-the-eu-ets-2021-2030>

Europäischer Rat (2017): Reform des EU-Emissionshandelssystems. <http://www.consilium.europa.eu/de/policies/climate-change/reform-eu-ets/>

European Commission (2016): Ajos BTL.

European Commission (2016a): Policy background. http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/policy_footprint.htm

European Commission (2016b): Ajos BTL. https://setis.ec.europa.eu/system/files/bio_-_ajos_btl_-_fi_-_2016_factsheet_o.pdf

European Commission (2017): Finance for innovation: Towards the ETS Innovation Fund. https://ec.europa.eu/clima/events/articles/0115_en

European Commission (2018): A new, modern Multiannual Financial Framework for a European Union that delivers efficiently on its priorities post-2020. Brüssel. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52018DC0098&from=EN>

European Commission (o. J.): Iron and Steel Production. <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/i&s.html>

- European Commission (o. J.):** Trans-European Networks for Energy.
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/infrastructure/trans-european-networks-energy>
- European Commission; Directorate-General for Research and Innovation (2018):** Mission-oriented research and innovation policy a RISE perspective.
- Fan, Y.; Qiao, Q.; Fang, L.; Yao, Y. (2016):** Emergy analysis on industrial symbiosis of an industrial park—A case study of Hefei economic and technological development area. *Journal of Cleaner Production* 141. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.159.
- Fischedick, M.; Marzinkowski, J.; Winzer, P.; Weigel, M. (2014):** Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. *Journal of Cleaner Production* 84 563–580. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.063.
- Fischedick, M.; Roy, J.; Abdel-Aziz, A.; Acquaye, A.; Allwood, J.; Ceron, J.-P.; et al. (2014b):** Industry. Climate change 2014 : mitigation of climate change ; contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Fischedick, M.; Fink, T. (2018):** P2F Hot Spots Power-to-Fuels an Hot Spots erneuerbarer Energien zur Unterstützung der Zielerreichung im Rahmen der Energiewende. Abschlussbericht, unveröffentlicht. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH.
- Forsberg, C. W. (2006):** Assessment of Nuclear-Hydrogen Synergies with Renewable Energy Systems and Coal Liquefaction Processes. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.133.9925&rep=rep1&type=pdf>
- Fraunhofer ISI; Wuppertal Institut; Forschungszentrum Jülich (2014):** Akzeptanz von CO₂-Speicherprojekten in Deutschland – Eine Tiefenanalyse basierend auf Fallstudien. Karlsruhe. http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4677724.pdf
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung; Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Hummen, T.; Erdmann, L.; Tercero Espinoza, L. A.; et al. (2016):** Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016: Auftragsstudie.
- Frosch, R. A.; Gallopoulos, N. E. (1989):** Strategies for Manufacturing. *Scientific America* 261144–152.
- Geibler, J. von (2010):** Nachhaltigkeit in globalen Wertschöpfungsketten : nicht-staatliche Standards als Steuerungsinstrument im internationalen Biomassehandel. Marburg: Metropolis-Verlag.
- Görner, K.; Lindenberg, D. (2015):** Technologiecharakterisierungen in Form von Steckbriefen. Beitrag zum Vorprojekt Virtuelles Institut: Strom zu Gas und Wärme – Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System. Essen, Köln, Wuppertal, Jülich, Bochum: Gas-Wärme-Institut Essen; Energiewirtschaftliches Institut zu Köln; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Forschungszentrum Jülich; Ruhr-Universität Bochum.
https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/Virtuelles_Institut_Strom_zu_Gas_und_Waerme_Anlage_Steckbriefsammlung.pdf
- Görner, K.; Lindenberg (2018):** Virtuelles Institut „Strom zu Gas und Wärme“; Volume III Pfadanalysen: Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System, Abschlussbericht des Hauptprojekts (2015 – 2017).

- Guminski, A. (2015):** Transition Towards an “All-electric World” – Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System (Masterthesis). Masterarbeit. München: Technische Universität München (TUM).
https://www.ffegmbh.de/images/stories/pressemeldung/634_GEE-Preis/Masterarbeit_AllElectricWorld_Guminski_GEE.pdf. Last access: 27 März 2017.
- Günter und Beer (2014):** Hybrides Ofenkonzept für Aluminium-Stangenpresslinien. ewi, Elektrowärme international 33–37.
- Hauck, H. (2017):** Aluminium-Flex-Elektrolyse als Virtueller Stromspeicher. Vortrag im Projekt Synergie. Darmstadt. <http://docplayer.org/41617229-Aluminium-flex-elektrolyse-als-virtueller-stromspeicher.html>
- Hauke, S. (2015):** Organophile Nanofiltration. Gehalten auf der Lunch & Learn, Siemens, Frankfurt am Main.
- Henning, H.-M.; Palzer, A. (2015):** Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050.
- Hirsch (2013):** Research Fund for Coal and Steel. New blast furnace process (ULCOS). Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Hita (2016):** European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. Iron production by electrochemical reduction of its oxide for high CO₂ mitigation (IERO) final report. Publications Office, Luxembourg.
- Hölling (o.J.):** Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff.
- Hölsgens, R.; Lübke, S.; Hasselkuß, M. (2018):** Social innovations in the German energy transition: an attempt to use the heuristics of the multi-level perspective of transitions to analyze the diffusion process of social innovations. Energy, Sustainability and Society 8(1)8. doi: 10.1186/s13705-018-0150-7.
- Holub, H.-W.; Schnabl, H. (1994):** Input-Output-Rechnung: Input-Output-Tabellen: Einführung. Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (3., unveränd. Aufl.). München: Oldenbourg.
- Holzer, K. (2016):** WTO law issues of emissions trading. World Trading Institute. https://www.wti.org/media/filer_public/6e/88/6e884b29-f5e2-4a25-85a6-a6edb5c25ed9/working_paper_short_version.pdf
- Horn, H.; Mavroidis, P. C. (2011):** To B(TA) or not to B(TA)? - On the Legality and Desirability of Border Tax Adjustments from a Trade Perspective. http://www.ferdi.fr/sites/www.ferdi.fr/files/publication/fichiers/P21_Horn_Mavroidis_WEB.pdf
- Hybrid (o.j):** Hybrid.
- IBU-tec (2018):** IBU-tec - Drehrohröfen-Expertise für Versuche und Produktion [WWW Document]. URL www.ibu-tec.de/anlagen/drehrohröfen/ (accessed 5.15.18).
- ICAP (2016):** Emissions Trading Worldwide: Status Report 2016. Berlin: International Carbon Action Partnership. https://icapcarbonaction.com/images/StatusReport2016/ICAP_Status_Report_2016_Online.pdf
- ICAP (2018):** ETS Detailed Information – China. International Carbon Action Partnership. [https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&systems\[\]=55](https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&systems[]=55)
- ICCA; ECOFYS (2017):** Greenhouse gas emission reductions enabled by products from the chemical industry. Utrecht. <https://www.ecofys.com/files/files/ecofys-icca-2017-avoided-emissions-roadmap.pdf>

- ICCA; WBCSD (2013):** Guidelines from the chemical industry for accounting for and reporting greenhouse gas (GHG) emissions avoided along the value chain based on comparative studies.
- IEA (2017):** Energy Technology Perspectives - catalysing energy technology transformations. International Energy Agency.
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives2017ExecutiveSummaryEnglishversion.pdf>
- IEAGHG (2008):** CO₂ Capture in the Cement Industry (Technical Study No. 2008/3). International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham.
- IPCC (2014):** Climate Change 2014. IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- IREES (2017):** Klimaschutz durch Energieeffizienz II: Konzept zur Erhöhung der Energieeffizienz und Erschließung von Treibhausgas- Minderungspotenzialen in den Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen - Herausforderungen und Chancen des Transformationsprozesses in der deutschen Industrie bis 2050. Karlsruhe, Berlin. http://www.irees.de/irees-wAssets/docs/publications/projektbericht-report/170412_Transformationsprozess-der-Industrie-2050.pdf
- IT.NRW (2014):** Energiebilanz und CO₂-Bilanz in Nordrhein-Westfalen 2012. Statistik No. Kennziffer E IV – j/12. Statistische Berichte. Düsseldorf: IT.NRW - Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Geschäftsbereich Statistik. www.energiestatistik-nrw.de/medien/downloads/Energiebilanz_2012.pdf. Last access: 20 April 2015.
- IT.NRW (2018):** NRW-Exporte waren im Februar um 6,8 Prozent höher als ein Jahr zuvor. Düsseldorf.
https://www.it.nrw.de/presse/pressemitteilungen/2018/pres_113_18.html
- Jaroni, B.; Friedrich, B. (o. J.):** Notwendigkeit der Entkopplung von Pyrolyse und Schmelzen beim Al Recycling. Aachen, Bonn. http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/old/images/pages/publikationen/paeper_energiee_id_7233.pdf
- Jens Günther; Harry Lehmann; Ullrich Lorenz; Katja Purr (2017):** Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Joachim Nitsch (2016):** Die Energiewende nach COP 21 - Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung, Kurzexpertise. Stuttgart: im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energien e.V.
- Joachim Nitsch (2017):** Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt - Aktuelle Szenarien 2017 der deutschen Energieversorgung. Stuttgart.
- Kemp, R.; Pearson, P. (2007):** Final report MEI project about measuring eco- innovation. <https://www.oecd.org/env/consumption-innovation/43960830.pdf>
- Kobiela, G.; Vallentin, D. (2016):** Wertschöpfungsketten in NRW im Kontext der Energiewende: Eine Metaanalyse bezüglich Stahl, polymeren Werkstoffen und dem Anlagenbau in der erneuerbaren Energiewirtschaft. Wuppertal Papers.
<https://www.econstor.eu/handle/10419/147521>. Last access: 11 April 2017.
- KOM (2011):** A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. Brüssel. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0112>
- KOM (2015):** Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Brüssel. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=EN>

- KOM (2018):** A new, modern Multiannual Financial Framework for a European Union that delivers efficiently on its priorities post-2020. Brüssel. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52018DC0098&from=EN>
- Kortum, S.; Weisbach, D. J. (2017):** The Design of Border Adjustments for Carbon Prices. *National Tax Journal* 70(2)421–446. doi: 10.17310/ntj.2017.2.07.
- Krieg, D. (2012):** Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt. Jülich: Forschungszentrum Jülich.
- Kronenberg, T.; Többen, J. (2011):** Regional input-output modelling in Germany: The case of North Rhine-Westphalia. <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/35494/>
- LANUV NRW (2012):** Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 1 - Windenergie LANUV-Fachbericht 40. Recklinghausen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30040a.pdf
- LANUV NRW (2013):** Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 2 - Solarenergie LANUV-Fachbericht 40. Recklinghausen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30040b.pdf
- LANUV NRW (2014):** Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 3 - Biomasse-Energie LANUV-Fachbericht 40. Recklinghausen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30040c.pdf
- LANUV NRW (2015):** Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 4 - Geothermie LANUV-Fachbericht 40. Recklinghausen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_40-Teil4-Geothermie_web.pdf
- LANUV NRW (2017):** Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 5 - Wasserkraft LANUV-Fachbericht 40. Recklinghausen. https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_commercedownloads/Fachbericht_40_Teil_5-Wasserkraft.pdf
- LBEG (2016):** Untertage-Gasspeicherung in Deutschland. ERDÖL ERDGAS KOHLE 11(132)409–417.
- Lechtenböhmer, S.; Arnold, K.; Espert, V.; Höller, S.; Schneider, C.; Tenbergen, J. (2015a):** Plattform Klimaschutz und Industrie NRW (unveröffentlicht). Leverkusen und Wuppertal: Ministerium für Klima, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz.
- Lechtenböhmer, S.; Nilsson, L. J.; Åhman, M.; Schneider, C. (2016):** Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. *Energy* 1151623–1631. doi: 10.1016/j.energy.2016.07.110.
- Lechtenböhmer, S.; Schneider, C.; Samadi, S. (2017):** Energy efficiency quo vadis? – the role of energy efficiency in a 100% renewable future. *ECEEE 2017 SUMMER STUDY* 171–181.
- Lechtenböhmer, S.; Schneider, C.; Yetano Roche, M.; Höller, S. (2015b):** Re-Industrialisation and Low-Carbon Economy—Can They Go Together? Results from Stakeholder-Based Scenarios for Energy-Intensive Industries in the German State of North Rhine Westphalia. *Energies* 8(10)11404–11429. doi: 10.3390/en81011404.
- Lombardi, R.; Laybourn, P. (2012):** Redefining Industrial Symbiosis - Crossing Academic–Practitioner Boundaries. *Journal of Industrial Ecology* 16(1)28–37. doi: 10.1111/j.1530-9290.2011.00444.x.

- Macron, E. (2017):** Initiative pour l'Europe - Discours d'Emmanuel Macron pour une Europe souveraine, unie, démocratique.
<http://www.elysee.fr/declarations/article/initiative-pour-l-europe-discours-d-emmanuel-macron-pour-une-europe-souveraine-unie-democratique/>
- Mantese, G. C.; Amaral, D. C. (2017):** Comparison of industrial symbiosis indicators through agent-based modeling. *Journal of Cleaner Production* 1401652–1671. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.142.
- Markewitz, P.; Zhao, L.; Robinius, M. (2017):** Technologiebericht 2.3 CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
[https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/605CD6257D2946BFE0539A695E8620A8/live/document/2.3_CO₂-Abscheidung_und_Speicherung__CCS_.pdf](https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/605CD6257D2946BFE0539A695E8620A8/live/document/2.3_CO2-Abscheidung_und_Speicherung__CCS_.pdf)
- Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Tercero Espinoza, L., Angerer, G., Marwede, M. & Benecke, S. (2016):** Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, 2016. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016: Auftragsstudie.
- Massard, G.; Jacquat, O.; Zürcher, D. (2014):** Internationale Studie über Öko-Innovationsstärke. Erkenntnisse zur räumlichen Dimension von Öko-Innovationen. Umwelt-Wissen Nr. 1402: 53pp. Bern, Schweiz: Bundesamt für Umwelt und ERA-NET ECO INNOVERA.
- Mazzucato, M.; European Commission; Directorate-General for Research and Innovation (2018):** Mission-oriented research & innovation in the European Union a problem-solving approach to fuel innovation-led growth.
- McDowall, W. (2012):** Technology roadmaps for transition management: The case of hydrogen energy *Technological Forecasting and Social Change*(79)530–542.
- McGlade, C.; Ekins, P. (2015):** The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature* 517(7533)187–190. doi: 10.1038/nature14016.
- McKibben, B. (2012):** Global Warming's Terrifying New Math.
<https://www.rollingstone.com/politics/news/global-warmings-terrifying-new-math-20120719>
- McKibbin, W. J.; Morris, A. C.; Wilcoxon, P. J.; Liu, W. (2017):** THE ROLE OF BORDER CARBON ADJUSTMENTS IN A U.S. CARBON TAX. Washington.
https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2017/05/es_20170531_carbontaxborderadjustment.pdf
- Mehling, M.; van Asselt, H.; Das, K.; Droege, S.; Verkuijl, C. (2017):** Designing Border Carbon Adjustments for Enhanced Climate Action. *Climate Strategies*.
https://climatestrategies.org/wp-content/uploads/2017/12/CS_report-Dec-2017-4.pdf
- Meinshausen, M.; Meinshausen, N.; Hare, W.; Raper, S. C. B.; Frieler, K.; Knutti, R.; Frame, D. J.; Allen, M. R. (2009):** Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature* 458(7242)1158–1162. doi: 10.1038/nature08017.
- Müller-Syring, G.; Henel, M. (2014):** Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierten Anlagen. No. Abschlussbericht DVGW-Förderkennzeichen G 1-02-12. Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
http://www.dvgw-innovation.web33.dvgw-sc.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1_02_12.pdf. Last access: 30 März 2016.
- MVV (o. J.):** Raffinerien und Pipelines. <https://www.mvv.de/raffinerien-und-pipelines/>
- Nordlander (2017):** THE HYBRIT PROJECT.

- Ren T.; Patel M. K.; Blok K. (2008):** Steam cracking and methane to olefins: Energy use, CO₂ emissions and production costs. *Energy* 33, 817–833.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.01.002>
- Rheinische Post Online (2018):** "Autobauer müssen Diesel auf ihre Kosten nachrüsten".
https://rp-online.de/politik/deutschland/svenja-schulze-im-interview-die-autobauer-muessen-auf-ihre-kosten-nachruesten_aid-16588183
- Rombach (2015):** Experteninterview zur Ermittlung industrieller PtH-Potenziale in Deutschland/NRW.
- Scheer, D.; Renn, O. (2014):** Public Perception of geoengineering and its consequences for public debate. *Climatic Change* 125(3–4)305–318. doi: 10.1007/s10584-014-1177-1.
- Schmidt (2018):** Technologiebericht 4.2a Power-to-gas (Methanisierung chemisch-katalytisch), Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.), Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- Schneider, C.; Höller, S.; Lechtenböhmer, S. (2014):** Re-industrialisation and low carbon economy – can they go together? Results from transdisciplinary scenarios for energy intensive industries. doi: 10.13140/2.1.4291.6483.
- Schneider, C.; Schüwer, D. (2017):** Technologiebericht 6.4 Low-carbon und ressourceneffiziente Industrie. Technologiebericht. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.). <https://www.energieforschung.de/energie-und-ressourceneffizienz-industrie>. Last access: 11 Januar 2018.
- Schröder, A.; Zimmermann, K. (2014):** Erstellung regionaler Input-Output-Tabellen. Berlin. http://www.klimzug-radost.de/sites/default/files/RADOST-Bericht_33_Regionale%20Input-Output-Tabellen.pdf
- Schüwer, D.; Arnold, K.; Bienge, K.; Bringezu, S.; Echternacht, L.; Esken, A.; et al. (2015):** CO₂ reuse NRW: evaluating gas sources, demand and utilization for CO₂ and H₂ within the North Rhine-Westphalia area with respect to gas qualities; final report. supported by Climate KIC. Wuppertal; Leverkusen: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Covestro Deutschland AG.
<http://epub.wuppertalinst.org/frontdoor/index/index/docId/6010>. Last access: 19 April 2016.
- SDSN; IDDRI (2015):** Pathways to deep decarbonisation. 2015 synthesis report.
http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/12/DDPP_2015_REPORT.pdf. Last access: 03 Dezember 2015.
- Snæbjörnsdóttir, S. Ó.; Gislason, S. R. (2016):** CO₂ Storage Potential of Basaltic Rocks Offshore Iceland. *Energy Procedia* 86371–380. doi: 10.1016/j.egypro.2016.01.038.
- Stahl-online.de (2013):** Stahltechnologie: Roheisen und Rohstahlherstellung.
http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/stahlherstellung_1.jpg
- Statistisches Bundesamt (2010):** Input-Output- rechnung im Überblick. Wiesbaden.
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrrechnungen/InputOutputRechnung/InputOutputRechnungUeberblick5815116099004.pdf?__blob=publicationFile
- Stel (2014):** Research Fund for Coal and Steel. ULCOS top gas recycling blast furnace process (ULCOS TGRBF) final report. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- TATA Steel. (o.J.):** HISARNA: Bahnbrechend für die Stahlindustrie.

- The Guardian (2015):** Ban Ki-moon urges governments to invest in low carbon energy.
<https://www.theguardian.com/environment/2015/jun/02/ban-ki-moon-urges-governments-invest-low-carbon-energy#img-1>
- Thyssenkrupp AG (2018):** Carbon2Chem [WWW Document]. thyssenkrupp. URL
www.thyssenkrupp.com/de/carbon2chem
- UBA (2014a):** Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Climate Change 07/2014. Dessau: Umweltbundesamt.
www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate-change_07_2014_treibhausgasneutrales_deutschland_2050_o.pdf. Last access: 09 Februar 2015.
- UBA (2014b):** Netzausbau. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/netzausbau#textpart-1>
- UBA (2014c):** Gesetzesentwurf der Bundesregierung eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Gesetzes zur Errichtung eines Sondervermögens „Energie- und Klimafonds“. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/gesetzesentwurf_der_bundesregierung_eines_zweiten_gesetzes_zur_aenderung_des_gesetzes_zur_errichtung_eines_sondervermoegens_energie-_und_klimafonds_stellungnahme.pdf
- UBA (2014d):** Umweltbelange und raumbezogene Erfordernisse bei der Planung des Ausbaus des Höchstspannungs- Übertragungsnetzes. Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_12_2014_komplett_16_5_2014.pdf
- UBA (2016):** Konzeption für eine Ressourcenverbrauchs- pflichtkennzeichnung für Produkte. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2016-12-05_ressourcenverbrauchs-kennzeichnung_endbericht_final_002.pdf
- UBA (2017a):** Emissionsentwicklung 1990 bis 2015 mit Nahzeitprognose 2016.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1>
- UBA (2017b):** Weiterentwicklung der Energieeffizienzpolitiken zur Erreichung der Klimaschutzziele der Europäischen Union bis 2050. Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-09-04_climate-change_21-2017_energieeffizienzpolitik.pdf
- UBA (2018):** The Innovation Fund: How can it support low-carbon industry in Europe? Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-13_climate-change_06-2018_innovation-fund.pdf
- VCI (2016):** Die Entwicklung der chemischen Industrie. Frankfurt: Verband der Chemischen Industrie. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2016-12-08-matrix-entwicklung-der-chemischen-industrie-bis-chemie-4-0-interaktiv.pdf>
- VDZ und WI (2015):** Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der Zementindustrie - Analyse des Status quo und Perspektiven. Verein Deutscher Zementwerke e.V. / Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Düsseldorf/Wuppertal.
- Velte, D.; Kuittinen, H.; European Commission; Directorate-General for Research and Innovation (2018):** Mission-oriented R&I policies in-depth case studies: Energiewende (Germany) : case study report.

- VI Transformation (2016):** Chemie- und Stahlindustrie im Zeichen der Energiewende - Chancen cross-industrieller Kooperationen. Dokumentation des Workshops. Düsseldorf: Virtuelles Institut „Transformation - Energiewende NRW“; Wuppertal Institut. <http://www.vi-transformation.de>
- VI Transformation (2017):** Branchen übergreifende Kooperationen in NRW im Zeichen der Energiewende – Die Bedeutung regionaler Austausch- und Netzwerkstrukturen. Dokumentation des Workshops. Düsseldorf: Virtuelles Institut „Transformation - Energiewende NRW“; Wuppertal Institut. <http://www.vi-transformation.de>
- WBCS (2018):** Global Cement Technology Roadmap - Low-carbon transition in cement industry [WWW Document]. Glob. Cem. Technol. Roadmap - Low-Carbon Transit. Cem. Ind. URL <http://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/climate-protection/technology-roadmap> (accessed 4.24.18).
- Weigel M.; Fishedick M.; Marzinkowski J.; Winzer P. (2016):** Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies. *J. Clean. Prod.* 112, 1064–1076. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.132>
- Wesseling, J. H.; Lechtenböhmer, S.; Åhman, M.; Nilsson, L. J.; Worrell, E.; Coenen, L. (2017):** The transition of energy intensive processing industries towards deep decarbonization: Characteristics and implications for future research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (79)1303–1313.
- White (2015):** Emerging “Green” Technology for Electric Melting.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; et al. (2017):** Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Karlsruhe. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-potentiale-hybridoberleitungs-lkw.pdf?__blob=publicationFile
- World Auto Steel (o. J.):** ULSAB Programme Report. <https://www.worldautosteel.org/projects/ulsab/ultralight-steel-auto-body-ulsab-programme/>
- World Bank (2017):** World Bank Group Announcements at One Planet Summit. http://www.worldbank.org/en/news/press-release/2017/12/12/world-bank-group-announcements-at-one-planet-summit?CID=ECR_FB_worldbank_EN_EXT_OnePlanet
- World Bank; ECOFYS (Firm) (2015):** State and trends of carbon pricing 2015. Washington, DC: World Bank Group. <http://elibrary.worldbank.org/doi/book/10.1596/978-1-4648-0725-1>. Last access: 09 Mai 2018.
- World Business Council for Sustainable Development; World Resources Institute (2011):** Greenhouse gas protocol: product life cycle accounting and reporting standard. Washington, DC; Geneva, Switzerland: World Resources Institute ; World Business Council for Sustainable Development.
- Wuppertal Institut (2015):** Einschätzung der Berichterstattungslage und konzeptionelle Überlegungen zur Ermittlung von ressourcenbezogenen Indikatoren für NRW aus wissenschaftlicher Sicht (Konzeptpapier). Wuppertal. https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/NHS_NRW_AP5-2_Ressourcenbezogene_Indikatoren.pdf
- Wuppertal Institut (2017):** Eine erste Bewertung der Klimakonferenz COP23 in Bonn. Wuppertal. https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/publications/COP23_First_Assessment_de.pdf

Wuppertal Institut (2018): An assessment of the 23rd Climate Change Conference COP23 in Bonn. Wuppertal.

Wuppertal Institut (2018): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Wuppertal Institut (o. J.): CCS-Chancen Chancen für und Grenzen der Akzeptanz von CCS in Deutschland. <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/476/>

Wuppertal Institut (o. J.): NRW Climate Lounge Veranstaltungsreihe zur COP23 im Bonner Post Tower. <https://wupperinst.org/a/wi/a/s/ad/4033/>

WWF (2016): EU-Emissionshandel. <https://www.wwf.de/themen-projekte/klima-energie/klimaschutz-und-energiewende-in-europa/eu-emissionshandel/>


Yu, C.; Davis, C.; Dijkema, G. P. J. (2013): Understanding the Evolution of Industrial Symbiosis Research - A Bibliometric and Network Analysis (1997–2012). *Journal of Industrial Ecology* 18(2)280–293. doi: 10.1111/jiec.12073.

Zementexperte (2017): Experten-Interview am 09.02.2017 im Rahmen des Projektes „Virtuelles Institut: Strom zu Gas und Wärme - Intelligente Flexibilisierung des Energiesystems in NRW“ mit Experten aus der Zementindustrie. www.wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/654

Zotero Forums - All Discussions (o. J.): . <http://forums.zotero.org/discussions/2/>. Last access: 16 Juni 2011.

van der Zwaan, B. C. C.; Schoots, K.; Rivera-Tinoco, R.; Verbong, G. P. J. (2011): The cost of pipelining climate change mitigation: An overview of the economics of CH₄, CO₂ and H₂ transportation. *Applied Energy* 88(11)3821–3831. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.05.019.

8 Anhang 1: Technologiesteckbriefe

<p>8.1 Branche: Aluminiumherstellung</p> <p>8.1.1 A1 - Flexibilisierung der Elektrolyse zur Herstellung von Primäraluminium</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Die Herstellung von Primäraluminium erfolgt im klassischen Schmelzflussprozess nach "Hall-Héroult" in großen Hütten via elektrolytischer Auflösung von Aluminiumoxid (Tonerde), welches vorab zur Senkung des Schmelzpunktes mit Kryolith gemischt wird. Der spezifischen Elektrizitätsbedarf dazu ist mit ca. 13,5 MWh/t Aluminium (Lechtenböhrmer et al., 2015b) sehr hoch.</p> <p>Die Elektrolyseöfen werden üblicherweise unter möglichst konstanten Prozessbedingungen betrieben, da sie sensibel auf Änderungen der Betriebsstromstärke reagieren. Durch Umrüstung der Elektrolysesysteme soll zukünftig eine flexiblere Betriebsweise und damit eine flexiblere Lastabnahme ermöglicht werden. In Abhängigkeit des Stromeintrages ändert sich sowohl der Wärmehaushalt als auch die Stärke des Magnetfeldes im Elektrolyseprozess. Erstes soll durch die Nachrüstung von Wärmetauschern (sogenannter Shell-Heat-Exchanger), zweites durch zusätzliche Stromschienen zur Magnetfeldkompensation beherrschbar werden. Durch die flexiblere Fahrweise sollen neben höheren Lastreduktions- und Erhöhungsanteilen auch deutlich längere Verschiebedauern als in der bisher angewandten Lastflexibilisierung der Aluminiumelektrolyse möglich werden. Die so entstehende „virtuelle Batterie“, die bei flächendeckendem Einsatz der Aluminiumelektrolyse in Deutschland eine Speicherkapazität von ca. 13 GWh bei einer Speicherleistung von 275 MW erreichen könnte (Hauck, 2017), soll zu einer effizienten und kostengünstigen Integration hoher Anteile fluktuierender erneuerbarer Stromeinspeiser und damit einer Minderung der THG-Emissionen beitragen.</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Die Firma TRIMET Aluminium SE hat die Entwicklung der Flexibilisierung maßgeblich voran getrieben und betreibt seit Juni 2015 einen Demonstrator in einem ihrer Werke in Essen. Dieser erstreckt sich über eine kleine Gruppe an Öfen, die sich ein Elektrolyse-System bestehend aus einer Vielzahl an Elektrolyse-Öfen einbettet. Ziel ist es, die komplette Produktionslinie umzurüsten. TRL 6 (- 7): Die Technologie wird mittels eines Demonstrators in anwendungsrelevanter Umgebung getestet und soll zu</p>	

einem Prototypen erweitert werden.

Systemvoraussetzungen

Hintergrund der Entwicklung dieser Technologie ist der steigende Bedarf an Flexibilitäten im Stromsystem, der mit dem Voranschreiten der "Energiewende" und der Integration steigender Anteile fluktuierender erneuerbarer Erzeuger (FEE) einhergeht.

Für eine zukünftig effiziente Synchronisierung von Stromnachfrage und Angebot wird dem technologieneutralen, wettbewerblichen Strommarkt eine wichtige Bedeutung beigemessen, in dem auch die Flexibilisierung der Nachfrage (unter anderem via Preiselastizität) eine wichtige Rolle spielen wird.

Da die Technologie innerbetrieblich weder zu Effizienzsteigerungen, THG-Emissionsminderungen oder direkten produktionstechnischen und oder betriebswirtschaftlichen Vorteilen führt, werden politisch stabile Rahmenbedingungen und passende Vermarktungsmöglichkeiten benötigt, die ausreichende Planungssicherheit und Erträge für eine Investitionsentscheidung generieren.

Infrastrukturbedarfe

Grundlegende Voraussetzung zur großflächigen Verbreitung der Technologie ist ein weiteres Voranschreiten der Energiewende und der damit verbundene Ausbau der Erneuerbaren Energien (siehe oben) und des Stromnetzes. Neben den gesamtsystemischen Infrastrukturbedarfen, die politisch festgeschrieben sind, bedarf es keiner zusätzlichen innerbetrieblichen Infrastruktur, sofern eine flexible Lagerung bzw. Weiterverarbeitung des erzeugten Aluminiums möglich ist. Der klassische Produktionsprozess in seiner bekannten Struktur wird beibehalten, auch steht kein Wechsel des Energieträgers an. Durch den Einsatz der Technologie sind keine infrastrukturellen Lock-in-Effekte (in den gegebenen politischen Rahmenbedingungen) absehbar.

Zentrale offene Forschungsfragen

Da die Technologie bereits in einer Pilotanlage getestet wird, widmen sich aktuelle Forschungsfragen vor allem Strategien zur Überwindung von ökonomischen Hemmnissen zur Erreichung der Marktreife.

Dafür muss unter anderem in umfangreichen Pilotprojekten getestet werden, dass die durch den Einsatz der Technologie veränderte Betriebsweise die Produktqualität nicht mindert oder Schäden in den Produktionslinien hervorruft. Darüber hinaus gehen betriebsinterne Effizienzeinbußen mit der veränderten Fahrweise der Anlagen einher. Diese müssen beziffert und den gesamtsystemischen Effizienzvorteilen gegenübergestellt werden.


Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Teilweise findet eine Umrüstung eines Elektrolyse-Systems der TRIMET Aluminium SE zu einer Pilotanlage statt (die Ausrüstung mit der Magnetfeld-Kompensation) : Kopernikus-Projekt Synergie.

<https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/industrieprozesse>

Aufrüstung der Öfen eines Elektrolyse-Systems der TRIMET Aluminium SE mit Wärmetauschern und wissenschaftliche Begleitung des Demonstrators in dem EFRE-Projekt Flextherm:

<https://www.lfa.uni-wuppertal.de/projekte/thermische-flexibilisierung-der-aluminium-elektrolyse-flextherm.html>, <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/711/>

<p>Branche: Aluminiumherstellung</p> <p>8.1.2 A2 - Power-to-Heat als Option beim Schmelzen und Erwärmen</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Bei der Produktion von Sekundäraluminium wird Aluminiumschrott neu verarbeitet. Die energieaufwendige Elektrolyse ist im Gegensatz zur Primäraluminiumproduktion nicht notwendig. Das Material wird bei ca. 700 °C neu eingeschmolzen, wobei für eine Tonne etwa 650 kWh Energie aufgewendet werden müssen.(Lechtenböhrer et al., 2015a)(Jaroni und Friedrich)</p> <p>Aufbauend auf das Schmelzen des Aluminiums gibt es zahlreiche Weiterverarbeitungsprozesse und Prozessschritte, die ebenfalls eine Erwärmung – wenn auch auf ein niedrigeres Temperaturniveau – benötigen.</p> <p>Warmwalzen ist eines der Umformverfahren, das sich dem Urformen (Blockguss od. Strangguss) anschließt. Kriterium für den Warmwalzprozess ist, dass die Umformtemperatur oberhalb der Rekristallationstemperatur liegt. Hierfür wird das im Vormateriallager erkaltete Walzgut wieder auf Temperaturen von etwa 300 bis 620°C in Wiedererwärmungsöfen erwärmt und im Walzspalt durch Druck auf die vorgegebene Dicke reduziert.</p> <p>Ein weiterer Wärmeprozess der Aluminiumverarbeitung ist das Erwärmen von Aluminiumstangen. Auf Grund von vielfältiger Einsatzgutabmessungen, Materialzusammensetzungen und unterschiedlicher Chargengrößen müssen die dafür genutzten Öfen möglichst variabel sein.</p> <p>Die eingesetzten Öfen, sowohl für das Schmelzen, als auch verschiedene Weiterverarbeitungsprozesse nutzen aktuell in der Regel Gas als Brennstoff, wobei auch elektrisch betriebene Induktionsöfen technologisch verfügbar sind.</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Entscheidend für den Einsatz von PtH sind die mit Strom betriebenen Induktionsöfen, die zum Teil technisch einfach realisierbar sind und gegenüber Gas-betriebenen Öfen über zahlreiche technische Vorteile verfügen. Genutzt werden diese heute schon in Regionen, in denen günstiger Industriestrom verfügbar ist. Laut Industrieakteuren ist die Entwicklung weg von Brennstoffen, hin zu Strom in Deutschland aus ökologischen wie auch ökonomischen Gründen frühestens ab 2040/2050 realisierbar. (PKI). Dies liegt in erster Linie an den Preisen für elektrische Energie, die in den meisten Regionen zwei bis dreimal höher sind als für den Brennstoff Gas.(Günter und Beer)</p> <p>Unterschieden nach den oben beschriebenen Prozessschritten lassen sich</p>	

folgende Aussagen treffen:

Induktions-Schmelzofen

Diese Öfen erfordern den Einsatz von stets flüssigem Metallsumpf, weisen dabei jedoch geringe Emissionen, einen hohen Wirkungsgrad sowie geringen Wasserstoffgehalt und geringen Abbrand auf. Dass sie überwiegend nur in Gießereien eingesetzt werden, liegt in erster Linie an den hohen Investitionskosten sowie an den Anforderungen an den Werkstoff, der besonders sauber sein muss. (Boin, 2000)

Walzprozess

Die Nutzung von PtH beim Warmwalzprozess ist relativ einfach zu realisieren, da die Heißluftgebläse für Walzluft unproblematisch elektrifiziert werden können. (Rombach, 2015) Dies ist bei Walzwerken mit Heißeinsatz zum Teil bereits Stand der Technik. (Hölling et al., n.d.)

Erwärmung von Aluminiumstangen

Bei diesem Prozess haben sich Hybridkonzepte aus Gas-betriebenen und Induktionsöfen etabliert. Eine rein elektrische Erwärmung wäre aus Gründen der technischen Vorteile sogar zu bevorzugen. (Günter und Beer)

Warmhalteöfen

Auch im Bereich der Warmhalteöfen ist eine Entwicklung hin zu elektrisch betriebenen Öfen technisch sinnvoll. (White, 2015)

Auf Grund der technologischen Verfügbarkeit der Anlagen ist der Einsatz von Power-to-Heat zum Schmelzen als auch zum Erwärmen von (Sekundär)aluminium als TRL 9 einzuschätzen.

Die Markteinführung betreffend sollte beachtet werden, dass die Aluminiumbranche durch sehr lange Investitionszyklen gekennzeichnet ist. Eine Elektrifizierung von bestehenden Anlagen ist auf Grund der hohen Investitionskosten unrealistisch, der Fokus sollte daher auf Neuanschaffungen liegen. (Rombach, 2015)

Systemvoraussetzungen

Eine Etablierung im Markt hängt in erster Linie von den Entwicklungen der Energieträgerkosten sowie verwandten Faktoren wie etwa CO₂-Zertifikaten ab. Für einen Durchbruch von Power-to-Heat zum Schmelzen und Erwärmen von Sekundäraluminium bedarf es demnach eines Energiesystems, das die Anlagen kostengünstig mit elektrischer Energie versorgen kann. Im Hinblick auf eine klimafreundliche Entwicklung sollte dies mit einem möglichst hohen Anteil an Strom aus erneuerbaren Energiequellen geschehen. Passende Erneuerbare Energieerzeugungsanlagen sowie eine entsprechende Netzstruktur sind dafür notwendig. (Günter und Beer)

Im Gegenzug liefert der Einsatz von elektrisch betriebenen Öfen die Möglichkeit deren Betrieb in ein modernes Stromsystem einzubauen und die

Produktion von Aluminium für DSM-Zwecke zu nutzen.(Rombach, 2015)

Infrastrukturbedarfe

Soll sich die Aluminiumproduktion weiter zu einem elektrischen Vorgang entwickeln, so ist zu gewährleisten, dass die dafür benötigte Netzstruktur vorhanden ist. Das allgemeine Energiesystem betreffend, muss bei einer weiteren Elektrifizierung der Aluminiumproduktion gewährleistet werden, dass stets genug Strom verfügbar ist, sodass die Produktion laufen kann. Gegebenenfalls sind hierzu auch Speicheroptionen einzusetzen.

Zentrale offene Forschungsfragen

Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf bezieht sich weniger auf die Ofentechnologie, als auf das angesprochene Energiesystem, das weiter in Richtung 100%-erneuerbare Energien entwickelt werden sollte.

Über den Aspekt Power-to-Heat hinaus sind allerdings noch weitere Entwicklungen im Zusammenhang mit der Wärmebehandlung von Aluminium zu nennen, die eine dekarbonisierende Wirkung haben können:


Solares Schmelzen von Aluminium

Ein in NRW neu entwickeltes Prinzip zum Schmelzen von Aluminium basiert auf der direkten Nutzung von Sonnenenergie. Spiegel bündeln das Sonnenlicht auf einen Drehofen, indem sich das Aluminium befindet. Damit können CO₂-Emissionen und Energiekosten bei der Aluminiumverarbeitung drastisch gesenkt werden. Zu vermerken bleibt, dass diese Technologie eine starke solare Strahlung benötigt und sich demnach nur in geografisch geeigneten Regionen anbietet.(Bürkle und Neises-von Puttkamer, 2015)

Effizienzverbesserungen

Allgemein gibt es in verschiedenen Prozessen Möglichkeiten zur effizienteren Produktion. Als Beispiele sind Verbesserungen bei der Abwärmenutzung zu nennen, wie auch die bessere Kombination von Produktionsschritten. Zum Beispiel beim Heißeinsatz im Walzwerk, wird anstatt die produzierten Alugüsse abkühlen zu lassen und anschließend erneut zu erwärmen, die Restwärme vom Gießenprozess genutzt und die Alubänder direkt gewalzt.(Brunke, 2017)

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

<p>8.2 Branche: Chemie</p> <p>8.2.1 C1 - Carbon Capture am Steam Cracker</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
Technologiebeschreibung	
<p>Steam Cracker werden zumeist dazu verwendet um große Mengen Naphtha durch schlagartige Erhitzung zu spalten. Unter den kürzerkettigen Kohlenwasserstoff-Produkten befinden sich auch ökonomisch niederwertige Brenngase (Nebenprodukt), welche als Brennstoffe für den Hochofen Verwendung finden. Durch die Verbrennung entsteht Kohlenstoffdioxid. Auch wenn das Abgas qualitativ wenig CO₂ (hoher Wasserstoffgehalt) gegenüber beispielsweise der Verbrennung von Erdöl freisetzt, so stellt der Steam Cracker als Einzeltechnologie den größten CO₂-Emittenten in der Chemieindustrie dar. Aktuell sind die Post-Cumbustion-Verfahren (chemische Filterung oder Wäsche nach dem eigentlichen Verbrennungsprozess) und die Pre-Combustion-Verfahren (basiert auf dem Prinzip der physikalischen Absorption) die vielversprechendsten CCS-Optionen. Vor allen Dingen die Aminwäsche (Post-Cumbustion), welche schon heute in einigen (wenigen) Prozessen der Chemieindustrie kommerzielle Anwendung findet, gilt anhand der möglichen hohen Durchsatzmenge, des hohen Abscheidegrads und der möglichen Nachrüstbarkeit bestehender Anlagen als vielversprechend.(Markewitz et al., 2017)(Schneider und Schüwer, 2017a)</p>	
Stand der Technik/Markteinführung	
<p>Carbon Capture an Steam Crackern ist aktuell noch nicht Stand der Technik und befindet sich in der Entwicklung (TRL=4). Bis zur Kommerzialisierung werden je nach Studie die 2020er oder sogar die 2030er Jahre angesetzt. Dies ist zum einen den technischen Entwicklungs- und Infrastrukturbedarfen geschuldet und zum anderen den allgemein langen Vorlaufzeiten in der Petrochemiebranche.(Schneider und Schüwer, 2017a)</p>	
Systemvoraussetzungen	
<p>CO₂-Abscheidung erscheint nützlich, wenn CO₂ anderweitig (z. B. PtX) benötigt und genutzt werden kann und eine entsprechende Infrastruktur zur Verfügung steht, oder sichere geologische Langzeitspeicherung möglich ist (was vielerorts kontrovers ist, geologisch relevante Zeiträume können nach Definition in Versuchen nicht abgeprüft werden). In Nordamerika (den USA und Kanada) wird Carbon Capture allerdings teilweise betrieben, um das CO₂ im Rahmen tertiären Ölförderung einzusetzen, sogenannter Enhanced Oil Recovery.(Markewitz et al., 2017)(ACTL, n.d.)</p>	

Infrastrukturbedarfe

Bei entsprechender CO₂ Abtrennung am Steam Cracker und gleichzeitig ohne direkten Bedarf im gleichen Prozess bedarf es Infrastrukturen für den Transport und eventuell zur Speicherung bzw. Zwischenspeicherung des Gases, innerhalb und ausserhalb des Chemiekomplexes. Ggf. können auch schon bestehenden Strukturen zum Transport (Pipelines) von Rohstoffen und Produkten am Cracker-Standort genutzt werden.

Zentrale offene Forschungsfragen


Die Komponenten für die CCS-Technologie sind im Prinzip vorhanden . Es müssten Pilotanlagen/Versuchsanlagen an Steam Crackern gebaut werden, um zu eruieren welches CC-Verfahren hier am vorteilhaftesten eingesetzt werden kann. Aufgrund der hohen Anlagenlebensdauer und der hohen Investitionssummen sind der Anwendung der Technologie enge Grenzen gesetzt. Folglich spielen vor allen Dingen die potenzielle Nachrüstbarkeit bestehender Anlagen und potenzielle Lockin-Effekte in einen ursprünglich ggf. als Übergang betrachteten CCS-Pfad eine wichtige Rolle.

Eine Anwendung von CCS für industrielle Prozesse würde deutlich geringere Mengen an CO₂ gemerieren als die Anwendung an der fossilen Stromerzeugung. Bisherige Studien waren auf große Mengen an CO₂ fokussiert, wie sie in den damals im Mittelpunkt stehenden Großkraftwerken anfallen würden, und hatten daher nur größere Speicherstrukturen analysiert. Zudem wurde mit einer groben Heuristik gearbeitet, um erste Aussagen über möglicherweise geeignete Lagerstätten zu gewinnen. Im Hinblick auf die in einzelnen Industrieanlagen abzutrennenden kleineren Mengen an CO₂ sollte diese Untersuchung aktualisiert und methodisch erweitert werden.

Es ist derzeit unsicher, ob iCCS-Technologien (Industrie-CCS) für eine kommerzielle Umsetzung von der Bevölkerung und relevanten Stakeholdern eine hinreichende Akzeptanz erhalten, sofern sich ausschließlich die Quelle des CO₂ verändert. Es gilt herauszufinden, ob sich eine Diskussion um iCCS der bisherigen CCS-Vorbehalte entledigen kann und sowohl objektive Fakten (sowohl hinsichtlich Möglichkeiten als auch bezüglich der Risiken) wie auch subjektiv wahrgenommene Ängste und Meinungen ausreichend berücksichtigt werden können.

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Derzeit gibt es kein Projekt, in dem ein Steam Cracker mit CCS verbunden ist.

<p>Branche: Chemie</p> <p>8.2.2 C2 - Änderung des Ausgangsmaterials (Edukt) am Steam Cracker (z. B. Naphtha/Wachse aus Fischer-Tropsch statt Naphtha aus Erdöl)</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Neben Erdöl als Rohstoffbasis für synthetische Kraftstoffe kann auch mittels GtL (Gas-to-Liquid) Erdgas, CtL (Coal-to-Liquid) Kohle und BtL (Biomass-to-Liquid) Biomasse genutzt werden. Die Vergasung von Kohle und Gas wurden vor allen Dingen dann genutzt, wenn Erdöl knapp war, z.B. zur Zeiten des Nationalsozialismus in D (CtL) und zur Zeiten der Apartheid in Südafrika (CtL und GtL). Das bekannteste und älteste Verfahren ist die Fischer-Tropsch-Synthese, in welcher zunächst durch Vergasung des jeweiligen Stoffes (Kohle, Erdgas oder Biomasse) Synthesegas entsteht. Nach anschließender Gasreinigung findet im zweiten Verfahrensschritt die eigentliche Fischer-Tropsch-Synthese statt, indem das reine Synthesegas heterogenkatalytisch (Katalysatoren: meist Cobalt oder auch Eisen) zu gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen (Paraffine) reagiert. Die Paraffine dienen dann als Rohstoffbasis für eine Vielzahl von Anwendungen in der Petrochemie. Auch eine direkte Synthese von Kraftstoff ohne Zwischenprodukte (Paraffine) ist möglich. (Marscheider-Weidemann et al., 2016)</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Coal-to-Liquid (CtL) und Gas-to-Liquid (GtL) werden in kommerziellen Großanlagen betrieben (TRL 9). Als Technologieträger sind hier vor allen Dingen das südafrikanische Unternehmen Sasol (CtL und GtL) und das britisch-niederländische Unternehmen Royal Dutch Shell (GtL) zu nennen. Biomass-to-Liquid (BtL) besitzt ein TRL von 6-7 (s. auch Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte). (Marscheider-Weidemann et al., 2016)</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Bei Erdöl Verknappung bzw. steigenden Preisen sind insbesondere die GtL-Technologien gefragt/rentabel. Folglich ist die Preisentwicklung des Erdöls aber auch der Substitute zu Kraftstoffgewinnung essentiell. Seit 2014 ist der Erdölpreis stark gefallen und hat sich seitdem nicht wirklich erholt, was es der alternativen Kraftstoffgewinnung schwerer machen wird das Erdöl zu ersetzen.</p> <p>Des Weiteren spielt der weltweite Bedarf an Kobalt eine Rolle. Man geht davon aus, dass für einen Fischer-Tropsch-Reaktor 100-200 Tonnen Kobalt als Katalysator benötigt werden. (Marscheider-Weidemann et al.,</p>	

2016)

Die nachgestellten Prozessschritte der Petrochemie (Steamcracker etc.) können beibehalten werden, jedoch verändert sich das Mischungsverhältnis der verschiedenen Eingangsstoffe. Synthetische Kohlenwasserstoffe sind in der Regel im wesentlichen kurzkettig, es fällt somit ein geringerer Anteil an u.a. Diesel und noch langkettigeren Fraktionen an. Teer und andere Destillationsreste fallen nahezu gar nicht an.

Infrastrukturbedarfe

Für GtL sind Gas-Pipelines hinreichender Kapazität erforderlich. Für CtL und BtL ist die räumliche Nähe zum Abbaugbiet bzw. und den Biomassenflächen vorteilhaft. Die Verkehrsinfrastruktur für die Zuführung der Ausgangsstoffe sowie die Abführung der Produkte müssen gewährleistet sein (Hafen, Bahnanbindung und Straße). (Marscheider-Weidemann et al., 2016)

Zentrale offene Forschungsfragen

Die Veränderung im Mischungsverhältnis der synthetischen Kohlenwasserstoffe gegenüber den aus fossilem Erdöl verwendeten verlangt, dass weniger langkettige Erdölfraktionen mittels Steam Crackern aufgebrochen, dafür allerdings mehr kurzkettige Fraktionen zu längerkettigen Produkten synthetisiert werden. All diese Technologien sind im Prinzip vorhanden, stellen allerdings eine Herausforderung für die effiziente Umgestaltung komplex miteinander verknüpfter Prozesse innerhalb von Industrieparks dar. Die Prozessführung innerhalb bestehender Steam Cracker muss an das veränderte Ausgangsmaterial angepasst werden, was ebenfalls vorwiegend eine Optimierung der Prozessparameter verlangt.

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

2009 hat das Unternehmen Choren Industries die weltweit erste kommerzielle Pilotanlage mit einer Produktionskapazität von 15000 t in Betrieb genommen. Choren Industries ist 2011 in Insolvenz gegangen und von der Linde Engineering Dresden aufgekauft worden. Linde hat Verbesserungen an der Technologie vorgenommen und sie an die Projektpartner des Ajos-Projekt lizenziert. Im finnischen Kemi soll hierbei bis 2019 eine erste Großanlage BtL entstehen, welche aus 1,8 Mio t Biomasse zu 225000 t Kraftstoff bereitstellen kann.

Größte GtL-Anlage ist die Pearl in Qatar (Betreiber Shell) mit einer Kapazität von 120000 Barrel/Tag. (Marscheider-Weidemann et al., 2016) (European Commission, 2016)

<p>Branche: Chemie</p> <p>8.2.3 C-3 Ablösung der Olefinproduktion im Steam Cracker durch andere Verfahren, z.B. auf Basis Methanol (MTO)</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>In der Petrochemie werden kurzkettige Kohlenwasserstoffe mit mindestens einer C-C-Doppelbindung als Olefine bezeichnet welche herkömmlicherweise aus Erdöl, aber auch Kohle und Erdgas erzeugt werden. Industriell von besonderer Bedeutung sind hierbei kurzkettige Olefine..Sie stellen hierbei einen Großteil der Grundstoffe für die Petrochemie dar. So ist beispielsweise Ethylen (C₂C₄) als einfachstes Olefin mit einer weltweit jährlichen Produktionsmenge von 160 Mt (Stand 2015), Ausgangsstoff für über 30% aller produzierten Petrochemikalien. Zur Zeit wird Ethylen vorwiegend aus leichten Erdölfraktionen (vor allem Naphtha) mittels Streamcracking gewonnen. Mittels MTO (Methanol-to-Olefines) lässt sich aus Erdgas, Kohle oder Biomasse gewonnenes Methanol zu Olefinen mittels eines Wirbelschichtreaktors umsetzen.(Arnold et al., 2017)</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Die Technologiegruppe PTC (Power-to-Chemicals) bietet ein sehr hohes THG-Einsparungspotential (78-190% in 2040-2050) bei Nutzung von Erneuerbarem (REG) Strom. Dieses Potenzial lässt sich weiter steigern, sofern die Endprodukte nicht verbrannt werden.</p> <p>PTC-Technologien erhöhen den Bedarf an REG-Strom, weshalb eine noch weitergehende Minderung erst bei 100 %-EE-Deckung möglich wird.</p> <p>MTO befindet sich in Europa als Technologie in der Demonstrationsphase (TRL=4-9).</p> <p>MTO-Demo-Reaktoren weisen ca. 1 m Durchmesser und ca. 2.000 t/a Durchsatzkapazität auf. Die Kommerzialisierung erfolgte vor wenigen Jahren in China bei ca. 10 m Durchmesser und ca. 600.000 t/a(Arnold et al., 2017, p. 10)(Ren et al., 2008), wobei dort fossile Feedstocks zum Einsatz kamen. Eine Kommerzialisierung ist somit in den kommenden Jahren in Europa technisch möglich.</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Eine Energieversorgung mit 100% reg-EE und hinreichende Kapazitäten für zusätzliche Abnehmer sind Voraussetzung für eine klimafreundliche PtX-Strategie (PtC: 55-110 TWh/a in 2050). Bei hoher Durchdringung an PtX-Anlagen sind Rückwirkungen auf das gesamte Stromnetz wahrscheinlich; deren Ausmaß ist davon abhängig, ob in flexibler Fahrweise auf</p>	

Stromangebot (Über- oder Unterdeckung) im Netz reagiert werden kann; PtX-Anlagen in der Grundlast erfordern zwingend einen überproportionalen Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten. Außerdem müsste vor allen Dingen für Biomass-to-Liquid die entsprechende Biomasse bereit gestellt werden, was Kapazitätsprobleme und potenziell erhöhten Stress auf Landschaft und Ökosysteme mit sich bringt.(Arnold et al., 2017)

Infrastrukturbedarfe

Der PTX-Aufbau kann weitgehend auf bestehende Distributions-Infrastrukturen zurückgreifen. Erhöhter Bedarf besteht für den Ausbau von Elektrolyseuren (H₂ & O₂), Gas-Speichern (H₂, CH₄, etc.) und Stromnetzen. Die produzierten Grundchemikalien können in bestehende Verteilungsstrukturen eingespeist werden (langfristig: Wegfall oder Umwidmung der Ölpipelines u. a. von Rotterdam, Wilhemshafen und Hamburg).

Derzeit ist die PTX-Produktion teurer als die fossile Route unter Vernachlässigung von externalisierten Kosten. Deren Bilanz jedoch stark abhängig einerseits vom Erdöl- bzw. Erdgaspreis, andererseits von Strompreis, THG-Emissionskosten und den Kosten der CO₂-, H₂- und O₂-Bereitstellung. Im Ausblick ist Kostenneutralität grundsätzlich realistisch.

Zentrale offene Forschungsfragen

Die Katalysator- und Trägermaterial-Entwicklung für die jeweiligen Prozesse steht im Vordergrund. Insgesamt dient dies der Optimierung der Prozesse (v.a. durch effizientere Katalysatoren) hin zu geringeren Drücken und Temperaturen für gesteigerte Energie-, Ressourcen- und Kosteneffizienz und Anlagenlebensdauer.(Arnold et al., 2017)

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Seit 2000 wurden MTO-Anlagen in Norwegen, China, Nigeria und Ägypten errichtet. Deutschland weist keine dieser Anlagen auf.(Arnold et al., 2017)(Ren et al., 2008)

<p>Branche: Chemie</p> <p>8.2.4 C-4 Nutzung von Membranverfahren zur Stofftrennung statt thermische</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Als Membranen werden semipermeable Schichten bezeichnet, welche zu- meist sehr dünn sind um eine möglichst hohe Permeabilität (Durchdring- barkeit) zu erreichen. Für die Produktion von Grundstoffen (z.B. Ethylen und Propylen) ist es eine der Hauptaufgaben der chemischen Industrie, gasförmige oder flüssige Gemische aufzutrennen. Die konventionellen Ver- fahren, wie z.B. die Rektifikation und Destillation, sind meist sehr energie- aufwendig und verursachen durch den hohen Energieverbrauch entspre- chend hohe Kosten. Membrantrennprozesse gelten hierbei als energiespa- rende und preiswertere Trennverfahren gegenüber den konventionellen Trennverfahren und können somit durch Prozessoptimierung einen Bei- trag zur CO₂-Vermeidung beitragen. Das aufzutrennende Fluid wird hier- bei über die semipermeable Membran geleitet und in zwei Teilstoffe (Per- meat und Retentat) separiert. Allgemein wird in poröse und Lösungs- Diffusions-Membranen (auch dichte Membranen) unterschieden. Je nach Anforderung eines Prozesses werden unterschiedliche Membrantechnolo- gien sowie Membranarten benötigt. Aktuell wird die organophile Nanofilt- ration (bezieht sich auf organische Verbindungen und Abtrennung von or- ganischen Lösungsmitteln, auch als Hybridverfahren möglich) als energie- effiziente Membrantrenntechnologie gesehen.(Bettermann et al., 2010)(Hauke, 2015)</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>In der Wasserversorgung bzw. in der Wasserindustrie ist die Membran- technik schon Stand der Technik (TRL=9). In der Chemieindustrie gibt es schon einige Trennverfahren, welche mit Membranen umgesetzt werden (z.B. Chlor-Alkali-Elektrolyse; TRL=9), aber auch viele Prozesse welche, sich noch in der Labor- und Pilotphase befinden (TRL=4-7).(Bazzanella et al., 2017)</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Politisch muss die Energieeffizienz sowie die Emissionsminderung forciert werden, damit Unternehmen in der Chemiebranche die aktuell noch teure Membrantechnik umsetzen. Voraussetzung für eine Markteinführung ist immer die kommerzielle Machbarkeit des jeweiligen Prozesses.(Bazzanella et al., 2017)</p>	

Infrastrukturbedarfe


Für die Membrantrennverfahren werden lediglich die herkömmlichen Produkten- und Edukteninfrastrukturen benötigt. Aufgrund der energieeffizienteren Arbeitsweise gegenüber den konventionellen thermischen Trennverfahren sinkt der Bedarf an elektrischer Anschlussleistung sowie Übertragungsinfrastruktur.(Bettermann et al., 2010)(Bazzanella et al., 2017)

Zentrale offene Forschungsfragen

Im Fokus steht vor allen Dingen die Entwicklung neuer Membranmaterialien auf Basis von Hochleistungspolymeren oder Hybridmaterialien, welche eine hohe Temperaturresistenz und chemischer Beständigkeit aufweisen. Mit diesen könnten dann z.B. die Auftrennung von Olefinmischungen oder aromatischen Gemischen bewerkstelligt werden. Außerdem müssen mechanische Langzeitstabilität, Lösemittelbeständigkeit der Permeatfluss sowie die Selektivität verbessert werden.(Bettermann et al., 2010)

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

National ist das Verbundprojekt OPHINA (Organophile Nanofiltration für energieeffiziente Prozesse) von der Evonik Industries AG (unter Beteiligung von Bayer, BASF und der RWTH Aachen) zu nennen. Ziel des Projektes ist es Membranmodule für die organische Nanofiltration für den großtechnischen Einsatz zu entwickeln. Hierbei standen mechanische Langzeitstabilität, die Selektivität, Lösemittelbeständigkeit sowie Permeatfluss im Vordergrund.(Bazzanella et al., 2017)

<p>Branche: Chemie</p> <p>8.2.5 C-5 Power-to-Heat mit dem Schwerpunkt auf die Dampferzeugung</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Als Power-to-Heat (PtH) werden Umwandlungstechnologien bezeichnet, bei denen elektrischer Strom in Wärme umgewandelt wird. PtH ist damit eine Sektorenkopplung zwischen Strom und Wärme. In der Industrie kann hierbei der Wasserdampf mit unterschiedlichen Technologien (z.B. Elektro-Kessel , Elektro-Ofen als indirekte elektrische Verfahren und der Elektrodenkessel als direktes elektrischen Verfahren) erzeugt werden.(Schneider und Schüwer, 2017b)</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Allgemein beträgt die Spannbreite der Technologieentwicklung von PtH zwischen TRL=3 (bei Zement) bis zur Kommerzialisierung (TRL=9 bei Stahl und Glas). Die Chemieindustrie weist einen TRL von 4 auf. Dieses niedrige Technologieentwicklungsniveau ist darauf hin zurückzuführen, dass die Grundstoffchemie einen hohen Dampfbedarf aufweist, und viele ihrer Prozesse optimalerweise kontinuierlich und homogen gefahren werden sollten, um sowohl die maximale Energieeffizienz als auch Produktqualität zu erreichen. Eine der fluktuierenden Verfügbarkeit der erneuerbaren Energien angepasste flexibilisierte Fahrweise mit Strom gestaltet sich hierbei als schwierig und würde z.T. grundlegend andere Prozesskonzepte und Optimierungsstrategien erfordern.(Schneider und Schüwer, 2017b)</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Bei hoher Durchdringung an PtH-Anlagen sind Rückwirkungen auf das gesamte Stromnetz zu erwarten; das Ausmaß ist davon abhängig, ob in flexibler Fahrweise auf das Stromangebot (Über- oder Unterdeckung) im Netz reagiert werden kann; PtH-Anlagen in der Grundlast erfordern zwingend einen überproportionalen Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten. Quaschnig schätzt - unter Einbeziehung von Effizienzmaßnahmen wie Wärmerückgewinnung - den zusätzlichen Strombedarf für die Dekarbonisierung industrieller und gewerblicher Prozesswärme durch Elektrifizierung bis zum Jahr 2040 in einer Größe von ca. 250 TWh ab,(Quaschnig, 2016) was eine deutliche Erhöhung (fast 50%) des heutigen Gesamtstrombedarfs zur Folge hätte. Letzterer lag 2016 bei 520 TWh.(Schneider und Schüwer, 2017b)</p>	

Infrastrukturbedarfe


Es besteht eine Abhängigkeit vom Ausbau der Übertragungsnetze und EE-Erzeugungskapazitäten, sowie den bestehenden Netzanschlussstrukturen am jeweiligen Standort. Darüber hinaus müssen ggf. weitere Infrastrukturen (Speicher, Backup-Systeme) ausgebaut oder neu errichtet werden. (Schneider und Schüwer, 2017b)

Zentrale offene Forschungsfragen

Je nach Prozess bestehen eher geringe (allg.) bis höhere (Bsp. Chemie und Zementindustrie) technische Entwicklungsrisiken bei insgesamt höherem wirtschaftlichem Risiko (aufgrund unter Vernachlässigung externalisierter Kosten oftmals preisgünstiger fossiler Referenzenergieträger Erdgas, Kohle und Ersatzbrennstoffe). Der F&E-Bedarf konzentriert sich vorwiegend auf die Entwicklung branchen- und produktspezifischer Elektrifizierungslösungen (Prozess- und Systemintegration). (Schneider und Schüwer, 2017b)

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Mittlerweile existieren eine Reihe von Forschungsprojekten bzw. virtuelle Institute, welche das Themenfeld PtH beforschen. Zu nennen sind beispielsweise das Virtuelle Institut NRW - Strom zu Gas und Wärme vom Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. oder Dialogplattform Power to Heat vom Energie-Forschungszentrum Niedersachsen. (Schneider und Schüwer, 2017b)

<p>Branche: Chemie</p> <p>8.2.6 C-6 Wasserstoff aus Elektrolyse als Edukt statt Steam Reforming bzw. partielle Oxidation</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Generell ist die Wasserstoffgewinnung mit Hilfe von Elektrolyseuren auch als Power-to-Gas (PtG, bzw. PtG-H₂) bekannt. Die grundlegende Idee ist es, generierte Stromüberschüsse aus hauptsächlich erneuerbaren Energien in Gas (Wasserstoff oder auch durch Veredelung Methan) umzuwandeln und so nutzbar zu machen. Hierbei wird der in der Brennstoffzelle ablaufende Prozess umgekehrt (Elektrolyseur), d.h. mit Hilfe von Gleichstrom werden Wassermoleküle in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt. Es gibt drei Arten von Wasser-Elektrolyseuren, welche sich nach der Art der verwendeten Elektrolyte unterscheiden:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Die Alkalische Elektrolyse (AEL), welche mit einer wässrigen Kali- oder Natronlauge betrieben wird 2. Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEMEL), welche eine protonenleitende Membran aufweist 3. Feststoff-Oxid-Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL), die über eine keramische ionenleitende Membran verfügt.(Wuppertal Institut, 2018) 	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Die Alkalische Elektrolyse ist kommerziell am Markt verfügbar mit Leistungsklassen > 5MW_{el} (TRL=8). Ebenfalls ist die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse im unteren MW-Bereich erhältlich (TRL=7-8), Die Hochtemperatur-Elektrolyse befindet sich aktuell noch im Forschungsstadium F&E (TRL=4)(Wuppertal Institut, 2018).</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Eine hohe Durchdringung von PtG-Anlagen erfordert zukünftig einen überproportionalen Ausbau der erneuerbaren Energien, da der Strombedarf gegenüber der direkten Stromnutzung sowie weitere Umwandlungsverluste (Rückverstromung oder Speicherung) ins Gewicht fallen. Aus dem erhöhten Zubau von EE-Anlagen resultiert ein größerer Bedarf an Netzausbau. Außerdem spielt der genehmigungsrechtliche Rahmen eine wichtige Rolle für die wirtschaftliche Betriebsweise von PtG-Anlagen. Aktuell gelten Elektrolyseure noch als Chemie- und nicht als Energiewandlungsanlagen, sodass als Folge unter anderem auch die EEG-Umlage bezahlt werden muss. Dies müsste sich für eine kommerzielle Nutzung mittelfristig ändern.(Wuppertal Institut, 2018)</p>	

Infrastrukturbedarfe

Kurzfristig gesehen kann Wasserstoff nach DWGW Richtlinie mit bis zu 2 Volumenprozent in die Erdgasinfrastruktur eingespeist werden. Langfristig gesehen wäre eine eigenständige Wasserstoffinfrastruktur (Pipelines und Speicher) vorstellbar. Falls Wasserstoff neben der Speicherung von fluktuierenden EE oder im Industriesektor auch im Verkehrssektor genutzt werden soll, müsste außerdem ein Wasserstoff-Tankstellennetz aufgebaut werden. (Wuppertal Institut, 2018)

Zentrale offene Forschungsfragen

Bei der Alkalischen Elektrolyse (AEL) bestehen die Hauptherausforderungen in der Erhöhung des Wirkungsgrades, der Steigerung der Leistungsdichte und der Verlängerung der Lebensdauer, sowie der Kostenreduktion.

Die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEMEL) bedarf einer Reduktion und Substitution von Edelmetallen (vor allen Dingen am Katalysator).

Für die Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) müssen noch verbesserte und günstigere Materialien entwickelt, sowie die Zellmechanik und Dichtungstechnik verbessert werden. (Wuppertal Institut, 2018)

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Hinsichtlich der Pilotanlagen gibt es für Alkalische- und PEM-Elektrolyseure eine Vielzahl (im deutschen Raum wie auch International) von Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsanlagen, sowie einige Praxisanlagen. Zwei Anlagen im deutschen Raum (Werlte und Mainz) haben hierbei eine Anschlussleistung von 6 MW. Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse gibt es eine Praxisanlage in Dresden und eine Demonstrationsanlage in Midtjylland (Dänemark).

Bezüglich aktueller Forschungsprojekte ist vor allen Dingen, dass aktuelle Kopernikus-Projekt P2X zu nennen, welches sich mit den Themen Power-to-Gas, Power-to-Liquids und Power-to-Chemicals befasst. (Wuppertal Institut, 2018)

<p>8.3 Branche: Primär-Rohstahlerzeugung</p> <p>8.3.1 ST1 - Primärstahl durch alkalische Eisenelektrolyse</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
Technologiebeschreibung	
<p>Die alkalische Eisenelektrolyse mit in Natronlauge gelöstem Eisenerz bei einer Prozesstemperatur von 110° C (Electrowinning) ermöglicht die Reduktion von Eisenerzen zu Roheisen unter Verzicht auf kohlenstoffhaltige Reduktionsmittel. Das Verfahren verspricht eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz gegenüber der Hochofen-Konverter-Route. Zudem kann die alkalische Eisenelektrolyse in Abhängigkeit vom genutzten Strom CO₂-frei sein. (Hita et al., 2016, p. 5)(Fishedick et al., 2014a) Neben der Erzeugung mit Eisenerzen unterschiedlicher Qualitäten kann die alkalische Eisenelektrolyse eingesetzt werden, um etwa eisen- und titanhaltiges Restmaterial (red slurry) aus dem Bayer-Prozess zur Aluminiumerzeugung sowie solches aus anderen metallurgischen Prozessen zu verwerten.</p>	
Systemvoraussetzungen	
<p>Primäre Systemvoraussetzung eines großtechnischen Einsatzes der alkalischen Eisenelektrolyse ist die Verfügbarkeit ausreichender Strommengen aus regenerativer Erzeugung. Sinnvoll ist zudem die räumliche Agglomeration mit Prozessen, bei denen die Verwendung des als Nebenprodukt erzeugten Sauerstoffs erfolgen kann. Durch den Wegfall des Kokseinsatzes werden Transportkapazitäten für Schüttgüter freigesetzt.</p>	
Infrastrukturbedarfe	
<p>Eine besondere Bedeutung kommt der Einbindung einer großtechnischen Erzeugung von Stahl auf der Basis der alkalischen Eisenelektrolyse in die Stromerzeugung und -verteilung zu. Als Prozess mit mäßig hoher Temperatur eignet sich die alkalische elektrolitische Herstellung von Eisen prinzipiell für den temporären Lastabwurf, was eine schlankere Infrastruktur im Bereich der Strombereitstellung ermöglichen kann.</p>	
Stand der Technik/Markteinführung	
<p>Die alkalische Eisenelektrolyse wurde bislang im Rahmen des EU-Projektes ULCOWIN lediglich im Labormaßstab erforscht (TRL 2-3)(Wesseling et al., 2017). Im Rahmen des laufenden EU-Folgeprojektes SIDERWIN wird angestrebt, TRL 6 zu erreichen. Schätzungen erwarten die Marktreife für 2040(Pardo et al., 2015).</p>	

Zentrale offene Forschungsfragen

Korrespondierend mit ihrem derzeit begrenzten TRL weist die alkalische Eisenelektrolyse noch beträchtliche Innovationspotenziale auf. Zentrale offene und im Projekt SIDERWIN zur Bearbeitung vorgesehene Forschungsfragen betreffen die Entwicklung einer prototypischen Elektrolysezelle und die Bestimmung der für ein Hochskalieren relevanten Einflussfaktoren sowie die Beschaffenheit von Anoden und Kathoden (Hita et al., 2016, p. 6f). Relevant sind zudem die digitale Kopplung des Betriebs mit den Stromnetzbetreibern sowie die Möglichkeit zur Verwertung von qualitativ geringwertigen Erzen und von Reststoffen aus anderen metallurgischen Prozessen.


Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Von Bedeutung ist neben den abgeschlossenen Arbeiten im EU-Projekt ULCOS das laufende EU-Folgeprojekt SIDERWIN: Development of new methodologies for industrial CO₂-free steel production by electrowinning mit einer Laufzeit vom 01.10.2017 bis zum 30.09.2022 ohne deutsche Beteiligung: ArcelorMittal (Coordinator, France), CMI (Belgium), EDF (France), CFD-Numerics (France), QUANTIS (Switzerland), TECNALIA (Spain), UAVR (Portugal), Mytilineos (Greece), NTUA (Greece), N-Side (Belgium), Dynergie (France), NTNU (Norway)

Projekt ULCOS: Ultra-Low CO₂ steelmaking
https://cordis.europa.eu/project/rcn/74430_en.html

Projekt SIDERWIN:
https://cordis.europa.eu/project/rcn/211930_en.html

<https://www.siderwin-spire.eu/content/home>

<p>Branche: Primär-Rohstahlerzeugung</p> <p>8.3.2 ST2 - Direktreduktion mit Wasserstoff</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Bei der Direktreduktion von speziell entwickelten Eisenerzpellets mit H₂ wird bei Temperaturen unter denjenigen im Hochofen das Erz in festem Zustand reduziert. Hierbei entsteht Eisenschwamm (Direct Reduced Iron DRI) sowie als Nebenprodukt Wasser. Der Eisenschwamm kann anschließend in einem Schmelzofen zu Stahl veredelt werden, woran sich die übliche Weiterverarbeitung anschließt. Das Ausmaß der CO₂-Minderung durch die Direktreduktion mit H₂ ist abhängig von der H₂-Vorkette. Im günstigsten Fall wird das H₂ mittels regenerativem Strom erzeugt, was bezüglich der Dekarbonisierung bei einer Reduktion der CO₂-Emissionen gegenüber der Hochofen-Konverter-Route um 100% einen Durchbruch darstellt (Fischedick et al., 2014b, p. 565).</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Neben der Verfügbarkeit der speziell beschaffenen Eisenerzpellets sind vor allem die Bereitstellung der für die Direktreduktion erforderlichen H₂-Mengen und des dafür notwendigen Stroms aus regenerativer Erzeugung zentrale Voraussetzungen.</p>	
<p>Infrastrukturbedarfe</p>	
<p>Der Infrastrukturbedarf ist über die der konventionellen Erzeugung ähnliche Eisenerz- und Produktlogistik hinaus vor allem abhängig davon, wo das H₂ per Elektrolyse erzeugt wird. Bei Herstellung in der Nähe der Stromerzeugung (z.B. Wasserkraft oder Windenergie an der Küste) sind entsprechend dimensionierte Rohrleitungen für den H₂-Transport zum Standort der Stahlerzeugung notwendig. Bei der H₂-Produktion im Umfeld der Anlage zur Direktreduktion sind dagegen Netzkapazitäten für den Stromtransport erforderlich. Dabei entsteht nicht zwingend inflexible Last im Stromnetz, da mittels H₂-Speicherung die Erzeugung von Eisenschwamm vom Stromangebot entkoppelt werden kann. Zwecks zeitlicher Entkopplung von Direktreduktion und Stromerzeugung sind entsprechend dimensionierte H₂-Speicher und/oder Lagerkapazitäten für Eisenschwamm vorzusehen. Durch den Wegfall des Kokseinsatzes werden Transportkapazitäten für Schüttgüter freigesetzt.</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Der Stand der Technik kann mit einem TRL von 3-4 eingeschätzt</p>	

werden(Wesseling et al., 2017, p. 1307). Im Rahmen des HYBRIT Joint-Venture-Projektes wird in Schweden eine Pilotanlage für Lulea und die 250 km nördlich gelegenen Norrbotten Eisenerzlagerstätten geplant. Die Beteiligung Finlands an dieser Phase wird geprüft. Die Markteinführung soll sich an die erfolgreiche Demonstrationsphase anschließen (2035)(Hybrid).


Zentrale offene Forschungsfragen

Grundsätzlich weist die Direktreduktion mit Wasserstoff korrespondierend mit ihrem derzeit begrenzten TRL noch beträchtliche Innovationspotenziale auf. Offene Forschungsfragen betreffen die technischen Voraussetzungen der Hochskalierung der Direktreduktion mit H₂ auf den großtechnischen Maßstab und die Steigerung der Prozesseffizienz. Überdies muss eine effiziente und im industriellen Maßstab nutzbare Elektrollysetechnik für die Erzeugung des H₂ entwickelt werden(Weigel et al., 2015, p. 14). Weitere wichtige Forschungsfragen betreffen die Pelletierung des Eisenerzes, die für die Anforderungen der Direktreduktion mit H₂ optimiert werden muss(Hybrid).

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

LKAB, SSAB und Vattenfall sind seit 2016 Joint-Venture-Partner von HYBRIT für die Länder Schweden und Finnland, das letztlich den Bau und Betrieb einer Demonstrationsanlage für die Direktreduktion mit H₂ und die Auswertung des Betriebs vorsieht. Der Zeitplan beinhaltet die abgeschlossene Machbarkeitsstudie (2016-2017), eine Pilotphase (2018-2024) sowie den Testbetrieb mit einer Demonstrationsanlage (2025-2035). Das von der Schwedischen Energie Agentur geförderte begleitende Forschungsprojekt erstreckt sich von 2017 bis 2021(Nordlander, 2017). Die Machbarkeitsstudie hat Produktionskosten für die Direktreduktion mit H₂ geschätzt, die gegenwärtig noch um 20 Prozent oberhalb denjenigen der konventionellen Erzeugung im Hochofen liegen. Aufgrund zukünftig weiter fallender Stromkosten aus regenerativer Erzeugung und steigender CO₂-Preise sowie der rückläufigen Verfügbarkeit von Kokskohle wird damit gerechnet, dass die Direktreduktion mit H₂ in Schweden im Verlauf des Umsetzungszeitplans wirtschaftlich wird(Hybrid).

<http://www.hybritdevelopment.com>

<p>Branche: Primär-Rohstahlerzeugung</p> <p>8.3.3 ST3 - Elektrostahl per Lichtbogen- oder Induktionsofen</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Neben der Hochofen-Konverter-Route stellt das Elektrostahlverfahren mittels Lichtbogen- oder Induktionsofen das derzeit gängigste Verfahren zur Rohstahlerzeugung dar. Einsatzstoffe sind vor allem Schrott und Eisenschwamm sowie Roheisen aus konventionellen Hochöfen. Dabei sind in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des verfügbaren Schrotts nicht alle in gewünschter Weise legierten Stahlqualitäten herstellbar. Zugleich werden durch das Schrottreycling wichtige Legierungselemente rohstofflich gesichert. Das Elektrostahlverfahren erfordert den Einsatz erheblicher Strommengen, die durch die Zugabe von nicht erhitzten Einsatzstoffen (Schrott, Eisenschwamm) in der Chargenproduktion sowie prozesstypisch starken Schwankungen unterliegen. Schließlich findet gegenwärtig auch bei der Produktion von Elektrostahl eine Zufeuerung mittels Erdgas im Umfang von rund 20% des gesamten Energieeinsatzes statt und werden pro Tonne Elektrostahl 4,4 kg Kohlenstaub zwecks Bildung der prozessverbessernden Schaumslagge beigegeben, worauf entsprechende CO₂ Emissionen (47kg je t Stahl) entfallen.</p> <p>Im Falle des Lichtbogenofens wird durch das Anlegen einer Spannung zwischen dem Schmelztiegel und über dem Schmelzgut befindlichen Graphit-Elektroden ein Lichtbogen erzeugt, der das Schmelzgut aufheizt. Beim Induktionsofen bewirken dagegen Ströme durch Wicklungen um den Schmelztiegel Wirbelströme, die das Schmelzgut erhitzen. Der Induktionsofen weist gegenüber dem Lichtbogenofen eine bessere Materialeffizienz auf und vermeidet die CO₂-Emissionen aus dem Abbrand der Graphit-Elektroden.</p> <p>Als weiteres denkbare Verfahren wird die Ergänzung eines Lichtbogenofens um eine Aufheizereinheit per Mikrowellenstrahlung diskutiert, da Eisenerz und Kohle Mikrowellen sehr gut absorbieren und so das eigentlich auf die Verwertung von Schrott fokussierte Elektrostahlverfahren integriert auch für die Roheisenerzeugung mit Erzen verwendet werden könnte.</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Global sinkt der Anteil der Elektrostahlroute, was aber eine Folge des mit dem ausgeprägten wirtschaftlichen Wachstum einhergehenden Ausbaus wichtiger Infrastrukturen mit hohem Stahlanteil insbesondere in China ist, dem kein entsprechendes Schrottangebot gegenüber steht. In Deutschland</p>	

werden 32% des erzeugten Stahls per Elektrostahlverfahren aus Eisen- und Stahlschrott hergestellt, während der Anteil global bei 25% liegt. Dabei wird ein Teil des Schrottaufkommens in der konventionellen Hochofen-Konverter-Route im exothermen Konverterprozess als Zuschlag verarbeitet.

Wegen des Rückgriffs auf das inländische Schrottaufkommen dürfte diese relativ dezentral und wenig transportintensiv per Ministahlwerk erfolgende Produktion kaum ins Ausland ausgelagert werden. Zudem besteht eine grundsätzliche Dekarbonisierungsstrategie bei Stahl darin, die Erfassung und Verwertung von Eisen- und Stahlschrott zu erhöhen, weil zu dessen Rezyklierung deutlich weniger Energie eingesetzt werden muss als bei der konventionellen Roheisenerzeugung als Vorstufe der Stahlproduktion. Dabei ist die Dekarbonisierung der Elektrostahlroute mit derjenigen in der Stromerzeugung direkt verzahnt. Eine primäre Systemvoraussetzung ist mithin die Verfügbarkeit ausreichender Strommengen aus regenerativer Erzeugung. Überdies kommt den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen des Schrottrecyclings hinsichtlich der Aufbereitung der zunehmend diversifizierten Legierungen und Bauformen (z.B. Sandwichtechnik) für die rohstoffliche und energetische Optimierung eine wachsende Bedeutung zu.

Infrastrukturbedarfe

Die Erfassungsquote von Eisen- und Stahlschrott ist in Deutschland bereits sehr hoch. In vielen Bereichen wird daher eine Steigerung der Verwertungsquote nur in geringem Umfang möglich sein. Allerdings werden jährlich allein rund 2 Millionen Fahrzeuge aus dem Bestand als Gebrauchtwagen exportiert, während lediglich eine halbe Million Altfahrzeuge in Deutschland verwertet werden. Mit einem Rückgang des Anteils der konventionellen Hochofen-Konverter-Route würde der bislang dort als Zuschlag eingesetzte Schrott ebenfalls über die Elektrostahlroute verwertet. Eine besondere Bedeutung kommt der physischen Einbindung der Elektrostahlwerke in die Stromerzeugung und -verteilung zu, was durch die im Vergleich zur Rohstahlerzeugung per Hochofen und Konverter relativ kleine typische Anlagengröße erleichtert wird. Infrastrukturelle Anpassungsbedarfe ergeben sich somit vor allem bei der physischen und temporalen Integration der Elektrostahlproduktion in das Stromnetz beziehungsweise den Abgleich von Stromerzeugung und -verbrauch.

Stand der Technik/Markteinführung

Grundsätzlich handelt es sich bei Lichtbogenöfen und Induktionsöfen um eingeführte Technologien und es geht um Detailoptimierungen eines für die Dekarbonisierung dauerhaft sehr bedeutsamen Pfades der Stahlerzeugung. Derzeit dominiert in Deutschland die Lichtbogentechnik. Interessant könnte die Ergänzung durch Mikrowellenstrahler für den Betrieb mit Erzen sein, da diese sehr kurze Aufheizzeiten ermöglichen und so eine Teilelektrifizierung der Eisenerzreduktion erfolgen könnte. Durch technische

Modifikationen könnten zudem Induktionsöfen in Deutschland wieder Marktanteile gewinnen.


Zentrale offene Forschungsfragen


Forschungsfragen betreffen die Energieeffizienz, die Integration dieser Stromverbraucher in das Stromnetz sowie die eventuelle Eröffnung von Flexibilitätpotenzialen durch modifizierte Technik und sonstige Prozessoptimierungen jeweils für Lichtbogen- und Induktionsöfen. Ein Schwerpunkt könnte darin liegen, die Zufeuerung von Erdgas überflüssig zu machen. Zudem erlaubt die Umstellung von Induktionsöfen von Netzfrequenz- auf Mittelfrequenztechnik in Gießereien den sumpfflosen Betrieb und damit das Anfahren mit festem Einsatzmaterial, was die Flexibilität erhöht. Zudem ermöglicht die Mittelfrequenztechnik eine bessere elektromagnetische Kopplung bei Eisenwerkstoffen und eine generell erhöhte elektrische Leistungsdichte mit Vorteilen bei der Energieeffizienz. Hier stellt sich die Frage, ob diese für Gießereien entwickelte Technik an die Elektrostrahlproduktion adaptierbar ist. Als weitere Aufheiztechnik kommen zudem Mikrowellenstrahler für den Betrieb mit Eisenerzen in Betracht. Schließlich kommt der vorgelagerten und gemeinhin als wenig technologieintensiv wahrgenommenen Aufbereitung von Schrott eine wachsende Bedeutung zu.

Wie weit hierbei LCBTT-Techniken geschaffen werden können ist ungewiss. Mit Ausnahme der Verwendung von Mikrowellen für den Betrieb mit Erzen und Induktionsöfen in Mittelfrequenztechnik geht es eher um in der Summe beträchtliche Kombinationswirkungen verschiedener Detailoptimierungen in einem absehbar nachhaltig bedeutsamen Segment der Stahlerzeugung.

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Derzeit keine benennbaren.

<p>Branche: Primär-Rohstahlerzeugung</p> <p>8.3.4 ST4 - Schmelzreduktion mit Kohle (und optional CCS/CCU)</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
Technologiebeschreibung	
<p>Bei der Schmelzreduktion werden die geschmolzenen Erze zu Eisenschwamm reduziert und anschließend unter Zugabe von Kohle und Sauerstoff zu Roheisen weiterverarbeitet. Ein wesentlicher Vorteil der Schmelzreduktion liegt in der Minderung der Emission klassischer Luftschadstoffe, wohingegen sich bei den CO₂-Emissionen keine Verbesserungen ergeben.</p>	
Systemvoraussetzungen	
<p>Ähnlich dem HISarna®-Verfahren kann die Koksproduktion sowie die Aufbereitung der Erze entfallen. Hinsichtlich der Anwendung von CCS/CCU gelten prinzipiell die gleichen Anforderungen wie bei der konventionellen Hochofen-Konverter-Route (siehe dort).</p>	
Infrastrukturbedarfe	
<p>Der Infrastrukturbedarf ist bezüglich der Aufbereitung der Einsatzstoffe potenziell geringer als bei der konventionellen Hochofen-Konverter-Route, sofern nicht alle Prozesse an einem Standort integriert werden und bei CCS/CCU identisch, d.h. allein vom Standort abhängig.</p>	
Stand der Technik/Markteinführung	
<p>In einigen Weltregionen verbreitete Verfahren sind Corex® und Finex®:</p> <ul style="list-style-type: none"> - TRL 9 Corex®-Verfahren - TRL 9 Finex®-Verfahren 	
Zentrale offene Forschungsfragen	
<p>Es ist unklar, ob sich die Corex®- und Finex®-Verfahren unabhängig von CCS/CCU-Anwendungen zumindest partiell dekarbonisieren lassen.</p>	
Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte	
<p>Regional verbreitete Verfahren (China, Indien).</p>	

<p>Branche: Primär-Rohstahlerzeugung</p> <p>8.3.5 ST5 - Hochofen mit CCS</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Bei der konventionellen CO₂-intensiven Hochofen-Konverter-Route wird Eisenerz mit Koks Kohle im Hochofen zu Roheisen reduziert und anschließend in einem Sauerstoffblaskonverter zu Stahl veredelt. Ohne Kohlenstoff kann diese Art der Reduktion nicht stattfinden und daher geht es bei der Dekarbonisierung dieser Route der Roheisen- und Stahlerzeugung darum, die Effizienz der Kohlenstoffverwendung bei der Reduktion zu steigern sowie das Reaktionsprodukt CO₂ abzutrennen und dauerhaft einzulagern. Hierzu dienen die Hochofengas-Rezyklierung (Top Gas Recycling TGR) sowie CCS-Technologien zur Abtrennung und Einlagerung des CO₂.</p> <p>Integrierte Hüttenwerke kombinieren die Prozesse der Verkokung von Koks Kohle (Kokerei) und der Reduktion von Erzen im Hochofen, wobei die jeweiligen gasförmigen Reaktionsprodukte im Verbund optimal genutzt werden können. Große integrierte Hüttenwerke erzeugen somit ein erhebliches Aufkommen an relativ reinem CO₂.</p> <p>Für die Abtrennung und Einlagerung von CO₂ (CCS) ist die Kombination des Hochofens mit einer Anlage zur Rezyklierung von Hochofengasen sinnvoll (TGR). Dabei werden zunächst CO und H₂ abgetrennt, die dem Hochofen wieder zugeführt werden und so für die Reduktion von Erzen zur Verfügung stehen. (Stel and Research Fund for Coal and Steel, 2014, p. 5) (Fischedick et al., 2014b, p. 565) Damit steigt zugleich der CO₂-Gehalt in den verbleibenden Abgasen für dessen Abtrennung.</p> <p>Mittels TGR und CCS lassen sich durchaus ambitionierte CO₂-Minderungen bei der Hochofen-Konverter-Route umsetzen. Bei CCS wird das abgetrennte CO₂ in eine geologisch geeignete Formation eingebracht. Hierbei standen bislang Aquifere sowie Öl- und Gaslagerstätten im Vordergrund des Interesses. Die langfristige Sicherheit der Einlagerung ist aber neueren Erkenntnissen aus Island zufolge durch dessen Mineralisation in Basaltformationen größer (Snæbjörnsdóttir und Gislason, 2016).</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Grundsätzlich kann CCS an jedem Koks Kohle-Hochofen eingesetzt werden. Es gibt aber Vorteile bei integrierten Hüttenwerken und in Kombination mit einer Hochofengas-Rezyklierung, die die Energieeffizienz des Hochofens steigert und die sich kostengünstig mit CCS kombinieren lässt. Die Ergänzung integrierter Hüttenwerke durch TGR erfordert keine zusätzlichen externen Systemvoraussetzungen. Der CCS-Pfad setzt die Verfügbarkeit geeigneter geologischer Formationen für die Einlagerung voraus. Für vorhandene Hochöfen bedingt das den Transport des abgetrennten CO₂</p>	

zum jeweiligen Ort der Einlagerung. Aufgrund der logistischen Anforderungen der Einsatzstoffe (Eisenerz, Koksrohle) und der Knappheit geeigneter geologischer Formationen für die Einlagerung sind den gesamten Transportaufwand minimierende Standorte in Deutschland rar. Dies gilt vor allem für Aquifere. Vorhandensein und Eignung von Basaltformationen wurden bislang für Deutschland nicht untersucht.

Infrastrukturbedarfe

Je nach räumlicher Konfiguration von Hochofen und der CO₂-Einlagerstätte sind mehr oder weniger umfangreiche Infrastrukturen für den Transport von Eisenerz und Koks (Binnenschiff, Bahn) sowie von CO₂ (Rohrleitungen) erforderlich. Grundsätzlich neu ist bei vorhandenen Standorten zur Stahlproduktion nur der Transport von CO₂.

Stand der Technik/Markteinführung

Es handelt sich um ein Bündel von Technologien zur Stahlerzeugung und zur Abtrennung von CO₂ sowie zur anschließenden Einlagerung, die jeweils spezifische technische Entwicklungsstände aufweisen:

- TRL 4-5 Hochofengas-Rezyklierung (TGR)(Wesseling et al., 2017)
- TRL 8 Abtrennung (CC) Hochofen
- TRL 8 CO₂-Einlagerung in Aquiferen
- TRL 6 CO₂-Einlagerung in Basaltformationen

Insgesamt wird der TRL des CCS-Pfads der Hochofen-Konverter-Route mit 4-5 eingeschätzt(Wesseling et al., 2017) und damit gerechnet, dass CCS unter günstigen Bedingungen ab 2020 großtechnisch einsatzfähig ist(Pardo et al., 2012). Die weltweite Demonstration von CCS konzentriert sich gegenwärtig auf die Förderung von Erdgas und Rohöl sowie auf die Stromerzeugung.

Zentrale offene Forschungsfragen

Grundsätzlich weist die Hochofen-Konverter-Route aufgrund ihrer fortgeschrittenen Nutzungsdauer begrenzte Innovationspotenziale auf(Weigel et al., 2016). Dabei steht die Rezyklierung von CO und H₂ als Bestandteilen des Kokerei- und Hochofengases im Vordergrund. Schwerpunktmäßig geht es um das Hochskalieren der im Rahmen des ULCOS-Projektes getesteten Verfahren zum Top Gas Recycling.

Offene Forschungsfragen lassen sich zudem bei der Abtrennung und Behandlung von CO₂ identifizieren. Die Abtrennung von CO₂ und dessen gasförmige Einlagerung in geologischen Formationen (Aquiferen) ist intensiv beforscht worden. Grundsätzlich erfordert die Abtrennung von CO₂, dessen Transport und Einlagerung einen zusätzlichen Energieeinsatz, der die gesamte Energieeffizienz der betreffenden Prozesse mindert und nicht zur Wertschöpfung beiträgt. Durch die Verbindung von TGR und CO₂-

Abtrennung stellt sich dies im Falle der Stahlproduktion über den Hochofen-Konverter-Pfad zwar etwas günstiger dar, das grundlegende Problem der Knappheit geeigneter geologischer Formationen und der Aufwand für eine CO₂-Logistik lässt aber bei fortschreitender Dekarbonisierung die Zukunftsfähigkeit des Hochofen-Konverter-Pfads fraglich erscheinen.

In Deutschland gibt es vor allem einen Mangel an geeigneten geologischen Formationen für die gasförmige Einlagerung von CO₂ in den bislang favorisierten Aquiferen und zu große Entfernungen zwischen bestehenden Emissionsquellen und diesen. Allerdings deuten neuere Forschungen in Island darauf hin, dass der bisherige Fokus auf eine dauerhafte gasförmige Einlagerung in Aquiferen nicht optimal ist. Vielmehr bieten weiter verbreitete vulkanische Basaltformationen die Möglichkeit, das eingelagerte CO₂ innerhalb weniger Jahre zu Kalkstein zu mineralisieren, was die dauerhafte Einlagerung garantiert. (Snæbjörnsdóttir und Gislason, 2016)

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Die Hochofengas-Rezylierung mit Carbon Capture wurde im EU-Projekt ULCOS (Ultra-Low CO₂ Steelmaking) in vier verschiedenen Varianten als ULCOS BF untersucht und für zwei Varianten des TGR in Lulea (Schweden) getestet. (Hirsch, 2013)

https://cordis.europa.eu/project/rcn/74430_en.html

Für CCS bei der Stahlproduktion gibt es eine für 0,8 Mt/a CO₂-Abscheidung ausgelegte Anlage in Abu Dhabi, die 2016 in Betrieb gegangen ist. Das abgeschiedene CO₂ wird in Rohöllagerstätten eingebracht und steigert dort die Förderung.

<https://www.globalccsinstitute.com/projects/abu-dhabi-ccs-project-phase-1-being-emirates-steel-industries-esi-ccs-project>

Mit dem CarbFix-Projekt konnte in Island gezeigt werden, dass die Einlagerung von CO₂ in vulkanische Basaltformationen zu einer deutlich schneller als erwarteten Mineralisation zu Kalkstein führen kann (zwei Jahre), die die Sicherheit der dauerhaften Einlagerung maßgeblich verbessert.

<https://www.or.is/carbfix>

<p>Branche: Primär-Rohstahlerzeugung</p> <p>8.3.6 ST6 - HISarna® mit CCS</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
Technologiebeschreibung	
<p>Beim HISarna®-Verfahren handelt es sich um eine Fortentwicklung der HISMelt-Technologie. Das Verfahren kombiniert die Kohle-Vorheizung und partielle Pyrolyse in einem Reaktor mit einem Zyklon-Konverter-Ofen.(Quader, M. Abdul et al., 2015)(Quader et al., 2016) Der Zyklon-Konverter-Ofen wird von oben mit Eisenerz befüllt. Das Eisenerz wird im oberen Bereich des Konverterofens verflüssigt und partiell reduziert und im unteren Bereich mit Kohlenstaub versetzt und vollständig zu Roheisen reduziert. Durch den Verzicht auf die Verarbeitung von Kohle zu Koks und die Vorbehandlung von Eisenerz(Burchart et al., 2015) wird die Energieeffizienz gesteigert und die CO₂-Emissionen werden so um rd. 20% abgesenkt. Das HISarna®-Verfahren eignet sich wegen des relativ reinen CO₂-Abgasstroms (N₂-frei) besonders für die Kombination mit CCS und so lassen sich ambitionierte CO₂-Minderungen (80%) umsetzen. Zudem können mindere Qualitäten von Erz und Kohle verarbeitet werden. Dem Erz können bis zu 50% Schrott beigemischt werden.</p>	
Systemvoraussetzungen	
<p>Hinsichtlich der Einsatzstoffe sind die Anforderungen gegenüber der konventionellen Hochofen-Konverter-Route deutlich reduziert, da auf die Sinterung oder Pelletierung von Eisenerz und die Produktion von Koks verzichtet wird. Hinsichtlich der Anwendung von CCS gelten prinzipiell die gleichen Anforderungen wie bei der konventionellen Hochofen-Konverter-Route (siehe dort).</p>	
Infrastrukturbedarfe	
<p>Der Infrastrukturbedarf ist wegen des Verzichts auf die Koksproduktion und die Pelletierung oder Sinterung von Eisenerz bezüglich der Einsatzstoffe geringer als bei der konventionellen Hochofen-Konverter-Route jedoch hinsichtlich der zusätzlichen Anwendung von CCS identisch.</p>	
Stand der Technik/Markteinführung	
<p>Grundsätzlich handelt es sich um ein Bündel von Technologien zur Stahlerzeugung und zur Abtrennung von CO₂ aus den Ofengasen sowie zur anschließenden Einlagerung. Diese weisen jeweils spezifische Entwicklungsstände auf:</p> <ul style="list-style-type: none"> - TRL 6-7 HISarna®-Verfahren (erwartete Marktreife bis 2030)(Pardo et al., 2012) 	

- TRL 8 Abtrennung (CC)
- TRL 8 Einlagerung für CCS (abhängig von den jeweiligen geologischen Bedingungen)

TRL-2 für die Kombination aus Hisarna und CCS

Zentrale offene Forschungsfragen


Die HISarna® Technologie ist weit entwickelt und Tata Industries hält mittlerweile exklusiv die Patent- und Markenrechte(TATA Steel).

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Das HISarna® Verfahren wurde im Rahmen des EU-Projektes ULCOS (Ultra-Low CO₂ Steelmaking) entwickelt und wird gegenwärtig von Tata Industries mit einer Pilotanlage bei Tata Steel in IJmuiden (NL) zur Anwendungsreife gebracht.

<https://www.tatasteelurope.com/en/innovation/hisarna>

https://cordis.europa.eu/project/rcn/74430_en.html

<p>8.4 Branche: Zementherstellung</p> <p>8.4.1 Z1 - CO₂-Capture Post-Combustion (Aminwäsche-Nachrüstung an konventionellen Zementöfen)</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Die Technologie <i>CO₂-Capture Post-Combustion</i> beschreibt das Einfangen prozess- und brennstoffbedingter CO₂-Emissionen mit Hilfe einer nachgeschalteten CO₂-Wäsche auf Aminbasis. Das abgeschiedene Kohlendioxid wird anschließend eingelagert (CCS - Carbon Capture and Storage) oder genutzt (CCU - Carbon Capture and Utilisation). Da der CO₂-Anteil im Abgas von Zementwerken mit ca. 25 % deutlich höher liegt als im Abgas von Kraftwerken (ca. 14 %), ist der apparative und energetische Aufwand für die Abscheidung entsprechend geringer (Schüwer et al., 2015).</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Die Technologie ist aufgrund hoher zusätzlicher Investitions- und Betriebskosten noch weit von der Marktreife entfernt (Zementexperte, 2017). Abhängig von der Entwicklung des CO₂-Preises werden die Zusatzkosten bei der Zementproduktion auf ca. 40 bis 90 % geschätzt (IEAGHG, 2008). Auch der für den Waschprozess hohe zusätzliche thermische (778 bis 972 kWh_{th} pro Tonne abgeschiedenes CO₂, (Öko-Institut e.V., 2012, p. 33)) und elektrische (167 kWh_{el}/tCO₂ für Abscheidung plus 129 kWh_{el}/tCO₂ für Kompression auf 110 bar, (ECRA, 2012, p. 99)) Energieaufwand stellt eine große Herausforderung dar. Optimierungsbedarf besteht auch hinsichtlich der stofflichen Reinheit des abgeschiedenen CO₂, da die Ofenabgase Katalysatorgifte enthalten können. Kleine Pilotstudien und Projekte sind in (ECRA, 2017a) dokumentiert. Ihr Entwicklungsstand wird mit TRL³⁷ 6 abgeschätzt (Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung, siehe auch unter „Pilotanlagen“).</p> <p>Neben dem hier beschriebenen chemischen Absorptionsverfahren gibt es noch weitere innovative Konzepte wie das Carbonate-Looping-Verfahren (Prinzip: trockene Sorption) sowie membranbasierte Verfahren (Polymermembranen, organische/anorganische Hybridmembranen), die zwar weitere Effizienzverbesserungen versprechen, sich jedoch noch in einem sehr frühen Entwicklungs- bzw. Forschungsstadium befinden. (Markewitz et al., 2017, p. 9) Weitere Infos zum Stand der Technik finden sich u.a. in (Lechtenböhmer et al., 2015a, p. 138).</p>	

³⁷ TRL = Technology Readiness Level

Systemvoraussetzungen

Die Technologie kann voraussichtlich nur zur Marktreife gelangen, falls Anreize durch ausreichend hohe CO₂-Emissionspreise entstehen oder sich ein Markt für CO₂ als Rohstoff entwickeln sollte. Die Entwicklung eines CO₂-Marktes würde das Beschreiten des PtG- bzw. PtF-Pfades (auf Basis von regenerativem Wasserstoff) voraussetzen. In diesem Fall könnte CO₂ für die Herstellung von synthetischen Chemieplattform-Rohstoffen sowie Brenn- und Treibstoffen genutzt werden. Alternativ erfordert die Speicherung (statt Nutzung) des abgeschiedenen CO₂ die politische und gesellschaftliche Akzeptanz der Kohlendioxid-Endlagerung.

Voraussichtlich ist die Technologie nur dann ökonomisch realisierbar, wenn ohnehin bestehende Infrastrukturen zum CO₂-Abtransport genutzt werden können bzw. entsprechende Industrie-Cluster (Kalk-, Chemieindustrie, Biogas- / Synthese-Anlagen, ...) für gemeinsame Input- bzw. Output-Produkte gebildet werden.

Infrastrukturbedarfe

Für die flächendeckende Umsetzung der Technologie ist der Aufbau eines CO₂-Pipeline-Netzes inklusive Verdichterstationen zum Abtransport des gewonnenen CO₂ zu Nutzern (CCU) oder zur Endlagerung (CCS) notwendig. Für die Endlagerung müssten langzeitstabile CO₂-Lagerstätten mit ausreichend hoher Kapazität erschlossen werden.

Zentrale offene Forschungsfragen

Zentrales Forschungsziel ist es, die hohen Kosten und den hohen energetischen Aufwand für den Waschprozess weiter zu reduzieren. Daneben besteht noch Forschungsbedarf bei der Entfernung unerwünschter Begleitstoffe aus dem Abgas, insbesondere bei der Rauchgasentstickung (DeNO_x) sowie der Rauchgasentschwefelung (DeSO_x).

Des Weiteren stellen sich infrastrukturelle Fragen, z.B. ob der Aufbau eines CO₂-Netzes alleine für die Zementbranche eine realistische bzw. wirtschaftliche Option ist oder ob stattdessen ein Zusammenschluss mit weiteren relevanten CO₂-Punktquellen angestrebt werden sollte. In diesem Zusammenhang muss auch geklärt werden, ob das abgeschiedene CO₂ abtransportiert werden soll oder ob sich CO₂-Senken (z.B. Methanisierungsanlagen aus EE-H₂, Plattform-Chemie, ...) in der Nähe von Zementwerken ansiedeln sollten.

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

2013 gründete die European Cement Research Academy GmbH (ECRA) die akademische Forschungseinrichtung „CO₂ to Energy: Carbon Capture in Cement Production and its Re-use“ an der Universität Mons (UMONS)

in Belgien am Lehrstuhl „Research Institute for Energy“. Darin enthalten waren u.a. die (mittlerweile beendete) Kooperation mit dem norwegischen Zementwerk Norcem Brevik. In diesem Zusammenhang wurden verschiedenen Abscheideverfahren getestet:

Solid Sorbent Technology (RTI)

Amine Technology (Aker Solutions)


Membrane Technologies (von einem Konsortium unter der Führung der Norwegian University of Science and Technology)

Carbonate Looping (Alstom Power)

Horizon-2020-Projekt CEMCAP (2015 - 2018):

Demonstration verschiedener CO₂-Capture-Technologien bei der Zementherstellung in industrienaher Anwendung (TRL 6, (ECRA, 2017a), (WBCSD, 2018))

Im indirekten Zusammenhang mit der Technologie stehen diverse CCU-Projekte, unter anderem das Carbon2Chem-Projekt (TKIS) in Duisburg (Thyssenkrupp AG, 2018). Weitere aktuelle Veröffentlichungen und Vorhaben sind (ECRA, 2017b) und (ECRA, 2017c) zu entnehmen.

<p>Branche: Zementherstellung</p> <p>8.4.2 Z2 - CO₂-Capture Oxyfuel (Ofenneubau)</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Die Technologie <i>CO₂-Capture Oxyfuel</i> beschreibt das Einfangen der prozess- und brennstoffbedingten CO₂-Emissionen mit Hilfe einer nachgeschalteten physikalischen CO₂-Abtrennung. Das abgeschiedene Kohlendioxid wird anschließend eingelagert (CCS - Carbon Capture and Storage) oder genutzt (CCU - Carbon Capture and Utilisation).</p> <p>Beim Oxyfuel-Verfahren wird (im Gegensatz zum Post-Combustion-Verfahren) Sauerstoff anstelle von Luft für die Verbrennung eingesetzt. Dadurch entfällt das apparatetechnisch teure und energetisch aufwändige Durchschleusen von Luft-Stickstoff (Anteil in der Luft rund 78%) durch den Verbrennungsprozess. Das Abgas besteht daher hauptsächlich aus CO₂ und Wasserdampf, welcher durch Kühlung relativ einfach auskondensiert werden kann. Allerdings ist die Bereitstellung des benötigten (mind. 95%-igen) Sauerstoffs - i.d.R. mittels einer kryogenen Luftzerlegungsanlage³⁸ - technisch, energetisch und von den Kosten her aufwändig.</p> <p>Da die Verbrennung mit reinem Sauerstoff zu deutlich höheren Verbrennungstemperaturen führt, ist aufgrund der geänderten wärme- und strömungstechnischen Randbedingungen eine Modifikation der Brenner und des Feuerraumes erforderlich. Ein Teil des CO₂-reichen Verbrennungsgases muss in den Feuerungsraum zurückgeführt werden, um die Feuerungstemperaturen zu begrenzen (Markewitz et al., 2017).</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Das Verfahren wurde / wird u.a. für den Einsatz in der Kraftwerkstechnik (fossile Stromerzeugung) entwickelt. Für Kohlekraftwerke befindet sich das Verfahren in der Demonstrationsphase. Gasturbinen für Sauerstoffbetrieb befinden sich noch im Entwicklungsstadium.</p> <p>Luftzerlegungsanlagen sind Stand der Technik, der energetischer Mehraufwand für die notwendige Sauerstoff-Produktion würde etwa eine Verdopplung des derzeitigen spez. Strombedarfs von ca. 109 kWh_{el}/t Zement bedeuten (ECRA, 2012, p. 84; IPCC, 2014; Lechtenböhmer et al., 2015a, p. 123 f.).</p> <p>Für Zementwerke werden derzeit Konzeptstudien zu Oxyfuel entwickelt. Die European Cement Research Academy GmbH (ECRA) forscht z.B. seit</p>	

³⁸ Alternativ kann der Sauerstoff auch durch Wasserelektrolyse erzeugt werden. Dies hätte den Vorteil, dass zusätzlich Wasserstoff als Nebenprodukt gewonnen werden kann (siehe dazu den Technologie-Steckbrief Z4: *Synergetische Konzepte - Oxyfuel-Verfahren & PtG*).

2007 in fünf Phasen dazu. Derzeit wird in Phase IV die Möglichkeit untersucht, den Bau eines Oxyfuel-Ofens in industriellem Maßstab zu initiieren (ECRA, 2017a). Die Markteinführung ist jedoch lediglich in der Langzeitperspektive denkbar (Zementexperte, 2017).

Systemvoraussetzungen

Die Technologie kann nur dann zur Marktreife gelangen, falls Anreize durch ausreichend hohe CO₂-Emissionspreise entstehen oder sich ein Markt für CO₂ als Rohstoff entwickeln sollte. Die Entwicklung eines CO₂-Marktes würde das Beschreiten des PtG- bzw. PtF-Pfades (auf Basis von regenerativem Wasserstoff) voraussetzen. In diesem Fall könnte CO₂ für die Herstellung von synthetischen Chemieplattform-Rohstoffen sowie Brenn- und Treibstoffen genutzt werden. Alternativ erfordert die Speicherung (statt Nutzung) des abgeschiedenen CO₂ die politische und gesellschaftliche Akzeptanz der Kohlendioxid-Endlagerung.

Voraussichtlich ist die Technologie nur dann ökonomisch realisierbar, wenn ohnehin bestehende Infrastrukturen zum CO₂-Abtransport genutzt werden können bzw. entsprechende Industrie-Cluster (Kalk-, Chemieindustrie, Biogas- / Synthese-Anlagen, ...) für gemeinsame Input- bzw. Output-Produkte gebildet werden.

Infrastrukturbedarfe

Für die flächendeckende Umsetzung der Technologie ist der Aufbau eines CO₂-Pipeline-Netzes inklusive Verdichterstationen zum Abtransport des gewonnenen CO₂ zu Nutzern (CCU) oder zur Endlagerung (CCS) notwendig. Für die Endlagerung müssten langzeitstabile CO₂-Lagerstätten mit ausreichend hoher Kapazität erschlossen werden.

Für die CO₂-arme Herstellung des benötigten Sauerstoffs in Luftzerlegungsanlagen (oder alternativ in Elektrolyseanlagen) müssten ausreichende Mengen an erneuerbarem Strom zur Verfügung stehen. Dies bedingt zum einen ausreichende Erzeugungs- und Speicherkapazitäten als auch ausreichende Stromtransportwege auf Verteilnetz- und Übertragungsnetzebene.

Zentrale offene Forschungsfragen

Neben dem zentralen Forschungsgegenstand der Entwicklung eines komplett neuen Brenner- und Ofen-Designs inklusive notwendiger Kostenreduktionen besteht noch Forschungsbedarf bei der Entfernung unerwünschter Begleitstoffe aus dem Abgas, insbesondere bei der Rauchgasentstickung (DeNO_x) sowie der Rauchgasentschwefelung (DeSO_x). Als problematisch könnte sich beim Oxyfuel-Verfahren der höhere CO₂-Partialdruck im Abgas herausstellen, da er möglicherweise die Kalzinierungsreaktion nachteilig beeinflusst (Markewitz et al., 2017, p. 22).

Des Weiteren stellen sich infrastrukturelle Fragen, z.B. ob der Aufbau eines CO₂-Netzes alleine für die Zementbranche eine realistische bzw. wirtschaftliche Option ist oder ob stattdessen ein Zusammenschluss mit weiteren relevanten CO₂-Punktquellen angestrebt werden sollte. In diesem Zusammenhang muss auch geklärt werden, ob das abgeschiedene CO₂ abtransportiert werden soll oder ob sich CO₂-Senken (z.B. Methanisierungsanlagen aus EE-H₂, Plattform-Chemie, ...) in der Nähe von Zementwerken ansiedeln sollten.

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

2013 gründete die European Cement Research Academy GmbH (ECRA) die akademische Forschungseinrichtung „CO₂ to Energy: Carbon Capture in Cement Production and its Re-use“ an der Universität Mons (UMONS) in Belgien am Lehrstuhl „Research Institute for Energy“. Darin enthalten waren u.a. die (mittlerweile beendete) Kooperation mit dem norwegischen Zementwerk Norcem Brevik. In diesem Zusammenhang wurden verschiedenen Abscheideverfahren getestet:

Solid Sorbent Technology (RTI)

Amine Technology (Aker Solutions)


Membrane Technologies (von einem Konsortium unter der Führung der Norwegian University of Science and Technology)

Carbonate Looping (Alstom Power)

Horizon-2020-Projekt CEMCAP (2015 - 2018):

Demonstration verschiedener CO₂-Capture-Technologien bei der Zementherstellung in industrienaher Anwendung (TRL 6, (ECRA, 2017a), (WBCSD, 2018))

Im indirekten Zusammenhang mit der Technologie stehen diverse CCU-Projekte, unter anderem das Carbon2Chem-Projekt (TKIS) in Duisburg (Thyssenkrupp AG, 2018). Weitere aktuelle Veröffentlichungen und Vorhaben sind (ECRA, 2017b) und (ECRA, 2017c) zu entnehmen.

<p>Branche: Zementherstellung</p> <p>8.4.3 Z3 - Elektrifizierung des Wärmeeintrags (PtH) im Sinterprozess und/oder bei der Kalzinierung</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Das hier beschriebene Power-to-Heat-Verfahren (PtH) für die Zementherstellung ist sowohl für die Kalzinierung im <i>Kalkofen</i> als auch für die gekoppelte Kalzinierung und Sinterung im <i>Zementofen</i> (Drehrohrföfen) anwendbar. Die derzeitige Referenztechnologie ist die Brennertechnologie mit Kohlestaub, Ersatzbrennstoff (EBS) oder Erdgas als Energieträger. Die Elektrifizierung des Wärmeeintrags kann in monovalente und hybride Elektrifizierung unterteilt werden.</p> <p>Die <i>hybride</i> elektrische Luftvorwärmung kann (mit Anpassungen) in bestehende Systeme integriert werden. Die Umsetzung erfolgt hierbei durch das Einblasen elektrisch erhitzter Luft oder den direkten Einsatz von Widerstandsheizelementen. Ein Hybridkonzept ließe sich beispielsweise relativ einfach für erdgasbefeuerte Heißgaserzeuger umsetzen (Zementexperte, 2017).</p> <p>Die <i>monovalente</i> Elektrifizierung erfordert eine komplette Neukonstruktion der Anlage. Die Nutzung von CO₂ im Kreislauf als Wärmeträger (an Stelle von Verbrennungsluft und Verbrennungsgasen) macht eine CO₂-Gaskühlung mit CO₂-Wärmetauschern erforderlich. Diejenige CO₂-Menge, die dem Prozess durch Kalkstein neu hinzugeführt wird, muss wieder ausgeschleust werden. Der apparative Aufwand für eine monovalente Elektrifizierung wird als einfach(er) angesehen als bei konventionellen Zementöfen mit Verbrennung, da u.a. keine Zuluft- und Brenngaskonditionierung erforderlich ist.</p> <p>Der Vorteil monovalenter elektrischer Systeme ist, dass reine CO₂-Ströme aufgefangen werden können, da keine Verbrennungsluft bzw. -gase entstehen oder durchgeschleust werden. Es entsteht eine hochreine CO₂-Quelle, welche in relevanten Mengen zur Gas-Synthese mit EE-H₂ genutzt werden könnte. Es würden sich Möglichkeiten für die Synergien von PtH und PtG ergeben, da allein in NRW in 10 Anlagen ca. 7,9 Mt/a reines CO₂ produziert werden könnte (Schüwer et al., 2015, p. 6).</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Elektro-Kalzinatoren existieren derzeit nur als F&E-Skizzen. Der Technology Readiness Level wird daher mit TRL 3 (Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie) abgeschätzt (Schneider und Schüwer, 2017b, p. 66 ff.). Indirekt elektrisch beheizte Drehrohröfen gibt es bislang nur im Technikum-Maßstab mit einem</p>	

Durchsatz von bis zu 0,4 t/h (IBU-tec, 2018), entsprechend einem TRL 4 (Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor).

Angesichts der sehr niedrigen Referenzbrennstoffkosten für die vorwiegend eingesetzten Ersatzbrennstoffe (durchschnittlich 63 % in 2014 (VDZ und WI, 2015, p. 15)) und angesichts der notwendigen Zuführung sehr hoher Energiemengen bzw. Leistungen ist die Elektrifizierung bei der Zementproduktion noch weit ab von einer Kommerzialisierung.

Systemvoraussetzungen

Eine Umsetzung der monovalenten Elektrifizierung im Sinterprozess und bei der Kalzinierung würde sehr große Mengen an erneuerbarem und CO₂-freiem Strom in der Grundlast erforderlich machen. Dies impliziert einen korrelierender Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungsanlagen. Ferner wäre ein Neubau (monovalent) oder zumindest eine Ertüchtigung (hybrid) von langlebigen Drehrohröfen oder Kalzinatoren zu Zeitpunkten erforderlich, die in Deutschland wahrscheinlich in der Regel außerhalb der normalen Ersatz-Investitionszyklen liegen (Zementexperte, 2017).

Die Technologie kann voraussichtlich nur zur Marktreife gelangen, wenn langfristig Dekarbonisierungsanreize z.B. durch ausreichend hohe CO₂-Emissionspreise gesetzt werden. Mit der Elektrifizierung selber würden -erneuerbaren, CO₂-freien Strom vorausgesetzt - mit den brennstoffbedingten Emissionen lediglich ca. ein Drittel der im Sinter- bzw. Kalzinierungsprozess entstehenden gesamten CO₂-Emissionen entfallen. Zwei Drittel der Emissionen sind jedoch prozessbedingt und würden daher auch in einer mit Strom betriebenen Anlage weiterhin entstehen. Daher macht eine (monovalente) Elektrifizierung insbesondere dann Sinn, wenn sie mit der Nutzung (CCU) der hochrein anfallenden CO₂-Ströme aus dem Entsäureungsprozess kombiniert wird (s.o.).

Infrastrukturbedarfe

Je nach Ausführung (hybrid/ monovalent) erfordert die Technologie die Zuführung sehr hoher elektrischer Energiemengen bzw. Leistungen im zwei- bis dreistelligen MW-Bereich. Dies bedingt in der Regel den Ausbau der Kapazitäten von Verteilnetzen und ggf. auch von Übertragungsnetzen. Für eine Dekarbonisierung ist außerdem der korrelierende Ausbau regenerativer Erzeugungskapazitäten zwingend. Einschränkungen entstehen bei der monovalenten Elektrifizierung dadurch, dass konventionelle Kalköfen aus prozesstechnischen Gründen Grundlastanlagen sind und ein Lastfolgebetrieb (DSM) elektrischer Anlagen keine Option darstellt. Dies stellt erhöhte Anforderungen an die gesicherte Bereitstellung von fluktuierenden erneuerbaren Stromquellen, z.B. durch zusätzliche Speichertechnologien.

Für den Fall, dass - wie oben beschrieben - eine monovalente Elektrifizierung mit der rohstofflichen Nutzung der prozessbedingten CO₂-

Abgasströme kombiniert wird, wäre der Aufbau eines CO₂-Pipeline-Netzes inklusive Verdichterstationen zum Abtransport des gewonnenen CO₂ zu Nutzern (CCU) oder zur Endlagerung (CCS) notwendig. Für die Endlagerung müssen langzeitstabile CO₂-Lagerstätten mit ausreichend hoher Kapazität erschlossen werden.

Zentrale offene Forschungsfragen


Da sich Elektro-Kalzinatoren bzw. Elektro-Drehöfen noch im frühen F&E-Stadium befinden, müssen zunächst grundsätzliche technisch-physikalische bzw. thermodynamische Fragestellungen gelöst werden, die sich insbesondere aus den veränderten Eigenschaften der Gase (CO₂ statt Luft und Brenngase) sowie aus dem grundsätzlich veränderten wärme- und strömungstechnischen Aufbau einer solchen Anlage ergeben. Unter anderem muss berücksichtigt werden, dass CO₂ im Kalzinator oberflächlich mit Kalk reagieren kann und dies zu unerwünschter Rekarbonatisierung führen kann. Der im Zementofen gebrannte Klinker reagiert hingegen nicht mit CO₂.

Sofern der synergetische Pfad der gleichzeitigen Nutzung der CO₂-Abgase beschritten werden soll, stellen sich infrastrukturelle Fragen, die in Machbarkeitsstudien aus technischer und wirtschaftlicher Perspektive analysiert werden sollten. Zu diesen Forschungsfragen gehören z.B. die Frage, ob der Aufbau eines CO₂-Netzes alleine für die Zementbranche eine realistische bzw. wirtschaftliche Option ist oder ob stattdessen ein Zusammenschluss mit weiteren relevanten CO₂-Punktquellen angestrebt werden sollte. In diesem Zusammenhang muss auch geklärt werden, ob das abgeschiedene CO₂ abtransportiert werden soll oder ob sich CO₂-Senken (z.B. Methanisierungsanlagen aus EE-H₂, Plattform-Chemie, ...) in der Nähe von Zementwerken ansiedeln sollten.

Pilotanlagen / laufende Forschungsprojekte

Es existieren erste kleine Versuchsanlagen zu indirekt elektrisch beheizten Drehrohröfen im Temperaturbereich 100 – 1.150°C und einem Durchsatz von 40 - 400 kg/h (IBU-tec, 2018)³⁹. Indirekt beheizte Drehrohröfen erzeugen die Wärme außerhalb des Reaktionsraumes durch Erdgasbrenner oder elektrische Heizelemente und führen sie über die Drehrohrwand zu. Dies erlaubt eine Materialbehandlung auch unter definierten Gasatmosphären (z. B. inert oder reduzierend), da entstehende Verbrennungsgase nicht in den Reaktionsraum eindringen.

³⁹ Zum Vergleich: Die größten (konventionellen) Zementöfen haben in Deutschland eine max. Kapazität von ca. 3.000 t/d (125 t/h) und international von bis zu 10.000 t/d (417 t/h) (Zementexperte, 2017).

<p>Branche: Zementherstellung</p> <p>8.4.4 Z4 - Synergetische Konzepte Oxyfuel-Verfahren & PtG (Elektrolyse und ggf. Methansynthese)</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Das Konzept beschreibt die (räumliche und stoffliche) Kombination der drei Verfahren</p> <p>Wasserelektrolyse</p> <p>Oxyfuel-Zementproduktion (Kalzinierungs- und/oder Sinterprozess) und Methanisierung (optional).</p> <p>Ziel der Kombination von Power-to-Gas- und Oxyfuel-Verfahren ist die Nutzung von reinem Sauerstoff, der als Co-Produkt der Wasserstoffelektrolyse entsteht, direkt vor Ort für die Zementproduktion im Oxyfuel-Verfahren. Beim Oxyfuel-Verfahren wird der Brennstoff mit reinem Sauerstoff anstelle von Luft verbrannt (s. Steckbrief Z2). So lassen sich einerseits höhere Flammentemperaturen erreichen, die sich über eine Abgas-Rezirkulation regulieren lassen. Insbesondere aber entfällt das apparatetechnisch teure und energetisch aufwändige Durchschleusen von Luft-Stickstoff (Anteil in der Luft rund 78%) durch den Verbrennungsprozess. Das Abgas besteht daher hauptsächlich aus CO₂ und Wasserdampf, welcher durch Kühlung relativ einfach auskondensiert werden kann. In einem dritten Schritt kann das auf diese Weise abgeschiedene CO₂ zur Veredelung des Wasserstoffs aus der Elektrolyse zu Methan (oder anderen Brenn- oder Rohstoffen) verwendet werden.</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Für die Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff sind folgende drei Verfahren relevant: Die Alkalische Elektrolyse (Technology Readiness Level TRL 8), die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (TRL 6) sowie die Hochtemperatur-Elektrolyse (TRL 4). Die Entwicklungsziele der Technologien liegen bei der Verlängerung der Lebensdauer, der Steigerung des Wirkungsgrade, der Kostenreduktion für die alkalische Elektrolyse und der Entwicklung von Katalysatormaterialien, von Prototypen sowie kommerziellen Anlagenkonzepten. Die am besten erprobte Anlage ist die alkalische Elektrolyse, bei der noch der Nachweis des kommerziellen Einsatzes erfolgen muss. Dieses Ziel wird schätzungsweise in 2020 erreicht. (Andreas Brinner et al., 2018)</p> <p>Die Zementproduktion im Oxyfuelverfahren wird in Steckbrief Z2 behandelt. Laut diesem werden derzeit Konzeptstudien zu Oxyfuel entwickelt. Während die European Cement Research Academy GmbH (ECRA) daran</p>	

forscht, den Bau eines Oxyfuel-Ofens im industriellen Maßstab zu initiieren, ist eine Markteinführung jedoch lediglich in der Langzeitperspektive realistisch.

Für die chemisch-katalytische Methanisierung von Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff gibt es verschiedene Methoden. Die bereits erprobten Verfahren sind der Festbettreaktor (TRL 8), der Wirbelschichtreaktor (TRL 6) und der Drei-Phasen-Reaktor (TRL 4). Der Stand der Technik unterscheidet sich also abhängig von der Technologie deutlich. Für die am besten erprobte Methode steht lediglich der Nachweis des kommerziellen Einsatzes noch aus. (Schmidt et al., 2018)

Für das eigentliche synergetische Konzept, also die Kombination dieser drei Technologien existieren noch keine Pilotanlagen. Diese sind laut E-CRA zwar in Planung, werden jedoch nicht vor 2020 realisiert. Auf Basis von Gesprächen mit Experten aus der Zementbranche wird das TRL auf 2 – 4 geschätzt. Die Technologie bzw. das Konzept befindet sich also noch in der Entwicklung.

Systemvoraussetzungen

Die CO₂-Bepreisung hat einen großen Einfluss auf die Rentabilität der Anlage, von daher müssten entsprechende finanzielle und / oder ordnungspolitische Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Die Anlagen erfordern als kombinierte Produktionsstätten von Zement und Wasserstoff (bzw. Methan) eine potentielle Weiternutzung dieser Produkte. Dies bedingt einerseits eine Infrastrukturanbindung zum Transport der Güter sowie andererseits eine ausreichend hohe gesellschaftliche und politische Akzeptanz für die CO₂-Wiederverwertung und den Einsatz von Wasserstoff. Die Vermutung liegt zwar nahe, dass die Akzeptanz bei CCU (CO₂-Reuse) generell höher sein wird als bei CCS (CO₂-Endlagerung), sie muss aber im Vorfeld noch untersucht bzw. gewonnen werden.

Infrastrukturbedarfe

Die Kombination der drei Technologien erfordert grundsätzlich die Infrastruktur für die einzelnen Technologien (Elektrolyse, Oxyfuel-Zementproduktion und Methanisierung). Andererseits ergeben sich aus der Kopplung der Prozesse weitere Infrastrukturbedarfe z.B. für Transporte und Speicherung von Medien sowie für Informations- und Kommunikationstechnik (IKT).

Für die Kopplung der Verfahren müssen die drei Prozesse eng auf einander abgestimmt und gesteuert werden. So erfordern die Anlagen beispielsweise gewisse Pufferspeicher für die genutzten Rohstoffe (besonders für die Gase O₂, H₂ und CO₂), damit die Auslastung sichergestellt und reguliert werden kann.

Für die Elektrolyse werden Wasser und Strom benötigt. Für die CO₂-freie

Herstellung des benötigten Sauerstoffs und Wasserstoffs in der Elektrolyseanlage müssen ausreichende Mengen an erneuerbarem Strom zur Verfügung stehen. Dies bedingt zum einen ausreichende Erzeugungs- und Speicherkapazitäten als auch ausreichende Stromtransportwege auf Verteilnetz- und Übertragungsnetzebene. Zur Einspeisung von Wasserstoff/Methan in das Erdgasnetz ist darüberhinaus eine Anbindung an ebendieses erforderlich.

Für die Zementproduktion müssen außerdem Transportwege (Anbindung an Bahntrassen und Straßen) für die Bereitstellung der Rohstoffe (insbesondere Kalkstein, Ton und Sand) und für den Abtransport des Endproduktes (Zement) vorhanden sein oder geschaffen werden.

Zentrale offene Forschungsfragen

Da diese Technologie noch am Anfang ihrer Entwicklung steht, sind Machbarkeitsstudien aus technischer und wirtschaftlicher Perspektive sowie eine darauffolgende Initiierung und Untersuchung von Pilotanlagen erforderlich. Forschungsfragen sind unter anderem:

Wie lassen sich die Mengenverhältnisse der chemischen Edukte und Produkte insbesondere bei Anlagen im industriellen Maßstab steuern und aufeinander abstimmen?

Welcher Qualität müssen die Edukte sein, um die Anlage kommerziell betreiben zu können?

(Wann) gibt es in Deutschland einen Bedarf für Neubau- und/oder Retrofit-Zementanlagen?


Wie sieht ein optimaler Standort für eine solche Anlage aus? Sind Regionen mit hohem EE-Überschussstrom in Küstennähe, in der Nähe bestehender Zementanlagen oder nahe von Erdgas-Pipelines zur direkten Einspeisung von synthetischem Methan am sinnvollsten?

Wie ist die Akzeptanz von Anlagen zur H₂-Synthese und CO₂-Wiederverwendung, ggf. inklusive notwendiger Transportinfrastrukturen?

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

Für die drei Einzelkomponenten Wasserstoffherzeugung, Oxyfuel-Verfahren und Methanisierung gibt es jeweilige Pilotanlagen. Kombianlagen, die erzeugten Wasserstoff methanisieren, stehen in Schwandorf (Bayern), Straubing (Bayern), Allendorf (Hessen), Werlte (Niedersachsen), Kirchheimbolanden (Rheinland-Pfalz) sowie bei Hypos e.V. (Sachsen-Anhalt)(DVGW, 2015). 2013 gründete ECRA die akademische Forschungseinrichtung „CO₂ to Energy: Carbon Capture in Cement Production and its Re-use“ an der Universität Mons (UMONS) in Belgien am Lehrstuhl „Research Institute for Energy“. Darin enthalten sind auch Pilotprojekte zur Herstellung von Zement mittels Oxyfuel-Verfahren(ECRA, 2017a).

Anlagen, die alle drei Verfahren, also das Oxyfuel-Verfahren (s. Technologie-Steckbrief Z2: *CO₂-Capture Oxyfuel (Ofenneubau)*) zur Zementproduktion mit den PtG-Verfahren kombinieren, existieren noch nicht.

<p>Branche: Zementherstellung</p> <p>8.4.5 Z5 - Alternative Zemente (Klinkersubstitute)</p>	 <p>Wuppertal Institut</p>
<p>Technologiebeschreibung</p>	
<p>Alternative Zemente bzw. Klinkersubstitute verfolgen den Ansatz der Herabsetzung des sogenannten „Klinkerfaktors“ (= kg Zementklinker / kg Zement) durch Verwendung alternativer Zementbestandteile. Durch die Herabsetzung des Klinkeranteils reduzieren sich die hohen rohstoff- und brennstoffbedingten CO₂-Emissionen der Zementklinker-Produktion (UBA, 2014, p. 173).</p> <p>Das CO₂-Reduktionspotential dieser Variante würde laut World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) und IEA bei einer Reduktion des Klinkerfaktors von 0,77 in 2010 (= Referenztechnologie) auf 0,71 in 2050 bei 60 kg/t liegen.</p> <p>Laut dem Bericht „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ vom Umweltbundesamt (UBA), würde für Deutschland bei gleichbleibender Produktionsmenge eine Reduktion des Klinkerfaktors auf 0,6 (- 22%) in 2050 2,75 Mio. t rohstoffbedingter und 1,86 Mio. t brennstoffbedingter CO₂-Einsparung entsprechen. Die spezifische Reduktion ist 70% rohstoffbedingt und 50% energiebedingt (thermisch und elektrisch). Das UBA geht davon aus, dass „die „grünen“ Zemente der Zukunft den größten Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie leisten werden“(UBA, 2014, p. 173f).</p>	
<p>Stand der Technik/Markteinführung</p>	
<p>Ein flächendeckender kommerzieller Einsatz liegt noch in weiter Ferne. Derzeit ist noch nicht absehbar, welche Produkte bzw. Ansätze Marktreife erlangen werden. Die kommerzielle Markteinführung von alternativen Zementen gestaltet sich schwierig, da es sich bei Zement um ein preisgünstiges Produkt für den Massenmarkt handelt. Für das Mahlen von Low-Carbon-Zement erhöht sich zudem der Stromeinsatz um etwa 50% (Lechtenböhrer et al., 2015a, p. 124,133), (UBA, 2014, p. 174). Der TRL-Level (Technology Readiness Level) wird mit TRL 4 (Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor) abgeschätzt.</p>	
<p>Systemvoraussetzungen</p>	
<p>Voraussetzung für die Etablierung alternativer Zemente ist die langfristige Verfügbarkeit verwendeter Zuschlagstoffe (Hüttensand, Flugasche, Kalksteinmehl, gebrannter Schiefer, Puzzolane, Silicastaub, ...). Zum Teil ist die Verfügbarkeit unklar bzw. wird als kritisch angesehen (z.B. bei Hüttensand).</p>	

Außerdem müssen die potenziellen neuen Zementbestandteile in die Zementnorm eingehen, was Zulassungszeiten von mehr als 10 Jahren bedeuten könnte (Lechtenböhrer et al., 2015a, pp. 133, 136f).

Infrastrukturbedarfe

Weitreichende Veränderungen der Infrastruktur sind nicht zu erwarten.

Zentrale offene Forschungsfragen

Wesentliche begrenzende Faktoren zur Entwicklung neuer Zementsorten ergeben sich aus dem Einfluss der alternativen Zementbestandteile auf die Anwendbarkeit und Erfüllung technischer Normen (z.B. Druckfestigkeit, Beständigkeit und Dauerhaftigkeit des hergestellten Betons) sowie auf die Marktakzeptanz.

Die langfristige Verfügbarkeit, Umweltauswirkungen und die CO₂-Bilanzierung der alternativen Zuschlagstoffe (Hüttensand, Flugasche, Kalksteinmehl, gebrannter Schiefer, Puzzolane, Silicastaub, ...) müssen erforscht werden. Auch die dauerhafte Verfügbarkeit von Magnesium (z.B. bei Novacem) und Aluminium bei Einsatz als Silikate ist unsicher.

Ebenfalls muss der Einfluss der Aktivierungsmahlung auf die hydraulischen Eigenschaften des Zements erforscht werden (UBA, 2014, p. 173), (Lechtenböhrer et al., 2015a, pp. 133, 142).

Pilotanlagen/laufende Forschungsprojekte

„Grüne“ Zemente, also neuartige zementähnliche Baustoffe mit geringerem Energie- und Ressourcenverbrauch und geringeren CO₂-Emissionen bei der Herstellung, welche entwickelt oder schon angeboten werden, sind z.B. die folgenden (UBA, 2014, p. 173f), (Lechtenböhrer et al., 2015a, p. 137f):

Celitement® aus Calcium-Hydrosilikat → 40 bis 50% Einsparpotenzial
(www.celitement.de / www.schwenk.de/produkte-loesungen/produktinnovationen)

Novacem® aus Magnesium-Hydrosilikat → 80 - 100% Einsparpotenzial

Zeobond® (www.zeobond.com) → 80 - 100% Einsparpotenzial

Optimo® (Fa. Holcim / CH, www.holcim.ch) mit gebranntem Schiefer als Klinkerersatzstoff

Zement aus Industrieabfällen (z.B. Fa. Cenin / UK, www.cenin.co.uk und Fa. CeraTech / US, www.ceratechinc.com)

9 Anhang 2: Imagebroschüre

Der Anhang der Imagebroschüre steht online unter <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/718/> zum download verfügbar.

10 Anhang 3: Dokumentation der Veranstaltung "Klimaschutz in der Industrie" am 10. November 2017 zur COP 23

Der Anhang der Dokumentation der Veranstaltung „Klimaschutz in der Industrie“ vom 10. November 2017 zur COP23 steht online unter <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/718/> zum download verfügbar.