

192_ Wuppertal Paper | Wuppertal, September 2016

Wertschöpfungsketten in NRW im Kontext der Energiewende

Eine Metaanalyse bezüglich Stahl,
polymeren Werkstoffen und dem Anlagenbau
in der erneuerbaren Energiewirtschaft

Georg Kobiela, Daniel Vallentin

Herausgeber:

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

Autoren:

Georg Kobiela, Daniel Vallentin
E-Mail: georg.kobiela@wupperinst.org

„Wuppertal Papers“ sind Diskussionspapiere. Sie sollen Interessenten frühzeitig mit bestimmten Aspekten der Arbeit des Instituts vertraut machen und zu kritischer Diskussion einladen. Das Wuppertal Institut achtet auf ihre wissenschaftliche Qualität, identifiziert sich aber nicht notwendigerweise mit ihrem Inhalt.

Der Text dieses Werks steht unter der Lizenz *Creative Commons Namensnennung – nicht-kommerziell – keine Bearbeitung* Lizenz 4.0 International | <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Kurzfassung

Im Zuge der Energiewende steht die Industrie in Nordrhein-Westfalen vor substantiellen Herausforderungen. Um die Energiewende zum Erfolg zu führen bedarf es großer Transformationen hinsichtlich der industriellen Infrastruktur. Dies bezieht sich sowohl auf den Energiebedarf als auch auf die Treibhausgasemissionen. Des Weiteren darf solch eine Betrachtung auch den allgemeinen Ressourcenbedarf nicht vernachlässigen.

Für solch eine Transformation ist ein Zusammenspiel der industriellen mit den öffentlichen Akteuren vonnöten. Politische Unterstützung aber auch Regulierung sind nötig, um diese Transformation zu unterstützen und voranzubringen. Dies reicht vom Anpassen eines förderlichen Marktrahmens für die marktwirtschaftliche Selbstoptimierung über öffentliche Fördergelder und –projekte hin zu gesetzlichen Tarifen und Regularien. Die Steuerbarkeit solcher Prozesse hängt jedoch auch stark davon ab, in welchem Umfang die entlang der oftmals komplexen Wertschöpfungsketten ablaufenden industriellen Prozesse innerhalb NRWs angesiedelt sind. Hierzu muss neben dem technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten einer solchen Veränderung der Grad der Geschlossenheit der entsprechenden Wertschöpfungsketten betrachtet werden.

In der vorliegenden Studie werden hierzu exemplarisch drei Wertschöpfungsketten aus unterschiedlichen industriellen Bereichen betrachtet. Diese wurden dergestalt ausgewählt, dass sie sowohl eine große strategische, wirtschaftliche bzw. seitens des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen quantitative Relevanz für die Energiewende speziell in NRW haben, als auch unterschiedliche Arten der äußeren Anbindung, der internationalen Konkurrenz und der internen Governancestruktur aufweisen.

Als zu betrachtende Wertschöpfungsketten wurden diejenigen der Eisen- und Stahlproduktion, der chemischen Industrie mit dem Fokus auf polymere Faserverbundwerkstoffe, und des Anlagenbaus für die Erneuerbare Energiewirtschaft mit dem Fokus auf Windkraftanlagen ausgewählt.

Für diese Analyse wurde ein Set von quantitativen und qualitativen Kriterien erstellt, das zum vertieften Verständnis dieser Wertschöpfungsketten dient. Es wurden für diese Arbeit keine neuen Daten erhoben, stattdessen erfolgt eine Metaanalyse existierender akademischer Studien und Quellen aus den jeweiligen Industrien. Diese Befunde werden in der Art einer Synthese zusammengetragen.

Darüber hinaus werden mögliche Einflussnahmen zur Unterstützung der angestrebten Transformationsprozesse umrissen.

Für alle drei betrachteten Wertschöpfungsketten muss eine ungenügende Geschlossenheit festgestellt werden. Dies impliziert die Notwendigkeit einer Einbindung weiterer Regionen und höherer politischer Ebenen in den Transformationsprozess. NRW kann somit als eine Schlüsselregion verstanden werden, die zum Gelingen der Energiewende entscheidende Beiträge leisten kann – jedoch sind die anstehenden Herausforderungen nur im Verbund und in enger Kooperation mit weiteren deutschen Bundesländern wie auch den umgebenden Industrieregionen des europäischen Auslands erfolgreich umsetzbar.

Die gefundenen Resultate können zur Diskussion der wettbewerbsfähigen Transformierbarkeit der nordrhein-westfälischen Industrie hin zu einer weniger nicht-nachhaltigen Wirtschaftsweise dienen. Hierin ist noch nicht weitergehend festgelegt, ob diese notwendige Transformation unter dem Paradigma eines „grünen Wachstums“ steht, oder aber mit weiteren Konzepten kombiniert zum Übergang zu einer noch weiter zu umreißen Postwachstumsgesellschaft dienen kann.

Die Arbeit zu diesem Artikel wurde ermöglicht durch die Förderung der Stiftung Mercator.

Abstract

The industrial landscape in North Rhine-Westphalia faces substantial challenges in the context of the German energy transition (Energiewende). To facilitate a successful transition, large parts of the industrial infrastructure need to be transformed. This is both about the overall energy consumption, as well as the emission of greenhouse gases. Further on, the general consumption of natural resources needs to be considered.

For such a transition, the interplay between industry and public actors is important. Political support, as well as regulation, play crucial roles. This reaches from setting up an appropriate market frame to enable self-improving process via market forces, over public support via funding and pilot projects, up to tariffs and other regulatory means. In how far it is possible to influence and shape these processes depends to large extents upon the level up to which the frequently rather complex value chains are located in NRW. Together with the technical and economic options for such changes, the degree to which a value chain can be regarded as closed is therefore a crucial factor.

In this study, three exemplary value chains from different industry sectors are considered. These were selected in such a way that they yield strategic, economic and ecologic (in terms of energy consumption and greenhouse gas emissions) relevance for NRW. Further more, they display different ways how they are connected to the outside, face international competition and possess different kinds of internal governance structures.

The selected value chains were those of iron and steel production, chemistry with a focus on fiber enforced polymers, and plant manufacturing for renewable energy generation with a focus on wind energy.

A set of both quantitative and qualitative criteria was generated, yielding deeper insight into these value chains. This study rests on a meta analysis of already existing academic studies and sources from the respecting industries. The data from these sources was brought together to form a synthesis.

Beyond this, potential ways to influence and support the desired transformation processes are sketched.

All three value chains are only insufficiently closed. Therefore, further regions and political levels need to be part of the transformational process. NRW can be understood as a key region, with the potential to offer crucial support – but the challenges can only be met in close cooperation with other German states as well as with the surrounding industrial regions in the neighboring European countries.

The results can help support the discussion for a competitive transformation of the industry in NRW toward a less unsustainable economic conduct. In this, it is not yet set whether such a necessary transition might simply align with the paradigm of so-called “green growth”, or might also have the potential to help a transition toward a post growth economy, if appropriately combined with further concepts.

The work for this publication was enabled via funding by the Mercator Foundation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	3
Abstract	3
Inhaltsverzeichnis	4
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen.....	7
Abbildungsverzeichnis	9
1 Einleitung	11
2 Theoretische Grundlagen zu WSK-Analysen.....	12
2.1 „Greening“ einer Wertschöpfungskette	15
2.2 Auswahl von Schlüsselbranchen.....	15
3 Auswahl und Eingrenzung von zentralen WSK innerhalb der Schlüsselbranchen	17
4 Eisen- und Stahlproduktion	18
4.1 Kennzahlen zur Branche.....	18
4.2 Erzeugnisse und Import/Exportbilanzen	19
4.3 Perspektive NRW	21
4.4 Prozesse zur Stahlherstellung.....	21
4.5 Optimierungs- und Einsparpotenziale	22
4.6 Quantitative Kriterien für die Eisen- und Stahlbranche	25
4.7 Beschreibung und Eingrenzung der Stahl-WSK	28
4.8 Qualitative Kriterien bzgl. der Stahl-WSK.....	28
4.9 Standorte in NRW	29
4.10 Zusammenfassung.....	31
5 Chemische Industrie	33
5.1 Rohstoff Erdöl.....	39
5.2 Rohstoff Erdgas.....	42
5.3 Rohstoff Kohle	43
5.4 Nachwachsende Rohstoffe	45
5.5 Kunststoffindustrie	45
5.6 Polymere Werkstoffe.....	47
5.7 Faserverbundwerkstoffe	48
5.7.1 Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)	48
5.7.2 Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK)	49
5.7.3 Recycling von faserverstärkten Kunststoffen	50
5.7.4 Weiterentwicklung und Alternativen zu GFK und CFK	51
5.8 Zusammenfassung.....	52
6 Anlagenbau für die Erneuerbare Energiewirtschaft.....	54
6.1 EE-Unternehmen und Analyse der regenerativen Industriestrukturen am Standort NRW	55
6.2 Anlagenbau für den Windenergiesektor.....	59
6.2.1 Rahmung der WKA-Wertschöpfungskette.....	60
6.2.2 Aufschlüsselung der wesentlichen Komponenten	64
6.2.3 Recycling von Windkraftanlagen.....	66
6.2.4 Governance in der WSK.....	68
6.3 Weitere Sparten im Erneuerbaren Anlagenbau	68
6.3.1 Photovoltaik	68
6.3.2 Solar- und Geothermie.....	69
6.3.3 Biogas-Sektor.....	70
6.3.4 Weitere Bioenergie.....	71
6.3.5 Kurzzeitspeicher.....	71
6.4 Zusammenfassung.....	71
7 Synthese der WSK-Analyse	73
8 Referenzen	75

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ASU	Stahlbedarf (Apparent Steel Use)
BAT	Beste verfügbare Technologie (Best Available Technology)
BAU	Szenario des Fortschreibens aktuellen Verhaltens (Business As Usual)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BF/BOF	Integrierte Hochofenroute zur Stahlerzeugung
BF-CCS	Integrierte Hochofenroute mit Kohlendioxidabtrennung
BF	Hochofen (Blast Furnace)
BOF	Sauerstoffaufblaskonverter zur Stahlerzeugung (Basic Oxygen Furnace)
CCS	Kohlendioxidabtrennung (Carbon Capture and Storage)
CFK	Kohlefaserverbundwerkstoffe
CFRP	Kohlefaserverbundwerkstoffe (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSP	Rohstahlproduktion (Crude Steel Production)
DMS	Bedarfssteuerung (DemandSideManagement)
EAF	Elektrischer Lichtbogenschmelzofen zur Stahlproduktion (Electric Arc Furnace)
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EPS	Schaumpolystyrol / Styropor (Expanded Polystyrene)
EW	Elektrolytische Eisengewinnung (Electrowinning)
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
FuE	Forschung und Entwicklung
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GFRP	Glasfaserverstärkter Kunststoff (Glass Fiber Reinforced Polymer)
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistung
HDPE	Polyethylen hoher Dichte (High Density Polyethylene)
H-DR	Wasserstoffdirektreduktion zur Stahlerzeugung (Hydrogen Direct Reduction)
KMU	Kleine und Mittelständische Unternehmen
LCA	Lebenszyklusbetrachtung (Life Cycle Assessment)
LCEA	Lebenszyklusenergieanalyse (Life Cycle Energy Assessment)
LDPE	Polyethylen niedriger Dichte (Low-Density PolyEthylene)
LLDPE	lineares Polyethylen niedriger Dichte (Linear Low-Density PolyEthylene)
MIPS	Material-Input pro Service-Einheit
MTBE	Methyl-tert-butylether
NRW	Nordrhein-Westfalen
OEM	Zulieferer, Hersteller von Originalkomponenten (Original Equipment Manufacturer)
OHF	Siemens-Martin-Ofen zur Stahlproduktion (Open Hearth Furnace)
P4	Pulver-Vorformungsprozesses (programmable powdered preforming process)
PAN	Polyacrylnitril
PE	Polyethylen
PET	Polyester
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PU	Polyurethan
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
SMC	„Sheet Moulding Compound“ (ein FVK-Herstellungprozess)
THG	Treibhausgas
WI	Wuppertal Institut für Klima Umwelt, Energie GmbH
WEA	Windenergieanlage, siehe WKA
WKA	Windkraftanlage
WSK	Wertschöpfungskette

Einheiten und Symbole

\$	US-Dollar
%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
C ₂ H ₄	Ethen (Ethylen)
C ₃ H ₆	Propen (Propylen)
C ₈ H ₁₈	Hauptbestandteil der Erdölfraktion Naphtha
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -eq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
g	Gramm
G	Giga (10 ⁹)
GJ	Gigajoule
Gt	Gigatonne
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde; 1 GWh = 3,6 PJ
h	Stunde
H	Wasserstoff
H ₂	Wasserstoff (molekular)
H ₂ O	Wasser
ha	Hektar
kg	Kilogramm
kgCO _{2eq}	Treibhausgasausstoss in Kilogramm Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
kgCO _{2eq} / €	Treibhausgas-Emissionsintensität, kgCO _{2eq} pro €
km	Kilometer
kt	Kilotonne
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh/t	Energieintensität in Bezug auf Masse (z.B. der Stahlproduktion)
l	Liter
Mio.	Million (10 ⁶)
Mrd.	Milliarde (10 ⁹)
M	Mega (10 ⁶)
MJ	Mega-Joule
Mt	Megatonne
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxid
N ₂ O	Lachgas (Distickstoffoxid)
P	Peta (10 ¹⁵)
Pa	Pascal
PJ	Petajoule
s	Sekunde
SKE	Steinkohleeinheit
T	Tera (10 ¹²)
TJ	Terajoule
t	Tonne

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verknüpfungen in einer einfachen Wertschöpfungskette, aus [1].	12
Abbildung 2: sechs Stufen einer WSK, aus [5].	13
Abbildung 3: Beispiel für das Mapping einer Wertschöpfungskette: Material- und Wertschöpfungsfluss für die Eisen- und Stahlindustrie in Großbritannien, aus [6]. Für Deutschland bzw. NRW sollten diese Flüsse qualitativ gleichartig sein und sich lediglich quantitativ unterscheiden (sowohl in absoluten Zahlen wie vermutlich auch streckenweise in Relation zueinander).	14
Abbildung 4: Übersicht über Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen in NRW [8, S.161].	18
Abbildung 5: Weltrohstahlproduktion nach Produktionsprozess (1970-2013): Die veraltete Methode des Siemens-Martin-Ofen (Open Hearth Furnace, OHF) ist nicht mehr relevant, Von Bedeutung sind derzeit die integrierte Hochofenroute (Blast Furnace / Basic Oxygen Furnace, BF/BOF) und die elektrische Lichtbogenroute (Electric Arc Furnace, EAF); Datenquelle: IISI/World Steel Association, Steel Statistical Yearbook (verschiedene Jahrgänge). Aus [8].	19
Abbildung 6: Rohstahlproduktion (Crude steel production, CSP) und -verbrauch (apparent steel use, ASU) ⁷ für die integrierte Hochofenroute (BF/BOF) und die elektrische Lichtbogenroute (EAF) in Deutschland (1990-2013), aus [8]. Daten: IISI/World Steel Association, Steel Statistical Yearbook (verschiedene Jahrgänge).	20
Abbildung 7: Energiequellen (elektrische Energie und die bei der Oxidationsreaktion frei werdende chemische Energie) und –senken (z.B. Abgas und Ofenkühlung) des EAF-Prozesses, aus [43].	22
Abbildung 8: Energie- und Ressourcenbedarf der alternativen Produktionspfade Elektrowining (EW) und Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR) im Vgl. zur BF/BOF-Route bzw. deren Ergänzung durch CO ₂ -Abtrennung (BF-CCS).	23
Abbildung 9: WSK-Mapping, aufbauend auf [41] und [45]. Nicht dargestellt sind der el. Energieinput und der Gesamtenergieinput.	24
Abbildung 10: Spezifische CO ₂ -Emissionen verschiedener Produktionsprozesse, aus [43].	27
Abbildung 11: Übersicht der integrierten Stahlwerke in NRW [8, S.158].	30
Abbildung 12: Abfallbilanz für alle Standorte der Deutsche Edelstahlwerke GmbH, aus [47].	30
Abbildung 11: Energieverbrauch Deutsche Edelstahlwerke GmbH, aus [47].	31
Abbildung 12: Pipeline-Netzwerk der chemischen Industrie im Rheinland; aus [52].	34
Abbildung 13: Veränderung der jährlichen Industrie- und Chemieproduktion, aus [48].	35
Abbildung 14: Wachstumsbeiträge der Bundesländer zur deutschen Chemieproduktion, aus [48].	35
Abbildung 15: Anteile der Chemiesparten und jährliches Wachstum der Chemieproduktion in NRW, 2011-2030. Die Basischemie wird trotz geringer Veränderungen in NRW dominant bleiben; aus [48].	36
Abbildung 16: Stoffstromverbund der BP Gelsenkirchen GmbH, aus [54].	38
Abbildung 17: Verlauf der NWO-Pipeline der Nord-West Oelleitung GmbH; aus [55].	39
Abbildung 20: Raffinerien, Pipelines und Cracker in Westdeutschland und der Benelux-Region; aus [60].	40
Abbildung 218: Erdöl-Weltförderung und Verwendung in der chemischen Industrie, nach [62].	41
Abbildung 19: Erdgas-Weltförderung und Verwendung in der chemischen Industrie, nach [62].	43
Abbildung 20: Kohle-Weltförderung und Verwendung in der chemischen Industrie, nach [62].	44
Abbildung 24: klassische Kunststoff-Wertschöpfungskette, nach [62] und [95].	46
Abbildung 25: Preis vs. Produktionsmenge polymerer Werkstoffe [102].	48
Abbildung 26: Steifigkeit gegenüber Dichte für verschiedene Werkstoffe. Die horizontale Linie beschreibt das Kriterium absoluter Steifigkeit mit $E=15\text{GPa}$, der Güteindex eines Stabes $M_b=E^{1/2}/\rho$ ist durch die schrägen Linien dargestellt, mit $M_b=0,003$ (untere Linie) bzw. $0,006$ (obere Linie) ein möglichst hoher Wert für M_b ist wünschenswert. GFK und CFK sind hier mit den englischen Bezeichnungen GFRP	

und CFRP bezeichnet. Aus [103].	48
Abbildung 27: Lifecycle-Flussdiagramm für eine Automobil-Bodenpfanne aus CFK [101].	49
Abbildung 28: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der erneuerbaren Energieträger in NRW, aus [74].	54
Abbildung 29: Entwicklung des regenerativen Strommixes + Grubengas in NRW, aus [77].	55
Abbildung 30: Industrie- und Dienstleistungsstandorte für regenerative Anlagentechniken in NRW, aus [77].	56
Abbildung 31: Die NRW-Beschäftigung und Umsätze im Regenerativen Anlagen- und Systembau, nach [77].	57
Abbildung 32: Regenerativer Anlagen- und Systembau in NRW, aus [85].	57
Abbildung 33: Effekte der Windenergie auf die Bruttowertschöpfung in NRW (2012, Millionen Euro), aus [90].	59
Abbildung 34: Effekte der Windenergie auf die Beschäftigtenzahl in NRW (2012), aus [90].	59
Abbildung 35: Wertschöpfungskette in der Windenergie, nach [75].	60
Abbildung 36: Kostenstruktur der Stromgestehungskosten bei der Windenergie, nach [87, S. 40].	62
Abbildung 37: Innerbetriebliche Wertkette nach Porter, aus [87, S. 46].	62
Abbildung 38: Direkte Wertschöpfungskette einer WKA, aus [87, S. 47+52].	63
Abbildung 39: Verteilung der Turbinenkosten (ex works) nach Komponenten, nach [87, S. 41].	64
Abbildung 40: Entwicklung des Gewichts der Rotorblätter gegenüber ihrer Länge. Die Symbole repräsentieren verschiedene Hersteller und Produktionstechniken [103].	65
Abbildung 41: Erwartete Menge an jährlich zu recycelndem Rotorblattmaterial, aus [97].	66
Abbildung 42: Entwicklung der PV-Gesamtleistung und Stromerzeugung in NRW (2002 – 2013), aus [77].	69
Abbildung 43: : Entwicklung der System-Kosten für PV-Anlagen 1991 bis 2014, aus [77].	69
Abbildung 44: Entwicklung der installierten elektrischen Gesamtleistung und Stromerzeugung im Bereich Biomasseheizkraftwerke in NRW, aus [77].	70
Abbildung 45: Entwicklung der installierten Gesamtleistung und Stromerzeugung im Bereich Biogas in NRW, aus [77].	70
Abbildung 46: Entwicklung der installierten Gesamtleistung und Wärmeerzeugung im Bereich Einzelfeuerungen in NRW gemäß Holzabsatzförderrichtlinie bzw. Marktanreizprogramm, aus [77].	71

1 Einleitung

Im ersten Teil dieser Arbeit wird ein theoretisches Verständnis über verschiedene Herangehensweisen von Wertschöpfungskettenanalysen gegeben und welche Möglichkeiten zu Verbesserungen aus einer ökologischen Perspektive (das sogenannte „Greening“) betrachtet werden können. Daran anschließend wird ein Set von quantitativen und qualitativen Kriterien zur Analyse von industriellen Wertschöpfungsketten eingeführt. Dies umfasst die Kapitel 2 und 3.

Die sich daran anschließenden Kapitel 4-6 betrachten jeweils eine der ausgewählten Wertschöpfungsketten.

Im Kapitel 4 wird die Eisen- und Stahl-Wertschöpfungskette analysiert. Hierbei wird neben einer umfassenden Rahmung auf bestehende und alternative Stahlproduktionsweisen eingegangen, und inwiefern eine zukünftig treibhausgasneutrale Stahlerzeugung realisierbar sein mag. U.a. durch die großen und weiter anwachsenden Produktionskapazitäten in China steht die deutsche Stahlproduktion vor der Herausforderung ihre lange Zeit erfolgreiche Position im internationalen Wettbewerb zu wahren bzw. sich den veränderten Gesamtbedingungen anzupassen. Der spezielle Charakter der deutschen Stahlindustrie, wie z.B. ihr Knowhow-Vorsprung bei der Herstellung von hochqualitativen Spezialstählen aus soll betrachtet werden. Unter diesen Randbedingungen kann die Energiewende für die in NRW beheimatete Stahlproduktion auch eine Chance darstellen, um im Folgenden diskutierte neue, im Idealfall emissionsfreie Produktionstechnologien zur konkurrenzfähigen Marktreife zu bringen. Auch die hierfür notwendigen Randbedingungen wie Kooperation mit und Unterstützung durch öffentliche Akteure sollen hier kurz beleuchtet werden.

In Kapitel 5 wird die in NRW beheimatete chemische Industrie betrachtet, die in vielfältiger Weise eng mit Akteuren in ganz Westeuropa vernetzt ist. Neben allgemeinen Betrachtungen der weitläufig vernetzten Wertschöpfungskette wird als dabei die Erzeugung von faserverstärkten Polymerwerkstoffen hervorgehoben. Die in NRW stark vertretene Basis- und Grundstoffchemie ist gegenüber von Spezialchemie durch internationale Konkurrenz einem stärkeren Preisdruck ausgesetzt. Abschließend wird das Potenzial und die damit einhergehenden Herausforderungen einer stärkeren Ausrichtung auf Spezialchemie-Produkte wie faserverstärkte Polymere als Zukunftsperspektive diskutiert.

In Kapitel 6 wird der Anlagenbau für die Erneuerbare Energiewirtschaft dargestellt, und im weiteren wird der Fokus auf den Bau von Windkraftanlagen gelegt. NRW ist hierbei vor allem als Zulieferer von Komponenten relevant. Neben der weiteren Unterstützung von Forschung und Entwicklung ist in diesem Bereich zugleich die Bedeutung des heimischen Absatzmarktes hervorzuheben, der stark durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz beeinflusst wird. Ob sich, abhängig von dessen Novellierung, entsprechende Perspektiven eröffnen oder Absätze einbrechen, wird hier dargestellt.

Kapitel 7 bietet einen zusammenführenden Überblick über die Ergebnisse der Betrachtungen der einzelnen Wertschöpfungsketten an.

2 Theoretische Grundlagen zu WSK-Analysen

Wertschöpfungskettenanalysen (künftig WSK-Analysen) können je nach Fokus dazu dienen, monetären Umsatz, Profit, Stoffströme, aber auch weitere Aspekte wie z.B. THG-Emissionen abzubilden.

Im einfachsten Fall lässt sich eine WSK wie in Abbildung 1 dargestellt mit vier Verknüpfungen beschreiben:

Es treten jedoch im realen Fall typischerweise sehr viel mehr Verbindungen und Abstufungen auf, zumal die Hersteller von Zwischenprodukten einer spezifischen WSK auch in verschiedenen weitere WSKs eingebunden sind und diese beliefern. Die reine Betrachtung der monetären Werte kann dabei zuweilen den Einfluss verschleiern, den ein einzelner Zulieferer auf den gesamten Rest der WSK hat, sofern er z.B. eine Schlüsseltechnologie oder ein für die gesamte WSK besonders bedeutsames Gut kontrolliert.

Kaplinsky und Morris entwickelten 2002 eine allgemein akzeptierte Definition [5], nach der die WSK den vollen Umfang aller Aktivitäten beschreibt, die benötigt werden, um ein Produkt oder eine Serviceleistung durch alle relevanten Phasen zu führen – hierzu gehören die verschiedenen Schritte der Produktion (was auch die Kombination aus physischer Veränderung und dem Einbringen verschiedener Produzentenleistungen beinhaltet), die Auslieferung zum Endkunden und die Entsorgung nach dem Gebrauch.¹

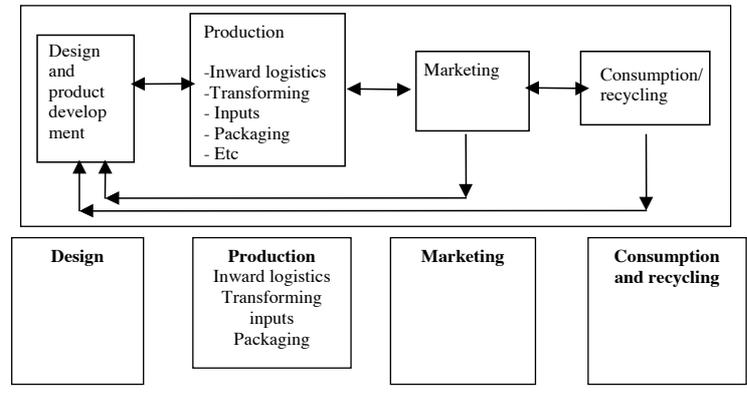


Abbildung 1: Verknüpfungen in einer einfachen Wertschöpfungskette, aus [1].

Aus der Analyse von „global commodity chains“, eingeführt von Gereffi Mitte der 1990er, lassen sich Einflussbeziehungen zwischen den einzelnen Stufen und Akteuren einer WSK ermitteln; so findet/en sich in einer WSK zumeist eine (oder mehrere) dominante Partei(en), die den Charakter der WSK bestimmt/en, für mögliches Upgrading verantwortlich ist/sind und die Beziehungen zwischen den einzelnen Knoten koordiniert/en. Je nach deren Positionierung innerhalb der WSK wird zuweilen von kundengetriebenen („buyer-driven“) oder produzentengetriebenen („producer-driven“) Ketten gesprochen [1].

Aus der Firmenperspektive lässt sich die eigene Wettbewerbsfähigkeit oftmals nur erhöhen, wenn die Komponentenzulieferer innerhalb der WSK ebenfalls vergleichbare Praktiken zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit annehmen und dadurch die Leistungsfähigkeit der gesamten WSK verbessern. Des Weiteren ermöglicht eine Analyse und Identifikation von Kernkompetenzen einer Firma, diejenigen Funktionen auszulagern, in denen sie keine spezifischen, sie von Wettbewerbern absetzenden Fähigkeiten besitzt [1].

Die Abbildung der Eingangsströme in Bezug auf Güter und Dienstleistungen in der Produktionskette ermöglicht es festzustellen, welche Akteure mit ihrem Verhalten einen besonders großen Einfluss auf die WSK und auch auf den Erfolg der anderen Teilnehmer haben [1]. In Kombination mit der Analyse der Stoffströme (Material Flow Accounting) lassen sich weitere Aspekte der Einflussnahmemöglichkeiten besonders hinsichtlich der Ressourceneffizienz analysieren [122, 123].

Um das Konzept der WSK von einem heuristischen, d.h. rein beschreibenden Mittel in ein analytisches Werkzeug zu verwandeln, sind laut Kaplinsky und Morris [1] drei Aspekte zu beachten:

- in WSKs werden an verschiedenen Orten Profite erwirtschaftet, und diese Profite entwickeln sich dynamisch.
- Um effektiv zu funktionieren, benötigt eine WSK ein gewisses Maß an Regelung („governance“).
- Es gibt sehr unterschiedliche Typen von WSKs.

¹ „The value chain describes the full range of activities, which are required to bring a product or service from conception, through the different phases of production (involving a combination of physical transformation and the input of various producer services), to delivery to final consumers, and final disposal after use.“ [5]

Innerhalb einer WSK geht der Hauptanteil des Profits an diejenigen Parteien, die in der Lage sind, sich vor Wettbewerbern zu schützen. Diese Fähigkeit, Aktivitäten vom Wettbewerb abzukapseln (englisch: "rent"), wird durch die Kontrolle über bzw. den Besitz eines knappen Gutes ermöglicht und beinhaltet entsprechende Eintrittsbarrieren für potenzielle Mitbewerber. Dementsprechend wird ein eine WSK dominierender Akteur tendenziell nur dann eine Transformation der entsprechenden WSK vorantreiben, wenn ihm dies eine für ihn vorteilhafte, d.h. gewinnsteigernde, Option (bzgl. der Eintrittsbarrieren) gegenüber dem Status quo bzw. dessen alternativer Entwicklung ohne gezielte Veränderung („Business As Usual“, BAU) bietet.

Insofern stellt sich für die Energiewende bedingte Transformation von WSKs die Frage, inwiefern die derzeitigen Akteure in der Lage sein dürften, auch in künftigen WSKs ihre vorteilhafte Position zu erhalten. Ist dies nicht der Fall bzw. wird die Situation von den Akteuren so nicht wahrgenommen, dürfte mit entsprechendem Widerstand zu rechnen sein.

Neben „klassischen“, bzw. „Schumpeter’schen“, als Profitquellen fungierenden Eintrittsbarrieren für Mitbewerber wie Technologie, menschlicher Arbeitskraft und Fähigkeit, interner Organisation sowie Marketing, können auch endogene (von den Akteuren beeinflussbare) Faktoren wie etwa bevorzugte Beziehungen, exogene (extern vorgegebene) Faktoren wie Rendite aus naturgegebenen Ressourcen und von äußeren Parteien bereitgestellte Faktoren wie Infrastruktur und wirtschaftspolitische oder finanzielle Rahmenbedingungen eine Rolle spielen. Da sich diese Profite dynamisch entwickeln – neue Faktoren kommen hinzu und bestehende Bereiche werden über die Zeit durch den Wettbewerb erodiert –, unterliegt jede WSK einer fortlaufenden wettbewerbsbedingten Anpassung.

Kaplinsky und Morris weisen zudem auch darauf hin, dass entsprechend der Schumpeter’schen Theorie durch innovative Neuerungen eben diese schützenden Barrieren und damit einhergehend die Verknappung und Profitabilität durch die handelnde Firma gesichert bzw. gesteigert werden können – Somit kann eine Überwindung von möglichen Widerständen potenziell konservativer Akteure dadurch gelingen, dass deren Innovationsprozess beispielsweise durch die Förderung von Forschung und Entwicklung unterstützt wird. Dadurch besteht für diese die Chance, sich durch aktive Beteiligung auf der Gewinner- anstatt auf der Verliererseite wiederzufinden.

Über viele WSKs hinweg kann zudem ein Trend hin zur Kontrolle nichtphysischer Aktivitäten (wie u.a. Design, Branding und Marketing) als Profitquelle beobachtet werden [1].

Zur Analyse einer Wertschöpfungskette (WSK) muss aufgrund deren oftmals hoher Komplexität und Verzweigung ein Rahmen dahingehend gesetzt werden, was im konkret ausgewählten Fall analysiert werden soll.

In einem ersten Schritt zur genaueren Definition und Analyse einer WSK wird das sogenannte Mapping durchgeführt. Hierfür müssen die Grenzen der WSK definiert werden. Im Grundsatz sollten zunächst die relevanten Akteure der WSK identifiziert werden, um anschließend die Produktflüsse innerhalb der Kette abzubilden. Diese umfassen die Input-Bereitstellung, die Produktion, die Be- und Verarbeitung und die Marketing Aktivitäten. [5]

Dieses Mapping ist eine Analyse bzgl. der auftretenden Funktionen und Institutionen, die damit einsetzt, eine ‚anfängliche‘ oder ‚vorläufige Karte‘ (‚initial‘ bzw. ‚preliminary map‘) einer spezifischen WSK zu erstellen, um einen Überblick über alle beteiligten Akteure (institutionelle Analyse) und die Art deren wechselseitiger Interaktion (funktionelle Analyse) zu erhalten. Die Ergebnisse können entweder als Tabelle oder als Flussdiagramm dargestellt werden, Abbildung 2 zeigt ein beispielhaftes Schema. Dies ist die „vorläufige Karte“ der WSK. Hierin sollten nach gängigen Standards etwa enthalten sein:

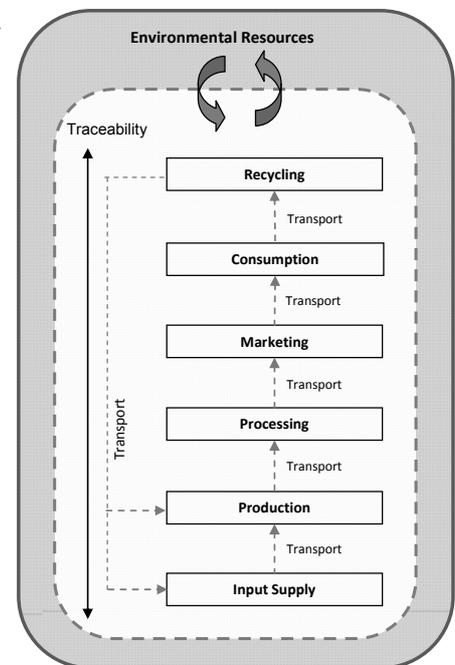


Abbildung 2: sechs Stufen einer WSK, aus [5]

- die Grenzen der WSK;
- die vorrangigen Funktionen jedes Abschnitts der WSK;
- die diese Funktionen ausführenden Akteure;
- die vorrangigen Produkte in der WSK und deren verschiedene Formen, in welche sie innerhalb der WSK umgewandelt werden.
- Aktivitäten und Verbindungen;

- einige (wenige) grundlegenden Indikatoren für Größe und Bedeutung;

Es ist hierbei empfehlenswert [1], erst nach diesem ersten Schritt in die tiefere Analyse einzusteigen und die WSK-Karte durch die Quantifizierung von Schlüsselgrößen (wie etwa den Mehrwert innerhalb eines Prozessschrittes oder den Energiebedarf etc.) und der strategischen Bedeutung verschiedener Aktivitäten zu verfeinern. Auf Grundlage dieser verfeinerten Karte können weitergehende Statistiken erstellt werden, etwa zum Ressourcenbedarf oder der Energieintensität einer WSK.

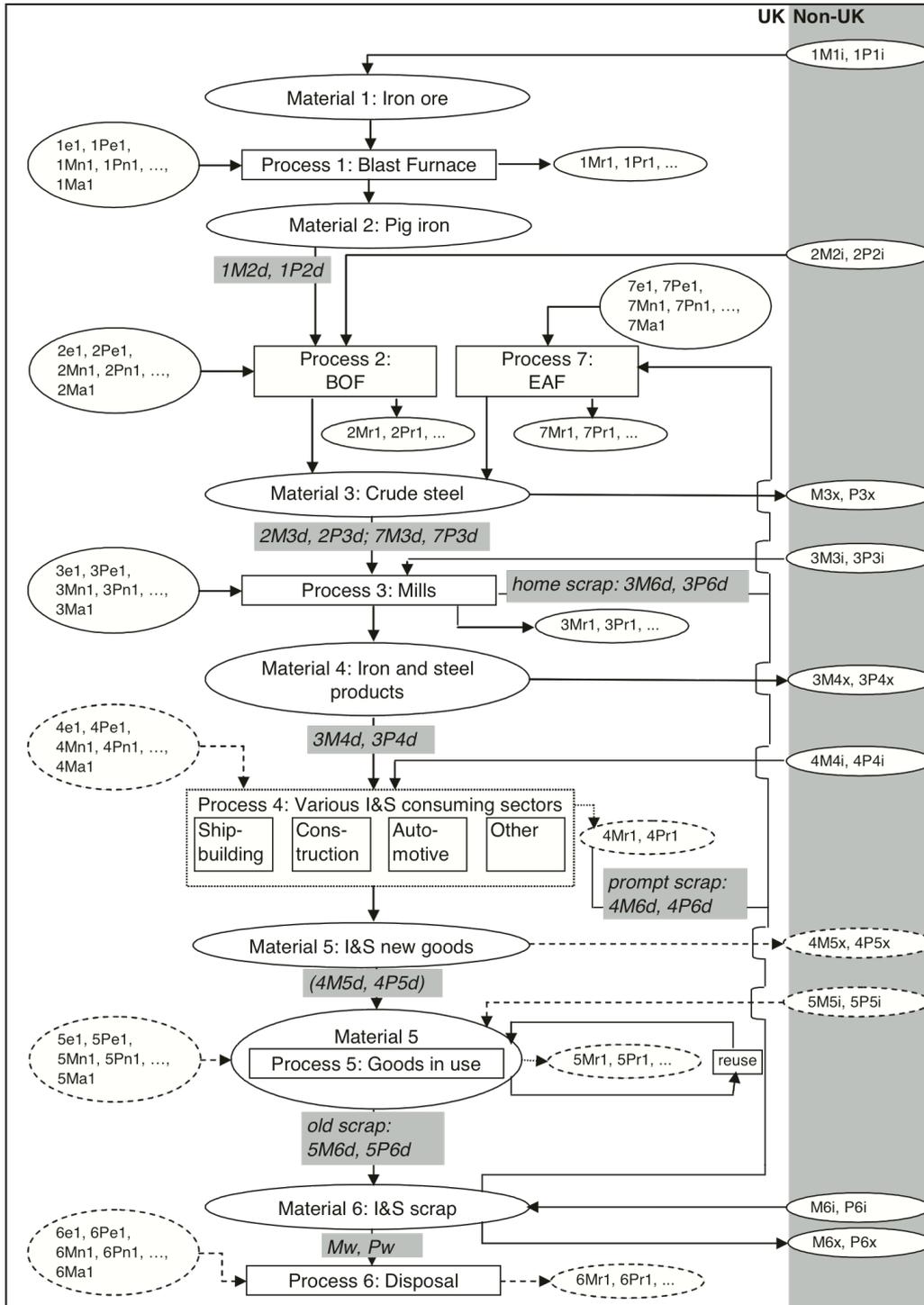


Abbildung 3: Beispiel für das Mapping einer Wertschöpfungskette: Material- und Wertschöpfungsfluss für die Eisen- und Stahlindustrie in Großbritannien, aus [6]. Für Deutschland bzw. NRW sollten diese Flüsse qualitativ gleichartig sein und sich lediglich quantitativ unterscheiden (sowohl in absoluten Zahlen wie vermutlich auch streckenweise in Relation zueinander).

2.1 „Greening“ einer Wertschöpfungskette

Diese Aktivitäten sind hilfreiche Schritte für das „Greening“ einer WSK, d.h. der Reduzierung umweltschädlicher Prozesse bzw. Produkte. Allerdings beantwortet das noch nicht, ob Produkte selbst auch „grüner“ gemacht werden (können), oder nur „grünere“ Produkte ausgewählt/produziert werden [5].

Auf eine Stahl erzeugende WSK bezogen etwa würde sich das „Greening“ weitgehend oder nahezu ausschließlich auf die Effizienzsteigerung und Optimierung des Produktionsprozesses beziehen, da das avisierte Endprodukt weitgehend das gleiche bleibt. Dieser Art der Optimierung des Materialaufwands pro erzielt Output kann u.a. in MIPS (Material Input per Unit Service) angegeben werden [115, 117, 119-121] und ist in der internen (Energie-, - Emissions-, o.ä.) Bilanz der WSK beschreibbar. Dagegen wäre eine Kette mit einem veränderten Endprodukt (z.B. eine veränderte Anlagenbau-WSK, in der nun anstatt für die fossile Energiebereitstellung Anlagen für die erneuerbare Energiewirtschaft hergestellt werden) möglicherweise im Produktionsprozess nicht „sauber“, der Gesamteffekt der Produkte über ihre gesamte Lebensdauer hinweg allerdings drastisch verändert.

Auch wenn es möglich ist, durch entsprechende Zumischungen anderer chemischer Elemente Stahlsorten höherer Güte und mechanischer Belastbarkeit bzw. (leichteren) Stahl mit etwas geringerer Dichte zu erzeugen, verändert sich dadurch die Nutzung stählerner Produkte und der Gesamtbedarf nur geringfügig. Zudem hat sich bei Stahl ein vergleichsweise zu anderen Stoffen effektives Recyclingsystem etabliert, wodurch der Großteil stählerner Erzeugnisse nach Nutzungsende wieder dem Stoffkreislauf zugeführt werden kann. Die signifikanten Effekte zur Ressourcen- Energie- und Emissionseinsparung liegen bei der Optimierung der Stahlerzeugung bzw. der Umstellung auf gänzlich neue Herstellungsprozesse (entsprechend der Entwicklung sogenannter „Break-Through-Technologien“) [24, 25].

Bei z.B. der Konstruktion von Windkraftanlagen dagegen spielt deren Lebensdauer und Energieausbeute und damit deren Performance nach Auslieferung eine deutlich bedeutsamere Rolle im Vergleich zum Herstellungsaufwand. Neben dem Etablieren eines umfassenden Recyclingsystems ist somit der Hauptansatzpunkt für ein „Greening“ hier die ingenieurstechnische Weiterentwicklung der Anlagen hin zu weiter erhöhter Energieausbeute und z.T. erhöhten Standzeiten (d.h. Lebensdauererlängerungen im aktiven Betrieb).

Diese beiden unterschiedlichen Perspektiven lassen sich zu einem gewissen Grad mit dem jeweiligen Konsumenten- bzw. Produzenten-bestimmten Charakter der WSK in Einklang bringen. Ein veränderter Produktionsprozess bei gleichbleibendem Endprodukt hat seltener Auswirkungen auf das Verhalten der Endkunden und erfolgt tendenziell eher dann, wenn dem bestimmenden Produzenten andere, ökonomische Aspekte wie etwa Umweltauflagen oder teuer zu kaufende Emissionszertifikate eine Umstellung attraktiv erscheinen lassen (Ausnahme: Aspekte des ökologischen Landbaus und das erhöhte Interesse von Konsumenten an im Ergebnis mindestens gleichwertigen, jedoch verträglicher hergestellten Lebensmitteln etc.).

Bei monetären Betrachtungen ist es wichtig, zwischen dem buchhalterischen, d.h. direkt bezahlten Marktpreis („financial analysis“), und dem ökonomischen (Schatten-)Preis („economic analysis“) zu unterscheiden. Bei auftretenden Preisverzerrungen (z.B. durch nicht berücksichtigte Externalitäten) spiegeln sich diese im Marktpreis wieder.

Die Umweltauswirkungen einer WSK können u.a. mit einer Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) betrachtet werden [116]. Mithilfe einer Lebenszyklusenergieanalyse (Life Cycle Energy Assessment, LCEA) werden die Energieinputs in Verbindung mit einem spezifischen Produkt nach den einzelnen Prozessschritten separiert betrachtet.

Für die im Zuge dieses Projekts durchzuführende Analyse erfolgt zunächst eine branchenbezogene Evaluation zur Identifikation von zentralen Spielern. Hierbei ist Vorrang von Interesse, die Hauptemittenten von Treibhausgasen (THG) in NRW in Augenschein zu nehmen.

2.2 Auswahl von Schlüsselbranchen

Als exemplarisch betrachtete Schlüsselbranchen werden die Eisen- und Stahlindustrie, als Teilbereich der chemischen Industrie die Erzeugung polymerer Werkstoffe (primär für den Energie-Anlagenbau) und der Anlagenbau für die regenerative Energiewirtschaft betrachtet.

Zur weitergehenden Analyse ist ein quantitativ und qualitativ gefasstes Set von Kriterien vonnöten. Dieses muss z.T. an die jeweils zu analysierende WSK angepasst bzw. im Fokus verschoben werden.

Als **quantitative Kriterien** [1, 2] sind für die Analyse hierbei von Interesse:

- Umsatz (€) (im Verhältnis zu anderen Branchen bzw. WSK);
- Gesamtenergieverbrauch (kWh), bzw. auch Energieoutput;
- THG-Emissionen (kgCO₂eq), ggf. Emissionsintensität (kgCO₂eq / €);
- Anzahl der Beschäftigten in der betrachteten Branche;
- Zeitliche Trends (n.M. über 5 Jahre) [1, S. 53], um die langfristige Bedeutung der einzelnen WSK zu analysieren und relevante WSKs auszuwählen;
- Energieintensität (Energiebedarf / Umsatz) [3]² bzw. Energieeffizienzmessung [107] (Energiebedarf/ erzeugten Mehrwert) [4]; (dabei wird z.B. der kaufmännische³ Wert der Ressource bzw. des Produkts (s. als Bsp. u.a. [6, 7]) vor und nach einem Prozessschritt verglichen).
- Energieintensität pro materiellem Output (Energiebedarf / Produktionseinheit);
- ggf. zusätzlich: Materialverbrauch (Material-Impact, MI bzw. MIPS) bzw. „ökologischer Rucksack“, um Fokus nicht ausschließlich auf THG zu verengen [23, 115, 117, 119, 120].

² „Die Bundesregierung hat sich offiziell zum Ziel gesetzt, die Endenergieproduktivität (d.h. das Verhältnis Bruttoinlandsprodukt (BIP)/Endenergieverbrauch) zwischen 2008 und 2050 um jährlich 2,1% zu verbessern“ [18]. Dies wird als unter den derzeitigen ökonomischen und ordnungspolitischen Voraussetzungen kosteneffizient weitgehend realisierbar erachtet [19].

³ Wenn anstatt der kaufmännischen die volkswirtschaftliche Sichtweise angewandt wird, können zwar die Gemeinkosten angemessen Berücksichtigung finden (so werden auf diese Weise die Gemeinkosten z.B. der Förderung und Verbrennung einer Tonne Kohle auf bis zu 200 US-Dollar geschätzt [27], und die weltweiten Subventionen (einschließlich „Externalitäten“, wie zusätzlicher Gesundheitskosten etc.) für fossile Brennstoffe laut IWF auf 5.300 Mrd. US-Dollar [28] – somit weltweit ca. 900 Dollar pro Person und Jahr.

3 Auswahl und Eingrenzung von zentralen WSK innerhalb der Schlüsselbranchen

Als erste Arbeitsschritte zum besseren Verständnis der Wertschöpfungsketten [1, S. 49] erfolgen hierbei:

- die Definition des Eintrittspunkts für die Analyse;
- das Mapping der Kette;
- die Benennung der Produktsegmente und kritischen Erfolgsfaktoren im Endmarkt (sofern schon möglich).

Anschließend können die **qualitativen Kriterien** zur Analyse der ausgewählten WSKs herangezogen werden. Diese umfassen die Fragen:

- Welches ist die Schlüsselkette innerhalb eines größeren Bereichs?
 Unterkriterien:
 - o Spezifische Schlüsselkompetenzen, besonderes Know-how für die Generierung der innerhalb der Wertschöpfungskette erforderlichen Komponenten und Produkte;
 - o Dominierendes Produkt der betrachteten Wertschöpfungskette
- Wird der überwiegende Teil der WSK durch Unternehmen in NRW bedient (geschlossene WSK)?
- Welchen Charakter zeigen die Eintrittsbarrieren für (neue) Konkurrenten, durch welche die Rendite der bestehenden Marktakteure gesichert wird [1, S. 79-81] (z.B. Technologielevel, spezifisches vorhandenes Know-how? Hierzu gehört auch, welche weiteren Kriterien relevant zu betrachten sind, wie z.B. staatl. Unterstützung, bereitgestellte Infrastruktur, ..)
- Wie ist die Wettbewerbssituation innerhalb der betrachteten Branche und – wenn beschreibbar - den einzelnen Wertschöpfungskettenelementen (national und international)
- Welches Potenzial für Upgrading oder Greening ist erkennbar? [1, S. 76 ff]
 (enthalten: Transformier- bzw. Anpassungsfähigkeit, Innovationsrate. Möglichkeiten des Upgrading: Prozess-, Produkt-, funktionales, und Ketten-Upgrading)
- Welche(r) ist / sind die/der Treiber der WSK (Produzenten- oder Kunden-getrieben? [1, S. 32 ff])
- Governancestruktur [1, S. 66] --> wer hat Einfluss, und wie erfolgt die Kontrolle? Am aktuellen Beispiel von RWE wie auch bei anderen großen Energieunternehmen wie E.On lässt sich erkennen, wie ein Konzern mit einer konservativen Strategie Veränderungen zu lange nicht wahrnimmt, sich dadurch in gewisser Weise „verrennt“ und gegen einen öffentlich und politisch proklamierten Wechsel stellt. Dies resultiert für dann allerdings in große ökonomische Schwierigkeiten gerät und sich den veränderten äußeren Gegebenheiten anpassen muss. Hierbei ist dies allerdings kein klar Konsumenten-getriebener Prozess, sondern zusätzlich eine Reaktion auf veränderte äußere (politisch und technologisch geprägte) Rahmenbedingungen, die sich dann allerdings auch wiederum in den Angeboten an die Endverbraucher und in deren Verhalten widerspiegeln [92, 93, 94].

4 Eisen-und Stahlproduktion

Ein erster Überblick (s. Abbildung 4) über direkte THG-Emissionen und Energieverbrauch in NRW zeigt die energie- und klimapolitische Relevanz der Eisen-und Stahlindustrie.

4.1 Kennzahlen zur Branche

„Mit einem Endenergiebedarf von 210 PJ (58 GWh⁴) war die Eisen- und Stahlindustrie im Jahr 2012 der zweitgrößte industrielle Energieverbraucher hinter der Grundstoffchemieindustrie in NRW.“ [8, S.33]. Durch den Einsatz von Brennstoffen (Kohle) liegt der tatsächliche Primärenergiebedarf nochmals deutlich höher. „Wenn die Treibhausgasemissionen der Verstromung der Hüttengase (in eigenen Kraft-

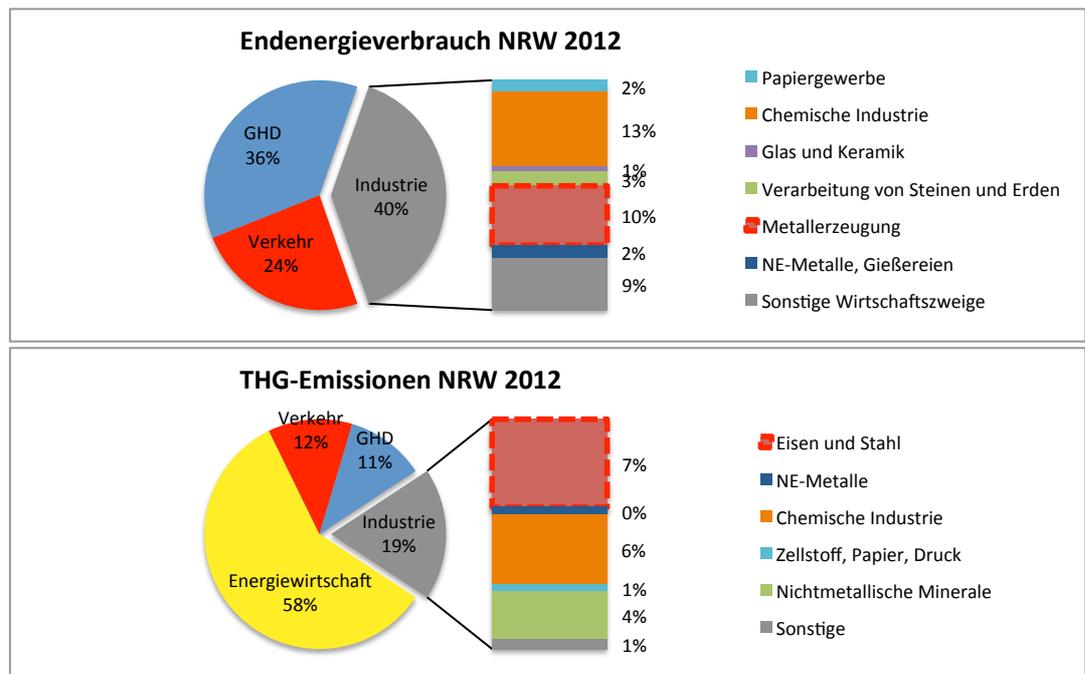


Abbildung 4: Übersicht über Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen in NRW [8, S.161]

werken) mitberücksichtigt werden, so sind alleine für die Eisen- und Stahlindustrie in NRW 20 Mio. Tonnen CO_{2eq} zu verbuchen, was bedingt durch die Konzentration der Stahlindustrie in NRW (Anteil: ca. 40%) knapp 40% der industriellen Emissionen und 7% der gesamten THG-Emissionen entspricht (Stand 2012).“ [ibid] – Die gesamte Metall produzierende Industrie (was v.a. Eisen und Stahl ist, aber auch Aluminium etc. mit einschließt) benötigt ca. 10% der gesamten Endenergie bzw. 26% der Industrie-Endenergie in NRW [8, S. 159]. Die Reduktion von Eisenerz zu Eisen ist mit 80 bis 90% der energieintensivste Prozessschritt der gesamten WSK [24, S. 312].

Die Stahl-WSK zu betrachten wäre sowohl von Interesse hinsichtlich der großen prozessseitigen Einsparpotentiale (ein signifikanter Anteil der THG-Emissionen entsteht prozessbedingt auf chemischem Weg), die bei mehr als 90% der Maßnahmen für die Unternehmen keine zusätzlichen Kosten generieren [24, 25], als auch in Blick auf die große politische Bedeutung der Branche für NRW mit ca. 48.000 Angestellten (bundesweit ca. 85.000 Beschäftigte [64,]) und Duisburg als europaweit größtem Stahlstandort [26]. Aufgrund dessen ist die politische und öffentliche Stimmung in NRW skeptisch gegenüber einer Verschärfung der Klimaschutzauflagen für die Stahlindustrie (wie u.a. durch die z.T. sehr großen Warnstreiks mit z.B. über 12.000 Beteiligten in Duisburg im April 2016 erkennbar [64, 91]) – weswegen ein Aufzeigen alternativer Wege gerade hier von hoher Bedeutung ist.

⁴ Umrechnung der Energieeinheiten: 1 GJ = (10⁹ J = 10⁹ Ws = 1000/3,6 kWh) = 278 kWh, 1 PJ = 278 MWh = 0,278 GWh, bzw. 1 kWh = 0,0036 GJ

Eine oft genannte Prozessalternative zur Herstellung von Stahl in konventionellen Hochöfen ist das Einschmelzen von Altstahl in sogenannten Lichtbogenhochöfen (Electric Arc Furnace; EAF). „Seit der Jahrtausendwende ist die Rohstahlproduktion weltweit allerdings so stark gestiegen, dass das Schrottaufkommen nicht ausreicht, um den Anteil der EAF-Stahlproduktion zu halten. In Deutschland wird etwa 60-70% des Rohstahls durch die Primärroute erzeugt“ [8, S.150].

Des Weiteren sind die bei der Eisenproduktion anfallenden Schlacken von großem Interesse für die Zementindustrie. Hochofenschlacke stellt ein bedeutendes Grundmaterial für die Herstellung von Portland-Zement dar. Fällt die Schlacke als Rohmaterial fort, so entstehen bei der Zementherstellung wesentlich größere CO₂-Emissionen.^{5 6}

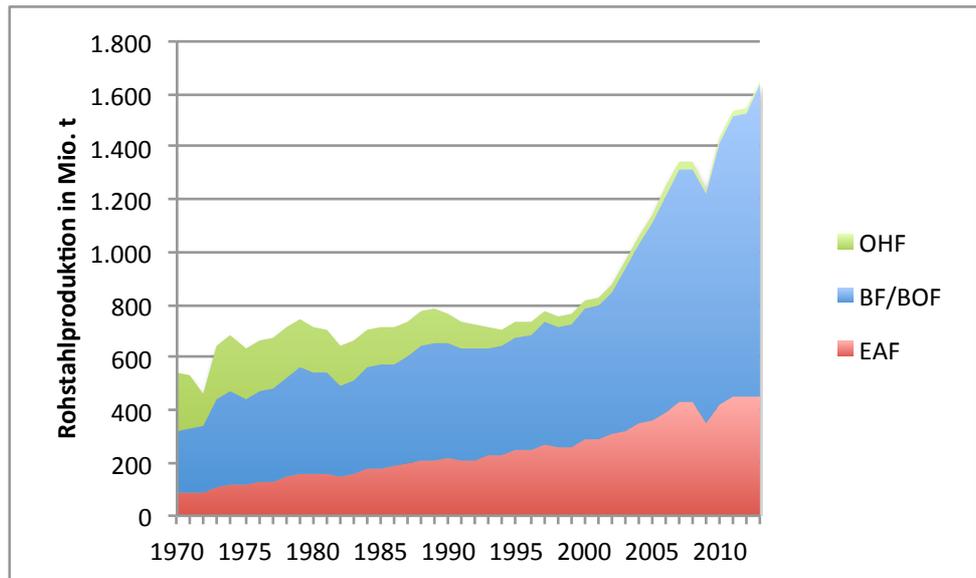


Abbildung 5: Weltrohstahlproduktion nach Produktionsprozess (1970-2013): Die veraltete Methode des Siemens-Martin-Ofen (Open Hearth Furnace, OHF) ist nicht mehr relevant, Von Bedeutung sind derzeit die integrierte Hochofenroute (Blast Furnace / Basic Oxygen Furnace, BF/BOF) und die elektrische Lichtbogenroute (Electric Arc Furnace, EAF); Datenquelle: IISI/World Steel Association, Steel Statistical Yearbook (verschiedene Jahrgänge). Aus [8].

Der weltweite Stahlverbrauch lässt sich durch den starken Anstieg (von derzeit ca. 1,6 Gt Stahl auf bis zu ca. 2,4 Gt in 2025 [38]) derzeit nicht durch Sekundärstahl decken

4.2 Erzeugnisse und Import/Exportbilanzen

Sowohl die Stahlnachfrage als auch die -produktion verlagern sich (sowohl anteilig als auch in absoluten Zahlen) von den alt-etablierten Industriestaaten zu den aufstrebenden Schwellenländern China, Indien und Brasilien [24]. Diese Verlagerung trägt dazu bei, die Verlängerung der weltweiten Transportwege speziell massereicher Produkte zu verlangsamen. Die Verlangsamung des Nachfrageanstiegs in China könnte zusammen mit dem großen Anstieg in weltweiten Produktionskapazitäten zu einem steigenden Konkurrenzdruck auf dem globalen Stahlmarkt führen [38], China wird aufgrund der sinkenden inländischen Nachfrage (in China) bei weiterem Ausbau von inländischen Produktionskapazitäten zu einem Stahl-Nettoexporteur [8]. Zumal die Gewinnmargen in der deutschen Eisen- und Stahlindustrie sehr gering sind (im Mittel etwa 2,5%, 2012 sogar nur 1%, [8, S.153]),

⁵ Zement in NRW: Jahresumsatz ~633 Mio €, ca 2% der THG-Emissionen in NRW [8]. Die prozessbedingten Emissionen (v.a. bei der Herstellung des Zementklinkers durch Brennen bei ca. 1450°C, wobei im Kalk gebundenes CO₂ freigesetzt wird) sind deutlich höher als der über Elektrizität zugeführte Energiebedarf.⁵ 2010 hatte die Zementherstellung einen Anteil von 6,5% an der weltweiten CO₂-Emission und damit einen höheren Anteil als die Eisen- und Stahlindustrie (5,2%) [20]. Für eine substantielle Verbesserung wären hier Pfadbrüche und Produktinnovationen (v.a. [24], sowie [8, 20, 21, 22, 29, 30, 31] und Rezyklierung [9] erforderlich.

⁶ „Aus dem Energieeinsatz (in NRW neben EBS in erster Linie Braunkohle) und den prozessbedingten Emissionen des Klinkerbrennprozesses mit der Austreibung von CO₂ aus dem Rohstoff Kalkstein (3-4 Mio. t CO₂ pro Jahr) entstehen große Mengen an CO₂-Emissionen. Der Anteil der Zementindustrie an den gesamten Treibhausgasemissionen ist aufgrund der prozessbedingten Emissionen bedeutender als der Anteil der Branche am Energiebedarf. Mit 5,6 Mio. Tonnen CO₂ belief sich der Anteil der Zementindustrie an den Treibhausgasemissionen der Industrie auf 10 % (2011).

Neben der CO₂-Intensität der Klinkerherstellung bestimmt die Zementzusammensetzung, insbesondere der Klinkeranteil, die spezifischen CO₂-Emissionen einer Tonne Zement.“ [8]

dürfte eine reine Verteuerung der Energie- bzw. Emissionskosten ohne flankierende Maßnahmen die deutschen Produktionsstandorte gerade in Verbindung mit diesem stärker werdenden Verdrängungswettbewerb unrentabel werden lassen. Eine entsprechende Unterstützung beim Umbau auf Produktionsmethoden mit geringerer Umweltintensität (bzgl. Ressourcen- und Energieverbrauch und THG-Emissionen) durch Förderung der Forschung und Entwicklung bzw. dem Aufzeigen alternativer substitutiv einsetzbarer Produkte erscheint ratsam.

Nach DIN EN 10020 werden Stähle unterschieden in [8]:

- Grundstähle,
- Unlegierte Qualitätsstähle,
- Unlegierte Edelstähle,
- Legierte Qualitätsstähle,
- Legierte Edelstähle.

In der deutschen Ein- und Ausfuhrstatistik sind die ersten drei Kategorien als "unlegierte Stähle" zusammengefasst. In Deutschland lag 2010 der Anteil der legierten Stähle und Edelstähle bei 50% und somit deutlich über dem internationalen Durchschnitt von 30% [40] – hier zeigt sich somit in der Produktion von Spezialstählen eine der möglichen, vor übermäßiger Konkurrenz schützenden und somit Gewinnmargen sichernden, Strategien für die heimischen Standorte. Diese Spezialstähle erfordern allerdings teilweise zusätzliche energieintensive Reinigungs-Prozessschritte wie etwa bei EAF-Stahlsorten mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, die eine nachgeschaltete Entkohlung notwendig machen [8].

Dementsprechend sollte bezüglich Umweltaspekten neben der weiteren Entwicklung und Verbreitung von Energie- und THG-emissionsreduzierenden Produktionsstrategien (Einsparpotenzial in NRW-Stahlindustrie ca. 33% THG-Emissionen [33, 34]) ein Augenmerk auf der Entwicklung von Stahl substituierenden Materialien wie z.B. polymeren Werkstoffen liegen.

Für die Stahlindustrie dagegen bedeutet dies freilich

einen weitere mögliche Reduktion der Absatzmöglichkeiten. Aus dem Wettbewerb unterschiedlicher Materialien hinsichtlich

ihrer Klima- und Ressourcen-

schonung kann hier allerdings auch ein erhöhter Druck zur Effizienzverbesserung kommen. Neben einer weiteren Verbesserung des ohnehin schon recht weitgehenden Recyclings von Stahlerzeugnissen [118] zeigt dies den Bedarf für die Entwicklung und Markteinführung von signifikant energie- und emissionseffizienteren „Break-Through-Technologien“ in der Stahlerzeugung. Für die Konstruktion der Türme von Windkraftanlagen steht Stahl zum Beispiel in Konkurrenz mit Beton als Baumaterial.

In Deutschland ist seit langem eine weitgehende Übereinstimmung von Rohstahlproduktion und -verbrauch zu beobachten, die Gesamtmenge zeigt dabei einen leicht ansteigenden langfristigen Trend von 1% Zuwachs pro Jahr⁷, während eine längerfristige Prognose [39] auf europäischer Ebene einen Anstieg von 0,8% pro Jahr bis

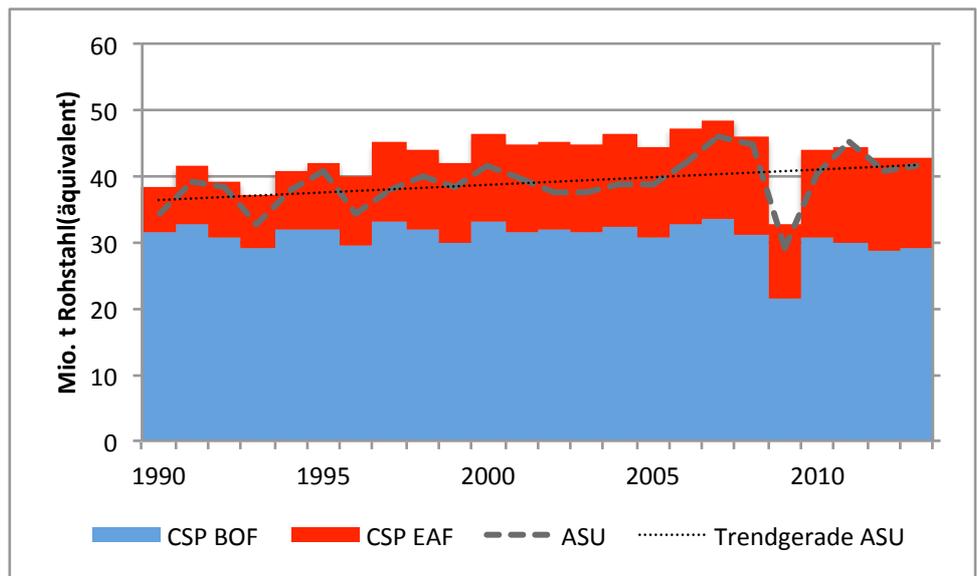


Abbildung 6: Rohstahlproduktion (Crude steel production, CSP) und -verbrauch (apparent steel use, ASU)¹ für die integrierte Hochofenroute (BF/BOF) und die elektrische Lichtbogenroute (EAF) in Deutschland (1990-2013), aus [8]. Daten: IISI/World Steel Association, Steel Statistical Yearbook (verschiedene Jahrgänge)

⁷ Daten: IISI/World Steel Association, Steel Statistical Yearbook (verschiedene Jahrgänge):

1990: 34 Mt; 2013, 2014: 43 Mt; d.h. 9 Mt in 23 a (ca 26%) --> 1,01% Zuwachs pro Jahr

2050 annimmt.

Laut Input/Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2010 sind gemessen am Produktionswert in Deutschland die bedeutendsten Abnehmer der inländischen Stahlproduktion [8]:

- Metallbearbeitung: 33%;
- Kraftwagen und Kraftwagenteile: 22% ;
- Maschinenbau: 17%;
- Gießereien: 4%.

40% der Rohstähle werden von der weiterverarbeitenden Industrie aus dem Ausland (zu 90% aus dem europäischen Ausland) importiert [8]. Während sich bzgl. der EU Importe und Exporte weitgehend die Waage halten, bestehen zum NAFTA-Raum (North American Free Trade Agreement, welches Mexiko, die USA und Kanada umfasst) und nach Asien Nettoexporte. Dass sich die Im- und Exporte in etwa die Waage halten, liefert allerdings noch keine hinreichende Basis, um die WSKs als wirklich geschlossen anzusehen oder gar von einem Stoffkreislauf zu sprechen, da viele der in Deutschland (und somit oftmals in NRW) hergestellten hochlegierten Spezialstähle zwar in alle Welt exportiert werden, der Import allerdings zu wesentlichen Teilen aus Stählen einfacherer Qualität besteht, die an ausländischen Standorten zu kostengünstigeren Konditionen produziert werden können.

4.3 Perspektive NRW

Innerhalb von NRW kann die Stahl-WSK als zumindest teilweise geschlossen angesehen werden: Die meisten Produktionsstandorte sind als integrierte Hüttenwerke angelegt und die Walzwerke verarbeiten vorwiegend Stahl aus NRW. Dies reduziert die Abhängigkeit vom Weltmarkt.

Die Rohstoffe für die Stahlproduktion in NRW werden weitgehend importiert (Kokskohle und Eisenerz in Form von Stückertz, Feinerz und Pellets), und nur wenige Grundstoffe (wie die Zuschlagstoffe Kalkstein und gebrannter Kalk) werden vorwiegend regional bezogen.

4.4 Prozesse zur Stahlherstellung

In den Kokereien entsteht das einen hohen Wasseranteil aufweisende Koksofen- oder Kokereigas⁸, welches zumeist zur Energiegewinnung weiter genutzt wird. Neben Teer (z.B. für den Straßenbau) können verschiedene Plattformchemikalien wie Benzol in der chemischen Industrie weiter genutzt werden. Das einen geringen spezifischen Heizwert aufweisende Gichtgas oder Hochofengas⁹ wird zumeist im Hüttenverbund verwertet. Konvertergas¹⁰ entsteht beim Sauerstoffblasverfahren und wird ebenfalls energetisch weiterverwertet. Die Schlacken aus Hochofen, Konverter und Lichtbogenofen (EAF-Pfad) finden verschiedene Verwendung: während Hochofenschlacke primär in der Zementindustrie Verwendung findet, wird Konverter- und EAF-Schlacke im Straßenbau oder als Dünger verwendet.

In der Vorkette verursacht die Produktion der Zuschlagstoffe zusätzliche CO₂-Emissionen, während andererseits die Nutzung von Prozesswärme aus den Hüttenverbänden z.B. der Kuppelgaskraftwerke im Fernwärme bzw. Dampfnetz, und glasig erstarrte Hochofenschlacke als Hüttensand in der Zementindustrie als Substitut für Zementklinker jeweils zur Energie- und Emissionsreduktion in anderen Bereichen und WSKs beitragen kann.

⁸ v.a. Wasserstoff (H₂, ca. 55%), Methan (CH₄, ca. 25%), Stickstoff (N₂, ca. 10%) und Kohlenmonoxid (CO, ca. 5%) sowie geringere Anteile an Kohlendioxid (CO₂), Ammoniak (NH₃), Schwefelwasserstoff (H₂S) sowie komplexere CH-Verbindungen

⁹ v.a. Stickstoff (ca. 45-60%), Kohlenmonoxid (20- 30%), Kohlendioxid (ca. 20-25%) und Wasserstoff (ca. 2-4%)

¹⁰ v.a. Kohlenmonoxid (ca. 65%), Stickstoff (ca. 18%), Kohlendioxid (ca. 15%) und Wasserstoff (ca. 2%)

4.5 Optimierung- und Einsparpotenziale

Die Reduktion von Eisenerz zu Eisen ist mit 80 bis 90% der energieintensivste Prozessschritt der gesamten WSK, über die beste derzeit verfügbare Technologie (Best Available TEchnology, BAT) hinaus sind in der herkömmlichen Prozessroute hierbei allerdings lediglich noch Optimierungen von unter 10% zu erwarten [24, S. 312].

Viele Optimierungspotenziale in einzelnen Prozessen der Eisen- und Stahlherstellung sind in NRW bereits ausgeschöpft (z.B. Optimierung des Elektrostahlverfahrens oder Stranggießen im Elektrostahlhofen), andere gelten als in NRW nicht wirtschaftlich umsetzbar (z.B. Umrüstung auf Kokstrockenkühlung als Effizienzverbesserung beim Löschen des Kokses). Weiterer F&E-Bedarf besteht bzgl. des Einsatzes von Katalysatoren und hochreaktiven Edukten in Hochöfen zur Reduktion des Kokseinsatzes [8, S.162].

Effizienzsteigerungen bei formgebenden Prozessen (Gießen, Walzen etc.) sind z.T. schon umgesetzt, weitere Steigerungen sind jedoch noch möglich; bzgl. der Ressourceneffizienz und Wärmenutzung besteht noch Potenzial durch „industrielle Symbiosen“, die im Allgemeinen eine weitergehende Integration notwendig machen [8, S.163].

Auch bzgl. der Nutzung von Schlacken (u.a. als Ersatzstoff für Zementklinker) besteht noch weiterer F&E-Bedarf.

Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Energieflüsse eines EAF-Prozesses. Hieraus ist das enorme Potenzial der Wärme-Rückgewinnung erkennbar.

Bei einer Besichtigung des mit einem EAF-Ofen ausgestatteten Stahlwerks Witten¹¹ wurden jedoch große nicht-ausgeschöpfte Energieeffizienzpotenziale deutlich: Nahezu keinerlei Rezyklierung von Prozesswärme wird durchgeführt. So wird die im EAF-Prozess anfallende Schlacke unter freiem Himmel abgekühlt, die gesamte Wärme entweicht in die Umgebung. Die produzierten Stahlbarren werden in großer Zahl auf dem Gelände gelagert, kühlen dort ab und müssen vor dem anschließenden Walzen oder Schmieden wieder aufwändig z.T. von Umgebungstemperatur in einem gasbetriebenen Ofen auf 800-1300°C erhitzt werden. Durch intelligente Wärmerückgewinnung und thermische Isolierungen besteht hier sicherlich ein großes Einsparpotenzial (innerhalb der thermodynamischen Grenzen, die eine vollständige Rückgewinnung der in Prozess-

wärme überführten Energie unmöglich machen), das allerdings zumindest in Teilen erst bei weiter ansteigenden Energiekosten attraktiv werden könnte.

Um darüber hinaus substantielle Einsparungen bzgl. THG-Emissionen und Ressourcenbedarf zu erreichen, ist ein Übergang zu anderen Produktionspfaden vonnöten, für die z.T. noch große F&E-Leistungen erbracht werden müssen, um technologische Durchbrüche hin zur Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Zugleich ist die Frage, welcher dieser Pfade sich über die nächsten Jahre bzw. Jahrzehnte hinweg durchsetzen wird, auch stark von politischen Rahmensetzungen abhängig.

Als derzeitige und potenzielle zukünftige Massentechnologien stehen gegenwärtig zur Verfügung bzw. sind in Aussicht:

- 1) Integrierte Hochofenroute (BF/BOF),
- 2) Integrierte Hochofenroute mit Kohlendioxidabtrennung (BF-CCS),

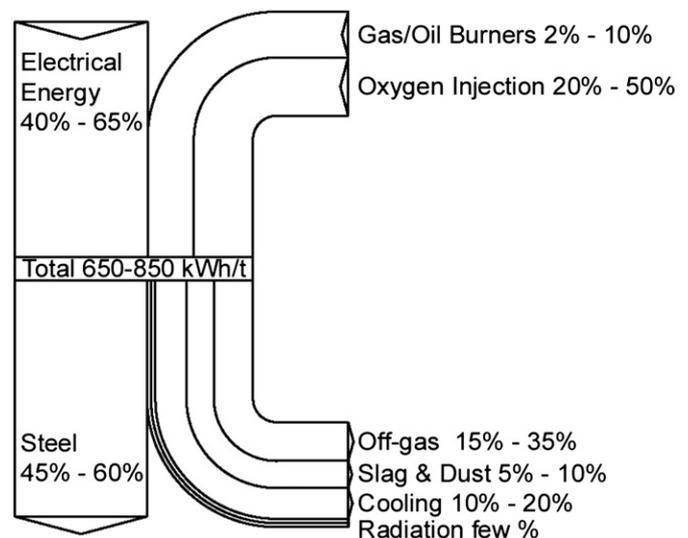


Abbildung 7: Energiequellen (elektrische Energie und die bei der Oxidationsreaktion frei werdende chemische Energie) und –senken (z.B. Abgas und Ofenkühlung) des EAF-Prozesses, aus [43].

¹¹ Hauptstandort der Deutschen Edelstahlwerke (DEW), Besichtigungsdatum: 18.01.2016

- 3) Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR),
- 4) Elektrolytische Eisengewinnung: Electrowinning (EW).

Bei der hypothetischen Verwendung von CCS sind allerdings die vielfältigen Schwierigkeiten und Risiken dieser noch nicht ausgereiften Technologie mit zu bedenken. Es ist derzeit weder absehbar, ob solch ein Verfahren wirtschaftlich zum Einsatz kommen kann, noch ob die dauerhafte Einlagerung des abgeschiedenen Kohlendioxids sicher gewährleistet werden. Die Akzeptanz einer dieser Technologie gegenüber skeptischen Bevölkerung ist ebenfalls zu berücksichtigen [36].

Verfahren wie die Direktreduktion nutzen Erdgas und Wasserstoff anstatt Koks und führen zu wesentlich geringeren THG-Emissionen [8, S. 168ff und 41]. Wenngleich manche dieser Verfahren noch in der Entwicklungsphase stecken, lässt sich abschätzen, dass sowohl der Energiebedarf als auch der THG-Ausstoß pro Tonne Rohstahl durch einen Technologiewechsel fort von der momentan hauptsächlich genutzten klassischen Hochofenroute (Blast Furnace / Basic Oxygen Furnace, BF/BOF) signifikant reduziert werden kann (s. Abbildung 8).

Mittelfristig bietet sich neben dem weiteren Ausschöpfen der verbleibenden Optimierungspotenzials der BF/BOF-Hauptroute möglicherweise deren Weiterentwicklung zu BF-CCS an, wobei die entstehenden Treibhausgase aufgefangen und entweder weitergenutzt oder in unterirdischen Lagerstätten gespeichert werden. Da hierbei allerdings die typischen Probleme und Risiken und damit verbundenen gesellschaftlichen Akzeptanzprobleme der CCS-Technologie auftreten [36], ist gegenwärtig offen, wann, bzw. ob die CCS-Technologie jemals in industriellem Maßstab unter vertretbaren Bedingungen nutzbar ist.

Unter den potenziellen zukünftigen Pfaden erscheint neben dem im ersten Moment präferenziell wirkenden direkten elektrischen „Electrowinning“ (EW) v.a. die Wasserstoffdirektreduktion (H-DR) attraktiv [41, 42]. H-DR könnte ab 2030 großindustriell eingesetzt werden und bietet gegenüber EW aufgrund der Möglichkeit der Schlackenutzung für andere WSKs, aber v.a. aufgrund der Speicherfähigkeit von Energie in Wasserstoff (H₂) bzw. Methan (CH₄) und der damit verbundenen weitgehenden Unabhängigkeit von Versorgungspeaks oder

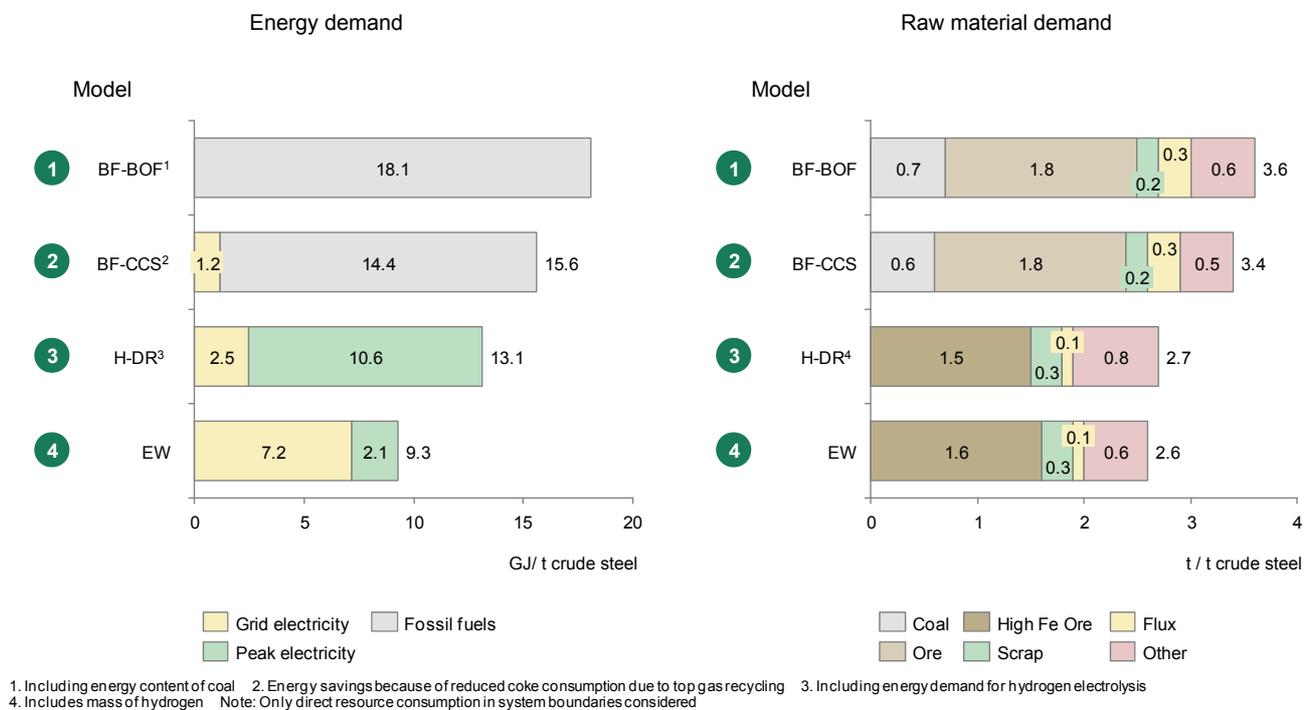


Abbildung 8: Energie- und Ressourcenbedarf der alternativen Produktionspfade Electrowinning (EW) und Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR) im Vgl. zur BF/BOF-Route bzw. deren Ergänzung durch CO₂-Abtrennung (BF-CCS).

-Lücken im Stromangebot wesentliche Vorteile. Zudem dürfte EW erst etwas später (ca. 2040) zur Marktreife gelangen und ist wie beschrieben auf kontinuierliche Stromlieferung angewiesen.

Abbildung 9 zeigt ein Mapping der WSK der Primärstahlerzeugung. Dabei werden die Abschnitte ab der Bereitstellung des Eisenerzes und der Kohle bis hin zur Fertigung der Stahlprodukte in Deutschland und dementsprechend v.a. NRW produziert und können je nach Betrachtungsweise als weitgehend geschlossene WSK betrachtet werden – wobei ein reger Handel mit Zwischenprodukten über die Landesgrenzen hinweg zu beachten ist. Hierdurch erfährt der Aspekt der “Geschlossenheit” der WSK eine Qualifizierung.

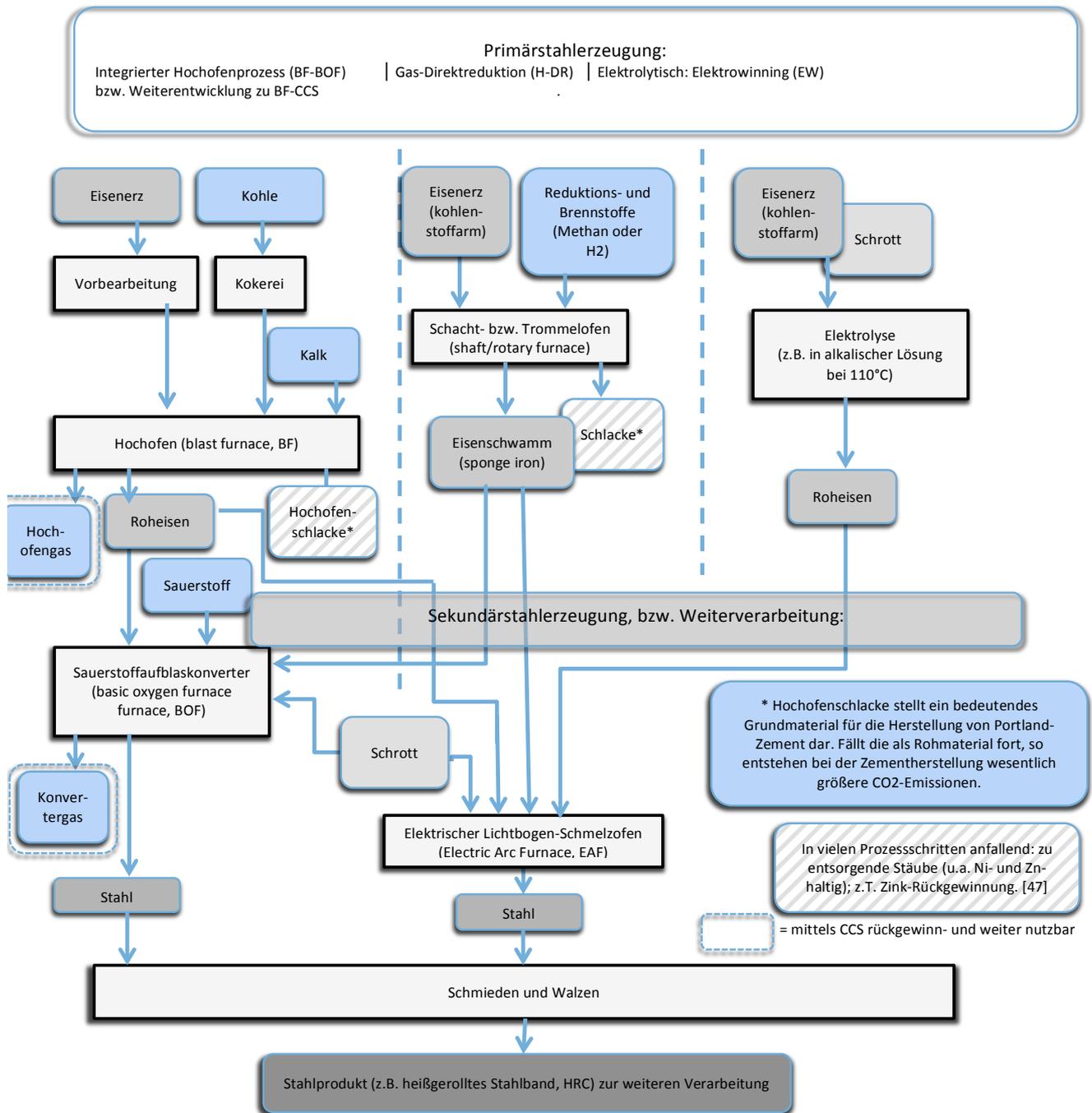


Abbildung 9: WSK-Mapping, aufbauend auf [41] und [45]. Nicht dargestellt sind der el. Energieinput und der Gesamtenergieinput.

4.6 Quantitative Kriterien für die Eisen- und Stahlbranche

Auf NRW bezogen ergeben sich für die Stahl-WSK die nachfolgend aufgelisteten Kenngrößen und numerische Größen für verschiedene Einsparstrategien.

Anzahl in der Branche Beschäftigten und Umsatz	Ca. 48.000 Angestellte in NRW (d.h. 56%), 75.000 Angestellte in Nordwest-Deutschland (NRW, Niedersachsen, Bremen) [82], ca. 85.000 Beschäftigte im gesamten Bundesgebiet [64]. 33,3 Milliarden € Umsatz in D [82], davon entfallen aber nur ca. 40% (13,3 Milliarden €) auf NRW [83].
Gesamtenergieverbrauch (kWh)	Energiebedarf in NRW in 2012: 210 PJ (58 GWh), Einsparungen: 1995 - 2012 gesamt -30%, also 2%/Jahr Direkter NRW-Kohleverbrauch in 2012 für die Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen: 2.506.000 t Steinkohle (77 PJ) und 989.000 t Koks (28 PJ), sowie 3.525.000 t Koks (101 PJ) in Hochöfen und Konvertern [74]. Vgl.: Primärenergieverbrauch in NRW in 2012: 28.030.000 t Steinkohle (766 PJ) und 101.554.000 t Braunkohle (925 PJ)
THG-Emissionen (kgCO _{2eq}), und Emissionsintensität (kgCO _{2eq} /€ bzw. kgCO _{2eq} /t)	Stand 2012: 20,5 Mt CO _{2eq} , d.h. knapp 40% der industriellen Emissionen und 7% der gesamten THG-Emissionen NRWs [8], bzw. 21,6 Mt CO ₂ nach [74]; davon 10,2 Mt CO ₂ aus Steinkohle (7,2 Mt) und Koks (3,0 Mt), 6,9 Mt CO ₂ aus Gas (v.a. Gicht- und Konvertergas mit 5,0 Mt, und Erdgas mit 1,5 Mt), 4,2 Mt CO ₂ aus Strom, 0,2 Mt CO ₂ aus Fernwärme [74]. Primärstahl im BF/BOF-Prozess (ca. 2/3 der deutschen Produktion nach diesem Prozess [84]): 1,63 t CO _{2eq} /t _{Rohstahl} im EU-Durchschnitt, mit bester aktueller Technologie (BAT) wird als Benchmark 1,33 t CO _{2eq} /t _{Rohstahl} [34], 1,371 t CO _{2eq} /t _{Rohstahl} [43] oder 1,475 t CO _{2eq} /t _{Rohstahl} [41] angegeben. Langfristige Minderung auf 1,1 t CO _{2eq} /t _{Rohstahl} als möglich erachtet [33], d.h. eine potentielle Emissionsreduktion um 33%. Laut IG Metall wäre europäische Stahlproduktion mit 1,39 t CO _{2eq} /t Rohstahl möglich, während konkurrierender chinesischer Importstahl 1,99 t CO _{2eq} /t _{Rohstahl} aufweise [81]. Größeres Einsparpotenzial durch Technologiewechsel: BF-CCS -- > 0,8 t CO _{2eq} /t H-DR -- > bis 0* EW -- > bis 0* *abh. von el. Stromproduktion. Netzemission 2010: 455 kg CO _{2eq} /MWh Energieintensität in monetären Einheiten: Abhängig vom internationalen Stahlpreis. 2015 sank der Preis für 1 t Warmbandstahl von 418 auf 319 € [81]- d.h. Energieintensität (bei 1,39 t CO _{2eq} /t) stieg von 3,3 kg CO _{2eq} /€ auf 4,4 kg CO _{2eq} /€ (geringer für hochpreisige Spezialstähle).
Output und Energieintensität pro materiellem Output (Energiebedarf / Produktionseinheit)	42,9 Mt Rohstahl in D in 2015 [82], NRW trägt mit 40% (ca. 17,2 Mt) zur bundesdeutschen Stahlerzeugung bei [83]. Die sich ergebende Energieintensität in NRW von 3370 kWh/t Rohstahl weist auf den hohen Anteil an Sekundärstahlerzeugung hin. Hochofen-/Konverterroute (BF/BOF) für Primärstahl (ca. 2/3 der deutschen Produktion [84]) mit ca. 5000 kWh/t [35], Elektro-Lichtbogenofen (Electric Arc Furnace, EAF. Ca. 1/3 der deutschen

	<p>Produktion [84]) für Primär- sowie Sekundärstahl: ca. 400-600 kWh/t, andere Quelle: BF/BOF dreimal so energieintensiv wie EAF für Primärstahl [24] BF/BOF: 18,1 GJ/t = 5000 kWh/t, (EAF: 1,4 - 2,2 GJ/t = 400-600 kWh/t) [35, 24, 43] BF-CCS: 15,6 GJ/t = 4330 kWh/t, H-DR: 13,1 GJ/t = 3640 kWh/t, EW: 9,3 GJ/t = 2580 kWh/t [41]</p>
<p>Zeitliche Trends</p>	<p>In D (1990-2014) leichter Zuwachs von 1% pro Jahr bzgl. materiellem Output [8]; EU-weit wird 0,8% Produktionsanstieg pro Jahr prognostiziert [39]. Kapazitätsauslastung mit 86% in Deutschland sehr hoch (EU-Durchschnitt 78%) [83]. Energie- und THG-Effizienz: 2007/2008 relativ zu 1960 um 40% (-1,1%/Jahr) bzw. relativ zu 1990 um 23% (-1,5%/Jahr) verbessert [8, S.159; 24, 39].</p>
<p>Materialverbrauch (Material-Impact, MI)</p>	<p>Rohmaterialeinsatz pro t Rohstahl: BF/BOF: 3,6 $t_{\text{Input}} / t_{\text{Rohstahl}}$, BF-CCS: 3,4 $t_{\text{Input}} / t_{\text{Rohstahl}}$, H-DR: 2,7 $t_{\text{Input}} / t_{\text{Rohstahl}}$, EW: 2,6 $t_{\text{Input}} / t_{\text{Rohstahl}}$, [41] (weitere Details in [41])</p>

Die Anzahl der Beschäftigten in der Eisen- und Stahlindustrie beträgt ca. 48.000 in NRW (bundesweit ca. 85.000 Beschäftigte [64]). Dies ist eine relevante, wenngleich nicht alleinig ausschlaggebende Anzahl, setzt man diese in Bezug zu den insgesamt ca. 726.000 Arbeitsplätzen [16] in der gesamten Werkstoff verarbeitenden Industrie in NRW und den über 100.000 Beschäftigten in der chemischen Industrie [8, S. 75]. Jedoch ist die Branche zusätzlich von strategischer Bedeutung für die weiterverarbeitenden Betriebe, die einen substantiellen Anteil der gesamten Werkstoff-verarbeitenden Industrie ausmachen. Speziell für diese ist sicherlich das Potenzial für Transformation/Umstellung auf andere Materialien interessant zu betrachten, um deren reale Abhängigkeit von der Eisen- und Stahlindustrie weitergehend beurteilen zu können.

Der Gesamtenergieverbrauch (kWh), der für andere WSK auch mit deren Energie-Output verglichen werden kann:

Der gesamte Industriebedarf macht 39% der Endenergie in NRW aus (267 GWh von 580 GWh, bzw. 960 von 2100 PJ) [8]. Der Energiebedarf der Eisen- und Stahlindustrie in 2012 betrug 210 PJ (58 GWh), damit ist sie der zweitgrößte industrielle Energieverbraucher hinter der Grundstoffchemieindustrie in NRW [8, S.33]. Hierbei sind Brennstoffe (v.a. Kohle) noch nicht berücksichtigt. Erdgas und Strom tragen jeweils mit ca. 13% zum Endenergiebedarf bei.

Über die letzten beiden Jahrzehnte kam es dabei zu deutlichen Absoluteinsparungen: Lag der Bedarf 1995 noch bei 83 GWh, fiel dieser bis 2012 auf 58 GWh (-30% gesamt, das entspricht 2%/Jahr).

Die direkten Industrieemissionen beliefen sich 2012 auf 19% der gesamten THG-Emissionen in NRW (53,5 Mt CO_{2eq} von 289 Mt CO_{2eq}). Mit Stand 2012 verursachte dabei die Eisen- und Stahlindustrie mit 20,5 Mt CO_{2eq}, knapp 40% der industriellen Emissionen und 7% der gesamten THG-Emissionen NRWs [8]. Bzgl. der THG-Emissionsintensität pro produzierter Tonne Rohstahl unterscheiden sich die verschiedenen Routen signifikant.

Im derzeitigen EU-Durchschnitt fallen für Primärstahl im BF/BOF-Prozess 1,63 t CO_{2eq}/t Rohstahl an, mit bester aktueller Technologie (BAT) wird als Benchmark 1,33 t CO_{2eq} /t [34], 1,371 t CO_{2eq}/t [43] oder 1,475 t CO_{2eq} /t Rohstahl [41] angegeben. Laut IG Metall wäre in der EU eine Stahlproduktion mit einer durchschnittlichen CO₂-Intensität von 1,39 t CO_{2eq}/t Rohstahl möglich, während konkurrierender chinesischer Importstahl eine CO₂-Intensität von 1,99 t CO_{2eq}/t Rohstahl aufweise [81]. Langfristig wird eine Minderung auf 1,1 t CO_{2eq}/t Rohstahl als möglich erachtet [33], was einer Emissionsreduktion um 33% entspricht. Somit sind bei einem Festhalten an der klassischen BF/BOF-Route 2/3 der Emissionsintensität unvermeidlich.

Größeres Einsparpotenzial liegt hier im Technologiewechsel und der weiter verstärkten Nutzung von Sekundär-

stahl aus Schrott (u.a. durch das konsequente Wiederaufsammeln von Eisen- und Stahlresten, u.a. aus alten Mülldeponien). Hierbei ergibt sich folgendes Bild:

- BF-CCS -- > 0,8 t CO_{2eq} /t,
- EAF --> bis 0*
- H-DR -- > bis 0*
- EW -- > bis 0*

*abh. von el. Stromproduktion. Netzemission 2010: 455 kg CO_{2e}/MWh.

Eine Umstellung auf Gas direktreduzierende Verfahren in Kombination mit Lichtbogenöfen bewirkt jedoch nicht notwendigerweise eine bedeutende Emissionsreduktion und ist stark abhängig von der elektrischen Energieerzeugung und der Prozessführung im EAF. Analysen bestehender weltweiter Anlagen zeigen für die klassische BF/BOF-Route 1,63-1,96 t CO_{2eq} /t Rohstahl, 0,36-0,47 t CO_{2eq} /t für die auf Schrott basierende EAF-Sekundärstahlproduktion, und die sehr weite Spanne von 0,56-1,45 t CO_{2eq} /t Rohstahl für die EAF-Route auf Basis von direktreduziertem Eisen [43] (s. auch Abbildung 10).

Die Energieintensität pro materiellem Output (Energiebedarf / Produktionseinheit) ist am ungünstigsten für die bestehende Hochofen-/Konverterroute (BF/BOF) für Primärstahl mit ca. 5000 kWh/t [35]. Der hier zuweilen als Ergänzung verwendete Elektro-Lichtbogenofen (Electric Arc Furnace, EAF) ist deutlich energieeffizienter; der reine BF/BOF-Prozess wird als dreimal so energieintensiv angegeben wie EAF für Primärstahl [24]. Für Primär- sowie Sekundärstahl finden sich Bedarfswerte für EAF von ca. 400-600 kWh/t [35].

- BF/BOF: 18,1 GJ/t = 5000 kWh/t, (EAF: 1,4 - 2,2 GJ/t = 400-600 kWh/t) [35, 24]
- BF-CCS: 15,6 GJ/t = 4330 kWh/t,
- H-DR: 13,1 GJ/t = 3640 kWh/t,
- EW: 9,3 GJ/t = 2580 kWh/t [41]

Die Energieintensität in monetären Einheiten hängt vom internationalen Stahlpreis ab. 2015 sank der Preis für 1 t Warmbandstahl von 418 auf 319 € [81]- d.h. die Energieintensität (bei 1,39 t CO_{2eq} /t) stieg von 3,3 kg CO_{2eq} /€ auf 4,4 kg CO_{2eq} /€. Für hochpreisige Spezialstähle fällt entsprechend weniger THG pro € an.

Die Betrachtung zeitlicher Trends (n.M. über mind. 5 Jahre) [1, S. 53], ermöglicht es, die langfristige Bedeutung der einzelnen WSK zu analysieren und relevante WSKs auszuwählen. In Deutschland zeigte der langfristige Trend (1990-2014) einen leichten Zuwachs von 1 % pro Jahr bzgl. des materiellen Outputs [8]; EU-weit wird ein Produktionsanstieg von 0,8% pro Jahr prognostiziert [39]. Die Energie- und THG-Effizienz hat sich für 2007/2008 relativ zu 1960 um 40% (-1,1%/Jahr) bzw. relativ zu 1990 um 23% (-1,5%/Jahr) verbessert [8, S.159; 24, 39]. Durch die unlängst im Zeitraum 2008-2014 erfolgte Erneuerung bzw. Modernisierung von fünf der sechs großen Hochöfen in NRW sind keine weiteren Effizienzsprünge in den nächsten Jahren zu erwarten.

Zusätzlich ist eine Betrachtung des allgemeinen Materialverbrauchs angeraten (Material-Impact, MI) bzw. des „ökologischen Rucksacks“, um den Fokus nicht zu sehr auf Energie und THG zu verengen [23]. Auch hier schneidet die klassische BF/BOF-Route am ungünstigsten ab, wenn für verschiedene Technologien der Rohmaterialeinsatz pro t Rohstahl verglichen wird:

- BF/BOF: 3,6 t_{Input} /t_{Rohstahl},
- BF-CCS: 3,4 t_{Input} /t_{Rohstahl},
- H-DR: 2,7 t_{Input} /t_{Rohstahl},
- EW: 2,6 t_{Input} /t_{Rohstahl}, [41] (weitere Details in [41])

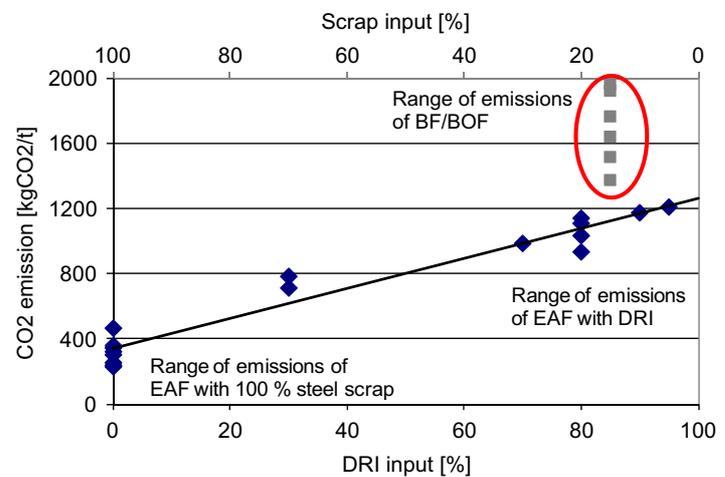


Abbildung 10: Spezifische CO₂-Emissionen verschiedener Produktionsprozesse, aus [43].

4.7 Beschreibung und Eingrenzung der Stahl-WSK

Als **Eintrittspunkt** für die Beschreibung der Stahl-WSK bieten sich Rohstahl oder schon teilweise weiter gefertigte Erzeugnisse an. Auf diesem Wege bleibt offen, welche Anfangsprodukte hierfür verwendet werden (ob Eisenerz, Roheisen oder Schrott). Da sowohl das Schmieden und Walzen der heißen Stahlblöcke als auch zunehmend CNC-gesteuerte Fräsbearbeitung (Computerized Numerical Control, computerisierte numerische Maschinensteuerung), z.B. von massiven Motorblöcken, direkt in den Stahlwerken stattfindet, diese Weiterverarbeitung aber eben auch oftmals elementarer Bestandteil des weiterverarbeitenden Gewerbes und mittelständischer Maschinenbaubetriebe ist, verbleibt eine gewisse Unschärfe in der Definition des Endes der hier umrissenen Stahl-WSK.

Da alle Prozessrouten jedoch zumindest den Zwischenschritt über den Rohstahl durchlaufen, bietet sich dieser als definierbarer Eintrittspunkt an, von dem sowohl (z.T.) weitergehende Verarbeitungsschritte als auch die (upstream) gelagerten und z.T. ausdifferenzierten Vorschritte betrachtet werden können.

Ein erstes (grobes) **Mapping** der WSK ist in Abbildung 9 dargestellt. Hierbei sind sowohl die klassische BF/BOF-Route, als auch die (noch nicht zur Marktreife geführten) alternativen Routen der Direktreduktion und des Electrowinning einbezogen.

Bei den hier besonders relevanten **Produktsegmenten** handelt es sich vorwiegend um hochlegierte Spezialstähle, zu deren Herstellung ein größeres technologisches Knowhow erforderlich ist und die somit als kritischen **Erfolgsfaktor** für den Endmarkt nicht primär den Preis, sondern in wesentlichem Maß eine hohe spezifische Produktqualität aufweisen. Dagegen können billige „Massenstähle“ zu wesentlich günstigeren Preisen in Schwellenländern (v.a. Indien und China) produziert werden. China exportierte in 2015 ca. 7 Mt Walzstahl nach Europa, dieser weist zudem eine deutlich schlechtere THG-Bilanz auf [81]. Die enge Verzahnung mit den Kunden (z.B. im Maschinenbau und der Fahrzeugindustrie), um anforderungsgerechte Spezialprodukte liefern zu können, bietet entscheidende Vorteile. Ein enger Kontakt und vertraulicher Informationsaustausch (u.a. Stahlspezifikationen und Konstruktionsskizzen) wird durch räumliche Nähe tendenziell erleichtert, wodurch ein endkundennaher Standort von Vorteil ist.

Der schwankende Stahlpreis und die gelegentliche weltweite Überproduktion, v.a. im Bereich von Standardstählen in den letzten Jahren, führen zu einer weiteren Einflussverschiebung fort von den Produzenten hin zu den Endkunden.

4.8 Qualitative Kriterien bzgl. der Stahl-WSK

Aufgrund der historisch gewachsenen, quantitativ großen Bedeutung nehmen die Hochofenstandorte weiterhin eine zentrale Rolle in der Stahl-WSK in NRW ein. Da deren Produkte allerdings prinzipiell durch Zulieferung substituiert werden könnte, bewahren sie sich diese bedeutende Position im wesentlichen durch die Standortintegration (wodurch die lokale Produktion wirtschaftlicher bleibt als der Roheisen-Zukauf) und die sehr langen Innovationszyklen verbunden mit dem hohen konstruktiven Aufwand eines Standortum- oder neubaus.

Dessen ungeachtet erscheint dies als ein relativ schwaches Kriterium zum langfristigen Schutz der WSK-Stabilisierung. Im Bereich der hochlegierten Spezialstähle dagegen (deren Herstellung und Qualitätssicherung ein hohes Maß an technischem Know-how und eine gute Kontrolle über die Qualität einiger Vorprodukte erfordert) ist von niedertechnologischen Massenproduzenten kein wesentlicher Konkurrenzdruck zu erwarten. Da es allerdings auch in diesem Bereich durchaus eine weltweite und wachsende Konkurrenz gibt (derzeit v.a. aus China), wird auch diese Eintrittsbarriere zunehmend erodieren. Somit wird auch in diesem Segment der Preisdruck wachsen, wodurch eine reine Erhöhung der Energie- und Emissionskosten ohne weitere flankierende Maßnahmen standortbedrohende Auswirkungen haben könnte – ein Abwandern zu THG- und energieintensiveren Standorten kann nicht im allgemeinen Interesse sein, wenngleich ggf. existierende Überkapazitäten separat diskutiert werden müssten.

Neben durch die politische Rahmgebung zu beeinflussenden Produktions- und Standortfaktoren wie Infrastruktur, an ökologische Kriterien gebundene Zölle und Subventionen, Förderung von Forschung und Entwicklung etc. bietet die Weiterentwicklung passgenauer kundenspezifischer Lösungen (was zu einer weitergehenden, vertieften Integration der Akteure entlang der Stahl- und der verschiedenen weiterverarbeitenden Wertschöpfungsketten führt) sicherlich Potenzial im Sinne von fortschreitendem „Upgrading“.

Ob das EEG und der derzeitige THG-Zertifikatehandel als schädlich für die inländische Stahlindustrie angesehen werden müssen, hängt von der konkreten Ausgestaltung ab – durch Effizienzsteigerung und Produktionsrück-

gang besitzt allein ThyssenKrupp 33 Millionen überschüssige CO₂-Zertifikate [81], die gewinnbringend vermarktet werden können und somit als Subvention angesehen werden können.

Wie weiter oben erwähnt, kann die Stahl-WSK auf NRW bezogen nur in Teilen als geschlossen erachtet werden, da ein zunehmendes Gewicht auf der Sekundärstahlproduktion liegt, welche wiederum in großen Teilen auf Schrott basiert, der nicht originär aus den in NRW beheimateten Werken stammt. Innerhalb der Verbundstandorte und entlang der in Abbildung 9 dargestellten WSK finden viele Prozessschritte in NRW statt, (der Im- und Export von Zwischenprodukten nach und aus NRW ist allerdings im vorliegenden Bericht nicht abschließend quantifiziert) und sind oftmals gut miteinander verzahnt.

Bei einer Umstellung auf alternative Produktionspfade im Sinne eines „Greening“ müsste von dritter oder öffentlicher Seite ein starker Ausbau der Energiespeicherkapazitäten erfolgen – dies kann im Falle der H-DR durch Elektrolysestationen zur Wasseraufspaltung und Wasserstoffproduktion sowie der Gasspeicherung erfolgen, oder im Falle des EW durch an das Stromnetz gekoppelte Speicher. In beiden Fällen erscheint es als wenig plausibel, dass der Pufferaufbau allein von den derzeitigen Akteuren der Stahl-WSK betrieben werden wird bzw. dass der technologische Übergang dann wesentlich langsamer ablaufen dürfte.

Hierbei ist zu beachten, dass die Gas-Direktreduktion auf Erdgasbasis ein durchaus schon großtechnisch praktiziertes Verfahren ist. Immerhin ca. 2% der weltweiten Stahlproduktion erfolgt auf diesem Wege, mit Indien (knapp 40%, Stand 2009), sowie dem mittleren Osten und Afrika (ca. 30%) als den bedeutendsten Regionen [43]. Hieraus ist zum einen die Praktikabilität der Methode erkennbar, es ist allerdings auch offensichtlich dass ohne eine gezielte technologische Förderung in NRW die Entwicklung der H-DR primär an anderen Standorten erfolgen wird.

Hieraus lässt sich zudem schließen, dass es sich nicht primär um ein (reines) Knowhow-Thema handeln kann, sondern eher die langen Innovations- und Umstellungszyklen bestehender Produktionsstandorte aufgrund der hohen damit verbundenen Kosten ein wesentlicher Faktor sind.

Alles in allem erscheint die Stahlbranche sich mehr und mehr hin zu einer Kunden-getriebenen Branche zu entwickeln, was entsprechende Auswirkungen auf die WSK hat. Zugleich ist der sich wandelnde Rahmen im Zuge der Energiewende ein Faktor, der sich stärker auf der Produzentenseite äußert und von diesen Akteuren Anpassungen verlangt die mit dem Kundeninteresse in Einklang zu bringen sein werden.

Gerade für die bessere Energieeffizienz bzgl. Prozesswärme birgt eine stärkere Integration von Verbundstandorten der chemischen Industrie mit der Stahlerzeugung Vorteile. Ebenso wäre dies bei der Transformation hin zur H-DR-Technologie ein nützlicher Schritt, um durch eine intelligente gemeinsame Erzeugung und Nutzung von (chemisch bzw. in großem Maße elektrolytisch bereitgestelltem) Wasserstoff Synergien zu heben.

Eine konkrete Ausgestaltung hierzu (welche Raffinerieprozesse in Kombination mit der Stahlerzeugung die größten Synergien versprechen) ist aufgrund der großen Diversität der chemischen Industrie nicht abschließend zu beantworten und ein vielversprechendes Thema für weitere gemeinsame Analysen mit Vertretern der entsprechenden Industrien.

4.9 Standorte in NRW

Die wesentlichen Produktionsstandorte in NRW (s. Abbildung 11) weisen zumeist ein hohes Maß an Integration diverser Produktionsschritte auf. Dies ermöglicht neben kurzen Transportwegen prinzipiell eine gute Weiternutzung von Nebenprodukten und Prozesswärme.

Standort	Betreiber	Kokerei	Sinteranlage	Hochofen	Konverter	EAF	Gießerei	Warmwalzwerk	Kaltwalzwerk	Kraftwerk	Produkte
Duisburg-Beeckerwerth	TKSE						a				Brammen, Warmband, Kaltband
Duisburg Bruckhausen	TKSE						d				Brammen, Warmband, Kaltband
Duisburg Süd	HKM						a				Brammen, Röhren
Duisburg-Ruhrort	ArcelorMittal						a				Brammen, Knüppel
Duisburg-Hochfeld	DK Recycling										Roheisen
Bochum	Outokumpu					e					Edelstahl
Siegen	BGH Edelstahl Siegen						b				Schmiedeeisen
Siegen	Deutsche Edelstahlwerke						c				Brammen, Stäbe, Walzdraht, Warmband
Witten	Deutsche Edelstahlwerke						c				Brammen, Schmiedeeisen

^a Strangguss; ^b Blockguss; ^c Block-/Strangguss; ^d Gießwalzanlage; ^e Schließung 2015

Abbildung 11: Übersicht der integrierten Stahlwerke in NRW [8, S.158]

Exemplarisch soll auf die Standorte der Deutschen Edelstahlwerke (DEW) [47] eingegangen werden. Diese befinden sich in:

- Hagen, Anlagen u.a. zur Beize, z.B. Tunnelbeize. Dampfkessel vorhanden;
- Krefeld (Umschmelzstahlwerk) mit Multifunktionsofen;
- Siegen (Stahlwerk);
- Witten/Hattingen (Stahlwerk und Hauptsitz). Energierelevante Anlagen: Elektrolichtbogenofen (EAF), Stranggießanlage, Brenner der 2 im Wechsel betriebenen Dampfkessel. Ca. 1.700 Mitarbeiter am Standort. In Witten bildet „seit 1981 [...] ein einziger 130-Tonnen-Elektrolichtbogenofen mit einer Erzeugungskapazität von 500.000 Tonnen Rohstahl pro Jahr die Stahlbasis. Er erzeugt Edelbau-, Werkzeug- sowie rost-, säure- und hitzebeständige RSH-Stähle. Wichtige Kunden sind unter anderem die Automobilindustrie, die Werkzeugmaschinen- und Windenergieanlagenbauer, die chemische Industrie sowie die Luft- und Raumfahrtindustrie.“ [46]

Dampf wird z.T. auch zur Abluftreinigung eingesetzt, wird aber z.T. (z.B. in Witten) durch effektivere und energieeffizientere Tuchfilteranlagen ersetzt. [47]

	Witten			Krefeld		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Stäube	8.462	7.499	9.134	101	72	56
Schlämme	864	1.222	487	22	23	24
Schlacke / Hüttenschutt	132.969	118.333	124.584	172	214	200
Zunder / Sinter	5.162	4.297	4.399	3.905	3.828	3.920
Beizlösungen / Spüflüssigkeiten	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
Ölhaltige Abfälle	662	755	826	364	436	360
Bauschutt / Bodenaushub	9.303	23.838	7.755	8.357	115	77
Sonstige Reststoffe	1.376	1.300	2.028	333	355	342
	Siegen			Hagen		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Stäube	7.382	7.023	7.869	entfällt	entfällt	entfällt
Schlämme	1.035	1.413	1.836	2.170	1.704	2.448
Schlacke / Hüttenschutt	97.512	109.672	114.610	127	55	57
Zunder / Sinter	7.722	7.123	7.897	2.276	1.986	2.203
Beizlösungen / Spüflüssigkeiten	entfällt	4	3	2.757	1.977	2.857
Ölhaltige Abfälle	592	458	562	1.368	958	1.020
Bauschutt / Bodenaushub	0	237	3.303	358	493	39
Sonstige Reststoffe	1.027	791	938	456	324	352

Alle Angaben in t.

Abbildung 12: Abfallbilanz für alle Standorte der Deutsche Edelstahlwerke GmbH, aus [47].

Die Schwankungen im Energieverbrauch ergeben sich im Wesentlichen aus den sich ändernden Produktionsmengen.

Durch Energieeffizienzprojekte wurden 2013 an diesen Standorten gesamt 12.620 MWh/a eingespart, diese Einsparungen erfolgten ausschließlich durch eine Verminderung des Verbrauchs von Erdgas und entsprechen einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 2.524 t [47]. Somit ergibt sich für 2013 eine relative Ersparnis von knapp 0,9% bzgl. des Gasverbrauchs und ca. 0,5% bzgl. des Gesamtenergieverbrauchs. „Seit Beginn der Einführung des Sonderbudgets zur Steigerung der Energieeffizienz im Jahr 2009 wurden bislang dauerhaft ca. 62.000 MWh pro Jahr und ca. 17.300 t CO₂ pro Jahr eingespart bzw. nicht erzeugt“ [47] – d.h. eine Steigerung in der Energieeffizienz um ca. 2,6%.

Jahr	Medium	Einheit	Siegen	Witten	Krefeld	Hagen	Hattingen	Deutsche Edelfabrikwerke
2011	Strom	MWh	450.993	361.961	66.992	46.835	3.509	930.290
	Erdgas	MWh	502.100	477.206	342.450	178.646	36.574	1.536.976
2012	Strom	MWh	383.502	326.780	62.612	42.042	3.093	818.029
	Erdgas	MWh	456.558	435.477	326.129	158.669	33.187	1.410.019
2013	Strom	MWh	427.752	357.433	60.219	44.327	2.920	892.651
	Erdgas	MWh	477.671	448.040	312.930	176.538	32.720	1.447.899

Tabella: Energiemengen 2011 - 2013

Abbildung 13: Energieverbrauch Deutsche Edelfabrikwerke GmbH, aus [47].

4.10 Zusammenfassung

Einige der wesentlichen Aussagen sind hier zusammengefasst:

- Sowohl ökonomisch als auch klimapolitisch ist die Eisen- und Stahlindustrie in NRW von großer Bedeutung.
- Der Umsatz (13,3 Milliarden €) und die Beschäftigtenzahl (ca. 48.000 Angestellte) in der Eisen- und Stahlindustrie in NRW entsprechen 40% des Umsatzes und 56% der Beschäftigten der gesamten deutschen Eisen- und Stahlbranche.
- Der Gesamtenergieverbrauch, 210 PJ bzw. 58 GWh, wird nahezu vollständig aus Steinkohle und Steinkohleprodukten (Koks) aufgebracht. Damit stellt diese Branche einen der größten Steinkohle-Verbraucher in NRW (Gesamtverbrauch in NRW: 766 PJ) dar.
- Entsprechend hoch sind die THG-Emissionen mit ca. 21 Mt CO₂ pro Jahr. Für ein tiefergehendes Verständnis der aggregierte Größen muss für diese zwischen den Anteilen für Primär- und Sekundärstahl unterschieden werden.
- Die Emissionsintensität liegt je nach Standort bei ca. 1,4 t CO_{2eq}/t_{Rohstahl} (und je nach Stahlpreis 3 - 4,5 kg CO_{2eq}/€) und die Energieintensität pro materiellem Output beträgt ca 3,6 t_{Input}/t_{Rohstahl}. Beide Parameter werden ohne die großflächige Implementierung von noch nicht großindustriell eingesetzten „Break-Through-Technologien“ nicht hinreichend stark reduziert werden können. Gegenüber heutigem Stand wird der derzeitigen besten vorhandenen Technologie (BAT) der konventionellen Stahlproduktion lediglich noch eine Effizienzsteigerung von unter 10% prognostiziert. Weitere Investitionen in die Effizienzsteigerung von Standorten der konventionellen Stahlerzeugung bergen entsprechend das Risiko von einer Verstärkung von Lock-In-Effekten.
- Der überwiegende Teil der Wertschöpfungskette wird durch Unternehmen in NRW bedient, allerdings werden Zwischenprodukte auch in relevantem Maß im- bzw. exportiert. Bzgl. der aggregierten Nettomassen ergibt sich das Bild einer weitgehend geschlossenen Wertschöpfungskette. Sekundärstahl wird dabei allerdings zu großen Teilen aus importiertem Stahlschrott produziert, der nicht identisch mit dem exportierten Spezialstahl sein dürfte.
- Die Energiewende (und der THG-Emissionshandel) machen sich derzeit nicht als Transformations-Treiber bemerkbar.
- Durch die hohen Anlagen-Investitionskosten sind Stahlstandorte stark von Lock-In-Effekten betroffen. Die derzeitigen Energiepreise (inklusive der weitgehenden Ausnahmeregelungen bzw. Vergünstigungen für energieintensive Industrien) erzeugen keinen hinreichenden Kostendruck zur Investition in effizienzsteigernde Innovationen, um ein WSK-Greening voranzutreiben.
- Zugleich ist ein reines Anheben der Energie- und Emissionskosten aufgrund drohendem Verlust von Marktanteilen an billiger produzierende Standorte mit noch geringeren Effizienzstandards („Carbon Leakage“, z.B.

zu konkurrierendem chinesischem Importstahl mit knapp 2 t CO_{2eq}/t_{Rohstahl}) nicht zielführend. Entsprechend sind flankierende wirtschaftspolitische Maßnahmen (wie z.B. THG-emissionsbasierte Importzölle für Märkte außerhalb des europäischen Emissionszertifikatehandel-Bereichs (ETS), die möglicherweise schwer durchzusetzen wären) und eine gezielte Infrastrukturpolitik nötig (Aufbau eines Wasserstoff-Verteilernetzes einschließlich leistungsfähiger Elektrolysatoren, und ggf. öffentlicher Unterstützung beim Aufbau innovativer Pilotstandorte, bzw. tiefgreifender Umbau bestehender Standorte). Gasbasierte Direktreduktion wird derzeit eher in Indien und dem mittleren Osten eingesetzt, insofern dürften ohne entsprechende (gerichtete) Unterstützung die dortigen Standorte hinsichtlich einer Transformation hin zu einem Wasserstoff-basierten Prozesses strategisch bevorteilt sein.

- Besonders bei hochqualitativen Spezialstählen kann die Stahl-WSK als eine Schlüsselkette innerhalb eines größeren Bereichs des Anlagen- und Maschinenbaus sowie des Automobilsektors angesehen werden. Eine enge Verzahnung mit den entsprechenden Abnehmern liefert Standortvorteile. Als besonderes Knowhow der deutschen Stahlerzeuger kann insofern sowohl die Produktion von Spezialstählen als auch die enge Vernetzung mit Kundenfirmen angesehen werden (z.T. CNC-Fertigung von Motorenblöcken direkt im Stahlwerk)
- Der Charakter der Eintrittsbarrieren für (neue) Konkurrenten beruht z.T. auf den hohen Investitionskosten beim Aufbau von Produktionsstandorten. Die bestehenden Marktakteure in Deutschland und NRW können ihre Renditen am ehesten durch die Produktion von qualitativ höherwertigen Spezialstählen und spezifischen Serviceleistungen (Fertigung von kundengerechten Bauteilen) sichern. Eine reine Strategie der billigen Energie birgt neben den klimaschädigenden Effekten das Risiko eines Zurückbleibens hinter andernorts vorangetriebenen Innovationen in „Break-Through-Technologien“ und einer irgendwann eintretenden Marktverdrängung durch billigere Auslandsimporte.
- Entsprechend liegt das Potenzial für ein Upgrading der Stahl-WSK im ggf. öffentlich unterstützten Aufbau von unterstützender Infrastruktur und Pilotstandorten.

5 Chemische Industrie

[49] – Die chemische Industrie ist eng mit anderen Industriebranchen verknüpft. In NRW existieren ca. 1000 Chemieunternehmen, die als Querschnittsindustrie für viele industrielle WSKs relevant sind. Ca. 70% aller chemisch produzierten Stoffe werden der industriellen Weiterverarbeitung zugeführt.

Regionale Verteilung: Die Regierungsbezirke Köln und Düsseldorf, in der Branche zusammenfassend betrachtet als die ChemCologne-Region, erwirtschaftete (ohne Pharma) mit ca. 70.000 Beschäftigten 2014 einen Umsatz von knapp 32 Mrd. Euro, was 70% des Umsatzes der chemischen Industrie in NRW entspricht. Besonders bedeutend sind die größeren Chemiestandorte und Chemieparks in und um Köln, die den Kölner „Chemie-gürtel“ bilden. Der Großteil der Produktion (80%) wird als Roh- oder Hilfsstoffe in weiterverarbeitenden Branchen eingesetzt; auch von diesen Industrien sind viele in der Region angesiedelt. Hierbei handelt es sich zumeist um kleinere und mittlere Unternehmen mit einem hohen Spezialisierungsgrad, die oftmals in ihren Marktnischen eine Führungsrolle einnehmen [51]. Bedeutend für die Struktur der chemischen Industrie im Rheinland ist ihr weit zurückreichender Entstehungsprozess. Viele auch noch heute relevante Unternehmen entstanden im 19. Jahrhundert, die Wiederaufbauzeit nach dem zweiten Weltkrieg und die „Wirtschaftswunderjahre“ bildeten die stärkste Wachstumsphase der Branche.

Ein weiterer prägender Schritt war die Umstrukturierung ab Mitte der neunziger Jahre. Bis dahin bestand typischerweise eine unternehmerische Einheit von Produktionsbetrieben und –standorten, die durch Verkäufe, Ausgründungen und Joint Ventures aufgebrochen wurde. Die großen als Verbundstandorte organisierten Chemie- und Industrieparks beherbergen mittlerweile eine große Anzahl diversifizierter Unternehmen, denen produktionsnotwendige Infrastruktur und Dienstleistungen von Standortbetreibern zur Verfügung gestellt werden [51] und dadurch wesentlich kosteneffektiver produzieren können sowie dank der auch administrativen Vernetzung und Förderung auch von schnellen Planungs- und Bewilligungsverfahren profitieren [50].

Die Verbundstandorte verfügen dabei u.a. oftmals über eigene Gas- und Kohlekraftwerke, oftmals mit Kraft-Wärme-Kopplung, die eine weitgehende energetische Autarkie der Standorte gewährleisten.

Nahezu die gesamte Spannweite chemischer Produkte ist in der Region beheimatet und bildet die große, stark intern vernetzte „klassische“ Wertschöpfungskette der Chemie [53]:

- Petrochemie incl. Raffinerien;
- anorganische und organische Basischemie;
- Polymere inklusive Kautschuken;
- Fasern;
- Feinchemie, inklusive Zwischenprodukten und Wirkstoffen für Life Science-Anwendungen;
- Agrochemie;
- Pharma.

Zugleich ist eine starke überregionale Vernetzung, sowohl in der unmittelbaren Region wie auch im europäischen Rahmen, gewährleistet durch u.a. Wassertrassen und das ARG-Pipelinennetz, das wiederum das nordwesteuropäische Ethylenpipelinennetz beinhaltet [50] (siehe auch Abbildung 14).

Als zukunftsweisende Felder werden von der Branche besonders die Biotechnologie sowie die Entwicklung neuer Werkstoffe angesehen [53].

Zwischen 1990 und 2012 kam es in Deutschland bei der Chemieindustrie zu einer deutlichen Emissionsreduktion bzgl. CO₂ und N₂O, aggregiert um 47%. V.a. bei der Ammoniak- und Ethen(Ethylen)-Produktion werden große Mengen CO₂ freigesetzt [62]. Der Energiebedarf sank um 16%, während die Chemieproduktion um 57% anstieg [53], was einem jährlichen Zuwachs von 2% entspricht.

Da die chemische Industrie Grundstoffe für vielfältige Branchen liefert und damit auch in globale WSKs eingebunden ist, werden neben lokalen Randbedingungen (wie die politische Rahmensetzung, u.a. auch durch die Energiewende) die sogenannten globalen Megatrends Demogra-

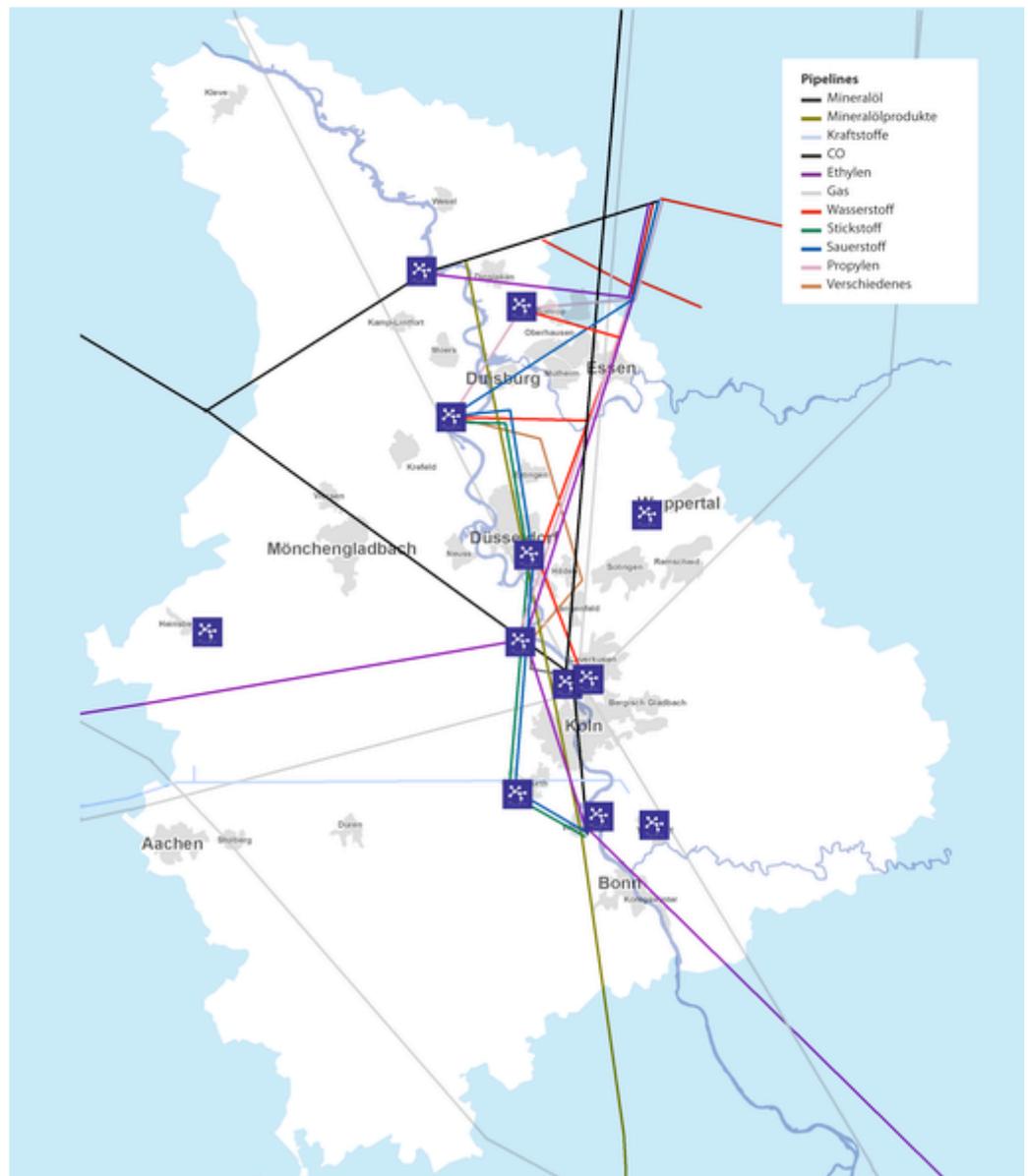


Abbildung 14: Pipeline-Netzwerk der chemischen Industrie im Rheinland; aus [52].

phie, Technologie, Humankapital, Energie und Ressourcen, Umwelt und Klima sowie Staatsfinanzen als relevant angesehen [48]. Die weltweite Konjunktur hat somit für die Branche in NRW unmittelbare Bedeutung.

Prognos und der Verband der Chemischen Industrie schätzen die zukünftige weltweite und auch regionale Entwicklung der Chemieindustrie optimistisch ein und gehen von einer stabilen, positiven Entwicklung ohne disruptive Ereignisse bis zum Jahr 2030 aus [48]. Für die chemische Industrie wird hier ein weltweites jährliches Wachstum von durchschnittlich 4,5% prognostiziert, was damit höher liegt als das Anwachsen der allgemeinen industriellen Wertschöpfung. Die deutsche chemische Industrie wird mit einem jährlichen Wachstum von 1,8% demnach auch weiterhin einen großen Nettoexport aufweisen und Deutschland der viertwichtigste Chemieproduzent mit einem Jahresumsatz von durchschnittlich 195.540 Mio. € [8, S. 66] weltweit bleiben. NRW ist mit einem Anteil von 27,3 % (2013), d.h. ca. 53 Mrd. €, am deutschen Gesamtumsatz stärkstes Bundesland.

Diese Position wird primär durch den technologischen und strukturellen Vorsprung in der Herstellung von forschungsintensiven und höherwertigen Spezialchemikalien gesichert. Die Nettoexporte sollen demnach bis 2030 jährlich um 2,6% steigen, neben der starken Basis im europäischen Ausland erlangt hierbei China eine zunehmende Bedeutung.

Hinsichtlich Standorten und zukünftiger Entwicklung des Ruhrgebiets wird von der chemischen Industrie positiv hervorgehoben, dass die Bevölkerung der Region der chemischen Industrie grundsätzlich sehr aufgeschlossen

gegenübersteht [50].

Eine vollständige Spezialisierung auf einzelne Produktionsschritte und eine starke Abkehr von der derzeit herrschenden Diversifikation wird nicht erwartet – auch 2030 werden demnach noch sämtliche Fertigungsstufen in Deutschland vertreten sein [48].

Neben als potenziell das wirtschaftliche Wachstum unmittelbar eher abbremsend angesehenen Faktoren wie produktionsseitige Auflagen zum Klima- und Umweltschutz, können Schutzmaßnahmen aber auch durchaus eine positive Wirkung zeigen, von der die chemische Industrie profitieren kann. Dies ist u.a. bzgl. der Gebäudedämmung und hinsichtlich Leichtbaukonzepten und Elektroantrieben in der Automobilindustrie erkennbar [48].

Für alle deutschen Bundesländer wird ein stärkeres Wachstum der chemischen Produktion gegenüber dem verarbeitenden Gewerbe prognostiziert, siehe Abbildung 15.

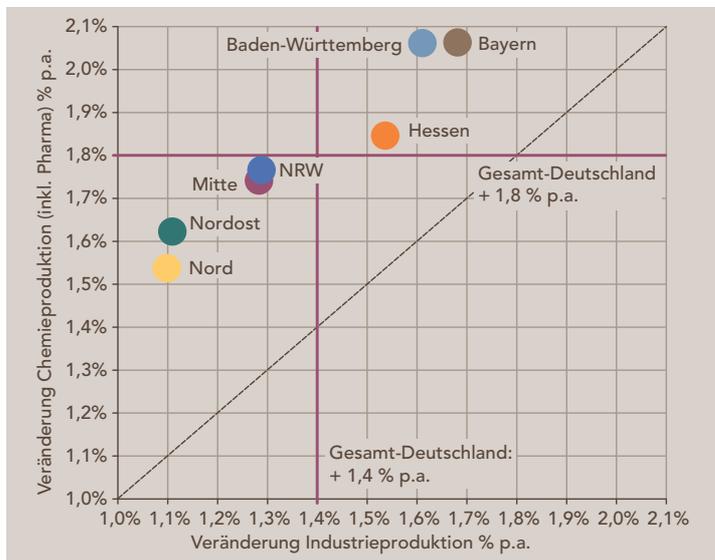


Abbildung 15: Veränderung der jährlichen Industrie- und Chemieproduktion, aus [48].

NRW bleibt dabei ein wichtiger Wachstumstreiber für die deutsche chemische Industrie und verzeichnet in absoluten Zahlen die höchsten Zu-

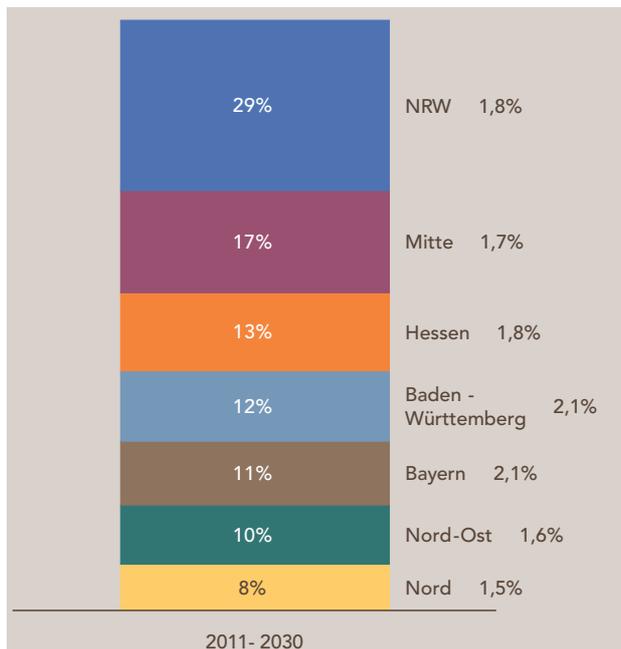


Abbildung 16: Wachstumsbeiträge der Bundesländer zur deutschen Chemieproduktion, aus [48].

wächse (die jährliche Steigerungsrate in NRW von 1,8% bedeutet 29% des gesamten Wachstums der deutschen Chemieindustrie), siehe dazu auch Abbildung 16. Dies deckt sich weitgehend damit, dass die chemische Industrie in NRW in 2011 28,3% Prozent des gesamtdeutschen Volumens ausmachte, und erwartet wird, dass dieser Anteil bis 2030 weitgehend konstant bleibt [48].

Insgesamt wird der chemischen Industrie in NRW die Rolle eines Wachstumsgewinners zugeschrieben, jedoch werden die Exporte des Bundeslandes unterdurchschnittlich stark anwachsen. Eine Ursache dazu wird in der vergleichsweise ungünstigen Industriestruktur mit einer alt gewachsenen, relativ traditionellen Ausrichtung gesehen. Mit einem Anteil von über 50% an der Gesamtproduktion dominiert in NRW die Basischemie (Deutschland: 37%), während die (durchaus vertretene) Spezialchemie mit 43% einen gegenüber der bundesweiten Situation unterdurchschnittlichen Anteil hat. NRW muss in dieser Hinsicht als ein „klassischer“ Industriestandort bezeichnet werden, der diese Struktur ohne eine gezielte Unterstützung einer Transformation auch beibehalten wird, dabei jedoch potenziell im weltweiten Wettbewerb in seiner Position zunehmend geschwächt wird.

Hier wird bis 2030 ein leichter, jedoch nicht substanzieller Trend hin zur Spezialchemie angenommen, siehe auch Abbildung 17. Ein stärkeres Abheben auf innovative, u.a. durch den Bedarf der Energiewende getriebene Spezialprodukte könnte also langfristig Standortvorteile generieren. Hierzu erscheint eine langfristige strategische Planung innerhalb der Unternehmen, wie auch eine entsprechende Wirtschaftsförderung und Ausrichtung der öffentlich geförderten Forschung und Entwicklung ausgesprochen hilfreich – während ein reines Festhalten an traditionellen Strukturen und petrochemischer Basischemie langfristige Arbeitsplatzrisiken birgt (wie u.a. im geplanten Stellenabbau von BP schon zu beobachten [61]).

Die Standorte der chemischen Industrie im Ruhrgebiet unterstützende ChemSite-Initiative, in der neben führenden Chemieunternehmen auch das Land NRW, die regionalen Kommunen, die Gewerkschaft IG BCE Westfalen und Wirtschaftsfördergesellschaften organisiert sind, erscheint hierbei ein starker potenzieller Treiber zu sein [50]. Inwiefern von diesem jedoch ein aktives Steuern fort von der Basis- und hin zur Spezialchemie zu erwarten ist, bedarf einer weitergehender Betrachtung.

In der nachfolgenden Auflistung sind quantifizierbare Kriterien für die Chemische Industrie dargestellt.

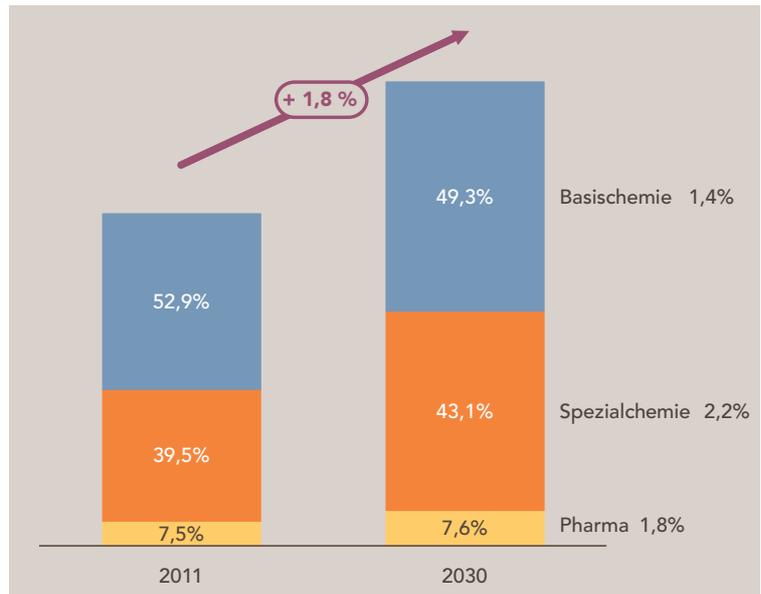


Abbildung 17: Anteile der Chemiesparten und jährliches Wachstum der Chemieproduktion in NRW, 2011-2030. Die Basischemie wird trotz geringer Veränderungen in NRW dominant bleiben; aus [48].

	Chemie in NRW, allg.	Chemie: Grundchemikalien (Basischemikalien)	Chemie: polymere Werkstoffe
Umsatz (€) Vgl.: Werkstoffverarbeitende Industrie hat 200 Milliarden Euro Umsatz in NRW [16]	Gesamtumsatz 2012: 53,2 Mrd. Euro NRW Anteil am Umsatz der deutschen Chemieindustrie: 29,1 % [49] bzw. 27,3 % (2013) [8, S. 66]	37% Anteil an der deutschen Chemieproduktion, in NRW über 50% [48].	Relevanz für NRW: Werkstoffverarbeitende Industrie traditionell stark, 200 Mrd. € Umsatz [16]. Kunststoffbranche: 35,7 Mrd. € in 2011, d.h. ca. 40% des deutschen Umsatzes [62].
Gesamtenergieverbrauch (kWh), bzw. auch Energieoutput (Industrie verbraucht 39% der Endenergie in NRW – 267 GWh von 580 GWh [8])	Deutschland: Energieverbrauch zw. 1990 und 2012 um 16% reduziert [53]	z.T. verfahrensbedingt hoher Strombedarf (z.B. Membrantechnologie zur Chlorherstellung: 2370 kWh/t Cl ₂). Prozesse mittlerweile weitgehend optimiert (Nutzung von Prozesswärme etc.) [8, S.67]	
THG-Emissionen (kgCO_{2eq}), ggf. Emissionsintensität (kgCO_{2eq} / €) 19% der THG-Emissionen in NRW waren in 2012 direkte	Deutschland: THG-Emissionen (CO ₂ und N ₂ O) zw. 1990 und 2012 um 47% reduziert [53]. CO ₂ -Emissionen der chem. Industrie in NRW in 2012:	NRW, 2012: 20,5 Mt CO₂ [74]. Davon 9,3 Mt aus Strom, 2,7 Mt aus Fernwärme, 2,5 Mt aus Erdgas, 2,0 Mt aus anderen Gasen, v.a. Raffineriegas, 1,1 Mt aus Abfällen.	Herstellung aller Gummi- und Kunststoffwaren in NRW, 2012: 1,7 Mt CO ₂ [74]. Kohlefaserverstärkte Kunststoffe: 12,5-17

<p>Industrieemissionen (53,5 Mt CO₂-eq von 289 Mt CO₂-eq)</p>	<p>gesamt ca. 22,8 Mt CO₂ 0,2 Mt aus Steinkohle, 0,5 Mt aus Braunkohle, 4,4 Mt aus Mineralöl, 3,2 Mt aus Gas, 10,3 Mt aus Strom, 3,0 Mt aus Fernwärme, 1,2 Mt aus anderen Quellen [74]</p>	<p>Teilweise hohe Lachgasemissionen. Gesamte chemische Industrie in NRW trägt mit 6% zu den NRW-THG-Emissionen bei [8, S. 81]. V.a. bei der Ammoniak- und Ethen(Ethylen)-Produktion wird CO₂ freigesetzt [62].</p>	<p>kgCO₂eq/kgWerkstück [101]</p>
<p>Anzahl der Beschäftigten in der betrachteten Branche</p> <p>(Vgl.: Werkstoffverarbeitende Industrie in NRW hat insg. 726.000 Arbeitsplätze [16])</p>	<p>101.995 Beschäftigte in 2012 in NRW; Anteil an in Deutschland Beschäftigten 23,5% [49],</p>		<p>Kunststoffbranche in NRW, 2011: 960 Betriebe mit ca. 116.000 Beschäftigten [62]</p>
<p>Zeitliche Trends (n.M. über 5 Jahre) [1, S. 53], um langfristige Bedeutung der einzelnen WSK zu analysieren und relevante WSKs auszuwählen</p>	<p>Jährliches Wachstum von 1,8% bis 2030 erwartet [48], d.h. deutlich schwächer als globale Chemie (4,5%), jedoch stärker als andere deutsche Industrien.</p>	<p>Rückgang aufgrund von internationaler Konkurrenz und hiesiger demographischer Entwicklung (Nachfrage) zu erwarten. Seit 2006 kontinuierlicher Rückgang, insgesamt um gut 10% [8, S. 76]. Basischemie relativ zur Spezialchemie in NRW leicht rückläufig, jedoch weiterhin und zukünftig in BAU-Szenario überproportional stark (ca. 50%) [48].</p>	<p>Weitgehend konstante Menge bzgl. Gesamtproduktionsmenge von Polymeren allg. über die letzten 10 Jahre [8, S.76]</p>
<p>Materialverbrauch (Material-Impact, MI) bzw. „ökologischer Rucksack“ [23].</p>		<p>7% des in Westeuropa verwendeten Erdöls wird für Chemiegrundstoffe verwendet</p>	<p>4% des in Westeuropa verwendeten Erdöls wird zu Kunststoffprodukten verarbeitet</p>

Weitergehende Gründe für/wider WSK-Analyse

Von u.a. ChemSite-Initiative geförderte „offene Chemiecluster“ als Potential für stärkere Integration und Vernetzung diverser, jeweils spezialisierter Unternehmen an Verbundstandorten. Stark verknüpfte WSKs und Synergieeffekte durch gemeinsame Infrastruktur und Logistik. [50]
 Vollstandorte, 2007:
 - Gelsenkirchen (Mineralölverarbeitung & Petrochemie)
 - Marl (Basis- & Spezialchemie)
 - Castrop-Rauxel (Teerchemie)
 - Dortmund (Rußherstellung)
 (-Dorsten/Marl: Weiterverarbeitung)

Diverses Feld, das allerdings weitgehend bedarfsgetrieben ist und oft wenig Substitutionspotenzial aufweist (da Bereitstellung von weiter zu verarbeitenden Grundstoffen). WSK mit Analyseeintritt vom End- bzw. Zwischenprodukt empfehlenswerter. Hohe Vernetzung und überregionale Ausrichtung (u.a. dank des nordwesteuropäischen Ethylenpipelinennetzes [50]).

Wachsendes Feld, ggf. interessante Substitute für klassische Baustoffe wie Stahl, Aluminium oder Zement.

Jedoch ggf. weitere Marktverdrängung durch US-Shalegas-Boom [8, S. 72]

Charakteristisch für die Chemiebranche in Deutschland und NRW ist ihre im weltweiten Vergleich hohe Spezialisierung, die Koppelproduktion (Weiterverarbeitung vielfältiger, dort z.T. unerwünschter Nebenprodukte aus anderen Prozessen), und die Verbundwirtschaft. Hierdurch sind die Produkte und Reststoffe eines Betriebs oftmals die Rohstoffe eines weiteren Betriebs [62]. Diese Spezialisierung ist in NRW allerdings deutlich geringer ausgeprägt als im bundesdeutschen Durchschnitt.

In der metallverarbeitenden Industrie besteht eine starke Abhängigkeit vom Import von Metallerzen und -konzentraten; in der chemischen Industrie besteht in Deutschland eine starke Importabhängigkeit von Flussspat (79,5%), Mineralöl (98%) und Phosphat (100%). Viele andere Rohstoffe können lokal bereitgestellt werden bzw. es besteht bei diesen sogar ein Exportüberschuss (wie z.B. bei Kalisalz, Schwefel und Gips) [62].

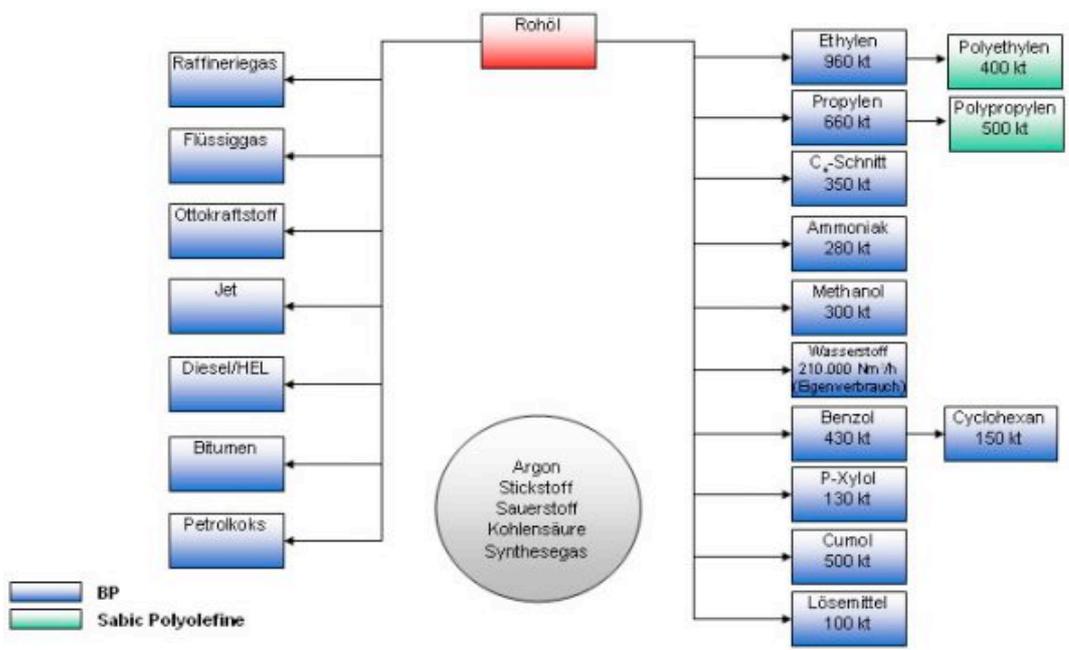


Abbildung 18: Stoffstromverbund der BP Gelsenkirchen GmbH, aus [54].

5.1 Rohstoff Erdöl

Fast 90% aller Chemieprodukte werden aus Erdöl gewonnen, dies gilt für die große Gruppe der Kunststoffe ebenso wie für Schmierstoffe, Heizöl, Bitumen für die Bauindustrie und Kraftstoffe [57]. Wird die Mineralölindustrie separat von der chemischen Industrie betrachtet, so ist die Rohstoffbasis der chemischen Industrie überwiegend von sogenannten Sekundärrohstoffen gebildet, die in anderen Branchen (wie eben der Mineralölindustrie, oder Kokereien) als Neben- oder Koppelprodukte anfallen. So fällt bei Herstellung und Fraktionierung der Treibstoffe Benzin, Diesel, Kerosin, Heizöl zu etc. 7-15% die kurzkettenige, leicht siedende Fraktion Naphtha (C_8H_{18}) an. Diese dient als wichtiger chemischer Rohstoff und wird u.a. in Crackern weiterverarbeitet [62].

In Westeuropa werden aus 1 t Erdöl im Durchschnitt 700 kg Diesel- und Heizöle, 100 kg Schmieröl, Bitumen etc., und 200 kg Benzine gewonnen. Aus diesem letzten Bereich werden ca. 130 kg Vergaserkraftstoffe, und 70 kg Chemie-Rohstoffe gewonnen – wovon wiederum 30 kg für andere Chemieprodukte und 40 kg zur Kunststoffproduktion genutzt werden. Somit werden ca. 7% des Erdöls direkt für die Basischemie genutzt, bzw. weitergehend 4% für die Kunststoffindustrie [62].

Durch die in Abbildung 19 dargestellte NWO-Pipeline werden die mineralölverarbeitenden Standorte mit Rohöl versorgt, dessen Menge und Zusammensetzung bedarfsgerecht in Wilhelmshaven je nach Abnehmer und Verwendung eingespeist wird. Typischerweise werden hierzu stets viele verschiedene Rohölsorten gemischt.

Hierbei besteht aufgrund der knapper werdenden Ressourcen ein Trend hin zur Verarbeitung schwererer Rohölsorten – die besonders gefragten kurzkettenigen und schwefelarmen „Light Sweet Crudes“ haben ihr Fördermaximum bereits vor geraumer Zeit überschritten. Marktbedingt besteht ein Zusammenhang zwischen der Energie- und Verarbeitungsaufwand und dem Preis des Rohöls – je höher die Qualität und entsprechend je einfacher und energieeffizienter die Verarbeitung, desto höher der Preis [56].

In der von der Ruhr Oel GmbH (einem 50-50-Gemeinschaftsunternehmen von BP und der russischen Rosneft) betriebenen Raffinerie Gelsenkirchen wurden dabei 2013 zu über 50% schwefelreiche Rohöle aus Russland und der Nordsee verarbeitet, die Gesamtmenge betrug 11,6 Mio. t. Von den ca. 50 petrochemischen Produkten entfällt der Großteil (ca. 9 Mio. t.) auf Benzin, Diesel, Düsentreibstoff, Heizöl, Bitumen und Petrokoks, sowie ein weiterer Teil (ca. 3 Mio. t.) auf Grundstoffe für die Kunststoffherstellung, v.a. Ethen (Ethylen, C_2H_4) und Propen (Propylen, C_3H_6) [58], die v.a. aus der Mineralölfraction Naphtha gewonnen werden [62].

Die Raffinierung von Rohöl besteht aus den drei Prozessschritten der Destillation, der Konversion und der Reformierung [57]. Die Destillation wird typischerweise in ca. 50 m hohen Destillationstürmen durchgeführt und benötigt Prozesstemperaturen bis ca. $400^\circ C$ um die einzelnen, bei unterschiedlichen Temperaturen siedenden Fraktionen des Rohöls zu trennen, wie etwa Flüssiggas, Leichtbenzin, Kerosin, Petroleum, Diesel, Heizöl und Bitumen (in der Reihenfolge aufsteigender Siedepunkte).

Um den höheren Bedarf an kurzkettenigen, niedrigsiedenden Fraktionen zu decken werden langkettige Fraktionen in Crackern aufgespalten (Konversion). Hierbei wird zwischen den drei Methoden des thermischen Crackens, des Hydrocrackens und des katalytischen Crackens (das bei ca. $600^\circ C$ abläuft und das am häufigsten genutzte Verfahren darstellt) unterschieden. Das resultierende Produktgemisch wird anschließend wieder durch Destillation in seine Fraktionen aufgetrennt.

Zur weiteren Veredelung, u.a. zur Erhöhung der Oktanzahl bei Benzin wird der Prozess der katalytischen Reformierung durchgeführt, bei dem i.A. Platinkatalysatoren zum Einsatz kommen.



Abbildung 19: Verlauf der NWO-Pipeline der Nord-West Oelleitung GmbH; aus [55].

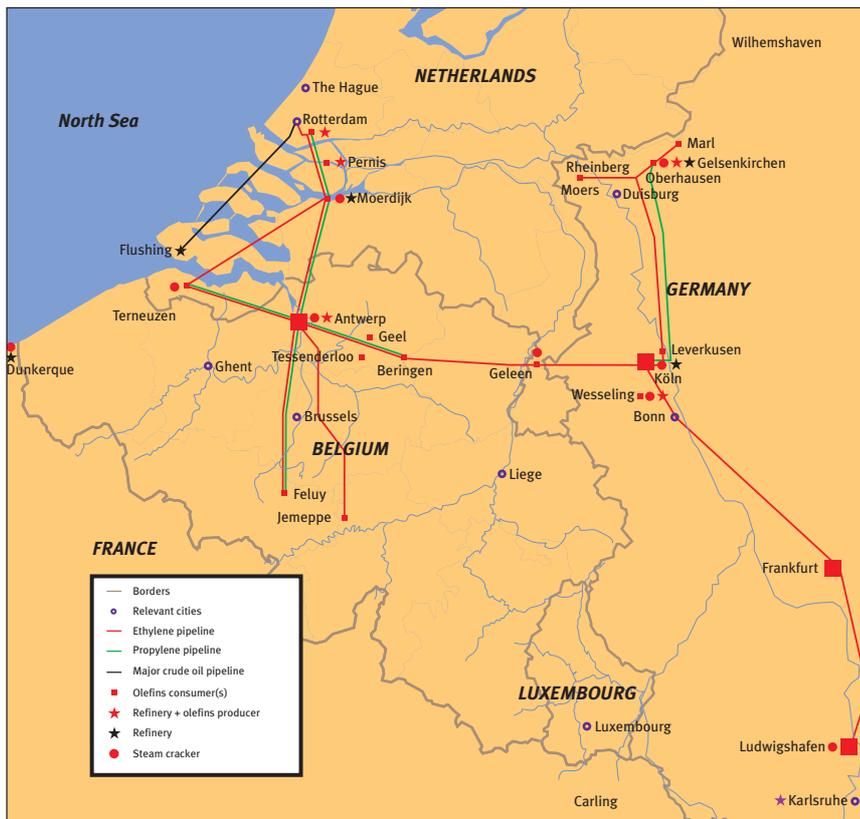


Abbildung 20: Raffinerien, Pipelines und Cracker in Westdeutschland und der Benelux-Region; aus [60].

Je nach Molekülstruktur werden die in den Mineralölfractionen enthaltenen Kohlenwasserstoffe in vier Gruppen eingeteilt: Paraffine, Olefine (zu denen Ethen und Propen gezählt werden), Naphthene und Aromate.

In NRW werden Cracker an den Standorten Gelsenkirchen (Ruhr Oel GmbH) mit einer Jahreskapazität von 1,050 Mt Ethen und Köln-Worringen (Ineos Olefins) mit einer Ethen-Jahreskapazität von 1,165 Mio. T und drei Cracker in Wesseling (LyondellBasell und Shell) mit einer jährlichen Gesamtkapazität von 1,200 Mio. t Ethen betrieben [59], siehe dazu auch Abbildung 20. Das Raffinerie-Verfahren ist innerhalb von Grenzen derartig steuerbar, dass bedarfsgerecht der Output spezifischer Zielprodukte gegenüber weniger stark benötigter Produkte optimiert werden kann [62].

An den beiden Gelsenkirchener Standorten Horst und Scholven betreibt die Ruhr Oel GmbH drei Destillationsanlagen, sowie fünf Konversionsanlagen (ein Hydrocracker, eine katalytisch arbeitende FCC-Anlage (Fluidized Catalyst Cracking), ein thermisch arbeitender Coker, ein Visbreaker und eine Schwerölvergasung).

Als Beispiel für die vielfältigen Produkte einer aus Naphtha erzeugten Basischemikalie kann Ethen (Ethylen) herangezogen werden. Die weltweite jährliche Ethenproduktion betrug mehr als 140 Mt in 2010, mit steigender Tendenz - für 2015 sind mehr als 160 Mt prognostiziert [44]. Für über 30% aller weltweit produzierten Petrochemikalien dient Ethen als Grundstoff, hierbei machen Kunststoffe mit 75% den Hauptanteil aus. Weitere Produkte sind Fasern und andere organische Chemikalien. Deutschland ist größter europäischer Einzelmarkt mit ca. 19% [44].

Die primären Folgerzeugnisse sind:

Die primären Folgerzeugnisse sind:

- Polyethylen (PE, in den Variationen HDPE, LDPE, LLDPE) mit 56% in 2010, dies entspricht 65,8 Mt [44]),
- Ethylendichlorid zur Herstellung von Polyvinylchlorid (PVC) mit 14%,
- Ethenoxid mit 11%, zur Ethylenglycol-Herstellung (Vorprodukt für Polyester und Waschmittel-Tenside)
- Ethylbenzol mit 7% zur Herstellung von Polystyrol (PS)
- Nicht-Kunststoffe / andere organische Verbindungen:
 - o Anthracen,
 - o 2-Chlorethanol,
 - o Chlorethan,
 - o Propanal,
 - o Isopren,
 - o Vinylacetat,
 - o Propansäure,
 - o Buten,
 - o Styrol,
 - o Ethandiol

Zudem wird Ethen zum Nachreifen unreifer Früchte eingesetzt.

50% der in der deutschen chemischen Industrie eingesetzten Rohstoffe sind anorganischer und 50% organischer Art (v.a. Erdöl (36,1%), Erdgas (7,1%), Kohle (0,5%) und nachwachsende Rohstoffe (6,4%) [62]. Naphtha (C_8H_{18}), als Grundstoff für viele weitere Produktionspfade (u.a. via Ethen (C_2H_4) und Propen (C_3H_6), aber auch für C4-Schnitt, Aromaten und weiteres (siehe auch Abbildung 21) macht weltweit einen Anteil von 10% am gesamten Erdölverbrauch aus, in Deutschland liegt der Anteil sogar bei 14%. Neben dem für die Herstellung von Verbindungen mit mehreren Kohlenstoffatomen verwendeten Naphtha kommt für Verbindungen mit lediglich einem Kohlenstoffatom auch Methan (CH_4) zum Einsatz. Daneben sind in geringeren Mengen verwendete Rohstoffe u.a. Kohlendioxid, Synthesegas und Wasserstoff [62].

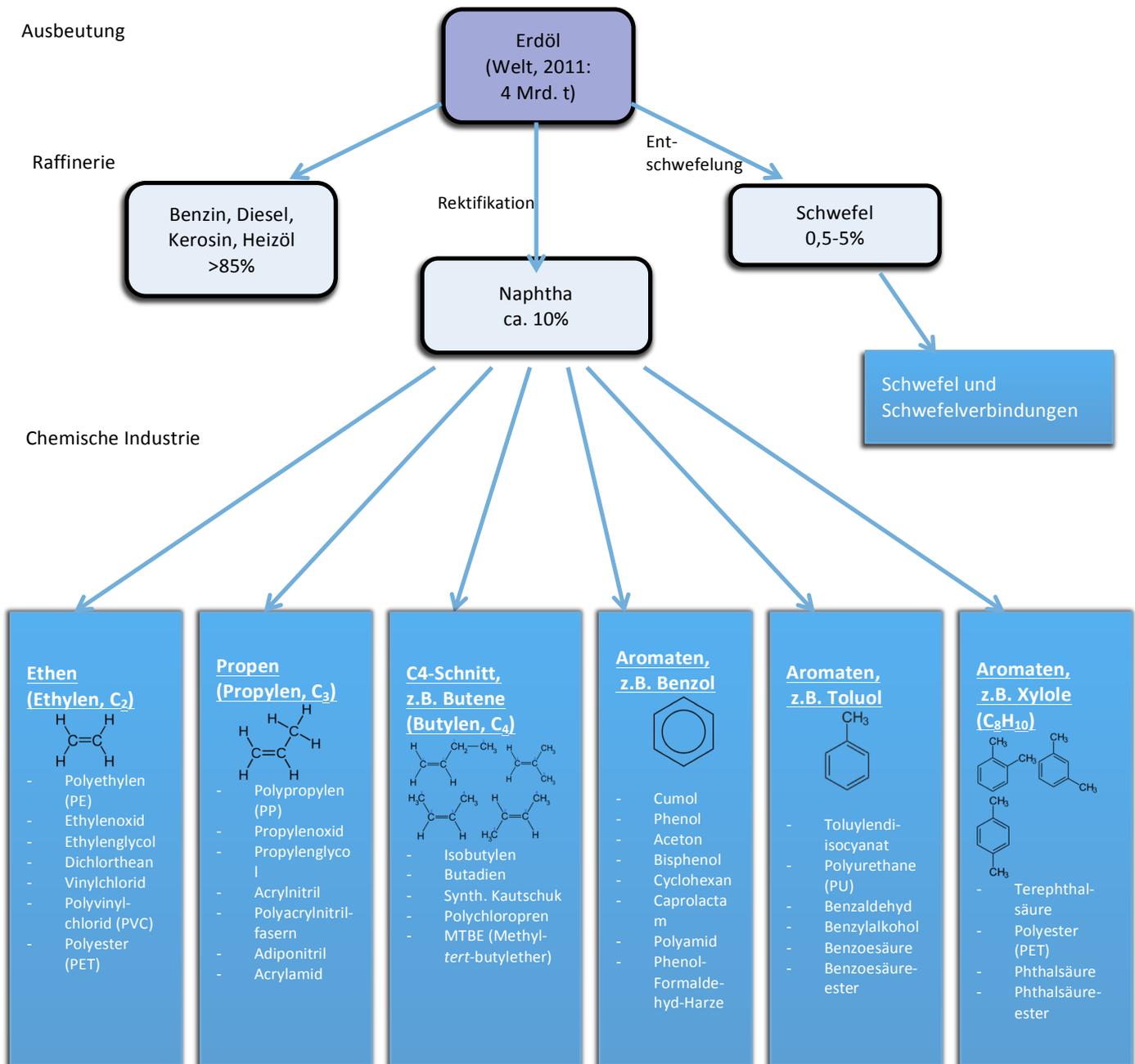


Abbildung 21: Erdöl-Weltförderung und Verwendung in der chemischen Industrie, nach [62].

Primärrohstoff	Erdöl	
Sekundärrohstoff	Naphtha (C ₈ H ₁₈)	
Weitere Koppelprodukte	Aromate, Schwefel (fallen bei der Reinigung von Mineralölprodukten an)	
Primäre Zwischenprodukte (Grundchemikalien)	Ethen, Propen, C4-Schnitt, Aromaten, sonstige organische Grundstoffe	
Produkte zur Weiterverarbeitung	Polymere (PE, PP, PS, ...) Spezialchemikalien	Produkte aus Spezialchemikalien: Farbstoffe, Arzneimittel, Kunststoffe, etc. (weiterverarbeitet zu z.B. Wandfarben, Medikamenten, Verpackungen, ...)

5.2 Rohstoff Erdgas

Ebenso wie die Erdöl-basierte Grundstoffchemie können auch aus Erdgas Basischemikalien gewonnen werden. Ein Überblick über die Erdgasverarbeitung ist in Abbildung 22 gegeben.

Primär wird Erdgas zur Energieerzeugung eingesetzt und ist derzeit der fossile Energieträger mit dem größten Verbrauchsanstieg [62].

Der Anteil der heimischen Erdgasförderung am deutschen Verbrauch liegt bei ca. 14% und damit höher als der derzeitige Bedarf der chemischen Industrie [62]. Bei einer vollständigen Umstellung der Strom- und Wärmeerzeugung auf erneuerbare Energien könnte der verbleibende Bedarf somit vollständig durch die inländische Produktion gedeckt werden.

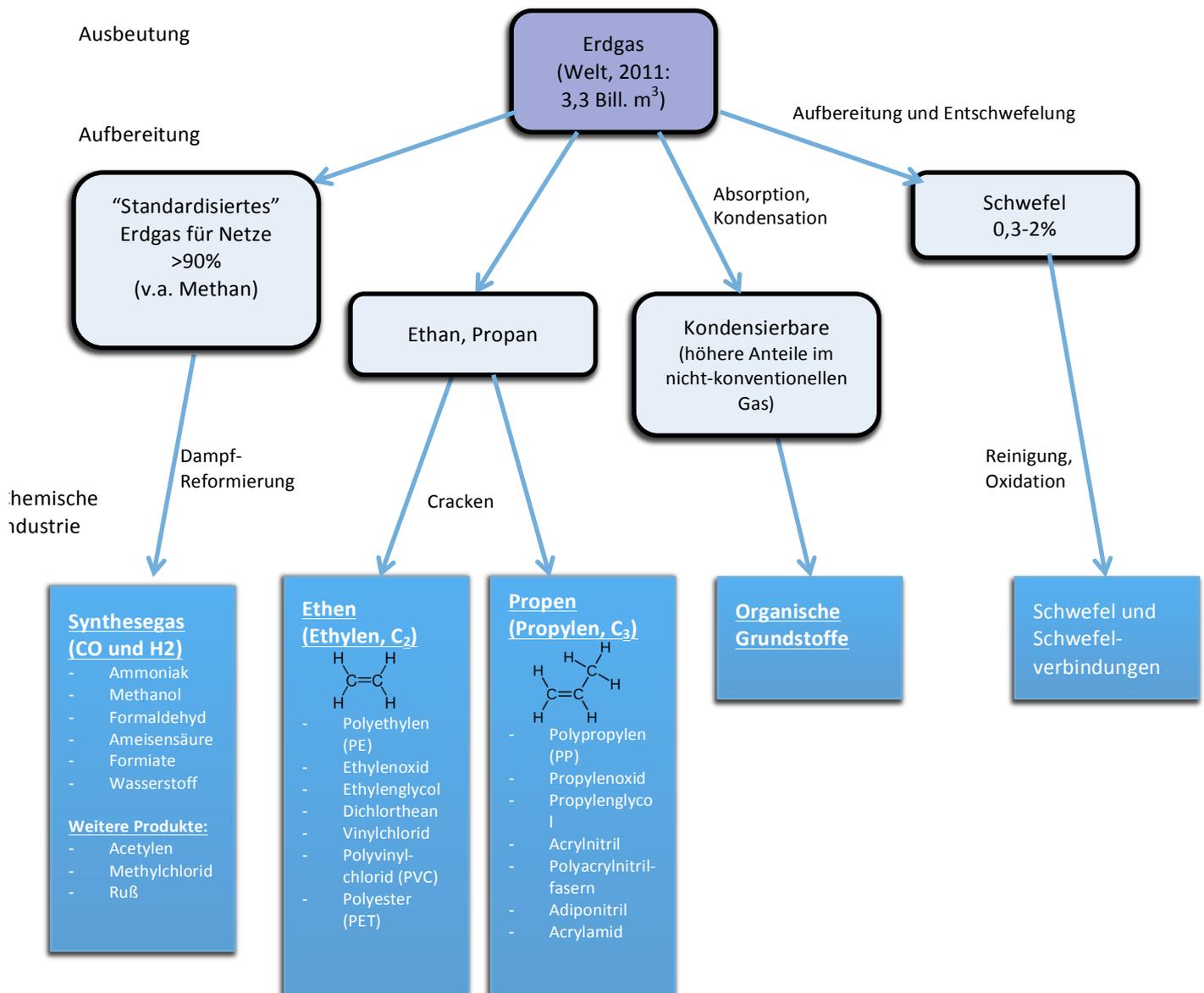


Abbildung 22: Erdgas-Weltförderung und Verwendung in der chemischen Industrie, nach [62].

5.3 Rohstoff Kohle

In Deutschland wird lediglich Braunkohle unter derzeitigen wettbewerbsfähigen Bedingungen gefördert, wobei auch dies primär am gesetzten politischen Rahmen liegt (bzgl. der Rechtslage zu Umsiedelung von Dörfern, Eigentumsübertragung und (Nicht-)Einpreisung von Schäden Dritter durch Kohleabbau und -verstromung, sogenannten „Externalitäten“). Wird diese Nicht-Besteuerung von Gesundheitsschäden und anderen Folgekosten mit berücksichtigt, zeigt sich auch hier deutlich die starke Subventionsabhängigkeit der Braunkohleindustrie [28]). In diesem Bereich sind mittelfristig starke Veränderungen zu erwarten.

Deutschland ist der weltweit größte Förderer von Braunkohle. Von den hier jährlich geförderten 170-180 Mio. t werden 90% energetisch (Stromerzeugung und Fernwärme) genutzt, die restlichen 10% werden einer stofflichen Nutzung zugeführt. In NRW wurden 2012 101,7 Mio. t Rohbraunkohle abgebaut, d.h. knapp 56% der deutschlandweit geförderten 183 Mio. t Rohbraunkohle [62].

In Deutschland wurden 2010 lediglich 0,2 Mio. t Kohle als Rohstoff für die chemische Industrie verwendet, obwohl die große globale Verfügbarkeit dieses Rohstoffes evtl. anderes vermuten lassen würde. Die anderen (v.a. fossilen) Rohstoffe sind für die chemische Industrie wesentlich attraktiver.

Abbildung 23 gibt einen Überblick über die stofflichen Verwendungsmöglichkeiten und die resultierenden Grundstoffe für die chemische Industrie.

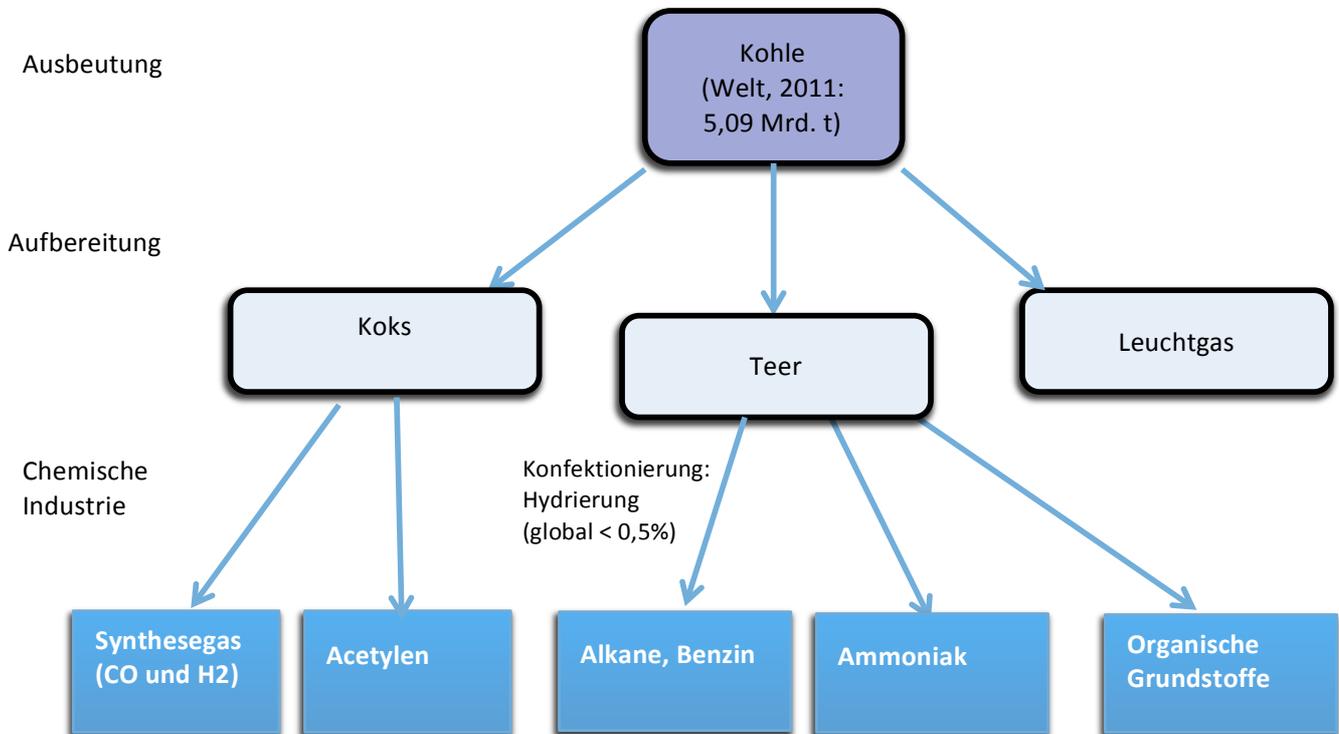


Abbildung 23: Kohle-Weltförderung und Verwendung in der chemischen Industrie, nach [62].

In den 1980er- und 90er-Jahren wurde ein elektrisches Verfahren mittels eines Lichtbogens entwickelt, um aus pulverisierter Kohle und Wasserstoff Acetylen herzustellen. Acetylen wiederum dient als Grundstoff für viele organischen Chemikalien und Kunststoffe. Das Produktgemisch der Reaktion setzt sich demnach in Gewichtseinheiten aus 25% Acetylen, 20% Kohlenmonoxid und 34% (ggf. wieder rückführbarem) Wasserstoff zusammen [69].

Eine Renaissance dieses Öl-unabhängigen Produktionspfades wäre abhängig von den Rohstoffpreisen für Naphtha und Kohle, sowie von der Entwicklung des Strompreises. Durch die Nutzung von Stromerzeugungsspitzen sowohl für die Wasserstoffsynthese als auch für die anschließende Acetylen-Reaktion könnten hierbei große Teile des Verfahrens durch erneuerbare Energie abgedeckt werden. Eine Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen wäre hierbei allerdings so nicht erreichbar.

Das gleiche gilt auch für die Lichtbogen-basierte pyrolytische Acetylsynthese aus Flüssiggasen und Raffineriegasen sowie Erdgas [62, S. 298]. Erst die sich derzeit noch in Entwicklung befindlichen direkten Power-to-Gas bzw. Power-to-Chemicals-Verfahren würden dieses Defizit lösen. Eine 100 kW-Demonstrationsanlage zur Wasserstoffherzeugung mit Überschussstrom aus Wind und Photovoltaik befindet sich in NRW in Ibbenbüren. Dort kommt das mit bis zu 75% Wirkungsgrad sehr effiziente PEM-Verfahren (Proton-Exchange-Membrane) zum Einsatz [62, S. 290, 328].

Eine reine Überschussstromnutzung erscheint langfristig jedoch kaum wirtschaftlich umsetzbar zu sein, da auf diese Weise eine jährliche Betriebszeit von lediglich 300 bis 1400 Volllaststunden realisierbar ist; erst bei 7000 oder mehr jährlichen Volllaststunden und kostenfreier elektrischer Energie wäre dieser Produktionspfad konkurrenzfähig gegenüber konventionellen fossilen Wasserstoffquellen wie Erdöl bzw. Erdgas [62, S. 330]. Somit wären für einen wirtschaftlichen Betrieb entsprechende politische Rahmenseetzungen vonnöten, wie etwa eine weitergehende Einpreisung der mit fossilen Kohlenwasserstoffen verbundenen Externalitäten.

5.4 Nachwachsende Rohstoffe

Die Gruppe der nachwachsenden (organischen) Rohstoffe beschreibt die pflanzliche und tierische Biomasse. Vor allem die pflanzlichen erneuerbaren Rohstoffe werden durchaus auch schon seit längerem in der chemischen Industrie eingesetzt. Im Jahr 2011 lag in Deutschland ihr Anteil bei 3,6 Mio. t, dies ist ein Anteil von 13%. Die jährliche Zuwachsrate von 1991 bis 2011 war ca. 2,9% [62], während die Zuwachsrate der allgemeinen chemischen Produktion in Deutschland 2% betrug [48]. Ein weiterer Ausbau erscheint realistisch.

Von den weltweit jährlich in der Landwirtschaft produzierten ca. 10 Mrd. t Biomasse werden ca. 32% für Lebensmittel verwendet, während ca. 60% dem energetisch sehr ineffizienten Weg der Viehfütterung zugeführt und somit weitgehend verschwendet werden. Lediglich 4% werden jeweils für die stoffliche bzw. die energetische Nutzung verwendet. Somit stellt die chemische Industrie in Bezug auf die Rohstoffverknappung gegenüber der Tiermast einen nahezu vernachlässigbaren Abnehmer biologischen Materials dar [62].

Lediglich auf den ersten Blick anders gestaltet sich das Bild hinsichtlich der in Deutschland produzierten nachwachsenden Rohstoffe und der zugehörigen Flächennutzung. Für die stoffliche und energetische Nutzung wurden 2013 in Deutschland 2,4 Mrd. ha genutzt, was einem Anteil von 20% an der Ackerfläche Deutschlands entspricht. Der überwiegende Teil hiervon wird allerdings für Energiepflanzen verwendet, während Industriepflanzen auf lediglich ca. 280 Mio. ha angebaut wurden, was in der Gesamtheit ca. 2,3% der deutschen Ackerfläche entspricht [62].

Allerdings ließe sich der heutige Bedarf an chemischen Erzeugnissen nur schwer vollständig auf der Basis nachwachsender Rohstoffe decken. Wollte man allein die weltweite Polyethylen-Produktion des Jahres 2011 von 65,8 Mio. t durch den Anbau von zuckerhaltigen Pflanzen versorgen, wären dazu 20 Mio. ha Ackerfläche notwendig – was in etwa der Gesamtfläche Deutschlands, und ca. 1% der weltweiten Agrarfläche entspricht [62]. Mit der von Prognos angenommenen Wachstumsrate der weltweiten chemischen Industrieproduktion von 4,5% [48] würde sich diese Fläche bis 2030 mehr als verdoppeln.

Aus diesen Rohstoffen werden Kohlehydrate (Stärke, Cellulose, Zucker), Lipide (Öle und Fette), Proteine, Harze, Fasern, Pigmente, Tenside, Aromastoffe und pharmazeutische Wirkstoffe gewonnen. Die aus diesen Grundstoffen erzeugten Produkte reichen von Kunststoffen, Waschmitteln, Lebensmittelzusätzen, Kosmetika, Farben, Lacken, Kleb- und Baustoffen, Hydraulikölen und Schmiermitteln bis zu Arzneimitteln [62].

Verschiedene Studien [48, 62] betrachten die Möglichkeit der Verknappung von Rohöl und damit auch einhergehend die Verknappung des Koppelprodukts Naphtha, das grundlegend für einen Großteil der gesamten heutigen Basischemie ist. Im Allgemeinen wird solch eine Veränderung jedoch erst in etwas fernerer Zukunft als möglich erachtet (deutlich jenseits des Jahres 2030), und könnte durch eine konsequentere Abkehr der energetischen Nutzung fossiler Energieträger weiter hinausgezögert werden. Somit ergibt sich in diesem Bereich derzeit noch keine unmittelbare Handlungsnotwendigkeit; ein fortschreitender Ausbau der Nutzung erneuerbarer Rohstoffe, einhergehend mit einer schrittweisen Umwidmung bestehender Landnutzung fort von der Futtermittelproduktion erscheint hierbei allerdings ratsam.

5.5 Kunststoffindustrie

Die chemische Industrie ist in der Lage, eine schier unüberschaubare Bandbreite von Kunststoffen herzustellen. Der überwiegende Teil (weltweit ca. 85%) davon wird für Massenanwendungen verwendet, die vergleichsweise geringe Anforderungen an die Materialeigenschaften stellen. Hier kommt es oftmals primär auf geringe Fertigungskosten an. Gängige Standardkunststoffe sind als amorphe Materialien EPS, PS, PET, PVC und als teilkristallin geartete Materialien PP und PE (HDPE, LDPE und LLDPE).

Für technische Anwendungen kommen Spezialkunststoffe zum Einsatz, die sich u.a. durch ihre größere Robustheit gegenüber extremeren Temperaturen auszeichnen. Kunststoffe, die noch im Temperaturbereich zwischen 100°C und 150°C verwendbar sind, werden als technische Kunststoffe bezeichnet, diese machen ca. 10% der weltweiten Produktion aus. Oberhalb von 150°C spricht man von Hochleistungs- oder Funktionskunststoffen, welche weniger als 0,5% der weltweiten Produktion ausmachen. Die weltweite Dominanz der Standardkunststoffe spiegelt sich ebenso in den europäischen und deutschen Produktionskapazitäten wider [62, S. 100, 106].

Neben dem Temperaturbereich spielen für weitere Klassifikationen und Anwendungen die mechanischen Eigenschaften bzgl. u.a. Härte, Zähigkeit, Langlebigkeit und Verarbeitbarkeit die bedeutende Rolle.

Die WSK von Kunststoffen beginnt mit der Herstellung der Kunststoff-Rohstoffe, also den Basispolymeren bzw. deren Vorstufen. Darauf folgt die Herstellung des Kunststoffs und der benötigten Additive, oftmals in Form eines Granulats. Aus diesem entstehen die Ge- bzw. Verbrauchsprodukte, die wiederum über den Handel zum Endverbraucher gelangen. Idealerweise schließt sich hieran eine Nachnutzung an, die aus Recycling, Kompostierung, thermischer Verwertung oder einer anderen Verwertungsform bestehen kann. Abbildung 24 gibt einen Überblick über diese sehr allgemeine, „klassische“ Kunststoff-WSK.

Aufgrund ihrer z.T. hohen Widerstandsfähigkeit auch weit über ihre Nutzungsdauer hinaus stellt sich die Frage der Nachnutzung, Rückführung oder Entsorgung bei Kunststoffen besonders nachdrücklich. Bei hochwiderstandsfähigen Spezialkunststoffen und komplexen Materialien wie etwa Faserverbundwerkstoffen steigert sich dies noch weiter – so ist z.B. heutzutage weitgehend ungeklärt, wie die an heutigen Windkraftanlagen (WKAs) verbauten polymeren Werkstoffe auf die beste Weise nachgenutzt oder recycelt werden können. Momentan wird deswegen ein Großteil dieser Materialien verbrannt, eine Weiterentwicklung der Konstruktion von WKAs ist deswegen vonnöten [65].

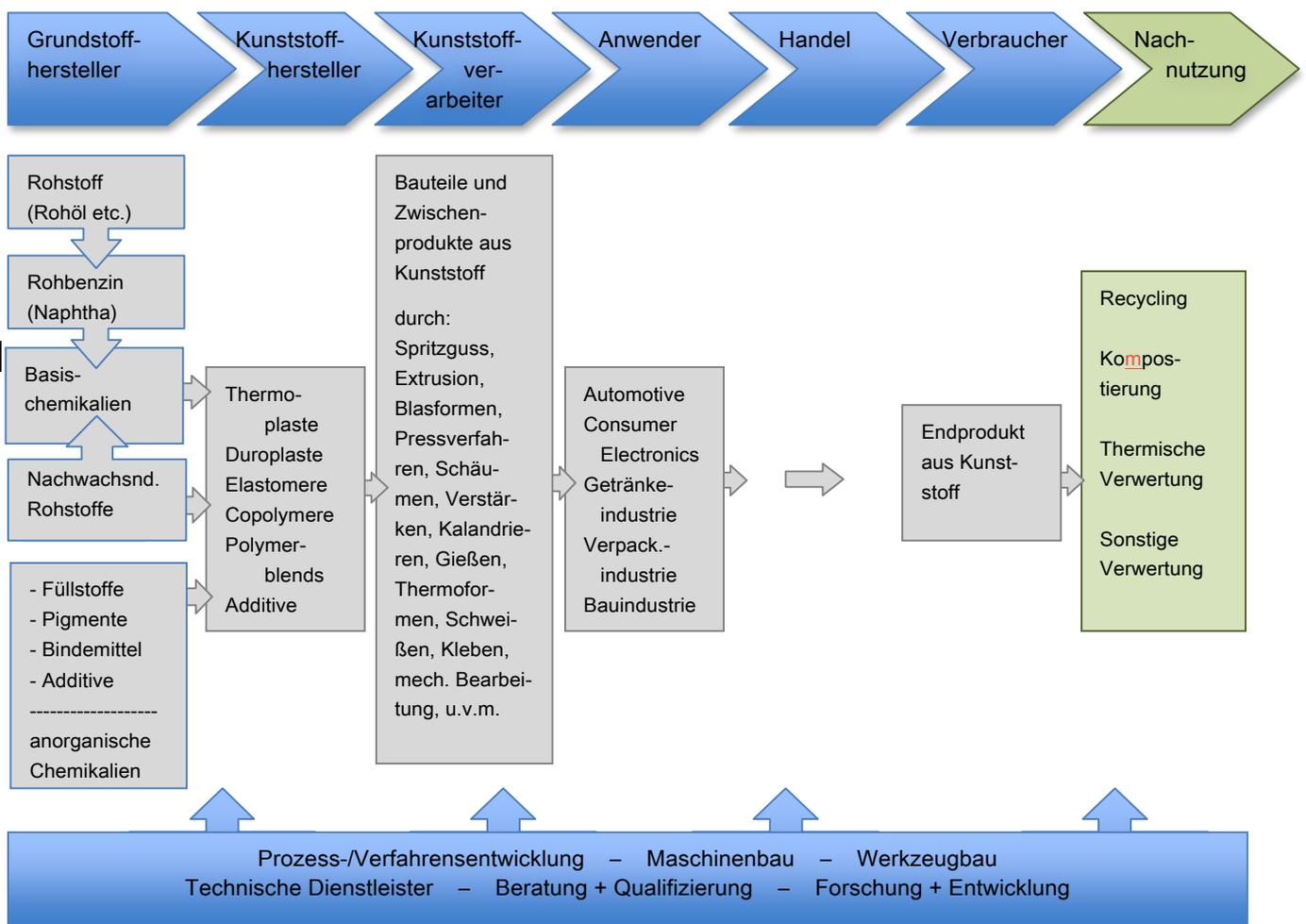


Abbildung 24: klassische Kunststoff-Wertschöpfungskette, nach [62] und [95].

In der Kunststoffindustrie waren 2011 in NRW ca. 960 Betriebe tätig, die mehr als 116.000 Menschen beschäftigten und einen Umsatz von 35,7 Mrd. € generierten – in Vergleich mit Gesamtdeutschland (7080 Unternehmen mit 90,5 Mrd. € Umsatz) fällt die geringere Betriebsanzahl auf, allerdings auch das große ökonomische Gewicht NRWs von fast 40% bzgl. des Umsatzes. Viele dieser Betriebe zählen zu den kleinen und mittelständischen Unternehmen [62]. Obwohl ca. die Hälfte der in NRW produzierten Kunststoffe bzw. daraus gefertigten Erzeugnisse in den Export geht, spricht das Branchennetzwerk „kunststoffland NRW“ von einer durchgängigen WSK (von Kunststoffherzeugern, -verarbeitern und -maschinenbauern, sowie der dazugehörigen Forschungs- und Dienstleistungsumgebung und einem weitläufigen Anwenderspektrum) [66].

Die weltweite Kunststoffproduktion findet mittlerweile zunehmend in Asien statt. China deckte 2014 mittlerweile 26% ab (2006: 21%), 20% entfielen auf Europa (2006: 23%), wovon wiederum $\frac{1}{4}$ in Deutschland produziert wird [68]. Die deutsche Produktion ist stark mit dem europäischen Ausland vernetzt, von dort kommt der Großteil der 40% Importe für die deutsche Kunststoffindustrie und es bildet den wichtigsten Absatzmarkt für die 57% Exporte der produzierten Kunststoffe [62].

Gerade bei der Massenproduktion von Standardkunststoffen besteht ein hoher Wettbewerbsdruck bei den europäischen Kunststoffherstellern aufgrund der Kombination aus hohen Energiekosten und den geringen Rohstoffkosten v.a. in den USA wegen des dortigen Booms der unkonventionellen Öl- und Gasförderung [62].

Seitens der Nachnutzung wurden zwar durchaus schon erkennbare Fortschritte erzielt, jedoch ist hier weitere Anstrengung notwendig. In 2014 wurden von den in der EU anfallenden 25,8 Mt Plastikmüll 69,2% durch Recycling (29,7%) oder energetische Nutzung (Verbrennung, 39,5%) nachgenutzt. 30,8% landeten in Mülldeponien. Deutschland weist hierbei eine deutlich positivere Bilanz auf, auch durch gesetzliche Regelungen, welche die massenhafte Endlagerung von Kunststoffen auf Mülldeponien seit 2006 verbieten. Derartige Regelungen bewirken einen signifikanten Anstieg der Nachnutzungsrate, allerdings primär durch einen höheren Anteil der energetischen Nachnutzung in Verbrennungsanlagen. Auf alle Kunststoffe bezogen übersteigt die Recyclingrate in keinem EU-Land 40%, auf Kunststoffverpackungen bezogen werden immerhin Raten bis knapp über 50% (in Tschechien) erreicht [68].

5.6 Polymere Werkstoffe

In Europa wurden 2014 ca. 20,1% der produzierten Kunststoffe für Konstruktion und Bau verwendet und ca. 8,6% in der Automobilindustrie [68]. Der Großteil der im Baugewerbe eingesetzten Kunststoffe wurde dabei allerdings zu Zwecken der Isolierung bzw. des Innenausbaus verwendet und durch Standardkunststoffe abgedeckt.

Beispiele für den Einsatz von speziellen Kunststoffen in der Automobilindustrie sind die Verwendung von schlagzäh-modifiziertem PP (Polypropylen) und z.T. auch faserverstärktem PUR für Stoßfänger und kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) für Fahrgastzellen [62].

Kohlefasern (deren Herstellung wiederum mit einem hohen Bedarf an elektrischer Energie verbunden ist) weisen bei etwa halbem Gewicht eine fünffache höhere Stabilität auf als Stahl, d.h. sind bezüglich des Gewichts zehnmal stabiler und sind u.a. für die Flug- und Fahrzeugindustrie von großem Interesse. Durch die Gewichtsersparnis wird z.B. bei Flugzeugen davon ausgegangen, dass durch den konsequenten Einsatz von Kohlefasern bis zu 30% des Treibstoffes eingespart werden können, bei gleichzeitiger Komfortsteigerung durch größere Fenster, besseren Luftdruckausgleich etc. – In der Fahrzeugindustrie werden ähnliche Hoffnungen artikuliert. Kraftstofftanks werden aufgrund der überlegenen Materialeigenschaften heutzutage weltweit schon überwiegend und in den USA und Europa wohl nahezu ausschließlich aus polymeren Kunststoffen hergestellt. Weitere Einsatzfelder in der Fahrzeugindustrie sind der verstärkte Einsatz von langlebigem und schwer entflammbarem PVC anstatt von Kabelisolierungen aus Gummi und die Entwicklung von verbesserten polymeren Fahrzeugreifen [63].

Diese Effizienz- und Attraktivitätssteigerungen zeigen allerdings zugleich eine starke Tendenz hin zu gravierenden Rebound-Effekten, wodurch es realistisch erscheint, dass viele dieser technologiebedingten Effizienzgewinne aufgrund einer durch sie getriebenen starken Nutzungssteigerung überkompensiert werden dürften.

Ein weiteres Anwendungsfeld für vor allem mittel- und langlebige Kunststoffe sind Windenergieanlagen (WKAs). Beim Bau einer WKA entfallen 20-25% der Gesamtkosten auf den Rotor [87 S. 30], dessen möglichst leichter, stabiler und materialsparender Aufbau ein wichtiges Feld für polymere Faserverbundwerkstoffe ist. Bei WKAs müssen die Werkstoffe je nach Einsatzbereich eine Lebensdauer von mehreren Jahren bis mehreren Jahrzehnten aufweisen. Besonders bei Offshoreanlagen steigen die Anforderungen durch die extremeren Wetter- und Witterungsbedingungen und den erhöhten Gehalt an potenziell korrosiv wirkendem Salz. Heutige WKAs weisen üblicherweise eine Gondel und Rotorblätter aus glasfaserverstärkten (GFK) oder kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) auf [62].

Das Recycling von faserverstärkten Kunststoffen befindet sich erst in der Anfangsphase. Erste Unternehmen bieten Lösungen zur Rückgewinnung und Weiternutzung von Kohlefasern aus rückgeführtem CFK an. Hierbei werden die Fasern pyrolytisch von der Kunststoffmatrix getrennt, der Kunststoff wird dabei verbrannt. Die zu-

rückbleibenden Kohlefasern werden entweder geschnitten oder gemahlen zu neuen Produkten weiterverarbeitet [71, 72].

Auch polymere Werkstoffe unterliegen einem starken Preisdruck. Wie in Abbildung 25 deutlich zu erkennen ist, wird das mittelfristige Marktpotenzial für alle polymeren Werkstoffe auf der gesamten Skala von Massenprodukten bis zu hochfunktionalen Spezialmaterialien streng von deren Preisniveau bestimmt [102].

Polymere Werkstoffe werden u.a. von Leis und Evonik¹² u.a. zur Substitution von Metallteilen entwickelt. Für NRW haben diese Werkstoffe insofern Relevanz, dass hier die Werkstoffverarbeitende Industrie mit derzeit insg. 726.000 Arbeitsplätze, 200 Milliarden Euro Umsatz [16] traditionell stark ist. Insofern besteht hier ein potenziell großes Substitutionspotenzial von traditionellen auf neue Werkstoffe.

Das in NRW ansässige Unternehmen Degussa weißt als weltweit größtes Spezialchemie-Unternehmen als einen Unternehmensbereich explizit Spezialpolymere aus und beschäftigt am Standort Marl ca. 7300 Mitarbeiter [50].

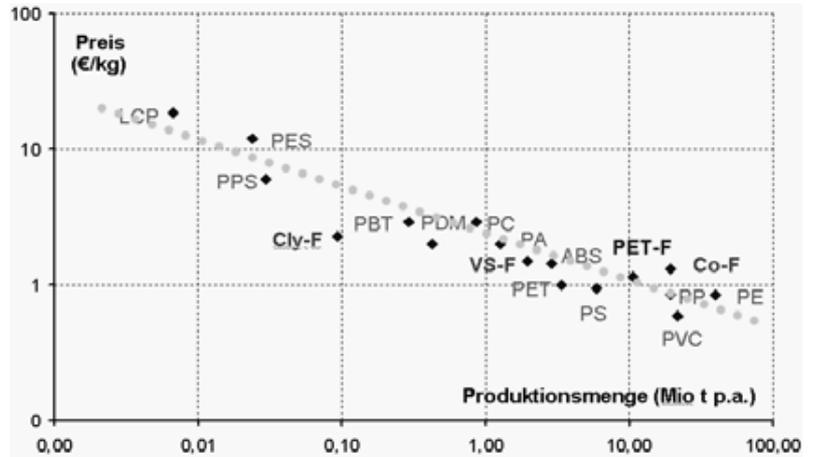


Abbildung 25: Preis vs. Produktionsmenge polymerer Werkstoffe [102]

5.7 Faserverbundwerkstoffe

Die beiden derzeit hauptsächlich eingesetzten Werkstoffkategorien sind hierbei Kohlefaser- und Glasfaser-verstärkte Kunststoffe (CFK und GFK).

Wie in Abbildung 26 dargestellt, weisen Faserverbundwerkstoffe eine für mechanische Anforderungen wünschenswerte Kombination aus eher geringer Dichte und sehr hoher Steifigkeit auf. Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sind hierbei den Glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) merklich überlegen.

5.7.1 Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)

Derzeit werden die Rotoren der meisten Windkraftanlagen (WKA) aus GFK gefertigt [108]. Diese in diesen Materialien zur verwendeten Fasern sind weitgehend zu Ende entwickelt, die Eigenschaften sind gut bekannt und GFK-Werkstücke haben sich in einem weiten und diversen Anwendungsfeld etabliert.

Rund 98% aller verwendeten Faser-verstärkten Kunststoffe (FVK) bestehen aus

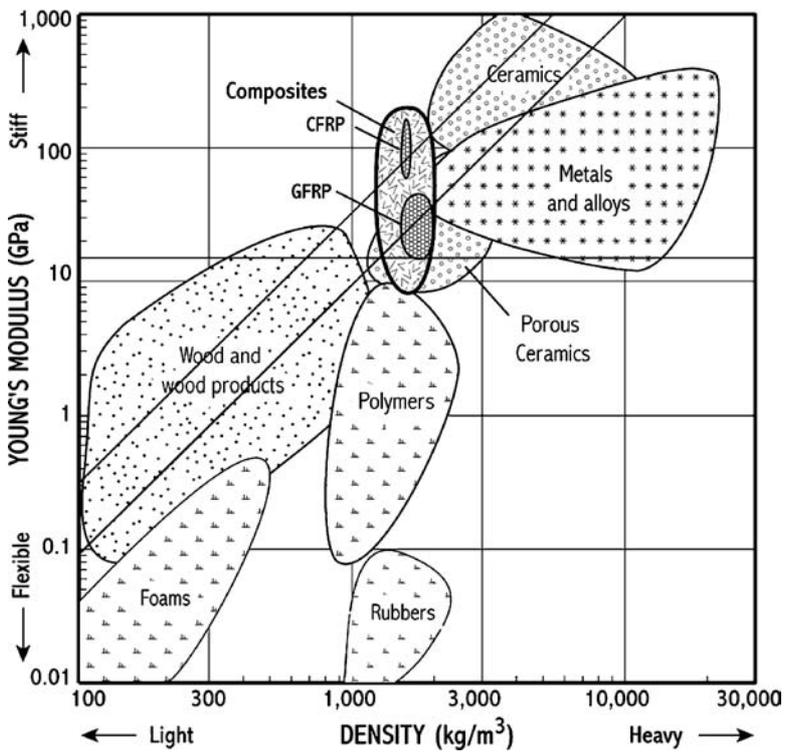


Abbildung 26: Steifigkeit gegenüber Dichte für verschiedene Werkstoffe. Die horizontale Linie beschreibt das Kriterium absoluter Steifigkeit mit $E=15\text{GPa}$, der Güteindex eines Stabes $M_b=E^{1/2}/\rho$ ist durch die schrägen Linien dargestellt, mit $M_b=0,003$ (untere Linie) bzw. $0,006$ (obere Linie) ein möglichst hoher Wert für M_b ist wünschenswert. GFK und CFK sind hier mit den englischen Bezeichnungen GFRP und CFRP bezeichnet. Aus [103].

¹² Evonik: Spezialchemieunternehmen mit Sitz in Essen, Umsatz 12,9 Mrd. € in 2014 (allerdings ca. 75% im Ausland), 33.412 Mitarbeiter, fünftgrößtes deutsche Chemieunternehmen

GFK [99].

Im Vergleich zu anderen Fasern weisen Glasfasern ein relativ hohes Gewicht auf.

Da der Produktionsprozess von GFK dem von Kohlefaser-Verbundstoffen (CFK) ähnelt, wird dieser hier nicht gesondert aufgelistet.

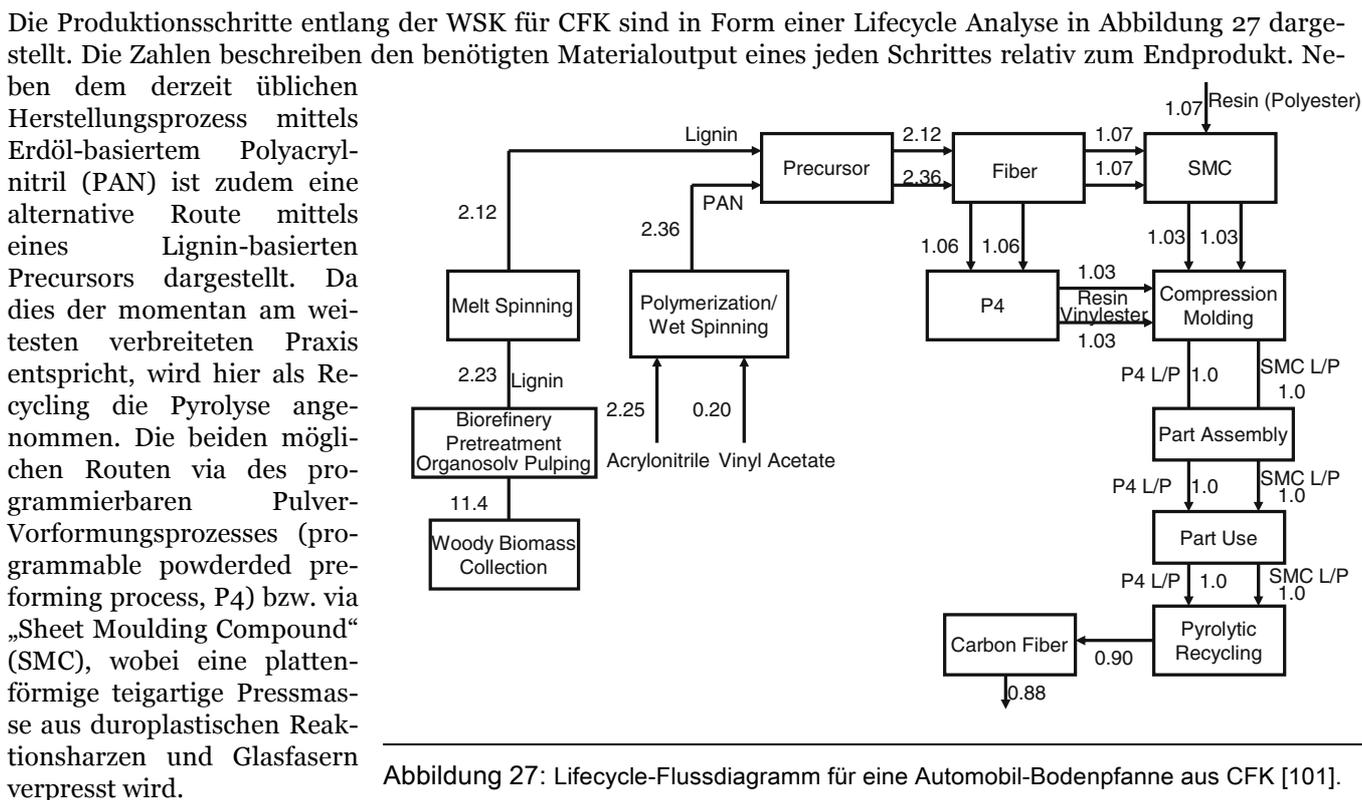
5.7.2 Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK)

Unter allen Leichtgewichtsmaterialien haben Kohlefaser-Verbundwerkstoffe das größte Potenzial zur Gewichtsreduktion von Bauteilen. Die Herstellung von Kohlefasern erfordert allerdings ca. 14mal mehr Energie und 15mal mehr CO₂-Emissionen als die konventionelle Stahlerzeugung, CFK-Komponenten gleicher Stabilität wie konventionelle Stahlkomponenten sind ca. 4,6mal so energieintensiv wie diese [101].

In der Automobilindustrie zeigen CFK-Komponenten aufgrund des geringeren Gewichts einen in etwa gleichen Energiebedarf über den gesamten Lebenszyklus wie Stahlkomponenten. Durch Recycling von CFK-Komponenten lässt sich die Energieintensität von CFK zu vergleichbaren Werten wie die Energieintensität von Stahlkomponenten reduzieren [101].

Bei besonders großen WKA-Rotorblättern kommen heutzutage zunehmend CFK-Komponenten zum Einsatz [108].

Kohlefasern werden üblicherweise aus den leichteren Komponenten des Erdöls erzeugt (Propan und Propan/Propylen). Aus diesen grundlegenden Precursoren wird ein längeres Polymer (Polyacrylnitril, PAN) katalysiert, welches dann gesponnen und karbonisiert wird [99].



Die SMC-Route ist mit einer etwas höheren Primärenergieintensität und höherer Emissionsintensität behaftet als die P4-Route. Im Herstellungsprozess fallen für PAN-SMC Teile 345 MJ und 16,9 kgCO_{2eq} pro kg Werkstück an, und für PAN-P4-Teile 323 MJ und 14,6 kgCO_{2eq}. Wird stattdessen auf einen Lignin-basierenden Precursor übergegangen und der Bereitstellungsprozess des Lignins außer Acht gelassen (da dieses als Abfallprodukt der Papierherstellung ohnehin anfällt), so weisen Lignin-SMC-Teile 336 MJ und 14,9 kgCO_{2eq}, und Lignin-P4-Teile 312 MJ und 12,5 kgCO_{2eq} pro kg Werkstück auf, während ein (fast doppelt so schweres) gepresstes Stahlteil 56 MJ und 4,4 pro kg Werkstück aufweist. Zu je nach Verfahren leicht unterschiedlichen Anteilen verteilt sich der Primärenergiebedarf bei der Kohlefaser-Produktion zu 1/3 auf die Bereitstellung der Faser-Precursoren und zu 2/3 auf die Faserproduktion. Demgegenüber schlägt der Primärenergiebedarf der Weiterverarbeitung mit ledig-

lich 8-15% zu Buche. Es wird angenommen, dass durch erhöhte Durchsatzraten und weiter gesteigerte Prozesseffizienz zumindest weitere 10% Einsparung im Produktionsprozess erreicht werden können [101].

Durch das deutlich geringere Gewicht der CFK-Werkstücke von nur 50-60% des Stahlerzeugnisses sind diese beim Einsatz in Automobilen trotz des größeren Produktionsaufwands geringfügig effizienter als Stahlwerkstücke. Beim automobilen Einsatz entfällt 75% (CFK) bzw. 93% (Stahl) des gesamten Primärenergiebedarfs auf die Nutzungsphase (aka, die Zeit in der das Fahrzeug verwendet wird). Die Unterschiede in der Gesamtenergiebilanz sind allerdings marginal [101].

Zur wirtschaftlichen und energetisch sinnvollen Umsetzung von auf Kohlefasern beruhenden Konstruktionskonzepten (z.B. in der Automobilindustrie) muss die Energieintensität von CFK-Materialien derer von Stahl nahekommen. Dies war vor zehn Jahren noch nicht gegeben, jedoch waren Möglichkeiten schon klar erkennbar. Durch die Wahl des passenden Faseranteils und einer optimierten Polymermatrix, sowie durch den verstärkten Fokus auf 3R (Reduce, Reuse, Recycle) war die mittlerweile weitgehend erreichte Wirtschaftlichkeit zumindest prognostizierbar [109]. 2009 waren Faserverbundmaterialien in vielen Bereichen automobiler Anwendung über ihren gesamten Lebenszyklus betrachtet schon deutlich energieeffizienter als Stahlteile, jedoch noch nicht im Vorteil gegenüber Aluminium [110].

Der führende Endnutzungsbereich für CFK ist derzeit die Luftfahrt mit 36%, gefolgt von der Windenergie mit 33%. Dahinter folgen der Automobilbereich, die Schifffahrt und der industrielle Sektor mit jeweils in etwa 8% [99].

5.7.3 Recycling von faserverstärkten Kunststoffen

Eine Reihe verschiedener Recyclingverfahren wurde mit der Zeit entwickelt. Diese haben jeweils verschiedene Vorteile und Schwächen und sind deswegen sinnvoll eher als komplementierend zu betrachten, anstatt sie miteinander in Konkurrenz zu setzen [112]. Kohlefasern können hierbei deutlich besser rückgewonnen und im Sinne einer Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden als Glasfasern.

Für die Rückgewinnung der Fasern wird z.T. zunächst ein Großteil der Polymermatrix aus dem Faserverbund herausgehämmert, anschließend kommen weitere Technologien zum Einsatz [97, 98].

- Mechanisch:
Das Verbundmaterial wird durch schreddern, brechen, mahlen und ähnliche Prozesse zerkleinert. Das resultierende Material kann anschließend in Matrixbestandteile und Fasern separiert werden. [99]
- Pyrolyse:
Das Verbundmaterial wird unter Sauerstoffabschluss auf 450°C bis 700°C erhitzt. Die Polymermatrix wird dabei in ein Gas oder in Dampf überführt, während die Fasern inert verbleiben und später aufgesammelt werden. [99]

Die Rate der Kohlefaserrückgewinnung durch die kontrollierte Pyrolyse kann sehr hoch sein (ca. 98%). Die Eigenschaften der rückgewonnenen Fasern erscheinen ähnlich denen von Neufasern aus Polyacrylnitril (PAN) zu sein. Da dieser Prozess die in der Polymermatrix chemisch gespeicherte Energie nutzt, läuft er ohne weitere Energiezufuhr ab und hat das Potenzial einer positiven Energiebilanz nach weniger als zwei Jahren [101].
- Wirbelschicht-Oxidation:
Der Wirbelschichtprozess ist die am weitesten verbreitete Anwendung. Sie besteht darin, die Polymermatrix in einem heißen, sauerstoffreichen Ofen bei 450°C bis 550°C zu verbrennen [99]. Bei der Verbrennung bleibt allerdings ca. 60% der Masse als z.T. belastete Asche zurück, was eine Deponielagerung notwendig machen kann [97, 98].
- Chemisch (Solvolyse [97, 98]):
Die Polymermatrix wird in Öle zersetzt, welche die Fasern zur Rückgewinnung freigeben. Hierbei kommen z.T. aggressive Chemikalien zum Einsatz (z.B. Salpetersäure [113]), und die eingesetzten Stoffe sind mitunter kostenaufwändig. Eine gute Reinigung und Rückgewinnung der eingesetzten Fasern ist mit diesen Verfahren sehr weitgehend möglich. Experimente mit superkritischem Wasser (unter hohem Druck von ca. 30 MPa und hoher Temperatur von ca. 440°C) zeigen vielversprechende Ergebnisse und eine nahezu ideale Rückgewinnung der eingesetzten Kohlefasern aus der Epoxy-Matrix ist möglich. Der Zusatz von Kaliumhydroxid als Katalysator unterstützt diesen Prozess [100, 106].

GFK stellen rund 98% der heutzutage produzierten Faserverbundstoffe dar. Es besteht allerdings keine wesentliche wirtschaftliche oder finanzielle Motivation, GFK-Materialien zu recyceln, da das rückgeführte Material nur eine begrenzte Verwendung und einen geringen Endwert hat. Bei CFK dagegen erscheint Recycling aufgrund des höheren Wertes der Kohlefasern von ca. 15 €/kg (gegenüber 1–2 €/kg für Glasfasern) und der vielfältigen weiteren Nutzungsmöglichkeiten attraktiver [99].

Da der Kohlefasermarkt kommerziell relativ instabil ist und Lieferketten zum Teil problematisch bzw. unzuverlässig sein können, erscheint das Potenzial für einen Markt für rückgewonnene Kohlefasern gegeben. Im Idealfall sollten die im geschlossenen Kreislauf rückgewonnenen Fasern eine verlässlich verfügbare und preisstabile Ressource darstellen [99].

Während die Herstellung neuer Kohlefasern mit ca. 165 kW h/kg bzw. ca. 46 MJ/kg sehr energieaufwändig ist, benötigt die Rückgewinnung von recycelten Kohlefasern lediglich 8,8 kW h/kg bzw. 2,4 MJ/kg.

Um diesen Kostenvorteil auch tatsächlich nutzen zu können müssen die rückgewonnenen Fasern allerdings auch in ihrer Verwendbarkeit vergleichbar mit Neufasern sein. Hierbei ist u.a. die Dichte des aus den Fasern erzeugten CFK von entscheidender Bedeutung. Dies ist insbesondere interessant für die Luftfahrtindustrie und die Produktion von WKA-Rotorblättern. Es wird geschätzt, dass recycelte Kohlefasern wirtschaftlich reizvoll werden, wenn der Preis von gerichteten recycelten Kohlefasern weniger als 50% des Preises von Neufasern beträgt [99].

Da für den Rückgewinnungsprozess große Werkstücke wie etwa Flugzeugtragflächen oder WKA-Rotorblätter erst zerschnitten werden müssen, wird zwingenderweise die durchschnittliche Länge der Kohlefasern reduziert. Ebenso kann es über die Dauer der Werkstücknutzung hinweg zu Ermüdungsbrüchen der Fasern kommen [99].

Das Auseinandernehmen und Zerkleinern der Rotorblätter ist sehr energieaufwändig. Besonders GFK stellt hierbei eine Herausforderung dar, das enthaltene Glas zu zermahlen erfordert viel Energie. Da derzeit lediglich ca. 30% des Abfalls der faserverstärkten Kunststoffe (FVK) für neue FVK verwendet werden können, kann ein Großteil derzeit lediglich als Füllmaterial für Zement dienen. Dort konkurrieren diese Materialien allerdings mit etablierten Materialien wie etwa Kalk und können nur aufgrund des hohen notwendigen Energieeinsatzes nur unter Nutzung einer billigen Energiequelle konkurrenzfähig angeboten werden [97, 98].

Rückgewonnene Fasern sind tendenziell kürzer als neue Fasern. Dies ist zwar kein grundsätzliches Problem, die Fasern können allerdings lediglich systematisch eingesetzt werden, wenn ihre Eigenschaften wie Länge und mechanische Belastbarkeit gut bekannt sind [97, 98].

Eine Reihe von Verfahren zur Wiederverwendung von rückgewonnenen Fasern wurde mittlerweile entwickelt, die nunmehr einen hinreichenden Reifegrad erreicht haben um kommerziell eingesetzt zu werden. Diese haben jeweils ihre Stärken und Schwächen und müssen anwendungsbezogen ausgewählt werden [112].

Der Einsatz von Recyclingfasern wird von vielen Firmen dennoch als Risiko betrachtet. Ähnlich wie in der Zementindustrie, wo das der traditionelle Portland-Zement u.a. aufgrund einer konservativen Grundeinstellung der Bauindustrie seine dominierende Stellung bewahren kann, zeigt auch die FVK-Branche derartige Tendenzen hinsichtlich der Wiederverwendung gebrauchter Glas- und Kohlefasern. Derzeit werden Recycling-Fasern eher für Produkte mit geringeren mechanischen Anforderungen weiter verwendet, wie z.B. Silotanks, zur Verstärkung von rückgewonnenem Polypropylen (PP), oder zur Verstärkung von Beton. Andere Endnutzungsoptionen ist der Einsatz von rückgewonnenen Glasfasern als Isoliermaterial in der Bauindustrie [97, 98].

Derzeit allerdings erscheint das wesentliche Probleme nicht so sehr die Technologie, sondern eher der Mangel an Altmaterial zu sein – es ist derzeit oftmals (noch) nicht wirtschaftlich rentabel, große entsprechende Recycling-Anlagen aufzubauen. Während z.B. in der Zementindustrie hunderte Tonnen Material pro Woche prozessiert werden, fallen in existierenden Anlagen zur FVK-Aufbereitung lediglich einige zehn Tonnen pro Jahr an [97, 98].

Es dürften ähnlich wie bei der Fahrzeugindustrie die Produzenten der Endprodukte (Autos, bzw. hier fertige WKAs) sein, die für die fachgerechte Entsorgung und stoffliche Weiternutzung der eingesetzten Materialien verantwortlich gemacht werden. Um hier Übergangsprobleme zu vermeiden erscheint es für die WKA-Endfertiger dringend angeraten, nicht auf einen gesetzlichen Rahmen zu warten, sondern schon proaktiv an entsprechenden Lösungen zu arbeiten und Kapazitäten aufzubauen [97, 98].

5.7.4 Weiterentwicklung und Alternativen zu GFK und CFK

Durch den Einsatz von alternativen, kostengünstigen Precursor-Materialien anstatt des konventionellen ölbasierten Polyacrylnitril (PAN) können die Herstellungskosten von ca. 11 €/kg (in 2011) auf 7-10 €/kg um 10-30% reduziert werden [101].

Neben den derzeit verwendeten Materialien wird auch an alternativen Werkstoffen geforscht, die mit einem geringeren Aufwand einen Recyclingprozess durchlaufen können. So entwickelt etwa Risoe DTU gemeinsam mit der Chinesischen Forstbehörde den Einsatz von Fasern auf Bambus-Basis. Diese sollen in einem ersten Schritt in eine Epoxy-Matrix eingebettet werden, langfristig soll diese allerdings durch ein auf nachwachsender Basis erzeugtes Bindematerial ersetzt werden [97, 98].

Natürliche Fasern können zumindest gegenüber Glasfasern diverse Vorteile vorweisen.

- Ihre Produktion hat einen geringeren umweltschädigenden Einfluss als die Produktion von Glasfasern.
- Naturfaser-Verbundstoffe weisen bei gleicher Festigkeit einen höheren Faseranteil auf, wodurch der Polymeranteil reduziert wird.
- Da natürliche Fasern leichter als Glasfasern sind und dies auch für die daraus hergestellten Verbundmaterialien gilt, führen sie zu einem energieeffizienteren und emissionsparenderen Einsatz während ihrer Nutzungsphase z.B. im Automobilbereich (sofern kein Rebound-Effekt eintritt).
- Die Verbrennung nach Erreichen des Lebensendes des Naturfaser-Bauteils kann zur Rückgewinnung der chemisch gebundenen Energie dienen [114].

Ligninbasierte Fasern stellen zumindest einen potenziellen Nischenbereich dar. Da Lignin als nachwachsender Rohstoff in großer Menge als Nebenprodukt der Papierindustrie anfällt, ist für dessen Erzeugung derzeit kein zusätzlicher Energiebedarf zu berücksichtigen. Entsprechend kann die Verwendung dieses Rohstoffs zu einer bis 30%igen Reduktion des Energiebedarfs für die Fasererzeugung führen, wenn zugleich der Konversionsprozess von Lignin zu Kohlefasern in als realistisch angenommenem Rahmen optimiert wird [101].

Für manche Anwendungen in den Rotorblättern sind vollständig wiederverwendbare thermoplastische Materialien wie z.B. PET-Schäume attraktiv. Diese können anschließend zerkleinert verflüssigt und wieder in neue Produkte überführt werden [97, 98, 111].

Idealerweise sollten dabei allerdings nicht lediglich einzelne Komponenten des Verbundsystems weiterentwickelt werden, sondern in enger Zusammenarbeit der verschiedenen Einzelentwickler und -hersteller neue integrierte Gesamtlösungen gefunden werden [97, 98]. Hierbei dürfte eine öffentliche Förderung durch entsprechende Forschungs- und Entwicklungsprogramme hilfreich sein.

5.8 Zusammenfassung

Einige der wesentlichen Aussagen des Kapitels sind hier zusammengefasst:

- Die chemische Industrie in NRW ist hinsichtlich Energiebedarf und THG-Emissionen der bedeutendste Industriezweig des Bundeslandes. Die Produktion polymerer Werkstoffe nimmt hierbei bislang allerdings nur einen Nischenbereich ein.
- Strategisch kann dieser Bereich große Bedeutung erlangen, da
 - a) die chemische Industrie in NRW traditionell und derzeit gegenüber Gesamtdeutschland überdurchschnittlich stark in der Basis- und Grundstoffchemie verwurzelt ist – welche tendenziell einem wesentlich höheren Konkurrenzdruck gegenüber Billigproduktionsländern wie v.a. China ausgesetzt ist, als das bei der Produktion von Spezialchemie der Fall ist. Dadurch ist die Kundenseite in der Lage, eine bestimmendere (und profitdrückende) Position in der Grundstoff-WSK einzunehmen.
 - b) die werkstoffverarbeitende Industrie in NRW sehr stark ist und polymere Werkstoffe hier ein weites Anwendungsfeld finden können.
- Polymere Werkstoffe haben sehr diverse Einsatzfelder und basieren auf diversen Zwischenprodukten. Eine generelle Aussage über die Energie- und Emissionsintensität ist nur sehr eingeschränkt möglich, da sich die Endprodukte und notwendigen Prozesse z.T. stark unterscheiden.
- Alle Vorprodukte von polymeren Werkstoffen können von der in NRW stark vertretenen Basis- und Grundstoffchemie bereitgestellt werden. Insofern ist eine geschlossene WSK realisierbar. Allerdings ist die chemische Industrie durch ein weitläufiges Transportnetz (Pipelines, Wasserstrassen und Schienenwege) in großen Teilen Westeuropas stark integriert.
- Industrieparks und Verbundstandorte bieten große Effizienz- und damit auch Standortvorteile, sowohl hinsichtlich Logistik und Knowhow als auch hinsichtlich der Energie- und Ressourceneffizienz (Nutzung von Prozesswärme, Dampf, Koppel- und Zwischenprodukten).

- Derzeit basiert nahezu die gesamte Produktion von organischen Verbindungen auf der Weiterverarbeitung fossiler Kohlenstoffverbindungen. In erster Linie wird hierzu Erdöl eingesetzt.
- Prinzipiell sind auch andere Stoffquellen einsetzbar, nachwachsende Rohstoffe werden derzeit allerdings nur zu einem geringen Maß genutzt. Eine vollständige Bedarfsdeckung der chemischen Industrie durch nachwachsende Rohstoffe erscheint bei heutigem Bedarf nicht realistisch.
- Sortenrein sortierte Kunststoffe können zu einem gewissen Grad wieder dem Stoffkreislauf zugeführt werden. Der größte Teil der organischen Verbindungen wird jedoch „thermisch genutzt“, d.h. verbrannt.
- Für den Anlagenbau in der erneuerbaren Energiewirtschaft sind vor allem Faserverbundwerkstoffe von Interesse. Diese stellen neue Herausforderungen an das Recycling. Eine stoffliche Weiternutzung der verwendeten Glas- und Kohlefasern wird teilweise umgesetzt, dabei werden die Fasern zumeist geschnitten oder gemahlen; eine Kreislaufwirtschaft ist insofern nur teilweise realisierbar. Die polymere Kunststoffmatrix wird derzeit üblicherweise verbrannt.
- Insofern lässt sich für polymere Werkstoffe neben den prozessbedingten Emissionen annehmen, dass (spätestens nach wenigen Durchläufen, zum Großteil allerdings nach einmaliger Nutzung) sämtlicher im Grundstoff wie später dann im Werkstoff enthaltener Kohlenstoff zu CO₂ umgewandelt wird.
- Durch die Diversität der einzelnen Werkstoffe und die Vielzahl der Akteure ist keine klare und verallgemeinerbare Governance-Struktur einer allgemeinen WSK für polymere Werkstoffe erkennbar. Gegenüber der Grundstoffchemie dürfte allerdings aufgrund der erhöhten Spezialisierung und des damit verbundenen Know-hows eine geringere Betonung der kundenseitigen Akteure vorliegen.
- In der Grundstoffchemie ist bei standardisierten Massenprodukten (wie z.B. Ethen) lediglich die Lieferung und der Endpreis für die Abnehmer relevant. Insofern sind die Hersteller dieser Produkte stark an preisgünstigen Produktionsoptionen interessiert. Insofern hat eine Verteuerung der Energie potenziell größere Auswirkungen auf diesen Sektor als auf die Herstellung von spezialisierten polymeren Werkstoffen.
- Da an integrierten Chemie-Verbundstandorten (zumeist durch Kohlekraftwerke, z.T. auch durch Gaskraftwerke) Energie auch betriebsintern bereitgestellt wird, sind hier die durch den ETS-Mechanismus anfallenden Kosten für THG-Emissionen ggf. von hervorzuhebender Bedeutung.
- Der Einfluss der Energiewende ist allerdings oftmals klein gegenüber zeitlichen Schwankungen in Rohstoffpreisen und Nachfrage – etwa durch die Wirtschaftskrise oder durch zeitweilig billiges Erdöl, aber auch durch z.. die Nachfrage nach Kohlefasern in der Luftfahrt- und Automobilindustrie.
- Der Aufbau einer Recycling-Infrastruktur für Faserverbundwerkstoffe würde zur Abfallvermeidung, Energieeffizienz und Versorgungssicherheit beitragen. Hierbei ist eine öffentliche Unterstützung angebracht.

6 Anlagenbau für die Erneuerbare Energiewirtschaft

In Deutschland wie auch weltweit besteht eine wachsende Nachfrage nach neuen Konzepten für die Bereitstellung von elektrischer Energie. Neben dem Altbestand an Kern- und Kohlekraftwerken existiert eine Reihe neuer und vergleichsweise effizienter Gaskraftwerke [10]. Diese sind aufgrund ihrer schnelleren Regelbarkeit kompatibler mit dezentralen Konzepten [17], wie sie im Anlagenbau für die erneuerbare Energiewirtschaft verstärkt zum Einsatz kommen.

Für NRW ist in diesem Bereich vor allem der stark wachsende Windenergiesektor von Relevanz. So wurde 2012 weltweit jedes dritte in einer Windkraftanlage eingesetzte Getriebe in NRW entwickelt [11], die gesamte Branche zeigt dabei großes Wachstumspotenzial [12-15].

Es bestehen große Unterschiede zwischen dem Zubau von in NRW betriebenen Anlagen zur erneuerbaren Energiegewinnung, und dem in NRW ansässigen Anlagenbau dieses Bereiches. Besonders deutlich ist dies bei der Photovoltaik, die zwar weiterhin sichtbare Zubauraten zeigt, allerdings wird dies vorwiegend durch importierte Solarmodule erreicht. Währenddessen steckt die in NRW ansässige PV-Industrie in größeren wirtschaftlichen Schwierigkeiten.

„Der Anteil der regenerativen Energieträger am PEV konnte um 0,45 Prozentpunkte auf 4,27% gesteigert werden. Insgesamt erhöhte sich die durch erneuerbare Energieträger gewonnene Energie um 10,3% gegenüber dem Vorjahr und stieg von 162 PJ auf 179 PJ. [...] Die Gewinnung von Primärenergie in Nordrhein-Westfalen stieg im Jahre 2012 um 45,3 PJ (1.546 kt SKE) auf 1.482 PJ (50,6 Mt SKE) (+3,2%)“ [74].

Abbildung 28 illustriert das starke Anwachsen der erneuerbaren Energieerzeugung, zeigt aber auch deren nach wie vor geringen Gesamtanteil. Mit 16,5 PJ im Jahr 2012 trug Windkraft hier allerdings erst einen geringen Teil zur Gesamtmenge bei. Mit 136 PJ dominierte die Energieerzeugung aus Biomasse [74]. Entsprechend ist von einem großen noch ungehobenen Potenzial für den Zubau an Windkraftanlagen auszugehen.

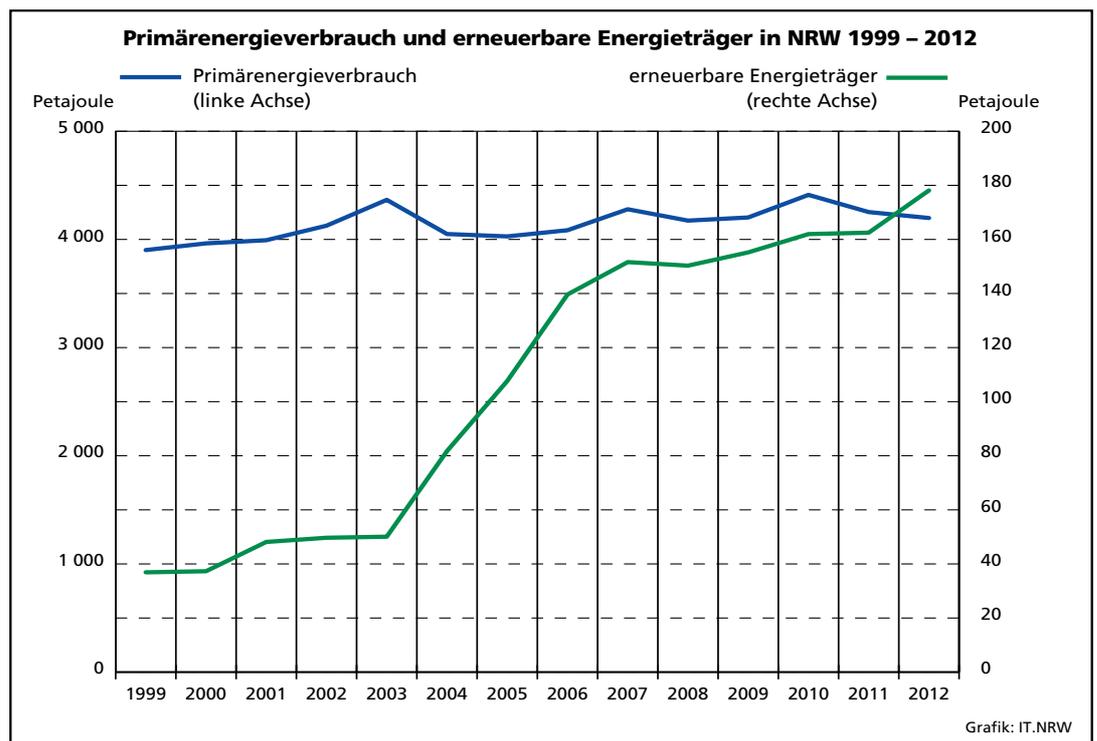


Abbildung 28: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der erneuerbaren Energieträger in NRW, aus [74].

In Deutschland wurden 2013 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von ca. 3.600 MW neu in Betrieb genommen, in NRW wurden ca. 110 WKA mit einer Gesamtleistung von 240 MW neu errichtet, gegenüber 164 MW im Jahr zuvor.

Insgesamt ist die regenerative Stromerzeugung in NRW (ohne Grubengas) im Vergleich zum Vorjahr 2012 um 6,5% auf 15 Mrd. kWh (2012: 14,1 Mrd. kWh) gestiegen, was ein geringerer Anstieg als im Vorjahr (+9%) ist. Für 2014 wurde für Deutschland von einem deutlichen Kapazitätsanstieg vor allem im Offshore-Bereich ausgegan-

gen, was für die Herstellung der für diese Anlagen benötigten Komponenten unmittelbare Auswirkungen hat. Durch die Anpassungen der energiepolitischen Rahmenbedingungen des EEG sind die Ausbautzahlen in den Bereichen Photovoltaik und Biogas allerdings seit dem Jahr 2013 deutlich rückläufig [77, S. 16, 34]. Abbildung 29 zeigt die anteilige Entwicklung der verschiedenen erneuerbaren Energieanlagen in NRW. Hinsichtlich des Anteils am Bruttostromverbrauch werden mittlerweile zweistellige Prozentwerte erreicht, das Ausbautempo in NRW hält derzeit mit dem Bundesdurchschnitt Schritt.

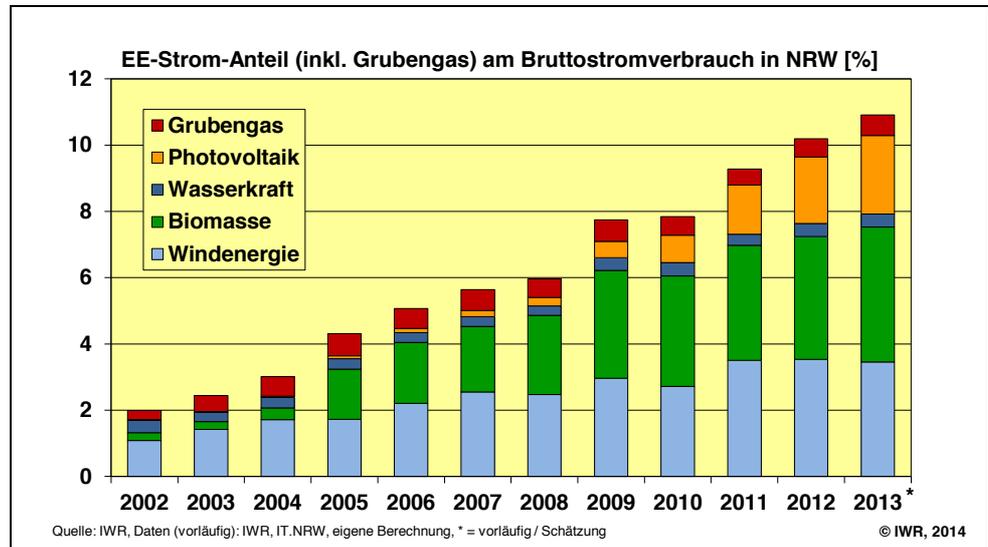


Abbildung 29: Entwicklung des regenerativen Strommixes + Grubengas in NRW, aus [77].

Hinsichtlich des Anteils am Bruttostromverbrauch werden mittlerweile zweistellige Prozentwerte erreicht, das Ausbautempo in NRW hält derzeit mit dem Bundesdurchschnitt Schritt.

6.1 EE-Unternehmen und Analyse der regenerativen Industriestrukturen am Standort NRW

Zentrale NRW-Unternehmen mit hoher Bedeutung als Innovations- und Kompetenzträger für die Weiterentwicklung des regenerativen Industrie- Standortes NRW sind:

- Hersteller von Komplettanlagen und Kernkomponenten
- Dienstleister, v.a. bzgl. Projektentwicklung und Planung
- Sowie NRW-Forschungs- und Kompetenzzentren als Schnittstellen zwischen Industrie und Forschung

216 NRW- Kernunternehmen des Regenerativen Anlagen- und Systembaus waren 2014 in NRW angesiedelt: 163 EE-Industrieunternehmen, sowie 53 zentrale NRW-Dienstleister. Ca. 25% der hier ansässigen Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sind im Windenergiesektor tätig, 18% im Bioenergie- und 13% im Geothermiesektor. In der Solarthermie, der Photovoltaik, im Bereich von Brennstoffzellen und Wasserstoff sind jeweils ca. 10% der Unternehmen tätig. Es sind in NRW sowohl international tätige Großunternehmen als auch kleine und mittlere Unternehmen zu finden: neben den auf den EE-Sektor ausgerichteten Abteilungen von Großkonzernen gibt es zahlreiche innovative Mittelständler [77, S. 156 ff], eine Übersicht der Standorte ist in Abbildung 30 gegeben. Insgesamt waren ca. 3.600 NRW-Unternehmen in der regenerativen Energiewirtschaft tätig [77, S. 161].

Der Anlagen - Bau und Betrieb erneuerbarer Energien zeichnet sich u.a. dahingehend aus, dass die Herstellung stark von Zwischenschritten in anderen Bundesländern abhängig ist, d.h. die Wertschöpfungskette (WSK) in NRW ist nicht sonderlich geschlossen.

Die Hersteller in anderen Bundesländern benötigen wiederum Vorleistungen aus NRW.

Nach dem Bundesbedarfsplangesetz sollen in NRW mehrere Freileitungen und Erdkabel für den Energietransport gebaut werden:

„Insgesamt ist nach den aktuellen Entwurfsplänen der ÜNB davon auszugehen, dass bis zum Jahr 2024 Netzverstärkungen und -optimierungen in vorhandenen Trassen auf einer Länge von rd. 6.000 km (Startnetz + Zubaunetz) vorgenommen werden sollen. Zusätzlich ergibt sich für den Ausbau des Netzes in neuen Trassen ein Bedarf von rd. 3.400 km. Demnach umfasst das Start- und Zubaunetz nach dem aktuellen Stand eine Gesamtlänge von fast 9.400 km (Stand: April 2014)“ [77, S. 125].

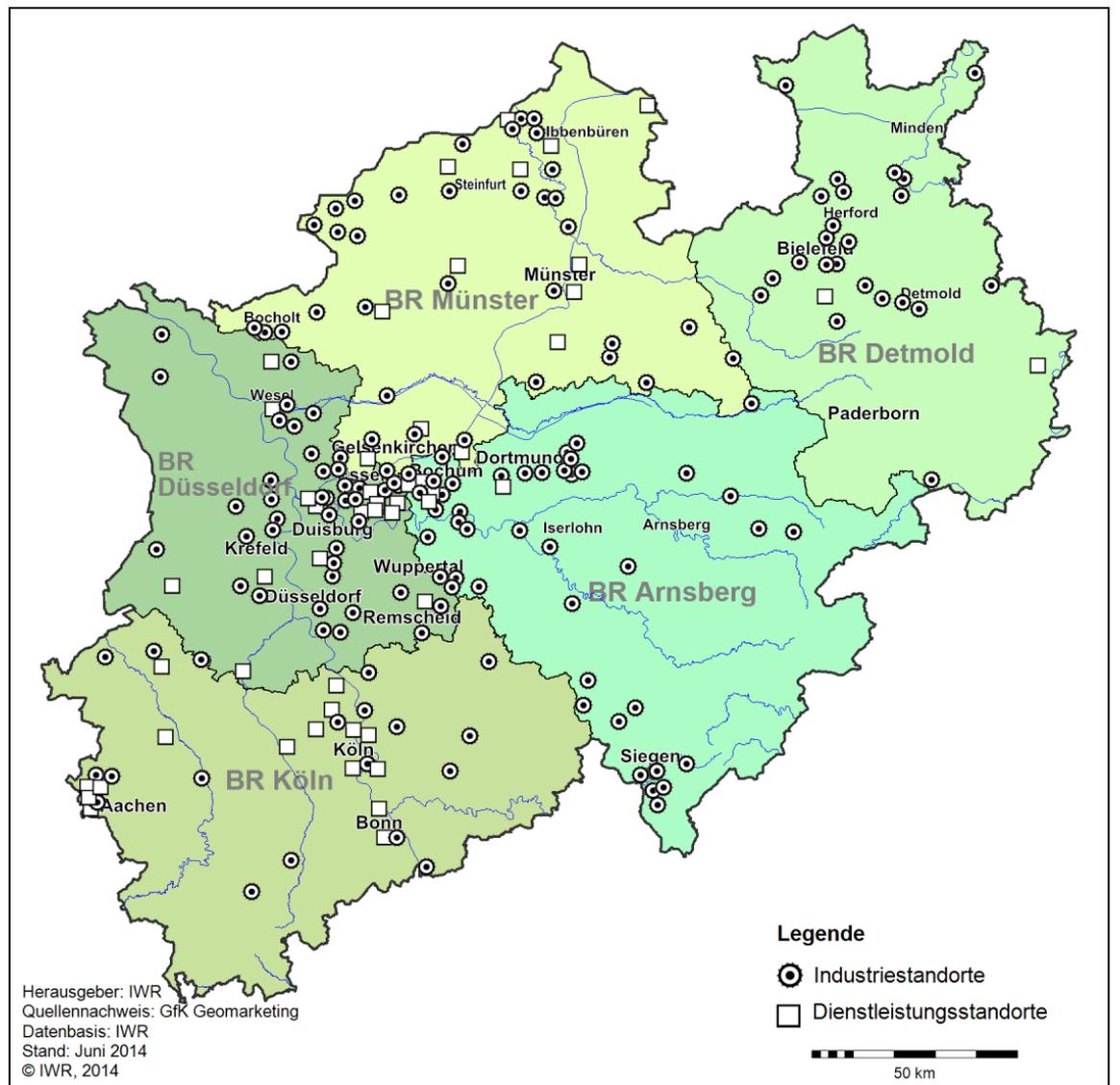


Abbildung 30: Industrie- und Dienstleistungsstandorte für regenerative Anlagentechniken in NRW, aus [77].

Die meisten dieser Leitungen dienen zur Anbindung von Offshore-Windparks, weitere sind auch für Onshore-Windparks und zur Vermeidung von Überlastungen und zur Verbindung der Übertragungsnetze zwischen Belgien und Deutschland geplant [77, S. 123]. Die Metallindustrie in NRW mit dem entsprechenden verarbeitenden Gewerbe ist auch hier von Bedeutung und ein potenzieller Profiteur.

Stagnation und Marktrückgänge hemmen die Entwicklung des regenerativen Industriestandortes NRW, insbesondere im Solarenergiesektor (aufgrund von Insolvenzen und der Umstrukturierung von Geschäftsfeldern) erfolgt ein weiterer Bedeutungsverlust des Standortes NRW [77, S. 155 ff], Rückgänge auf dem nationalen PV-Markt konnten nicht durch zusätzliche Exportaktivitäten kompensiert werden. Dies ist auch in der in Abbildung 32 dargestellten Entwicklung der Beschäftigten zahlen und der Umsätze über die vergangenen Jahre zu erkennen.

Energiesparte		2010		2011		2012		2013*		Trend	
Beschäftigte	Umsatz in Mio.€	#	Mio.€	#	Mio.€	#	Mio.€	#	Mio.€	#	€
Windenergie		7.229	1.947	8.151	2.084	8.599	2.281	8.577	2.238	+	+
Solarenergie (Photovoltaik, Solarthermie und Solararchitektur)		7.626	4.147	7.894	4.070	6.836	2.668	5.344	1.916	- -	- -
Bioenergie		3.575	961	3.846	1.181	4.089	1.133	3.833	1.065	≈	≈
Querschnitts-Dienstleister (Wind, Solar, Wasser, Bio etc.)		2.351	365	2.449	378	2.655	416	2.554	405	≈	+
Sonstige Installationsbetriebe		2.391	444	2.430	433	2.523	450	2.253	405	≈	≈
Geoenergie		1.544	224	1.617	279	1.490	253	1.442	254	-	≈
Brennstoffzelle		875	16	866	18	917	22	862	21	≈	+
KWK		709	216	805	249	894	276	1.078	286	+	+
Wasserkraft		168	17	163	16	188	16	176	15	≈	≈
Gesamt		26.470	8.337	28.220	8.708	28.190	7.515	26.120	6.606	≈/-	- -

Abbildung 31: Die NRW-Beschäftigung und Umsätze im Regenerativen Anlagen- und Systembau, nach [77].
* = vorläufig.

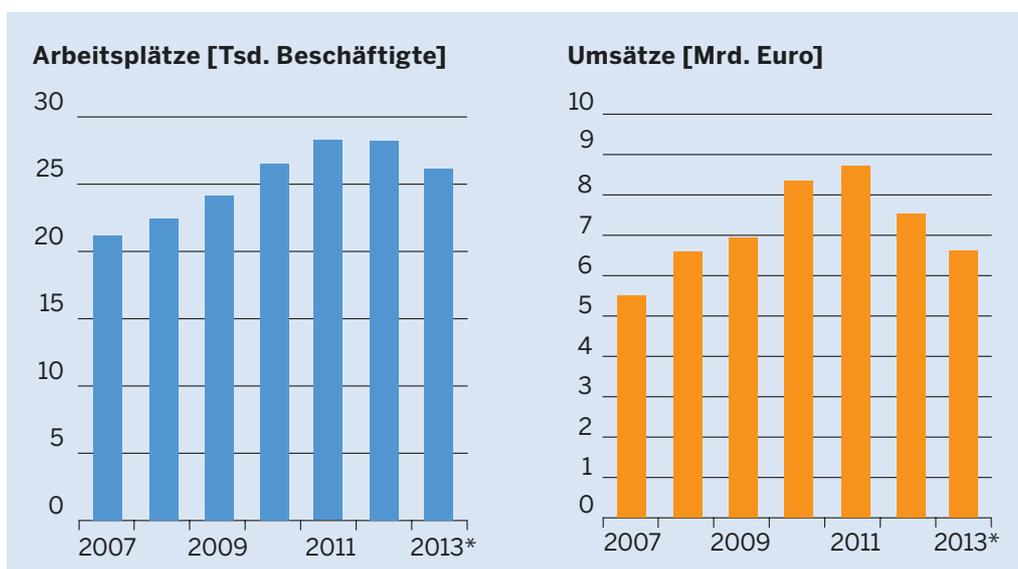


Abbildung 32: Regenerativer Anlagen- und Systembau in NRW, aus [85]. * = vorläufig.

Beschäftigte u. Betriebe in der betrachteten Branche

(Die Werkstoff-verarbeitende Industrie in NRW hat insg. 726.000 Arbeitsplätze [16], Potenzial für Transformation/Umstellung auf andere Materialien interessant zu betrachten; Chemische Industrie mit ca. 50 Mrd. € Umsatz und über 100.000 Beschäftigten in NRW [8, S. 75].)

2014: 216 NRW- Kernunternehmen des Regenerativen Anlagen- und Systembaus: 163 EE-Industrieunternehmen, sowie 53 zentrale NRW-Dienstleister [77].
 25% davon im Windenergiesektor, 18% im Bioenergiesektor, 13% im Geothermiesektor, jeweils 10% in der Solarthermie, der Photovoltaik, im Bereich von Brennstoffzellen und Wasserstoff. Details in Abbildung 31.
 Insgesamt waren in 2014 ca. 3.600 NRW-Unternehmen im EE-Bereich tätig [77, S. 161]
26.120 Beschäftigte in 2013 in der gesamten EE-Branche in NRW [77], keine klare Tendenz erkennbar.
 8.577 [77] Beschäftigte im Windenergiesektor in 2013 in NRW (je nach Datenquelle 8.599 [77] oder 9.208 [90] Beschäftigte in 2012), mit steigender Tendenz.
 Einschließlich induzierter Konsumeffekte 14.000 Beschäftigte in 2012 [90].

Umsatz (€)

(im Verhältnis zu anderen Branchen bzw. WSK)

Mit einem Gesamtumsatz von 6-8 Milliarden € [77] in relevanter Größe gegenüber. z.B. der Eisen- und Stahlindustrie in NRW mit etwas über 13 Milliarden € [82, 83], jedoch derzeit mit fallender Tendenz.
 Windenergiesektor mit ca. 2,2 Milliarden € größter und am stärksten wachsender Sektor [77].

Gesamtenergieverbrauch (kWh), bzw. auch Energieoutput

179 PJ erneuerbare Energieerzeugung in 2012 in NRW
 (sämtliche Industrie verbraucht 39% der Endenergie in NRW – 267 GWh von 580 GWh [8])

THG-Emissionen (kgCO_{2eq}), ggf. Emissionsintensität (kgCO_{2eq} / €)

9 g CO₂/kWh bei WKA von 1,8-2 MW [86]
 19% der THG-Emissionen in NRW in 2012 waren direkte Industrieemissionen (53,5 Mt CO_{2eq} von 289 Mt CO_{2eq})

Zeitliche Trends (n.M. über 5 Jahre) [1, S. 53],
 um langfristige Bedeutung der einzelnen WSK zu analysieren und relevante WSKs auszuwählen

Beschäftigungsentwicklung (-7%) bei den 3.600 EE-Unternehmen NRWs (ohne Service und Betrieb) 2013 erstmals negativ seit 2005. Umsatz (-12%) zum zweiten Mal in Folge rückläufig. Windenergiebranche dabei weitgehend stabil, v.a. durch Offshore-Ausbau mit weiter steigendem Umsatz.
 Nach einer IWR-Prognose von 2009 kann die Anzahl der Beschäftigten im EE-Anlagen- und Systembau in NRW im Jahr 2020 zwischen 30.000 und 45.000 liegen [77, S. 166]. Durch die Abwandlung des EEG seit 2012 liegt der reale Trend mittlerweile deutlich darunter.

Energie- und Kapitalintensität pro materiellem Output (Energiebedarf / Produktionseinheit)

Energetische Amortisationszeit Onshore < 8 Monate, Offshore 8-9 Monate.
 Investitionen von **900-1500 €/kW** installierter Leistung notwendig.

Materialverbrauch (Material-Impact, MI) bzw. „ökologischer Rucksack“, um Fokus nicht ausschließlich auf THG zu verengen [23].

Hoher Bedarf an Zement und Stahl, sowie von Kupfer und in zunehmendem Maß von Kohlefasern (für die Rotoren) und seltenen Erden (für Permanentmagnete)

6.2 Anlagenbau für den Windenergiesektor

Dieser Bereich entwickelt sich weitgehend stabil, und zeigt weiterhin Wachstumspotenzial.

NRW beheimatet mehrere weltweit führende Getriebehersteller, sowie international tätige Hersteller von Kupplungen, Lagern, Bremsen und Gussteilen. Zulieferunternehmen für den Windenergiesektor bilden daher die größte industrielle Gruppe [77, S. 157]. Traditionell ist viel Knowhow bzgl. WKA in Europa beheimatet. So waren 2005 72% der Zulieferer und Hersteller in Europa lokalisiert, während auf die USA noch 18% und auf Asien lediglich 10% einfielen [103]. Dieses Bild hat sich durch eine verstärkte Aktivität sowohl in Amerika als auch in Asien (v.a. China) im Lauf der letzten zehn Jahre stark gewandelt. Dennoch können sich die in NRW befindlichen Unternehmen hier auch im internationalen Konzert zumeist gut platzieren. Durch den anwachsenden Markt von Offshore-WKAs werden zudem neue Komponenten wie spezielle Kransysteme, Komponenten und Materialien für Gründungsstrukturen und Offshore-Großtransformatoren bzw. –Umspannwerke nachgefragt, die auch wiederum von NRW-Unternehmen gefertigt werden können. Hierdurch hat sich in NRW ein weiteres Geschäftsfeld aufgetan. Hersteller bzw. Endfertiger von Groß-WKAs sind in NRW dagegen kaum vorhanden. Der Dienstleistungssektor profitiert bzgl. der Planung, Projektierung und Umsetzung von Offshore-Windparks [77, S. 157].

Durch die Wirtschaftskrise und damit verbundene Auftragsrückgänge besteht abgesehen vom Offshore-Bereich ein sehr geringer Bedarf bzgl. des weiteren Ausbaus von Produktionskapazitäten. Der durch politische Entscheidungen verursachte, 20%ige Rückgang des WKA-Zubaus in den USA im Jahr 2013 macht sich hierbei auch unmittelbar bemerkbar. Der Aufbau von Windenergieanlagen bzw. –parks in Deutschland erbrachte in 2012 einen Beitrag von 3,3 Milliarden € zur heimischen Wertschöpfung¹³.

Es ist eher eine Marktkonsolidierung durch Verdrängung, Zusammenschlüsse, Joint Ventures und das Gründen von Vertriebsniederlassungen im Ausland zu beobachten [77, S. 158]. Die Beschäftigtenzahlen sind dabei rückläufig.

Die in der jüngsten EEG-Novellierung vorgesehenen Veränderungen, fort von festen Abnahmemengen und Vergütungen und mit einem veränderten Ausschreibungsprozedere, das eine Deckelung der jeweils neu installierten Gesamtleistung vorsieht, verändert die Planung und den Zubau. Zukünftig dürfte der Zubau deutlich geringer ausfallen.

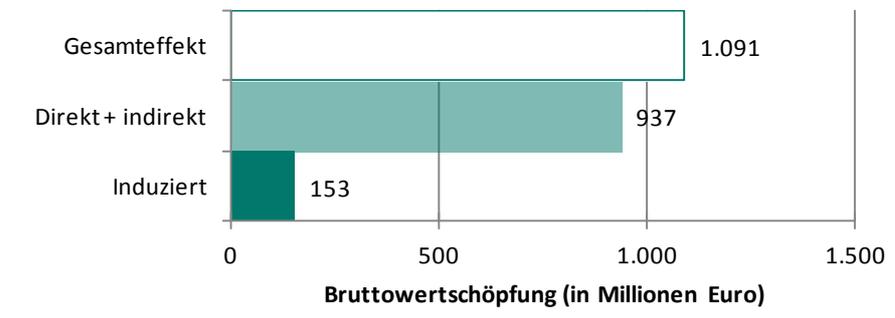


Abbildung 33: Effekte der Windenergie auf die Bruttowertschöpfung in NRW (2012, Millionen Euro), aus [90].

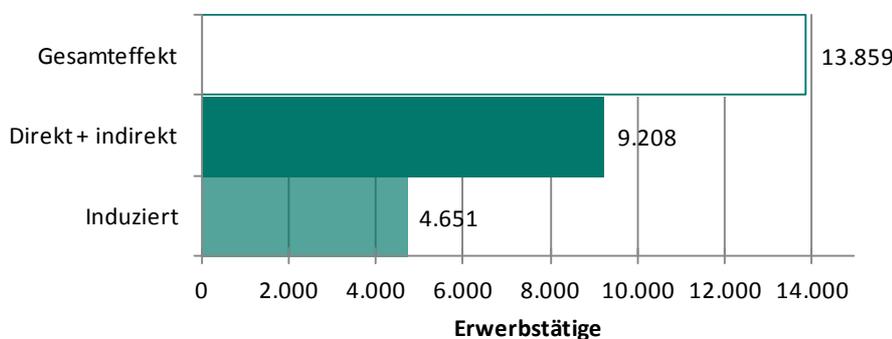


Abbildung 34: Effekte der Windenergie auf die Beschäftigtenzahl in NRW (2012), aus [90].

In NRW trug der Windenergiesektor 2012 mit knapp 1,1 Milliarden € zur Bruttowertschöpfung bei (siehe Abbildung 33), wodurch öffentliche Einnahmen in Höhe von 307 Millionen € generiert wurden. Im gleichen Jahr waren 9.200 Beschäftigte direkt oder indirekt in der Windenergiebranche tätig, hinzu kommen induzierte Konsumeffekte (s. Abbildung 34) [90].

¹³ “Branchenangaben zufolge liegt der Importanteil insgesamt bei knapp 13%. Der Abzug dieses Anteils führt zu einem um Importe korrigierten, im Inland wirksamen Gesamtinvestitionsvolumen von knapp 3,3 Milliarden Euro“ [90].

In NRW waren Ende 2013 etwa 3.000 WKA mit einer Gesamtleistung von ca. 3.420 MW installiert, NRW liegt damit im Vergleich der Bundesländer an fünfter Stelle [77, S. 41; 79]. Hierbei ist der Großteil der installierten Leistung in den dünn besiedelten und windbegünstigten Kreisen gelegen (u.a. in den Höhenlagen des Haarrstrangs und des Eggebirges), während die dichtbesiedelten und viel Energie verlangenden Kreise des Ruhrgebiets und des Rheinlands nur eine geringe Anzahl an WKA aufweisen [77, S. 42].

Zur Erreichung des NRW-Landesziels von 15% Windstromanteil bis 2020 wird u.a. auf „Repowering“ gesetzt, was ein subventioniertes Ersetzen von Altanlagen durch neue, leistungsfähigere Anlagen bedeutet. Es wird davon ausgegangen, dass auch mit diesem Ansatz WKA ein Betriebsalter von 15 Jahren erreichen [77, S. 43].

6.2.1 Rahmung der WKA-Wertschöpfungskette

Zur Eingrenzung der WSK für den Windkraft-Anlagenbau wird die Fertigung, Errichtung und der Betrieb der WKA betrachtet. Der Vertrieb der gewonnenen elektrischen Energie bleibt außen vor. Die Endkunden in dieser Betrachtung sind somit die Anlagenbetreiber.

Die Wertschöpfungskette der Windenergie beinhaltet mehr als die Fertigung der WKA¹⁴ und erstreckt sich über die in Abbildung 35 dargestellten und nachfolgend beschriebenen sechs Felder [75]:



Abbildung 35: Wertschöpfungskette in der Windenergie, nach [75].

1. Industrielle Herstellung und Fertigung – ca. 84% des gesamten Primärenergiebedarfs der WKA [86]

(a) Windkraftanlagen-Hersteller

- international agierende Unternehmen
- bedienen zumeist sowohl On- als auch Offshore-Markt (einzelne auch auf Offshore spezialisiert)
- z.T. zu Industriekonzernen gehörig, die neben On- und Offshore-Windenergieanlagen auch konventionelle Energieerzeugungsanlagen anbieten

(b) Zulieferer und Komponentenhersteller

- ein zentraler Teil der WSK
- insbesondere Unternehmen aus Stahlbau, Maschinenbau und Elektrotechnik (s. u.a. [76])
- bedeutend: Hersteller von Großkomponenten wie Getriebe, Gründungsstrukturen und Türmen sowie Teile und Komponenten des Antriebsstrangs, Rotorblättern und Kabeln

2. Planung und Projektierung

- oft von spezialisierten Planungs- und Projektierungsgesellschaften übernommen
- Aufgaben: Standortwahl, Einhaltung der Raumordnungsvorgaben, Analyse der windklimatologischen Verhältnisse am geplanten Standort, Auswahl der Anlagenkonfiguration, die Umsetzung des Genehmigungsverfahrens, Bau, und die Übergabe des Windparks an den Betreiber/Investor
- oft unter Beteiligung weiterer spezialisierter Dienstleistungsunternehmen, z.B. für die ökologischen Begleituntersuchungen oder die Analyse der Windverhältnisse

3. Finanzierung und Versicherung

(a) Banken und Finanzinstitute

- Projekte i.d.R. im Rahmen von Projektkonsortien realisiert (aufgrund der hohen Investitionskosten von Windparks)

¹⁴ „Die Gesamtinvestitionskosten je MW Windenergieleistung lassen sich in Hauptinvestitions- und Investitionsnebenkosten aufgliedern. Die Hauptinvestitionskosten beinhalten die Kosten für die gesamte Windenergieanlage, Transport und Installation. In den Investitionsnebenkosten sind die Posten Planung, Netzanbindung, Fundament, Erschließung und sonstige Investitionsnebenkosten enthalten“ [90].

- Kreditfinanzierung durch Privatbanken oder öffentliche Banken (z.B. die staatliche Förderbank KfW, oder die Europäische Investitionsbank)
- oft Großkonzerne, Bankenkooperationen oder Stadtwerke als Investorengruppen
- Beteiligung kleinerer Unternehmen und privater Geldgeber z.B. über den Kauf von Anleihen zum Kapitalaufbau
- kleinere Windparks oder Einzelanlagen durch genossenschaftliches Bürgerengagement

(b) Versicherungsgesellschaften

- Risikomanagement v.a. bei Offshore-Windkraftanlagen wegen der hohen Investitionssummen relevant, vielfältige Risiken, von der Baugrunduntersuchung über den Transport bis zur Inbetriebnahme eines Windparks.

4. Errichtung und Wartung – ca. 7% des gesamten Primärenergiebedarfs der WKA [86]

(a) Transport- und Logistikunternehmen

- bedeutsam v.a. wegen Transport von Großkomponenten
- Schiffswerften für Spezialschiffe wie Errichter- und Transportschiffe für den Bau von Offshore-Windparks benötigt

(b) Bauunternehmen

- Errichtung der Anlagen und Verlegung der Kabel durch spezialisierte Bauunternehmen
- oft mehrere Unternehmen in Projekt-Arbeitsgemeinschaften beteiligt

(c) Windservice- & Wartungsunternehmen

- Wartung durch Anlagen-Hersteller oder externe Dienstleistungsunternehmen
- Gründungsstrukturen und Rotorblätter bei Offshore-Windenergie besonders wartungsintensiv

5. Zertifizierung und Prüfung

- Dienstleistungen unabhängiger Zertifizierungs- und Prüfinstitute

6. Betrieb von Windparks – ca. 5,5 % des gesamten Primärenergiebedarfs der WKA

(4,3 Wartung, 1,2% Betrieb) [86]

- Einzelbetreiber, Genossenschaften, Projektierungsgesellschaften, einzelne Kommunalversorger, große Stromversorger oder Stadtwerke-Verbände

Als 7. Schritt ließe sich zudem noch die Demontage einschließlich des Recyclings oder Repowerings anführen. Dieser Bereich ist derzeit weitestgehend noch im Entstehen begriffen.

Abbildung 36 gibt einen Überblick über die Struktur der Stromgestehungskosten. Seit dem Beginn der kommerziellen Windenergietechnologie vor drei Jahrzehnten sind die Kosten deutlich gesunken, allerdings seit der Mitte der Dekade wieder gestiegen [87, S. 40].

Die Kosten der erneuerbaren Energien und insbesondere der Windenergie (mit 0,065-0,081 €/kWh) nähern sich der konventionellen, mittels der Nicht-Berücksichtigung großer Externalitätskosten verdeckt subventionierten, Stromerzeugungstechnologien (0,06-0,07 €/kWh) an [87, S. 40].

Der Großteil (ca. 73%) der Kapitalkosten einer WKA fällt für die Beschaffung und Montage der Turbine (einschließlich Rotor) an. Vom restlichen Teil entfallen 8% auf den Netzanschluss, 6% auf das Fundament, 5% auf die elektrische Installation, 2% auf die Pacht, jeweils 2% auf Infrastruktur und Planung und 1% auf die Finanzkosten. Bei Offshore-Anlagen kann der Anteil für Fundament und Netzanschluss je nach Bedingungen nochmals deutlich höher liegen [87, S. 41].

Der Preis einer WKA ist eng mit den Rohstoffpreisen (v.a. dem Stahlpreis, aber auch z.B. dem Preis für Kohlefasern und Kupfer) verknüpft, da über die Hälfte der Turbinenkosten Materialkosten und nur zu ca. 30% Arbeitskosten sind. Als Investitionskosten muss von 900 bis 1500€ je KW installierter Leistung ausgegangen werden [87, S. 41].

Im Gegensatz zum großen Volumen des weltweiten Stahlumsatzes, in dem der Bedarf für WKAs lediglich einen geringfügigen Teil ausmacht, wird ein substanzieller Anteil der weltweiten Kohlefaserproduktion für WKA-Rotoren verwendet. Damit beeinflusst der WKA-Markt auch rückwirkend den Markt für Kohlefasern, es besteht eine wechselseitige Abhängigkeit - was bei Stahl dagegen nicht der Fall ist [87, S. 41].

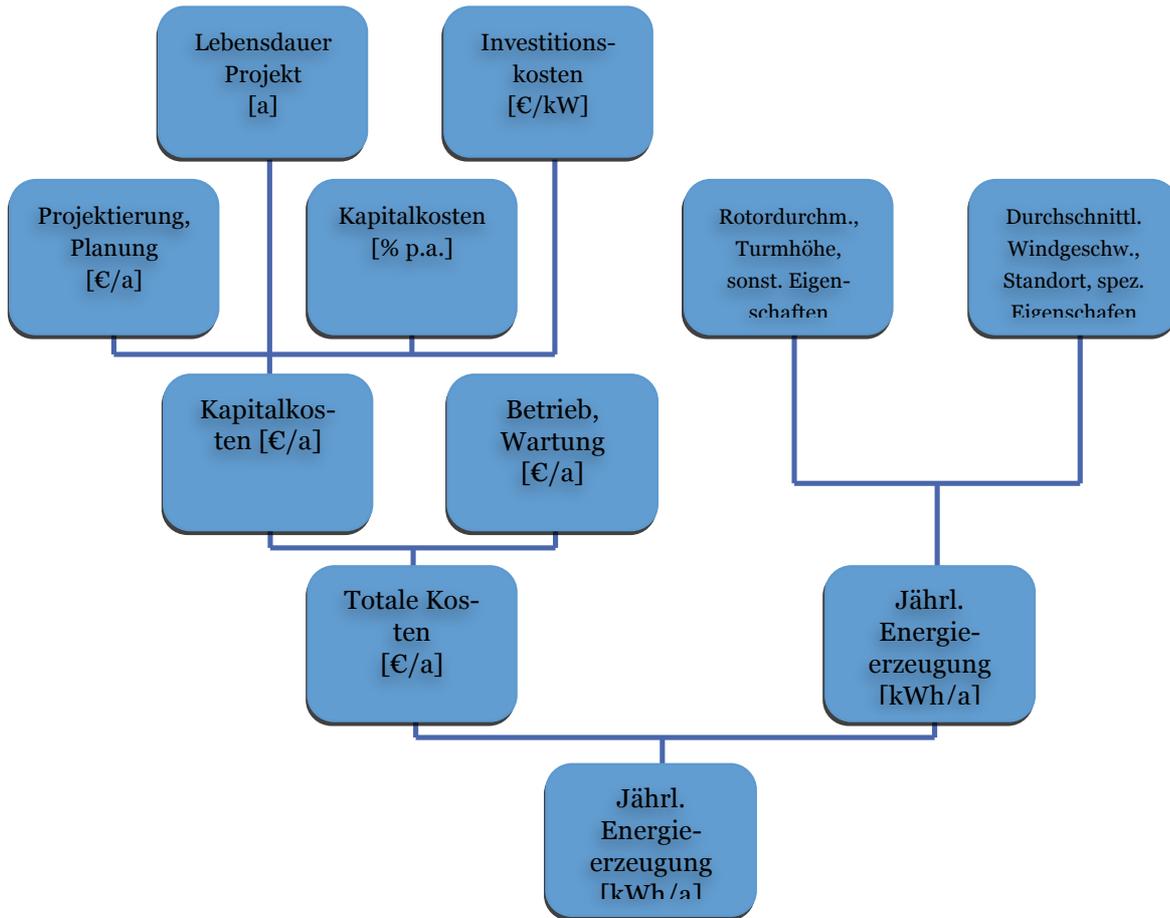


Abbildung 36: Kostenstruktur der Stromgestehungskosten bei der Windenergie , nach [87, S. 40].

Abbildung 37 zeigt eine schematische Darstellung der WSK nach Porter, die für ein unternehmensübergreifendes Erfassen der WSK dienlich ist. Solch eine Betrachtung ist partial- und nicht einzelwirtschaftlich angelegt. Aus dieser Perspektive braucht nicht zwischen supply chain und Wertschöpfungskette (value chain) unterschieden werden, da in die Lieferkette alle Schritte von den Teilleferanten bis zum fertigen Produkt einbezogen werden. Insofern ist diese Darstellung übersetzbar in die Darstellung in Abbildung 36.

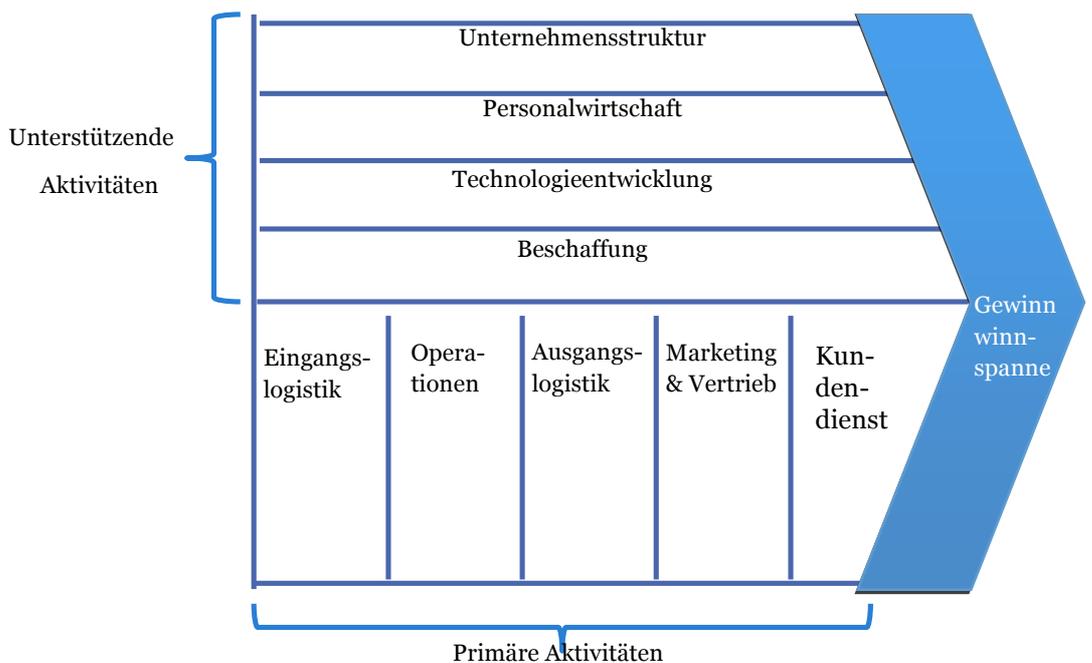


Abbildung 37: Innerbetriebliche Wertkette nach Porter, aus [87, S. 46].

Für die Rahmung der direkten Wertschöpfungskette wird als Windenergiebranche im engeren Sinn die Gruppe von Unternehmen verstanden, die als OEM in der WSK einer WKA tätig sind. Im weiteren Sinn zählen auch die Zuliefernden Unternehmen aus der direkt produktbezogenen WSK dazu [87, S. 48] – diese Betrachtung liegt im Folgenden der Analyse zugrunde. Hierbei ist zu beachten, dass die Branchenabgrenzung für die WKA-Herstellung nicht deckungsgleich mit traditionellen Branchendefinitionen wie z.B. dem Maschinenbau ist. Viele heutige Zuliefererunternehmen für WKA-Komponenten oder grundlegende Materialien bzw. Serviceleistungen haben ursprünglich andere Branchen beliefert. Dies stellt eine Herausforderung an offizielle Statistiken.

Die Zulieferer sind, wie in diesem Schema erkennbar, sowohl vom Markt bzw. der Endkundennachfrage als auch vom OEM abhängig, was ein inhärentes Problem für die Zulieferer darstellt. Zuliefererstrategien können entweder darin bestehen, einen kleinen stark spezialisierten Nischenmarkt zu bedienen und in diesem durch ihre Expertise eine bestimmende Rolle einzunehmen, oder aber Volumenmärkte zu bedienen. Im ersteren Fall ist ein hohes Maß an (technischem) Knowhow erforderlich, das Unternehmen steht unter konstantem Entwicklungsdruck, entwickelt aber auch mit größerer Wahrscheinlichkeit eine intensive Kooperation und eine wechselseitige Abhängigkeit mit dem OEM bzw. zumindest mit einem nachgestellten Zulieferer (weiter oben in der Pyramide). Die eröffnet zugleich Vorteile durch die abgesichertere Stellung innerhalb der WSK, als auch eine Einschränkung, da der Zulieferer dann weniger in der Lage ist seine Kunden zu wechseln [87, S. 48]. OEMs dagegen neigen dazu, sich divers aufzustellen und nach Möglichkeit mehrere Zulieferer für gleichwertige Komponenten zu haben. Dies dient ihnen zugleich zur Versorgungssicherung und zur Stärkung der eigenen Verhandlungsposition. Entsprechend ist es auch für Zulieferer ratsam, stets mehr als einen Kunden (höhergestellten Zulieferer oder OEM) zu beliefern. Im letzteren Fall dagegen werden Massenerzeugnisse gefertigt, die einen vergleichsweise geringen Komplexitätsgrad aufweisen und aufgrund der geringeren Markteintrittsbarrieren einem höheren Konkurrenz- und Kostendruck ausgesetzt sind. Die Bindung zwischen Zulieferer und Abnehmer ist weniger stark ausgeprägt, es können sich aber auch leichter Überkapazitäten ausbilden.

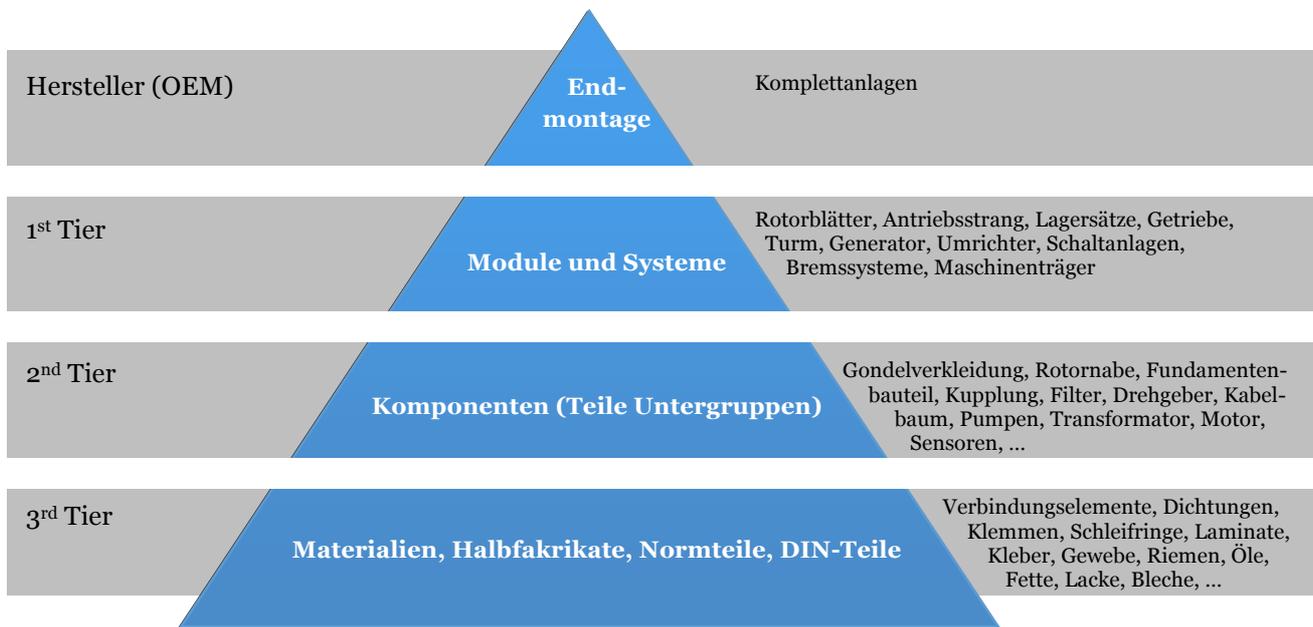


Abbildung 38: Direkte Wertschöpfungskette einer WKA, aus [87, S. 47+52].

Durch Wertkettenverkürzung (Outsourcing / Desinvestment / Konzentration auf das eigene, profitable Kerngeschäft) bzw. Wertkettenverlängerung (Aufbau eigener Produktionsanlagen für Grundkomponenten / Aufkauf von Zulieferern) kann das Gewicht innerhalb der WSK verschoben werden.

Die in Abbildung 38 dargestellte Anlagenproduktion stellt der Schritt 1 der umfassenderen, in Abbildung 35 skizzierten WSK der Energieerzeugung mittels WKAs dar. Für die Teilmärkte Onshore, Offshore, Repowering und Kleinwindanlagen kann dieses Schema jeweils zurate gezogen werden, wobei sich die Gewichtung jeweils verschiebt. Für Offshore-Anlagen etwa nimmt der Bereich Transport und Montage und der Bereich Netzanbindung

einen bedeutend größeren Anteil ein – weshalb der Offshore-Bereich zuweilen auch als separate Branche von den verschiedenen Onshore-Bereichen betrachtet wird [87, S. 53].

Für NRW ist die Windenergiebranche aufgrund der großen Bedeutung von mittelständischen Unternehmen besonders interessant. In der WSK für WKA sind eine große Anzahl von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) und auch sogenannte „mittelständische Weltmarktführer“ (MWF) vertreten [87, und auch 67, S. 262 ff]. Deren Tätigkeiten erstrecken sich über Zulieferung von Grundstoffen, Einzelkomponenten und Anlagenteilen (Beton, Getriebekomponenten, ...), über die Standortanalyse und Planung bis hin zum Bereich der Wartung (z.B. Reparatur von Rotorblättern) und des Rückbaus von Anlagen.

Die Windbranche 2013 bot in Deutschland 137.800 Beschäftigten Arbeit, insgesamt bestanden 2013 371.000 Stellen in der Branche der erneuerbaren Energien [67, S. 262]

6.2.2 Aufschlüsselung der wesentlichen Komponenten

Eine Übersicht über die Kostenzusammensetzung einer exemplarischen Turbine ist in Abbildung 39 gegeben. 20-25% der Gesamtkosten für den Bau einer WKA entfallen auf den Rotor. Dieser ist entsprechend ein wichtiges Feld für Materialeffizienz und polymere Faserverbundwerkstoffe (deren Recycling derzeit jedoch sehr unzureichend erfolgt - der Polymeranteil wird i.d.R. verbrannt). Die materialsparende und Energieausbeute-steigernde Optimierung des Rotordesigns ist damit ein wichtiger Entwicklungsbereich [87 S. 30].

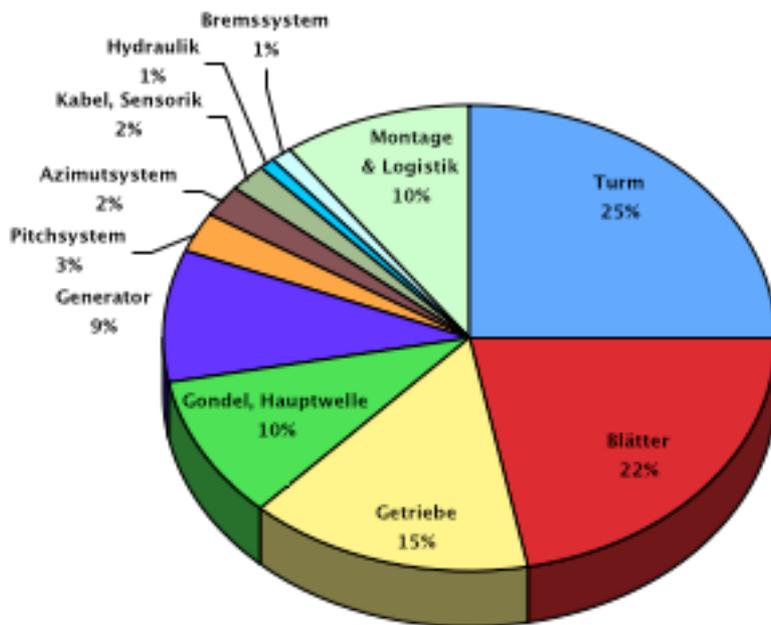


Abbildung 39: Verteilung der Turbinenkosten (ex works) nach Komponenten, nach [87, S. 41].

noch mit 25% knapp dahinter lag. Durch die fortlaufend größeren Bauformen dürfte sich dies mittlerweile deutlich gewandelt haben und der Rotor ist zur ökonomisch bedeutendsten Komponente aufgestiegen [105]. Entsprechend nimmt der Anteil der chemischen Industrie an der WKA-Wertschöpfung zu, während der relative Anteil des Maschinen- und Getriebebaus leicht zurückgeht.

Es besteht ein fortdauernder Trend zu immer größeren WKA-Konstruktionen. Die Rotorblätter werden dabei immer länger, ebenso entsteht ein erhöhter Bedarf an sogenannten intelligenten Rotorblättern. All dies erhöht den Anspruch an die verwendeten Materialien und Strukturen [103]. In den nächsten 3-7 Jahren ist zu erwarten, dass die WKA-Größe auf eine Leistung von 8-10 MW ansteigt, wozu Rotordurchmesser von 170-180 m erforderlich sein werden [108].

Den materialintensivsten Teil einer WKA bilden Turm und Gründungsfundament. Je nach Konstruktion besteht der Turm entweder aus Stahl, Beton, oder einer Kombination beider Bauformen. „Die Turmhöhe beträgt bei netzeinspeisenden Anlagen ca. das ein- bis 1,8-fache des Rotordurchmessers und kann mehrere hundert Tonnen schwer sein“ [89]. Sowohl der Turm¹⁵ wie auch das Fundament¹⁶ können dabei jeweils einen Materialaufwand von über 750 t erreichen.

Bezüglich der Wertschöpfung entfiel 2006 noch der größte Anteil mit 30% auf den Antriebstrang, während der Rotor

¹⁵ Je nach Quelle gehen die Angaben auseinander. Während zum einen für Onshore-Türme von 60 bis 120 m ein Gewicht von 60 bis 250 t angegeben wird [88], geben andere Quellen an, dass „ein 120 m hoher Stahlturm mit einem unteren Durchmesser von 5,5 m [...] immerhin ein Gewicht von 750 t [erreicht]“ [88, S. 259].

¹⁶ „Das Fundament für eine 1,5 MW [Onshore-]Windkraftanlage ist ca. 14 bis 16 Meter lang, zwei bis drei Meter tief, und ca. 750 Tonnen schwer“ [89].

Mit der weiter anwachsenden WKA Größe nehmen die mechanischen Belastungen weiter zu. Die länger werdenden Rotorblätter werden überproportional schwerer (s. Abbildung 40), weshalb fortwährend neue Fertigungstechniken entwickelt werden müssen. Die steigenden Anforderungen an die in den WKA-Rotorblättern verwendeten Materialien lassen sich in drei Kriterien zusammenfassen [103]:

- hohe Materialsteifigkeit, um optimale aerodynamische Eigenschaften sicherzustellen
- geringe Dichte ρ , um die gravitativ und zentrifugal hervorgerufene Belastung im Bauteil zu reduzieren
- geringe Materialermüdung zur Gewährleistung einer langen Lebensdauer.

Eine mögliche Strategie für die Realisierung derartiger Strukturen ist die Sandwichbauweise, bei der anstatt einer monolithischen Verbundlaminate mehrerer unterschiedliche faserverstärkte Kunststoffschichten übereinandergelegt werden [108]. Eine derartige Sandwichbauweise stellt wiederum erhöhte Anforderungen an Demontage und Recycling.

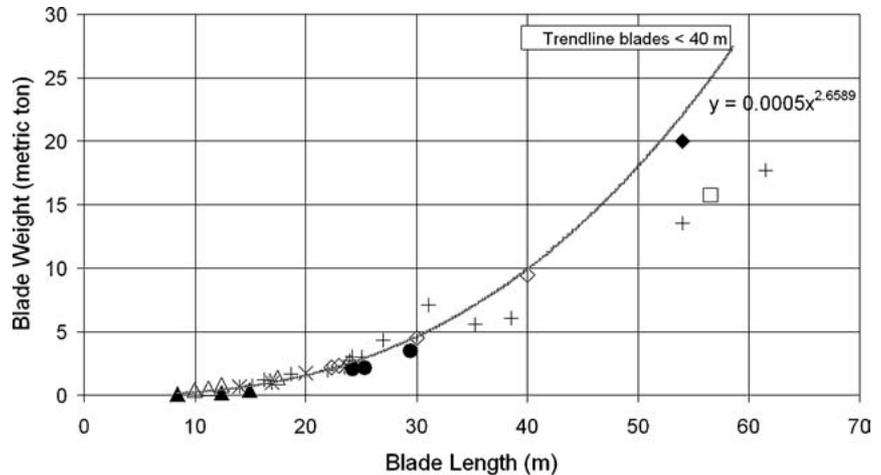


Abbildung 40: Entwicklung des Gewichts der Rotorblätter gegenüber ihrer Länge. Die Symbole repräsentieren verschiedene Hersteller und Produktionstechniken [103].

Neben der strukturellen Eigenschaften ist auch die Oberflächenbeschaffenheit der Rotorblätter von Bedeutung. Spezielle Oberflächenbeschichtungen dienen dazu, die Lebensdauer und Performance der WKA auch unter widrigen Umweltbedingungen zu gewährleisten bzw. zu erhöhen. Während in den kalten nordischen Regionen vor Vereisung ein Problem darstellt, stellen in den warm-feuchten subtropischen Regionen Insektenkollisionen und das dadurch auf den Rotorfronten akkumulierte organische Material aufgrund des dann ablaufenden „Fouling“ ein potenzielles Problem dar, das zur Zerstörung der Rotoroberfläche führen kann. In ariden Regionen mit trocken-heißem Klima können durch hohe Winde Partikel wie z.B. feine Sandkörner die Oberfläche der Rotorblätter abschleifen. Derzeitige Lösungen gegen Vereisung oder Insekten-Fouling beruhen zumeist darauf, einen Teil der WKA-Leistung zum Anlagenschutz abzuziehen oder die WKA anzuhalten. Spezielle Oberflächenbeschichtungen können hier potenziell Abhilfe schaffen und die Energieausbeute erhöhen [104].

Zur optimalen Steuerung einer modernen WKA wird aufwändige Regelungstechnik verwendet. Diese besteht aus einem Pitchsystem für die Einstellung der Rotorblätter, z.T. einer Stallregelung, um die Rotorblattnase zur Glättung der Leistungsaufnahme in oder aus dem Wind zu drehen, redundant ausgeführter Steuerungselektronik, und Bremssystemen [87, S. 30 ff.]. Die Entwicklung von Monitoring Systemen wurde stark durch die Anforderungen deutscher Versicherer vorangetrieben [105]. Für den Antriebsstrang kommen verschiedene konkurrierende Technologien zum Einsatz, von denen sich bislang keine als alleiniger Technologiepfad durchgesetzt hat.

Windkraftanlagen benötigen Offshore 8-9 Monate bis Energieamortisation, an Land ist die Dauer etwas kürzer. Bis zu $\frac{3}{4}$ einer WKA ist aus Stahl gefertigt (bei stählerner Turmbauweise und ohne Berücksichtigung des Gründungsfundaments). Die Entsorgung der GFK-Materialien ist potenziell kritisch bzw. schwierig, vieles wird derzeit verbrannt. Entsorgungs- und Recyclingkonzepte müssen teilweise noch entwickelt werden. Insofern ist noch unklar, inwiefern der verstärkte Einsatz polymerer Werkstoffe einen Beitrag zur Energieeffizienz leisten kann bzw. wird [65].

Wird die Gründungsstruktur mit in die Analyse einbezogen und zudem berücksichtigt, dass viele der aktuell errichteten WKAs mit Türmen (zumindest zu wesentlichen Teilen) aus Beton errichtet werden, zeigt sich die große Bedeutung von Beton für den WKA-Bau. Moderne 1,8-2 MW WKAs bestehen dem Gewicht nach zu ca. 58-76% aus verstärktem Beton, zu 20-30% aus Edelstahl, zu 3-6% aus Gusseisen und zu 0,2-1,6% aus Kupfer. Epoxy, Plastik und Glasfasern machen im Gewicht lediglich 0,6-1,8%, 0,2-0,3%, und 1,6-2,6% aus [86].

Der Turm ist zudem mit deutlich über 50% die Komponente mit dem höchsten Anteil am Gesamtenergiebedarf. Auf den Rotor entfallen dagegen lediglich ca. 6-8% [86]. Insofern kann die Verwendung von alternativen Zementen mit geringerer THG- und Energieintensität signifikant zur Lifecycle-Effizienzsteigerung einer WKA beitragen.

Die Energierücklaufzeit (energetische Amortisationszeit) bei 1,8 – 2 MW-Anlagen betrug im Jahr 2010 knapp 8 Monate. Lebenszyklusanalysen zeigen außerdem auf, dass die für die Herstellung aufzubringende Primärenergie einer in Deutschland produzierten Windkraftanlage vorwiegend auf Rohöl (75%) basiert. Insgesamt liegt der nicht-erneuerbare Anteil an der durchschnittlich ausgewendeten Primärenergie bei 98%, der erneuerbare Anteil somit (noch) vernachlässigbar gering [86].

6.2.3 Recycling von Windkraftanlagen

Lässt man Turm und Fundament außer Acht, besteht eine WKA im Durchschnitt vorwiegend aus Stahl, Aluminium, Kupfer, Glasfasern, Polyester, Kohlefasern, und Epoxid. Anders als Glas- und Kohlefasern sind die verwendeten Metalle in großem Umfang recycelbar. Dies beruht auf der günstigen Kombination ihrer intrinsischen Eigenschaften und ihres wirtschaftlichen Wertes [99].

Das Recyclen der großen Mengen an Beton (von Turm und Fundament) ist problematisch, da dieser nach derzeitigen Vorgaben nicht mehr als Grundstoff für neuen Beton verwendet werden darf. Insofern stellt sich hier das gleiche Problem wie auch sonst in der Bauindustrie, dass große Mengen an Bausand und Zement dem Baustoffkreislauf verloren gehen. Bei den verwendeten Metallen kann von einer ca. 90%igen Recyclingquote ausgegangen werden [98]. Ca. 3,1% der gesamten für eine WKA aufzubringenden Primärenergie werden für die Demontage benötigt [86].

Lässt man den Beton außer Acht, wird eine über alle Komponenten gemittelte durchschnittliche gewichtsbezogene Recyclingquote von 80% als realistisch erachtet. Das Verbundmaterial der Rotorblätter (Die Rotorblätter der Firma Vestas bestehen z.B. vorwiegend aus Kohlefasern, Glasfasern, Epoxid und Polyurethan) stellt dabei eine der großen Herausforderungen an das Abfallmanagement dar [99].

Für jedes installierte KW an Leistung werden ca. 10 kg Rotorblatt-Material benötigt [97, 98].

Die derzeitigen Kapazitäten für das FVK-Recycling müssen deutlich ausgebaut werden, die wirklich großen Mengen von ausrangierten Rotorblättern werden in Deutschland zehn bis 15 Jahren aufkommen.

Schätzungen gehen dahin, dass im Jahr 2034 jährlich ca. 225.000 t (0,23 Mt) Rotorblattmaterial weltweit recycelt werden müssen, siehe Abbildung 41. Dies ist eine relevante Gesamtmenge und muss u.a. auch wegen des hohen Energiebedarfs der Materialherstellung weitergenutzt werden, ist aber immer noch eine geringe Menge ggü. z.B. dem Stahlbedarf (allein z.T. mehrere hundert t pro WKA, also eher 10-100 t Stahl pro installiertem KW) oder dem Kohlebedarf bei konventioneller Stromerzeugung (allein in Deutschland derzeit ca. 170 Mt Braunkohle pro Jahr).

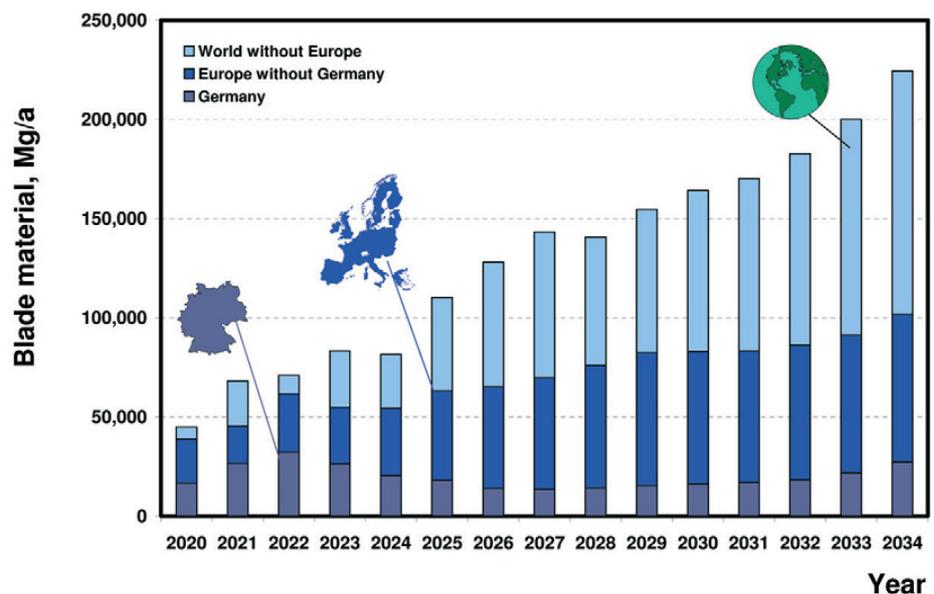


Abbildung 41: Erwartete Menge an jährlich zu recycelndem Rotorblattmaterial, aus [97].

Allein in Europa dürfte die Masse der Fahrzeuge, die das Ende ihre Nutzungsdauer erreicht haben, im Jahr 2015 die Marke von 14 Mt erreicht haben [99]. Verglichen mit der jährlichen weltweiten Menge an zu entsorgenden oder rückzuführenden Verbundmaterialien bleiben Verbund-Rotorblätter damit um Größenordnungen unter diesen Mengen.

Das Recycling der aus Faserverbundmaterial bestehenden Rotorblätter stellt aus mehreren Gründen eine große Herausforderung dar [99]:

- Sie weisen eine komplexe Materialzusammensetzung auf aus Fasern, Polymermatrix und Füllstoffen.
- Sie können nicht einfach umgeformt werden, da die vernetzte Struktur der eingesetzten Polymere dies nicht gestattet.
- Die Rotorblätter sind über ihre Nutzungszeit hinweg einer weiten Bandbreite von harten Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Hierzu zählen extreme Temperaturen, hohe Luftfeuchtigkeit, Regen, Hagelschlag, Schnee, Eis, Sonneneinstrahlung, Blitzschlag und Salzeinfluss. Die hierdurch z.T. stark in Mitleidenschaft gezogene Qualität der Fasern kann diese gegebenenfalls von einer möglichen Weiternutzung als Strukturkomponenten ausnehmen.
- Selbst bei Faserverbundmaterialien aus mit einer thermoplastischen Matrix können die Fasern nach 20jähriger Nutzung ggf. so geschädigt sein, dass eine Kreislaufnutzung in neuen Rotorblättern für sie ausscheidet.
- Die großen Abmessungen der Rotorblätter verursachen logistische Probleme in Bezug auf die Demontage, den Transport und das Zerschneiden oder anderweitige Zerkleinern.
- Im Prozess des Zerkleinerns der Rotorblätter werden notwendigerweise auch die darin enthaltenen Fasern durchtrennt. Dies führt zu einer Reduktion der durchschnittlichen Faserlänge und einer größeren Streuung der Faserlängen.

Das Recycling der Rotorblätter wird auf 6% der Gesamtkosten der WKA-Entsorgung und 0,14% der Kosten einer neuen WKA geschätzt [99].

Als einfachste Methode wird das mechanische Recycling erachtet, allerdings schädigt dieser Prozess die einzelnen Fasern, was deren mechanischen Eigenschaften beeinträchtigt. Durch Verbrennen lässt sich lediglich der kalorische Wert des Materials (die chemisch gespeicherte Energie, bzw. die chemische Enthalpie) rückgewinnen. Diese ist vorwiegend im organischen (kohlenstoffhaltigen) Anteil des Faserverbundmaterials enthalten. Da Glasfasern nicht brennbar sind, hängt der kalorische Wert des Verbundmaterials entsprechend vom Anteil an Polymer und Kohlefasern ab [99].

Das Auseinandernehmen und Zerkleinern der Rotorblätter ist sehr energieaufwändig. Besonders GFK stellt hierbei eine Herausforderung dar, da das enthaltene Glas zu zermahlen viel Energie erfordert [97, 98]. Kohlefasern stellen in dieser Hinsicht eine Möglichkeit dar, die Recyclingfähigkeit der Blattsysteme ggf. zu erhöhen [99].

Der Einsatz von Recyclingfasern wird von Firmen allerdings z.T. als Risiko betrachtet. Ähnlich wie in der Zementindustrie, wo das der traditionelle Portland-Zement u.a. aufgrund einer konservativen Grundeinstellung der Bauindustrie seine dominierende Stellung bewahren kann, zeigt auch die FVK-Branche derartige Tendenzen hinsichtlich der Wiederverwendung gebrauchter Glas- und Kohlefasern. Derzeit werden Recycling-Fasern eher für Produkte mit geringeren mechanischen Anforderungen weiter verwendet [97, 98].

Derzeit gibt es kaum gesetzliche Regelungen für die europäische Windenergieindustrie, die das Abfallmanagement für WKA-Komponenten am Ende ihrer Nutzungsdauer regulieren. Ein (in Deutschland bestehendes) Verbot der simplen Deponie-Endlagerung trägt dazu bei, den anfallenden Abfall fort von der Deponierung und hin zur energetischen Nachnutzung zu verlagern [99].

Derzeit allerdings erscheint das wesentliche Probleme nicht in erster Linie bzw. ausschließlich die noch nicht ausgereifte Technologie, sondern eher der Mangel an Altmaterial zu sein, der wiederum zu einer mangelhaften Infrastruktur führt – es ist derzeit oftmals (noch) nicht wirtschaftlich rentabel, große entsprechende Recycling-Anlagen aufzubauen. Während z.B. in der Zementindustrie hunderte Tonnen Material pro Woche prozessiert werden, fallen in existierenden Anlagen zur FVK-Aufbereitung lediglich einige zehn Tonnen pro Jahr an [97, 98].

Es dürften ähnlich wie bei der Fahrzeugindustrie die Produzenten der Endprodukte (Autos, bzw. hier fertige WKAs) sein, die für die fachgerechte Entsorgung und stoffliche Weiternutzung der eingesetzten Materialien verantwortlich gemacht werden. Um hier Übergangsprobleme zu vermeiden erscheint es für die WKA-Endfertiger dringend angeraten, nicht auf einen gesetzlichen Rahmen zu warten, sondern schon proaktiv an entsprechenden Lösungen zu arbeiten und Kapazitäten aufzubauen [97, 98].

6.2.4 Governance in der WSK

Diese ist stark von den gesetzlichen Rahmenbedingungen abhängig; bei weitgehend freiem Zubau mittels fester Vergütung ist der Druck geringer, eine Dominanz innerhalb der WSK zu etablieren. Die Entwickler und auch die Zulieferer von WKAs haben bei einer hohen weltweiten Nachfrage nach ihren Produkten eine vergleichsweise komfortable Position. Technische Neuerungen wie etwa Anlagen mit erhöhter Effizienz, größerer Gesamtausbeute oder für besonders robuste Anwendungen wie etwa im Offshore-Bereich lassen sich auch von Herstellerseite aus in den Markt bringen. Insofern ist hier die Voraussetzung für eine vergleichsweise flache Hierarchie innerhalb der WSK prinzipiell gegeben. Allerdings ist zu beachten, dass viele Hersteller große, international agierende Unternehmen sind, die schon dadurch über eine relativ starke Position gegenüber den z.T. kleineren Zulieferbetrieben verfügen. Diese haben dann zugleich eine starke Position gegenüber kleinen Betreibern wie etwa lokalen bzw. kommunalen Energiegenossenschaften oder Privatpersonen. Zudem gibt es große Akteure wie z.B. Siemens, die zugleich Entwickler, Hersteller und Betreiber von WKAs bzw. Windparks sind und durch diese Integration nicht immer eine klare Differenzierung bzgl. des WKA-dominierenden Prozessschrittes bzw. Akteurs zulassen. In dem Fall bestimmt das Gesamtunternehmen die WSK.

Die derzeit erfolgende Umstellung im EEG von feste Abnahme und Vergütung auf ein System mit Mengenbegrenzung, ohne feste Abnahme und mit variabler Vergütung stellt die Betreiber von WKAs unter erhöhten Konkurrenzdruck untereinander [77, S. 20 ff]. Entsprechend steigt der Kostendruck entlang der gesamten WSK. Bzgl. deutscher WKA-Standorte erhöht sich dadurch die Notwendigkeit einer (aus Perspektive der WKA-Hersteller) stärker Konsumenten-getriebenen (aka, vom WKA-Betreiber getriebenen) WSK. Zudem besteht die Befürchtung, dass durch die derzeitige EEG-Umstellung primär für große Windparks und große WKA-Betreiber einen Vorteil bringt [77, S. 21], die von kleinen Akteuren geprägte sogenannte „Bürgerenergie“ dagegen weniger Berücksichtigung finden dürfte [78]. Dies hätte eine stärkere Machtkonzentration bei den dann marktmächtiger auftretenden großen Betreibern zufolge, und dementsprechend eine stärkere Verschiebung hin zur konsumentengetriebenen WSK.

Wenn die Nachfrage nach WKAs wie in den Jahren 2007/2008 deutlich über den Produktionskapazitäten liegt, wird der Windenergiemarkt ein „Verkäufermarkt“, in dem die WKA-Hersteller eine dominierende Rolle einnehmen können [87, S. 43].

Die starke Abhängigkeit der Neuinstallation von Anlagen von den gesetzlichen Rahmenbedingungen des EEG weist darüber hinaus auf den starken externen Einfluss auf diese WSK hin. Sowohl das Klimaschutzgesetz wie auch der dieses konkretisierende Klimaschutzplan des Landes NRW bauen auf dem Prinzip von konsumentengetriebenen WSKs auf – Der Zubau von erneuerbaren Energieanlagen soll vorwiegend über die Endkunden vorangebracht werden, die Akteure entlang der produzierenden WSK werden als reagierend angesehen.

Der internationale Absatzmarkt ist z.T. schwer prognostizierbar und stark von der Entwicklung politischer Rahmenbedingungen in den jeweiligen Ländern und deren entweder offenen oder abschottenden Marktpolitik (der Leitmarkt China verfolgt in diesem Bereich einen Kurs starker Abschottung gegenüber ausländischen Importen) abhängig.

„Die Situation auf dem internationalen Gesamtmarkt ist weiterhin durch einen hohen Margendruck gekennzeichnet, der aus der schwächelnden Weltwirtschaft resultiert. Insbesondere in Europa zeigen sich weiterhin die Folgen der Wirtschaftskrise und der Reformpolitik in Südeuropa. Auch das Problem der weltweiten Überkapazitäten belastet die Windenergiebranche 2013 weiter“ [77, S. 148].

Entsprechend bedeutend ist eine stabile Planbarkeit im Inland für die Hersteller und Zulieferer von WKAs.

6.3 Weitere Sparten im Erneuerbaren Anlagenbau

6.3.1 Photovoltaik

Der PV-Bereich in NRW ist im Abschwung und von Produktionsrückgängen, Umstrukturierungen und Insolvenzen geprägt [77, S. 158]. Entsprechend ist dieser Bereich von allen regenerativen Energiesparten in NRW am stärksten von Umsatzrückgang und Arbeitsplatzabbau betroffen, und entsprechend verliert dieser Bereich für die Industriestruktur in NRW an Bedeutung.

Der Zubau von PV-Anlagen in NRW war im Jahr 2013 um über 50% rückgängig ggü. den Vorjahren, wie in Abbildung 42 zu erkennen. Auch der Zubau von PV-Anlagen ist wie der WKA-Zubau vorwiegend im ländlichen Raum konzentriert [77, S. 68].

Aufgrund des massiven Preisverfalls von PV-Anlagen (s. Abbildung 43), z.T. auch verbunden mit hohen Subventionen in China, ist die deutsche Produktion von Solarmodulen stark eingebrochen. Auch wenn der Preisverfall derzeit vorläufig gestoppt scheint, ist eine signifikante Erholung der inländischen Produktion derzeit nicht in Sicht [77, S. 150]. Die Beschäftigtenzahl ging 2013 um 22% zurück.

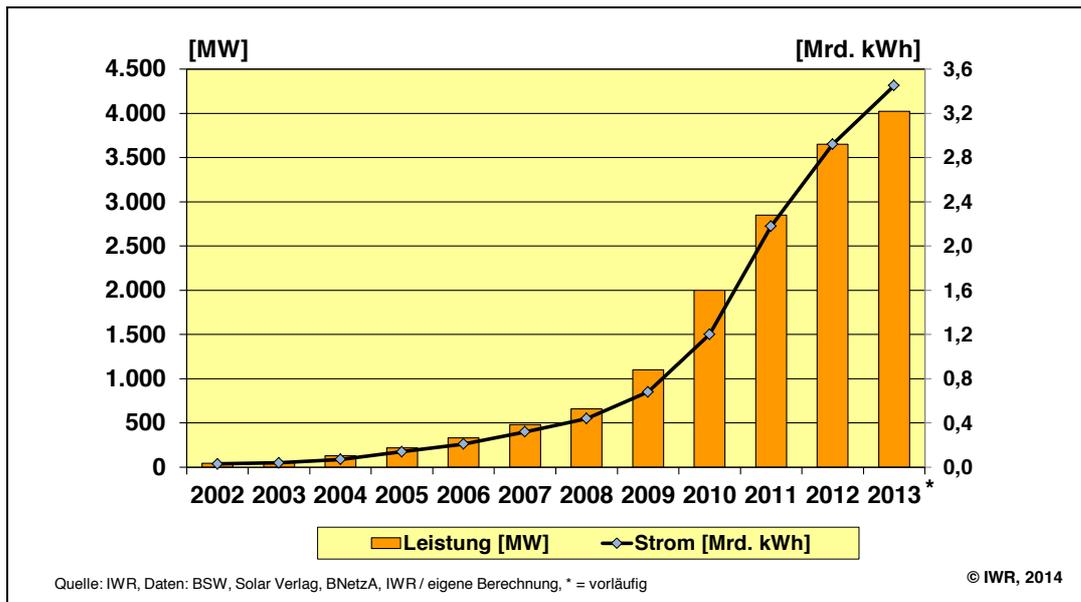


Abbildung 42: Entwicklung der PV-Gesamtleistung und Stromerzeugung in NRW (2002 - 2013), aus [77].

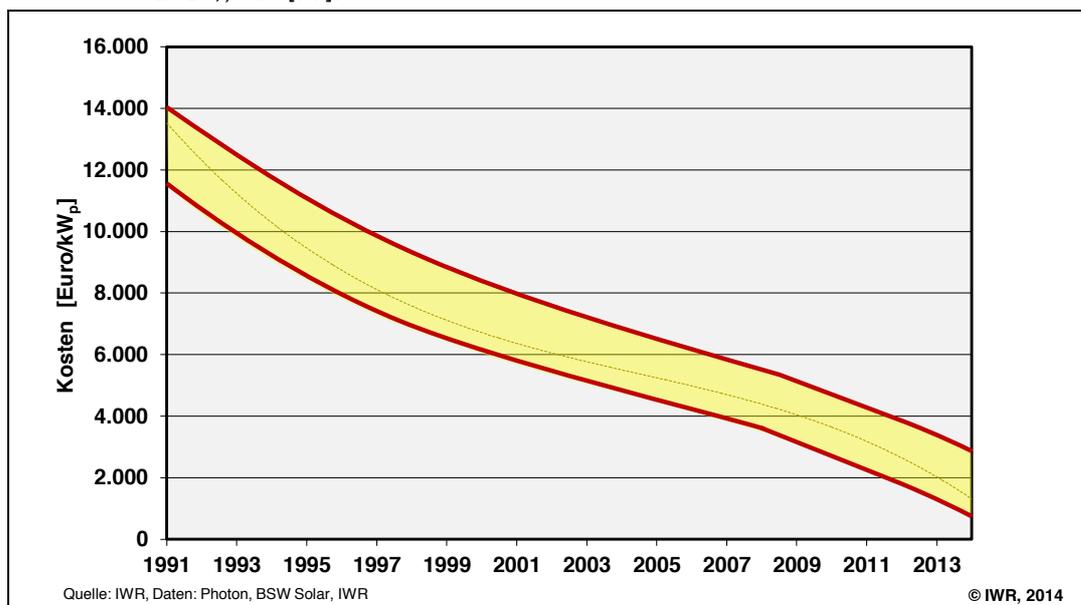


Abbildung 43: : Entwicklung der System-Kosten für PV-Anlagen 1991 bis 2014, aus [77].

6.3.2 Solar- und Geothermie

Die Produktion und Neuinstallation von Solar- und geothermischen Anlagen ist in NRW stagnierend bis rückläufig.

Durch die geringe Nachfrage aufgrund der Änderung des EEG im Jahr 2012 reduziert die Solarthermiebranche in NRW seither ihre Produktionskapazitäten und die Anzahl der Beschäftigten. Als bedeutendste Unternehmen für die Herstellung von Solarkollektoren hielten sich in NRW lediglich noch Bosch Buderus Thermotechnik und Vaillant. Als Erfolgsgeschichte kann dagegen das Unternehmen Alanod gelten, das durch Zukauf expandiert und seine Solarthermieproduktion am Standort Ennepetal in NRW ausgebaut hat [77, S.159].

Die oberflächennahe Geothermie (die auch im Privatbereich zum Einsatz kommt) hat in NRW Bedeutung für die Hersteller von Wärmepumpen, Erdwärmesonden, Erdkollektoren und entsprechendem Zubehör. Zunehmend wird dieser Geschäftsbereich allerdings durch die Verwendung von Luftwärmepumpen verdrängt.

Bohrunternehmen sehen auch im Bereich der Tiefengeothermie einer unklaren Zukunft entgegen – während die industrielle Infrastruktur in NRW durch die Hersteller von Bohrequipment und weiterer Felder wie z.B. Kraftwerks-Kühltechnologie gut aufgestellt ist und durch das Internationale Geothermiezentrum (GZB) in Bochum

Vernetzung und Knowhow-Transfer gewährleistet wird, sind es hier eher die gesetzlichen Rahmenbedingungen. Tiefengeothermische Bohrverfahren ähneln denen die im Fracking von Schiefergas verwendet werden und unterliegen deswegen ähnlich starken Einschränkungen [77, S. 160].

6.3.3 Biogas-Sektor

Der Biogas-Anlagenbau steht weiterhin und Druck bzw. großes Wachstumspotenzial ist nicht in Sicht. Obwohl Biogas-Firmen auf dem internationalen Markt durchaus erfolgreich sind, war das Inland (D bzw. NRW) 2013 weiterhin der Hauptabnehmermarkt. Durch die veränderte EEG-Rahmgebung brach der inländische Markt 2012 um 70% ein. Dies führte zu Entlassungen und Unternehmensinsolvenzen. Dieser Trend scheint auch aktuell weiterhin fortzubestehen, Unternehmen des Zuliefererbereichs ziehen sich weiter aus dem Biogassektor zurück [77, S. 159].

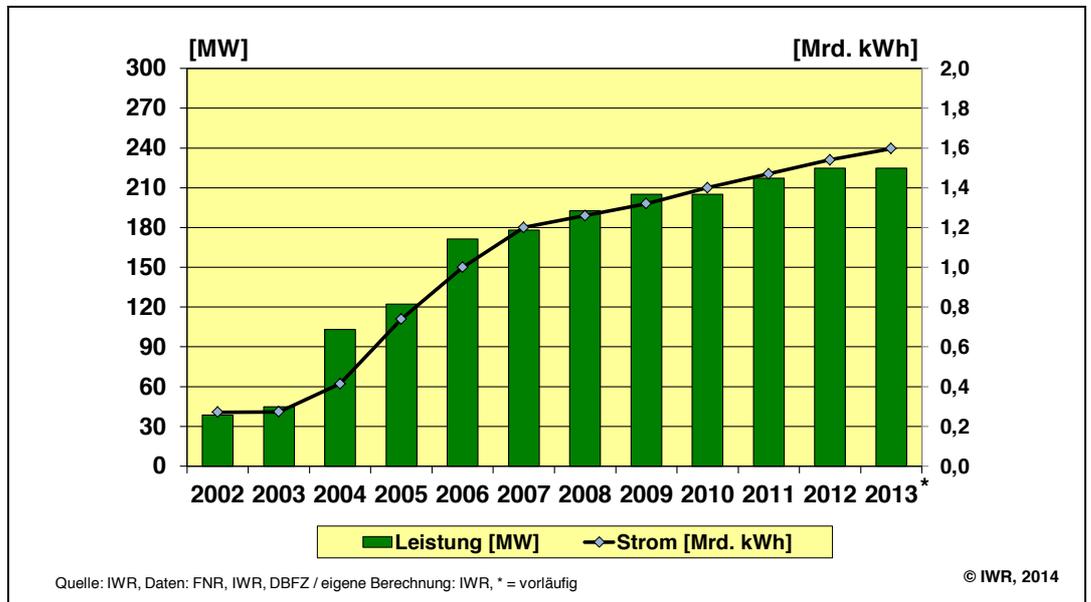


Abbildung 44: Entwicklung der installierten elektrischen Gesamtleistung und Stromerzeugung im Bereich Biomasseheizkraftwerke in NRW, aus [77].

Stromerzeugung aus Bioenergie in NRW: 5,93 Mrd. kWh in 2013, d.h. +9,3% im Vgl. zum Vorjahr. Der Zuwachs geht v.a. auf die Produktion in Biomasseheizkraftwerken und Biogasanlagen zurück [77, S. 49]. Deren Anstieg verläuft derzeit in moderaterem Maß als noch vor ca. zehn Jahren, s. Abbildung 44. Die nutzbaren Brennstoffkontingente in NRW lassen nur eine beschränkte Zahl von Anlagen bzw. installierter Gesamtleistung zu.

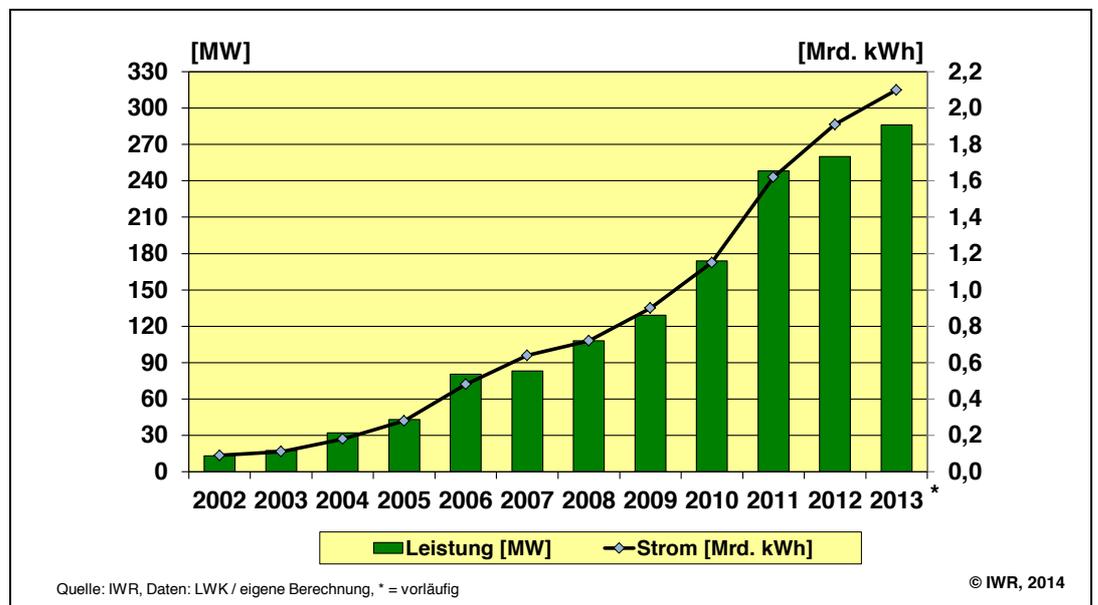


Abbildung 45: Entwicklung der installierten Gesamtleistung und Stromerzeugung im Bereich Biogas in NRW, aus [77].

Die Beschäftigtenzahl im Bioenergiebereich ging 2013 um ca. 6% zurück.

Bei Biogasanlagen verlief der Zubau in den letzten Jahren intensiver, s. Abbildung 45.

Bundesweit wurden 2015 insgesamt ca. 200 Anlagen mit einer Leistung von ca. 270 MW_{el} neu installiert, nach

163 Anlagen im Vorjahr 2014. Im bisherigen Rekordjahr der Branche 2011 wurden noch ca. 1.500 Anlagen neu errichtet [80]. Der Rückgang wird primär auf die veränderten Vergütungsregelungen im EEG seit 2012 zurückgeführt [77, S. 54].

Wie die Windenergieanlagen sind auch die Bioenergieanlagen vor allem im ländlichen Raum zu finden, die Ballungsgebiete in Ruhrgebiet und Rheinland weisen lediglich eine sehr geringe Anlagendichte auf [77, S. 55].

Die Stromerzeugung aus Klärgas und Deponieabfällen stagniert bzw. ist rückläufig in NRW. Ebenso diejenige aus Wasserkraft und Grubengas. Die regenerative Wärmenutzung wird in NRW von Bioenergie dominiert, Geoenergie und Solarthermie machen gemeinsam lediglich etwas mehr als 10% davon aus [77, S. 60 ff].

6.3.4 Weitere Bioenergie

Die Anzahl von holzbetriebenen Einzelfeuerungsanlagen nimmt in NRW weiterhin nahezu linear zu, siehe Abbildung 46. Bei den betrachteten Anlagen handelt es sich in erster Linie um Pellet- und Hackschnitzelanlagen. Der Großteil der neu zu gebauten Anlagen in diesem Bereich befindet sich in Süddeutschland; Bayer und Baden-Württemberg erreichen gemeinsam über 50% [77, S. 81 ff]. Entsprechend ist davon auszugehen, dass auch die meisten Herstellerbetriebe dort ihre Produktionsstätten haben.

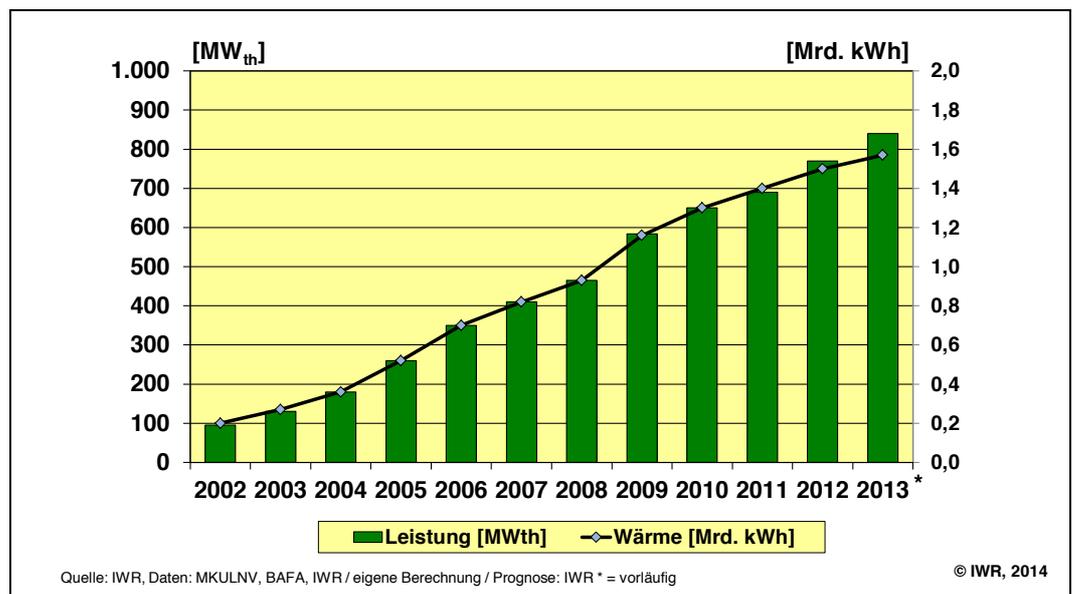


Abbildung 46: Entwicklung der installierten Gesamtleistung und Wärmeerzeugung im Bereich Einzelfeuerungen in NRW gemäß Holzabsatzförderrichtlinie bzw. Marktanzreizprogramm, aus [77].

6.3.5 Kurzzeitspeicher

Ein weiterer für den mit der erneuerbaren Energiebereitstellung verbundener Bereich des Anlagenbaus sind Energiespeicher für die kurz- und mittelfristige Energiespeicherung. Bei erhöhtem Bedarf für eine Glättung der Energiebereitstellung von Photovoltaik und Windkraftanlagen, von Demandside Management (DMS) und Prosumentenbedürfnissen (auch u.a. an industriellen Verbundstandorten) erscheinen Technologien wie z.B. Schwungradspeicher für die Kurzfrist-Regelung attraktiv. Ein Beispiel für solch einen Ansatz ist die u.a. die in Jülich/NRW ansässige Firma Stornetic GmbH, die schnell reagierende und kurzfristig regelbare Speicher mit einer Kapazität von mehreren MWh entwickelt und produziert [70, 73].

6.4 Zusammenfassung

Einige der wesentlichen Aussagen des Kapitels sind hier zusammengefasst:

- Von allen Bereichen des Anlagenbaus für den Sektor der erneuerbaren Energien verzeichnet der **Windenergie-Anlagenbau** die stärksten Zuwachsraten sowohl hinsichtlich des **Umsatzes (über 2 Mrd. €)** als auch hinsichtlich der **Beschäftigtenzahl (über 9.000)**. Dieser Bereich ist der größte und zeigt auch die positivsten Prognosen für NRW. Insgesamt sind mehr als **26.000 Beschäftigte in 3.600 Unternehmen im EE-Sektor** in NRW aktiv, mit einem **Umsatz von 6-8 Mrd. €**.

- Die Beschäftigungsentwicklung des gesamten EE-Sektors in NRW (ohne Service und Betrieb) war 2013 erstmals negativ (-7%) seit 2005. Der Umsatz war (-12%) zum zweiten Mal in Folge rückläufig. Die Windenergiebranche entwickelt sich dabei weitgehend stabil, v.a. durch Offshore-Ausbau mit weiter steigendem Umsatz. Die Anzahl der Beschäftigten im EE-Anlagen- und Systembau in NRW könnte im Jahr **2020** zwar zwischen **30.000 und 45.000** liegen, durch die Abwandlung des EEG seit 2012 liegt der reale Trend allerdings mittlerweile deutlich darunter.
- Die WKA-Hersteller haben gegenüber ihren Zulieferern eine starke Position in der WSK, durch die sinkende Ausbaurate aufgrund der EEG-Novellierung steigt die Bedeutung v.a. von großen Windparkbetreibern, sowohl gegenüber den kleineren Akteuren als auch gegenüber den Herstellern. Durch Integration (Verkürzung der WSK) entlang der WSK verstärkt sich dieser Trend.
- Dieser Wirtschaftszweig ist aufgrund des volatilen internationalen Marktes auf eine stabile heimische Nachfrage angewiesen, zudem sind Energiebedarf und Transportkosten bei internationaler Versorgung wesentlich höher.
- Die weiteren Sparten des EE-Anlagenbaus wie etwa Bioenergie, Solar- und Geothermie sind von mittelständischen Akteuren geprägt und haben üblicherweise eher regional oder zumindest inländisch orientierte Absatzmärkte. Insofern hat hier die EEG-Ausgestaltung auch unmittelbare Relevanz auf den industriellen Standort.
- Die **energetische Amortisationszeit** einer **Onshore-WKA** liegt **unter 8 Monaten, Offshore bei 8-9 Monaten**. Es sind i.A. Investitionen von **900-1500 € pro kW** installierter Leistung notwendig. Es kann derzeit von ca. **9 g CO₂/kWh** mittels WKA bereitgestellter Energie ausgegangen werden. Diese wird derzeit weitgehend aus fossilen Energieträgern gedeckt.
- Der hohe Bedarf an nicht in Kreislaufwirtschaft nutzbarem Beton zeigt die Notwendigkeit der Weiterentwicklung des WKA-Konzeptes auf. Dies ist eine generelle Herausforderung an die Bauindustrie.
- Durch die komplexe Zuliefererstruktur im EE-Anlagenbau und -betrieb ist dessen **WSK nicht vollständig auf NRW lokalisierbar**. Die Herstellung ist stark von Zwischenschritten in anderen Bundesländern abhängig, während Hersteller in anderen Bundesländern wiederum Vorleistungen aus NRW benötigen.
- Hinsichtlich der vielen in NRW angesiedelten Unternehmen, die Aspekte aller Stufen der komplexen Zuliefererkette des Windenergie-Anlagenbaus abdecken, kann von einer zumindest teilweise geschlossenen WSK gesprochen werden. Die **z.T. enge Verzahnung der stark spezialisierten Unternehmen** trägt zu dieser (teilweisen) Geschlossenheit bei.
- Da die **Kohlefaserproduktion** stark im asiatischen Raum konzentriert ist, besteht hier eine größere Abhängigkeit, obwohl die für Kohlefasern notwendigen Grundstoffe von der in NRW ansässigen chemischen Industrie problemlos bereitgestellt werden können.
- Der **Aufbau einer heimischen Kohlefaserproduktion** in Kombination mit einer **Recycling-Infrastruktur für Faserverbund-Altmaterial** würde hier stark zur weitergehenden Geschlossenheit der WSK beitragen. Eine Koordinierung oder Kooperation des WKA-Bereichs mit Akteuren der Luftfahrt- und Automobilindustrie erscheint hier angeraten, da diese beiden Branchen ebenfalls verstärkt CFK-Komponenten zum Einsatz bringen.

7 Synthese der WSK-Analyse

Der energieintensive **Eisen- und Stahlsektor** stellt große Herausforderungen an einen industriellen **Transformationsprozess hin zu einer emissionsneutralen und ressourcenneutralen Kreislaufwirtschaft**. Derzeit besteht weiterhin ein wesentlich höherer Stahlbedarf als er durch die ausschließliche Kreislaufnutzung von Sekundärstahl zu decken ist.

Die Stahlproduktion in NRW ist deutlich emissionseffizienter als der weltweite Durchschnitt, die konventionelle Produktionsroute weist allerdings nur noch sehr begrenztes Verbesserungspotenzial auf. Vollständig neuartige Konzepte wie eine elektro- oder wasserstoffbasierte Stahlproduktion mittels **Electrowinning (EW)** oder **Direktreduktion (H-DR)** bieten dagegen das Potenzial für solch eine Produktionsweise. Die über die nächsten Jahre mit Sicherheit **schärfer werdenden Klimaschutzziele** müssen in der heutigen Planung mit einbezogen werden. Innovationen in der Stahlbranche laufen traditionell auf der **langen Zeitskala von z.T. Jahrzehnten** ab.

Aufgrund der sehr **hohen Investitionskosten** und **Lock-In-Effekte** bestehender konventioneller Standorte ist nicht davon auszugehen, dass eine derartige Transformation selbständig durch die als Marktakteure auftretenden Konzerne vonstatten gehen wird. Energie und Emissionsrechte sind zudem wesentlich zu günstig um eine derartige Transformation zu treiben. Eine reine Mehrbelastung durch die Verteuerung von Energie und Emissionen ist ebenfalls nicht zielführend, da diese zum **Carbon-Leakage**, d.h. der Abwanderung der Produktion an schwächer regulierte Standorte führen dürfte. Entsprechend müssten solche Maßnahmen mit **emissionsbasierten Importzöllen** und ggf. einer **Subvention von emissionsreduziert produziertem Stahl** einhergehen.

Ob eine derartige Transformation allerdings überhaupt über neoklassische Marktmechanismen ablaufen kann erscheint fraglich. Eine als Kooperationen angelegte **öffentliche Unterstützung beim Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur hinsichtlich Energiespeicher, eines Netzes für Wasserstoffproduktion, -verteilung und -speicherung**, und der **Aufbau von Pilotstandorten** erscheint ein möglicher gangbarer Weg.

Durch die **Verzahnung mit der chemischen Industrie und der Zementindustrie** entstehen **emissions- und ressourcenschonende Synergieeffekte**, die zudem auch **ökonomische Standortvorteile** darstellen. Die Produktion von **Spezialstählen hoher Güte** und eine **vertiefte Kooperation mit Kunden** (direkte CNC-Fertigung von z.B. Motorblöcken u.a. an den Stahl-Produktionsstandorten) ermöglicht den Erhalt von **Markteintrittsbarrieren**, um **während des Transformationsprozesses einen Schutz vor dem Preisdruck** der internationalen Konkurrenz aufrechterhalten zu können. Deutsche Produktionsstandorte werden gegenüber v.a. der chinesischen Konkurrenz keine Preiskämpfe im Bereich der Massenproduktion im Bereich niedrigqualitativer Massenstähle durchstehen können. Eine proaktive Transformationsstrategie ist insofern essentiell für die Standortsicherung.

Die **Chemische Industrie** ist in NRW traditionell stärker auf die **Grundstoff- und Basischemie** ausgerichtet als in anderen deutschen Bundesländern. Dies kann langfristig einen Nachteil im internationalen Wettbewerb darstellen. Der hochtechnologische Bereich der Spezialchemie bietet im deutlich größeren Maß die Chance von Knowhow-basierten Markteintrittsbarrieren.

Die WSK der chemischen Industrie ist komplex, stark verflochten und erstreckt sich aufgrund des Verteilernetzes über mindestens Westeuropa. Durch das Vorhandensein aller wesentlichen Produktionsschritte entlang der chemischen Wertschöpfungskette hat NRW jedoch eine große Relevanz hinsichtlich möglicher Transformationen.

Die in NRW etablierten **integrierten Verbundstandorte** bieten große **Effizienzvorteile** hinsichtlich der gemeinsamen Nutzung von Verteilernetzen für elektrische Energie, Prozesswärme, Dampf und Koppelprodukten. Die derzeitige starke Abhängigkeit von Erdöl als fossilem Grundstoff wird durch den Aufbau einer Versorgung mit **alternativen, nachwachsenden Grundstoffen** erst langfristig und graduell reduziert werden können. Grundsätzlich ist eine Synthese der für die Weiterverarbeitung relevanten Grundstoffe Naphtha, Ethen,

Propen, Acetylen usw. auch aus diesen Quellen gut realisierbar. Allerdings ist die chemische (Grundstoff-) Industrie wie auch die Stahlbranche **hohen Investitionskosten, Lock-In-Effekten und langfristigen Innovationszyklen** unterworfen. Auch die chemische Industrie wird über die kommenden Jahre den notwendigerweise fortlaufend weiter verschärften Klimaschutzziele Rechnung tragen müssen. Ein Festhalten am Status Quo und verspätetes Reagieren unter erhöhtem Druck könnte zu ähnlich großen Problem führen, wie sie derzeit die großen Energieerzeuger erfahren. Eine aktiv gestaltende Industriepolitik durch die Verteuerung von Energie und Emissionen in Kombination mit der Unterstützung beim Aufbau von alternativen Versorgungsnetzen und Pilotstandorten erscheint vielversprechender als eine passiver Verlass auf Marktmechanismen.

Für eine erhöhte Versorgung der Verbundstandorte mit erneuerbar bereitgestellter Primärenergie sind Konzepte des intelligenten **Demand-Side-Management (DMS)** und der **digitalen vernetzten Prozesskontrolle (Industrie 4.0)** relevant.

Neben dem Einfluss der Energiewende und des Emissions-Zertifikatehandels haben sich z.T. stark und dynamisch verändernde Rohstoffpreise (v.a. Erdöl) einen großen Einfluss auf den gesamten Sektor.

Im Bereich der Spezialchemie bieten polymere Werkstoffe ein innovatives Betätigungsfeld. Besonders der Bereich komplexer Faserverbundwerkstoffe bietet für einen Hochtechnologie-Standort wie ihn Deutschland darstellt ein vielversprechendes Betätigungsfeld. Hierbei kann sowohl der internationale Markt bedient werden, als auch die weiterverarbeitende heimische Industrie. Besonders die Luftfahrt- und Automobilindustrie, sowie in weiter anwachsendem Maß der Windenergie-Anlagenbau sind hier als Abnehmer zu nennen. Der verstärkte Aufbau einer Kohlefaserproduktion und einer Recycling-Infrastruktur sollten hier Beachtung und ggf. öffentliche Unterstützung finden. Dies könnte durch die Unterstützung der Vernetzung relevanter privater Akteure und ggf. der Förderung von Pilot-Recyclinganlagen geschehen.

Der **Anlagenbau für die erneuerbare Energieerzeugung** zeigt keine einheitliche Tendenz in NRW. Während der **Windenergiesektor gute Zuwachsraten** sowohl seitens der Beschäftigtenzahl als auch hinsichtlich des Umsatzes zeigt, sind alle anderen Bereiche entweder nur sehr moderat wachsend, stagnierend oder rückläufig. Besonders der **PV-Bereich** ist aufgrund der starken ausländischen Konkurrenz im **Rückgang** begriffen.

Die oftmals **mittelständisch geprägte**, regionale bzw. inländische Orientierung der anderen EE-Sektoren führt dazu, dass eine durch die **EEG-Novellierung** veränderte Situation des **heimischen Absatzmarktes** unmittelbare Auswirkungen auf die lokalen Akteure (Produzenten, Zulieferer und Dienstleister) hat.

Im **Windenergie-Sektor** ist die **WSK allenfalls teilweise geschlossen**, da wesentliche Komponenten über die Grenzen von NRW hinweg gehandelt werden. Es besteht eine **wechselseitige Abhängigkeit mit an anderen Standorten angesiedelten Unternehmen**. NRW beheimatet in diesem Bereich vorwiegend **Zuliefererbetriebe**. Diese haben nur einen geringen Einfluss auf die Gesamt-WSK.

In Kooperation mit der Baustoffindustrie wäre von den WKA-Herstellern eine Alternative zur derzeitigen Verwendung großer Mengen Portland-Zements im Bau von WKA-Turm und Fundament zu entwickeln, Dies würde die Energie- und Emissionsbilanz der Anlagen wesentlich verbessern. Ggf. sind hierzu Kooperationen mit öffentlichen Forschungseinrichtungen zielführend.

Der **Aufbau einer regionalen Kohlefaserproduktion** und eine **Recyclinginfrastruktur** für ausrangierte WKAs würde zum stärkeren Schließen der WSK beitragen und Aspekte einer Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Hierbei wäre eine mögliche **Kooperation der WKA-Hersteller** mit anderen Industrie-Sektoren wie der **Luftfahrt- und der Automobilindustrie** zu betrachten

Es bleibt zu prüfen, welche Erfolgsfaktoren entscheidend für kleine und mittelständische Spezialunternehmen sind, welches Maß an **Regionalisierung** bzw. **Clusterbildung** positive Effekte zeigt und ob sich diese Unternehmen somit vorteilhafter wie in der chemischen Industrie üblich an **Verbundstandorten** konzentrieren oder über die Fläche verteilen. Hierzu kann weitere Forschung im Bereich von Prosumenten ggf. Aufschlüsse liefern.

8 Referenzen

- [1] Kaplinsky, Raphael, und Mike Morris. *A handbook for value chain research*. Bd. 113. IDRC Ottawa, 2001. <http://www.prism.uct.ac.za/Papers/VchNovo1.pdf>.
- [2] Bunse, Katharina, Matthias Vodicka, Paul Schönsleben, Marc Brühlhart, und Frank O. Ernst. „Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature“. *Journal of Cleaner Production* 19, Nr. 6–7 (April 2011): 667–79. doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011.
- [3] Phylipsen, G. J. M., K. Blok, und E. Worrell. „International comparisons of energy efficiency-Methodologies for the manufacturing industry“. *Energy Policy*, Cross-country comparisons of indicators of energy use, energy efficiency and CO2 emissions, 25, Nr. 7–9 (Juni 1997): 715–25. doi:10.1016/S0301-4215(97)00063-3.
- [4] Farla, Jacco, Kornelis Blok, und Lee Schipper. „Energy efficiency developments in the pulp and paper industry: A cross-country comparison using physical production data“. *Energy Policy*, Cross-country comparisons of indicators of energy use, energy efficiency and CO2 emissions, 25, Nr. 7–9 (Juni 1997): 745–58. doi:10.1016/S0301-4215(97)00065-7.
- [5] Faße, Anja, Ulrike Grote, und Etti Winter. „Value Chain Analysis Methodologies in the Context of Environment and Trade Research“. Discussion papers // School of Economics and Management of the Hanover Leibniz University, 2009. <http://www.econstor.eu/handle/10419/37104>.
- [6] Dahlström, Kristina, und Paul Ekins. „Combining economic and environmental dimensions: Value chain analysis of UK iron and steel flows“. *Ecological Economics* 58, Nr. 3 (25. Juni 2006): 507–19. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.07.024.
- [7] Dahlström, Kristina, und Paul Ekins. „Combining economic and environmental dimensions: Value chain analysis of UK aluminium flows“. *Resources, Conservation and Recycling* 51, Nr. 3 (September 2007): 541–60. doi:10.1016/j.resconrec.2006.09.010.
- [8] Lechtenböhmer, Stefan, Karin Arnold, Valentin Espert, Samuel Höller, Clemens Schneider Julia Tenbergen Dr. Daniel Vallentin, Julia Tenbergen, Daniel Vallentin, Christoph Sievering, und Karen Perrey. „Plattform Klimaschutz und Industrie NRW. Endbericht“. Im Auftrag des Ministeriums für Klima, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz. Leverkusen und Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 9. September 2015.
- [9] Becker, Nicole. „Ressourceneffizienz der Tragwerke“. VDI ZRE Publikationen. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, März 2014. http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Bau-5_08012013-Web.pdf.
- [10] Netzwerk Kraftwerkstechnik NRW der EnergieAgentur.NRW. „Vor Ort im Weltmeister-Kraftwerk“. *Netzwerk Kraftwerkstechnik NRW*, 24. Juli 2015. <http://www.energieregion.nrw.de/kraftwerkstechnik/28072015vor-ort-im-weltmeister-kraftwerk-27691.asp>.

- [11] Netzwerk Kraftwerkstechnik NRW der EnergieAgentur.NRW. „EnergieRegion.NRW - Windenergie“. *Netzwerk Kraftwerkstechnik NRW*, April 2016. <http://www.energystate.de/content2.php?lang=de&id=&subid=12>.
- [12] Catherine, Diethelm. „Wachstumsmarkt dezentrale Energieversorgung“. *VDMA*, 18. September 2014. <http://motorenanlagen.vdma.org/article/-/articleview/5365119;jsessionid=286324D5ABDBB4C9BC1037B64EB90Co4>.
- [13] NRW.INVEST GMBH. „Energiebranche in NRW“. *NRW.INVEST*, April 2016. <https://www.nrwinvest.com/de/branchen-nrw/energiebranche/>.
- [14] EnergieRegion.NRW. „Kraftwerkstechnik“. *Cluster EnergieRegion.NRW*, April 2016. <http://www.energieregion.nrw.de/energieregion/themen/kraftwerkstechnik-11898.asp>.
- [15] EnergieRegion.NRW. „Netze und Speicher“. *Cluster EnergieRegion.NRW*, April 2016. <http://www.energieregion.nrw.de/speicher-und-netze-23847.asp>.
- [16] NRW.INVEST GMBH. „Neue Materialien in NRW“. *NRW.INVEST*, April 2016. <https://www.nrwinvest.com/de/branchen-nrw/neue-materialien/>.
- [17] Energy Decentral. „Technologien zum Anfassen!“ *EnergyDecentral: Internationale Fachmesse für innovative Energieversorgung*, April 2016. <http://www.energy-decentral.com/home-ed-de.html>.
- [18] Hillebrandt, Katharina, Sascha Samadi, und Manfred Fishedick. „Wege zu einer weitgehenden Dekarbonisierung Deutschlands: Kurzfassung“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, September 2015. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/DDPP_DE_summary_de.pdf.
- [19] Schломann, Barbara, Clemens Rohde, Wolfgang Schade, und et al. „Ausarbeitung von Instrumenten zur Realisierung von Endenergieeinsparungen in Deutschland auf Grundlage einer Kosten-/Nutzen-Analyse“. Berlin: BMWI, November 2014.
- [20] Dietmar, Hipp. „Kurzer Prozess“. *Der Spiegel*, August 2010. <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-72462723.html>.
- [21] Stemmermann, P., U. Schweike, K. Garbev, und G. Beuchle. „Celitement - eine nachhaltige Perspektive für die Zementindustrie“. *Cement International* 8, Nr. 5 (26. Oktober 2010): 52–66.
- [22] Müller, Bernd. „Der richtige Riecher“. *Bild der Wissenschaft Plus*, Nr. KIT Sonderheft (Februar 2011): 22–24.
- [23] Schmidt-Bleek, Friedrich. *Grüne Lügen: nichts für die Umwelt, alles fürs Geschäft - wie Politik und Wirtschaft die Welt zugrunde richten*. 4. Aufl. München: Ludwig, 2014.
- [24] Fleiter, Tobias, Barbara Schломann, und Wolfgang Eichhammer, Hrsg. *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. ISI-Schriftenreihe „Innovationspotenziale“, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung. Stuttgart: Fraunhofer-Verl, 2013.

- [25] Fraunhofer ISI. „Große Einsparpotenziale in energieintensiven Branchen“, 7. August 2013. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/service/presseinfos/2013/pri13-22_energieintensive-branchen-einsparpotenziale.php.
- [26] klimaretter.info/kir. „Stahlindustrie will weiter emittieren“. *klimaretter.info*, 21. September 2015. <http://www.klimaretter.info/politik/nachricht/19652-stahlindustrie-will-weiter-emittieren>.
- [27] Meyer, Robinson. „This is the real cost of coal“. *Mother Jones*, 14. August 2015. <http://www.motherjones.com/environment/2015/08/coals-cost-climate-change>.
- [28] Coady, David, Ian Parry, Louis Sears, und Baoping Shang. „How Large Are Global Energy Subsidies?“ IMF Working Paper. International Monetary Fund, Fiscal Affairs Department, 2015. <http://www.lee-lsa.de/uploads/media/wp15105.pdf>.
- [29] Bradley, David. „Grüner Beton“. *Technology Review*, 6. Mai 2010. <http://www.heise.de/tr/artikel/Gruener-Beton-989886.html>.
- [30] Ben Schwan. „Klimaschonender Zement“. *heise online*, 6. Mai 2010. <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Klimaschonender-Zement-991925.html>.
- [31] Böck, Hanno. „Die Suche nach dem grünen Zement“. *klimaretter.info*, 29. September 2011. <http://www.klimaretter.info/forschung/hintergrund/9509-die-suche-nach-dem-gruenen-zement>.
- [32] Steiniger, Silvana. „Zementindustrie: Mauern aus Beton“. *klimaretter.info*, 16. Februar 2013. <http://www.klimaretter.info/politik/hintergrund/12944-zementindustrie-mauern-aus-beton>.
- [33] Allwood, Julian M., Jonathan M. Cullen, und Rachel L. Milford. „Options for Achieving a 50% Cut in Industrial Carbon Emissions by 2050“. *Environmental Science & Technology* 44, Nr. 6 (15. März 2010): 1888–94. doi:10.1021/es902909k.
- [34] Herman, H., F. Matthes, and Uwe Athmann. "Potenziale und Chancen der Technologie zur CO₂-Abtrennung und -Ablagerung (CCS) für industrielle Prozessemissionen." *Kurzstudie für die Umweltstiftung WWF Deutschland*. Hg. v. Öko-Institut. dezentec (2012).
- [35] Remus, Rainer, Serge Roudier, Miguel A Aguado-Monsonet, und Luis Delgado Sancho. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control*. Luxembourg: Publications Office, 2013.
- [36] Esken, Andrea, Samuel Höller, Hans-Jochen Luhmann, Katja Pietzner, Daniel Vallentin, und Peter Viebahn. „RECCS plus. Regenerative Energien (RE) im Vergleich mit CO₂-Abtrennung und -Ablagerung (CCS)“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 6. April 2010. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/3658/file/3658_RECCSplus_de.pdf.
- [37] Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Geschäftsbereich Statistik. „Energiebilanz und CO₂-Bilanz in Nordrhein-Westfalen 2012“. Statistische Berichte. Energiebilanz und CO₂-Bilanz in Nordrhein-

Westfalen. Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Geschäftsbereich Statistik, Dezember 2014. http://www.energiestatistik-nrw.de/medien/downloads/Energiebilanz_2012.pdf.

- [38] Auer, Josef. „Deutscher Stahl mit Zukunftschancen in einer global wachsenden Welt“. Deutsche Bank AG, 6. Mai 2015. https://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD000000000355335/Deutscher+Stahl+mit+Zukunftschancen+in+einer+globa.pdf.
- [39] Wörtler, Martin, Peter Dahlmann, Felix Schuler, Hans Bodo Lungen, Nicole Voigt, Jean-Theo Ghenda, und Torben Schmidt. „Steel’s Contribution to a Low-Carbon Europe 2050: Technical and Economic Analysis of the Sector’s CO₂ Abatement Potential“. The Boston Consulting Group, Juni 2013. <http://www.bcg.de/documents/file154633.pdf>.
- [40] Rotering, Joachim, Peter von Hochberg, Nils Naujok, und Timo Schmidt-Brockhoff. *Die Stahlindustrie in Deutschland „Rückgrat des Industriestandorts Deutschland“*. München, 2012. http://en.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/2012-01-19_Die-Stahlindustrie-in-Deutschland-Kurzfassung_Viewpoint-fin.pdf.
- [41] Fishedick, Manfred, Joachim Marzinkowski, Petra Winzer, und Max Weigel. „Techno-Economic Evaluation of Innovative Steel Production Technologies“. *Journal of Cleaner Production* 84 (Dezember 2014): 563–80. doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.063.
- [42] Weigel, Max, Manfred Fishedick, Joachim Marzinkowski, und Petra Winzer. „Multicriteria Analysis of Primary Steelmaking Technologies“. *Journal of Cleaner Production*, August 2015. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.132.
- [43] Marcus Kirschen, Karim Badr. „Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry“. *Energy* 36, Nr. 10 (2011): 6146–55. doi:10.1016/j.energy.2011.07.050.
- [44] Global Industry Analysts, Inc. „World Ethylene Market To Cross 160 Million Tons By 2015, According To New Report By Global Industry Analysts“. *Chemical Online*, 3. November 2008. <http://www.chemicalonline.com/doc/world-ethylene-market-to-cross-160-million-0001?VNETCOOKIE=NO>.
- [45] Worrell, Ernst, Lynn Price, Nathan Martin, Jacco Farla, und Roberto Schaeffer. „Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators“. *Energy Policy*, Cross-country comparisons of indicators of energy use, energy efficiency and CO₂ emissions, 25, Nr. 7–9 (Juni 1997): 727–44. doi:10.1016/S0301-4215(97)00064-5.
- [46] „Edelstahlwerk Witten“, 19. November 2015. <http://www.route-industriekultur.de/themenrouten/12-geschichte-und-gegenwart-der-ruhr/edelstahlwerk-witten.html>.
- [47] Deutsche Edelstahlwerke. „Bericht zur nachhaltigen Entwicklung 2013“. Schmolz+Bickenbach Group / Deutsche Edelstahlwerke, 2013. http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Sonstige_Downloads/web_dew_nachhaltigkeitsbericht2013_140911.pdf.

- [48] Prognos AG. „Die chemische Industrie in den Bundesländern 2030: Nordrhein-Westfalen. Regionale Ergebnisse der VCI-Prognos-Studie“. Prognos AG, im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V., April 2014. <https://www.vci.de/nrw/downloads-nrw/die-chemische-industrie-in-den-bundeslaendern-2030-nrw-1.pdf>.
- [49] ExzellenzNRW. „Chemie.NRW Cluster Nordrhein-Westfalen“. *ExzellenzNRW*, April 2016. <http://www.exzellenz.nrw.de/clusterinfo/landescluster/chemie/>.
- [50] „ChemSite. Chemiestandorte für zukunftsorientierte Investitionen“. ChemSite-Initiative, April 2007. http://www.exzellenz.nrw.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=o&file=fileadmin/Cluster-Broschueren/chemie_chemsite.pdf&t=1455807246&hash=eec9cdcc4d4adc61082873982a178a923b107292.
- [51] ChemCologne. „Die stärkste Chemie-Region Europas“. *ChemCologne. connecting the chemical industry*, April 2016. <http://www.chemcologne.de/investieren-im-rheinland/die-chemie-region.html>.
- [52] ChemCologne. „Erfolgsfaktor für die Region - Verbundproduktion“. *ChemCologne. connecting the chemical industry*, April 2016. <http://www.chemcologne.de/investieren-im-rheinland/verbundproduktion.html#prettyPhoto>.
- [53] ChemCologne. „Branchen“. *ChemCologne. connecting the chemical industry*, Februar 2016. <http://www.chemcologne.de/investieren-im-rheinland/branchen.html>.
- [54] ChemSite-Initiative. „ChemSite - Stoffstromverbund“. *ChemSite. Your base for chemical production in Europe*, April 2016. <http://www.chemsite.de/chemsite/chemieparks-industriestandorte/gelsenkirchen/stromstoffverbund.php>.
- [55] BP Deutschland. „Das schwarze Gold und sein Weg in die Raffinerie“. *bp.com*, April 2016. http://www.bp.com/de_de/germany/ueber-bp/aktivitaeten-in-deutschland/raffineriegeschaeft/verfahren-in-einer-raffinerie/das-schwarze-gold-und-sein-weg-in-die-raffinerie.html.
- [56] BP Deutschland. „Erdöl ist nicht gleich Erdöl“. *bp.com*, April 2016. http://www.bp.com/de_de/germany/ueber-bp/aktivitaeten-in-deutschland/raffineriegeschaeft/verfahren-in-einer-raffinerie/erdoel-ist-nicht-gleich-erdoel.html.
- [57] BP Deutschland. „Raffinierte Verwandlung“. *bp.com*, April 2016. http://www.bp.com/de_de/germany/ueber-bp/aktivitaeten-in-deutschland/raffineriegeschaeft/raffinierte-verwandlung.html.
- [58] BP Deutschland. „Wer wir sind. Raffinerie Gelsenkirchen“. *bp.com*, April 2016. http://www.bp.com/de_de/germany/ueber-bp/aktivitaeten-in-deutschland/raffinerie-gelsenkirchen/wer-wir-sind.html.
- [59] Petrochemicals Europe. „Crackers capacities“. *petrochemistry.eu*, April 2016. <http://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/facts-and-figures/crackers-capacities.html>.

- [60] Petrochemicals Europe. „Steam crackers and Refineries, pipelines, crackers maps“. *petrochemistry.eu*, April 2016. <http://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/facts-and-figures/maps-refineries,-pipelines-and-crackers.html>.
- [61] BP Deutschland. „Statement zur Medienberichterstattung über einen geplanten Stellenabbau bei BP“. *bp.com*, 11. Januar 2016. http://www.bp.com/de_de/germany/presse/nachrichten/statement-zur-medienberichterstattung-ueber-einen-geplanten-stel.html.
- [62] „Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren“, April 2015. https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/GB_I/I.1/EK/16.WP/EK_II/MMD16-8500_Bericht.pdf.
- [63] Author. „The road to the future. But which direction will the car industry take us?“ *INCH Magazine*. Zugegriffen 22. Februar 2016. <http://www.ineos.com/inch-magazine/articles/issue-4/the-road-to-the-future/>.
- [64] Welt Online. „Gabriel sagt Stahlkochern Unterstützung zu“. *Welt Online*, 11. April 2016, Abschn. Regional. <http://www.welt.de/regionales/berlin/article154198730/Gabriel-sagt-Stahlkochern-Unterstuetzung-zu.html>.
- [65] Götze, Susanne, und Susanne Schwarz. „Die gestählte Effizienz“. *klimaretter.info*, 5. Februar 2016. <http://www.klimaretter.info/energie/hintergrund/20589-windraeder-und-ressourcen>.
- [66] kunststoffland NRW. „kunststoffland NRW“. *kunststoffland-nrw.de*, April 2016. <http://kunststoffland-nrw.de/ueber-uns/zahlen-und-fakten.html>.
- [67] Gochermann, Josef. *Expedition Energiewende*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-09852-0>.
- [68] PlasticsEurope. „PlasticsEurope - Plastics - the Facts 2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data“. *PlasticsEurope. Association of Plastics Manufacturers*, 9. November 2015. <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics---the-facts-2015.aspx>.
- [69] Brachold, Harald, Cornelius Peuckert, und Hans Regner. „Lichtbogen-Plasma-Reaktor Für Die Herstellung von Acetylen Aus Kohle“. *Chemie Ingenieur Technik* 65, Nr. 3 (1. März 1993): 293–97. doi:10.1002/cite.330650308.
- [70] BINE Informationsdienst. „Projektinfo: Kinetische Speicherung von Elektrizität - Technologie BINE Informationsdienst. „Projektinfo: Kinetische Speicherung von Elektrizität - Technologie DYNASTORE“. *BINE Informationsdienst*, November 2003. <http://www.bine.info/publikationen/publikation/kinetische-speicherung-von-elektrizitaet/technologie-dynastore/>.
- [71] Karl Meyer Gruppe. „CarboNXT GmbH: Unternehmen“, April 2016. <http://www.carbonxt.de/index.php?id=5>.
- [72] Karl Meyer Gruppe. „CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG: Recycling Center“, April 2016. <http://www.cfk-recycling.com/index.php?id=6>.

- [73] Stornetic GmbH. „STORNETIC - The Energy Storage Company“, April 2016. http://stornetic.com/index_de.html.
- [74] Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Geschäftsbereich Statistik. „Energiebilanz und CO₂-Bilanz in Nordrhein-Westfalen 2012“. Statistische Berichte. Energiebilanz und CO₂-Bilanz in Nordrhein-Westfalen. Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Geschäftsbereich Statistik, Dezember 2014. http://www.energiestatistik-nrw.de/medien/downloads/Energiebilanz_2012.pdf.
- [75] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien. „Windbranche“. *Windbranche.de*, 2. April 2016. <http://www.windbranche.de/wirtschaft/branche>.
- [76] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien. „Windenergie-Unternehmen: Zulieferer“, April 2016. <http://www.windbranche.de/firmen/info-136-zulieferer>.
- [77] Allnoch, Norbert, Ralf Schlusemann, Bernd Kleinmanns, Franz Bertram, und Henrik Jostmeier. „Zur Lage der Regenerativen Energiewirtschaft in Nordrhein-Westfalen 2013“. *Studie des Internationalen Wirtschaftsforums Regenerative Energien, im Auftrag des Ministeriums für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen (MVEL)*, Juni 2014. http://www.energiestatistik-nrw.de/medien/downloads/IWR-Studie_Regenerative_Energiewirtschaft_2013_NRW.pdf.
- [78] Wenzel, Stefan, Robert Habeck, Eveline Lemke, Tarek Al-Wazir, Johannes Rimmel, Franz Unterstell er, Jens Kerstan, Joachim Lohse, und Anja Siegesmund. Brief an Sigmar Gabriel. „Ihr Eckpunktepapier zur EEG-Reform - De-Minimis-Regelung für Bürgerenergie nutzen“, 5. August 2015. https://www.thueringen.de/mam/th8/tmlfun/aktuell/mi/anschreiben_gabriel_eckpunkte_bmwi.pdf.
- [79] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien. „Bundesländer“. *Windbranche.de*, 2. April 2016. <http://www.windbranche.de/windenergie-ausbau/bundeslaender>.
- [80] Fachverband BIOGAS. „Branchenzahlen“. *Fachverband Biogas e.V.*, November 2015. http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen.
- [81] Rother, Richard. „Streik in der Stahlindustrie: Böser Stahl aus China“. *die tageszeitung*, Winter 2016, Abschn. Ökonomie. <http://www.taz.de/Streik-in-der-Stahlindustrie/!5290241/>.
- [82] IG Metall Bezirk Nordrhein-Westfalen. „Stahlnachrichten. Informationen für die Beschäftigten der nordwestdeutschen stahlindustrie“. IG Metall, 5. Oktober 2015. https://www.igmetall-nrw.de/fileadmin/user_upload/stahltarifnachten_5.10.2015.pdf.
- [83] Goss, Andreas J. „Stahlindustrie investiert in die Zukunft“. *Börsen-Zeitung*, 9. Mai 2015. <https://www.boersen-zeitung.de/index.php?li=1&artid=2015088804&titel=Stahlindustrie-investiert-in-die-Zukunft>.
- [84] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Referat Öffentlichkeitsarbeit. „Stahlindustrie“. Zugegriffen 11. April 2016. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=171736.html>.

- [85] „EnergieDaten.NRW 2014“. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Dezember 2014. http://www.energiestatistik-nrw.de/medien/downloads/EnergieDaten.NRW_2014.pdf.
- [86] Guezuraga, Begoña, Rudolf Zauner, und Werner Pözl. „Life Cycle Assessment of Two Different 2 MW Class Wind Turbines“. *Renewable Energy* 37, Nr. 1 (Januar 2012): 37–44. doi:10.1016/j.renene.2011.05.008.
- [87] Keller, Sarina. *Die deutsche Windindustrie auf dem internationalen Markt*. Bd. 4. Wuppertaler Schriften zur Forschung für eine nachhaltige Entwicklung. oekom verlag, 2014. <http://www.onleihe.de/static/content/oekom/20140502/978-3-86581-860-7/v978-3-86581-860-7.pdf>.
- [88] Quaschnig, Volker. *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation ; mit 271 farbigen Bildern, 113 Tabellen und einer DVD*. 6., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2009.
- [89] BWE. „Bundesverband WindEnergie e.V.“ *Bundesverband WindEnergie e.V.*, April 2016. <https://www.wind-energie.de/>.
- [90] Mattes, Anselm. „Die ökonomische Bedeutung der Windenergiebranche. Windenergie an Land in Deutschland und in Nordrhein-Westfalen“. DIW Econ GmbH, 28. Juni 2014. https://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/die-oekonomische-bedeutung-der-windenergiebranche-nordrhein-westfalen/20140628_diw_econ_oekonomische_bedeutung_windenergie_d_und_nrw.pdf.
- [91] Deutsche Mittelstandsnachrichten. „Stahlarbeiter demonstrieren gegen Konkurrenz aus China“. *Deutsche Mittelstandsnachrichten*, 10. April 2016. <http://www.deutsche-mittelstandsnachrichten.de/2016/04/82369/>.
- [92] aktiencheck.de AG. „RWE-Aktie: Aussichten bleiben schwierig - Aktienanalyse“, 28. August 2014. http://www.aktiencheck.de/exklusiv/Artikel-RWE_Aktie_Aussichten_bleiben_schwierig_Aktienanalyse-5972985.
- [93] Brück, Mario, und Yvonne Esterházy. „RWE und E.On in der Krise: Der schwierige Kampf um das Geschäft mit Ökostrom“. *Wirtschaftswoche*, 2. Dezember 2015. <http://www.wiwo.de/unternehmen/energie/rwe-und-e-on-in-der-krise-der-schwierige-kampf-um-das-geschaeft-mit-oekostrom/12667748.html>.
- [94] Wirtschaftswoche. „Stromkonzerne: Energieaktien im Tiefflug“. *Wirtschaftswoche*, April 2016. <http://www.wiwo.de/finanzen/boerse/stromkonzerne-energieaktien-im-tiefflug/12586378.html>.
- [95] chemieatlas.de. „Kunststofftechnologie“. *chemieatlas.de - Das Informationsportal für die Chemieregion Ruhrgebiet + NRW*, April 2016. <http://www.chemieatlas.de/unternehmen/kunststofftechnologie/>.
- [96] chemieatlas.de. „Werkzeugbau“. *chemieatlas.de - Das Informationsportal für die Chemieregion Ruhrgebiet + NRW*, April 2016. <http://www.chemieatlas.de/unternehmen/kunststofftechnologie/werkzeugbau/>.
- [97] Larsen, Kari. „Recycling wind turbine blades“. *Renewable Energy Focus* 9, Nr. 7 (Januar 2009): 70–73. doi:10.1016/S1755-0084(09)70045-6.

- [98] Larsen, Kari. „Recycling wind“. *Reinforced Plastics* 53, Nr. 1 (Januar 2009): 20–25. doi:10.1016/S0034-3617(09)70043-8.
- [99] Cherrington, R., V. Goodship, J. Meredith, B.M. Wood, S.R. Coles, A. Vuillaume, A. Feito-Boirac, F. Spee, und K. Kirwan. „Producer Responsibility: Defining the Incentive for Recycling Composite Wind Turbine Blades in Europe“. *Energy Policy* 47 (August 2012): 13–21. doi:10.1016/j.enpol.2012.03.076.
- [100] Bai, Yongping, Zhi Wang, und Liqun Feng. „Chemical recycling of carbon fibers reinforced epoxy resin composites in oxygen in supercritical water“. *Materials & Design* 31, Nr. 2 (Februar 2010): 999–1002. doi:10.1016/j.matdes.2009.07.057.
- [101] Das, Sujit. „Life Cycle Assessment of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites“. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16, Nr. 3 (März 2011): 268–82. doi:10.1007/s11367-011-0264-z.
- [102] Harms, Haiο. „DAS KONZEPT DER HOLZ ,RAFFINERIE ““. *Lenzinger Berichte* 86, Nr. 2006 (2006): 1–8.
- [103] Brøndsted, Povl, Hans Lilholt, und Aage Lystrup. „COMPOSITE MATERIALS FOR WIND POWER TURBINE BLADES“. *Annual Review of Materials Research* 35, Nr. 1 (4. August 2005): 505–38. doi:10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641.
- [104] Dalili, N., A. Edrisy, und R. Carriveau. „A Review of Surface Engineering Issues Critical to Wind Turbine Performance“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, Nr. 2 (Februar 2009): 428–38. doi:10.1016/j.rser.2007.11.009.
- [105] Hyers, R. W., J. G. McGowan, K. L. Sullivan, J. F. Manwell, und B. C. Syrett. „Condition Monitoring and Prognosis of Utility Scale Wind Turbines“. *Energy Materials* 1, Nr. 3 (September 2006): 187–203. doi:10.1179/174892406X163397.
- [106] Piñero-Hernanz, Raul, Christopher Dodds, Jason Hyde, Juan García-Serna, Martyn Poliakov, Edward Lester, María José Cocero, Sam Kingman, Stephen Pickering, und Kok Hoong Wong. „Chemical Recycling of Carbon Fibre Reinforced Composites in Nearcritical and Supercritical Water“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39, Nr. 3 (März 2008): 454–61. doi:10.1016/j.compositesa.2008.01.001.
- [107] Phylipsen, G. J. M., K. Blok, und E. Worrell. „International comparisons of energy efficiency-Methodologies for the manufacturing industry“. *Energy Policy*, Cross-country comparisons of indicators of energy use, energy efficiency and CO2 emissions, 25, Nr. 7–9 (Juni 1997): 715–25. doi:10.1016/S0301-4215(97)00063-3.
- [108] Thomsen, Ole Thybo. „Sandwich Materials for Wind Turbine Blades – Present and Future“. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 11, Nr. 1 (1. Januar 2009): 7–26. doi:10.1177/1099636208099710.
- [109] Suzuki, Tetsuya, und Jun Takahashi. „Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars“. Tokyo, Japan, 2005. <http://j-t.o.oo7.jp/publications/051129/S1-02.pdf>.

- [110] Song, Young S., Jae R. Youn, und Timothy G. Gutowski. „Life Cycle Energy Analysis of Fiber-Reinforced Composites“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40, Nr. 8 (August 2009): 1257–65. doi:10.1016/j.compositesa.2009.05.020.
- [111] Schinner, G., J. Brandt, und H. Richter. „Recycling Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites“. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 9, Nr. 3 (7. Januar 1996): 239–45. doi:10.1177/089270579600900302.
- [112] Pimenta, Soraia, und Silvestre T. Pinho. „Recycling Carbon Fibre Reinforced Polymers for Structural Applications: Technology Review and Market Outlook“. *Waste Management* 31, Nr. 2 (Februar 2011): 378–92. doi:10.1016/j.wasman.2010.09.019.
- [113] Liu, Yuyan, Linghui Meng, Yudong Huang, und Jianjun Du. „Recycling of Carbon/epoxy Composites“. *Journal of Applied Polymer Science* 94, Nr. 5 (5. Dezember 2004): 1912–16. doi:10.1002/app.20990.
- [114] Joshi, S.V, L.T Drzal, A.K Mohanty, und S Arora. „Are Natural Fiber Composites Environmentally Superior to Glass Fiber Reinforced Composites?“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35, Nr. 3 (März 2004): 371–76. doi:10.1016/j.compositesa.2003.09.016.
- [115] Liedtke, Christa, Katrin Bienge, Klaus Wiesen, Jens Teubler, Kathrin Greiff, Michael Lettenmeier, und Holger Rohn. „Resource Use in the Production and Consumption System—The MIPS Approach“. *Resources* 3, Nr. 3 (28. August 2014): 544–74. doi:10.3390/resources3030544.
- [116] Bienge, Katrin, Justus von Geibler, Michael Lettenmeier, B. Biermann, O. Adria, und M. Kuhndt. „Sustainability Hot Spot Analysis: A streamlined life cycle assessment towards sustainable food chains“. In *Conference proceedings of the 9th European International Farming System Association Symposium*, 4–7, 2010. http://ifsa.boku.ac.at/cms/fileadmin/Proceeding2010/2010_WS4.4_Bienge.pdf.
- [117] Welfens, Dr Maria J., und Nadja Schiemann. „Materialintensität pro Serviceeinheit – Material Intensity per Serviceunit (MIPS)“. In *Umweltökonomie und zukunftsfähige Wirtschaft*, herausgegeben von Dr Maria J. Welfens und Nadja Schiemann MA, 65–67. Umwelt und Ökonomie 10. Physica-Verlag HD, 1994. doi:10.1007/978-3-642-46953-4_21.
- [118] Herzog, Kristina, Liedtke Christa, Ritthoff Michael, Wallbaum Holger, und Merten Thomas. *Der Werkstoff Stahl im Vergleich zu Konkurrenzwerkstoffen: Verfahren, Ressourceneffizienz, Recycling, Umwelt*. Herausgegeben von Studiengesellschaft Stahlanwendung. Forschung für die Praxis P 559. Düsseldorf: Verl. u. Vertriebsges. mbH, 2002.
- [119] Friedrich, Schmidt-Bleek. *Das Wuppertal Haus: Bauen und Wohnen nach dem Mips-Konzept*, 1999. <http://link.springer.com/openurl?genre=book&isbn=978-3-7643-6017-7>.
- [120] Schmidt-Bleek, Friedrich. *Wieviel Umwelt braucht der Mensch?: MIPS - Das Maß für ökologisches Wirtschaften*, 1994. <http://link.springer.com/openurl?genre=book&isbn=978-3-0348-5651-5>.
- [121] von Weizsäcker, Ernst Ulrich, Amory B. Lovins, und L. Hunter Lovins. *Faktor Vier: doppelter Wohlstand - halbiertes Naturverbrauch ; der neue Bericht an den Club of Rome*. 10. Aufl. München: Droemer Knaur, 1997.

- [122] Liedtke, Christa, Holger Rohn, Michael Kuhndt, und Regina Nickel. „Applying Material Flow Accounting: Ecoauditing and Resource Management at the Kambium Furniture Workshop“. *Journal of Industrial Ecology* 2, Nr. 3 (1. Juli 1998): 131–47. doi:10.1162/jiec.1998.2.3.131.
- [123] Lehmann, Harry, und Friedrich Schmidt-Bleek. „Material flows from a systematical point of view“. *Fresenius Environmental Bulletin* 2, Nr. 8 (1993): 413–418.