



Klimaschutz durch Energieeffizienz II: Konzept zur Erhöhung der Energieeffizienz und Erschließung von Treibhausgas-Minderungspotenzialen in den Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

Herausforderungen und Chancen
des Transformationsprozesses in der
deutschen Industrie bis 2050

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

IREES - Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien

Karlsruhe, Berlin, 12. 04. 2017 (Redationsschluss/Inhaltlicher Stand: 30.09.2016)

Autoren

Dipl.-Phys. Oliver Lösch (Projektleitung),

Prof. Dr. Eberhard Jochem,

Dr. rer. nat. Felix Reitze,

Dipl.-Ing. Michael Schön,

Dr. rer. pol., MBA Felipe Toro,

Christian Gollmer, M.Sc.,

Prof. Dr. Jürgen Blazejczak,

Dipl.-Volkswirt Franz Garnreiter,

Prof. Dr. Ali Hassan,

Dr. rer. pol. Harald Legler †

Unter Mitarbeit von Sami Maliha und Philip Willmann

Inhalt

Inhalt.....	3
Abkürzungsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
1 Zur Notwendigkeit der Transformation in der deutschen Industrie.....	11
1.1 Zielsetzung der Studie	12
2 Zielszenarien für die THG-Emissionen der Industrie bis 2050 sowie die Relevanz des Energieverbrauchs.....	14
2.1 Aussagen aktueller Zielszenarien zu notwendigen Treibhausgasminderungen in der Industrie bis 2050	14
2.2 Derzeitiger Energiebedarf in der deutschen Industrie sowie ausgewählte Technologien.....	23
3 Transformationsprozess in der Industrie	27
3.1 Grundlegender Wandel der Produktion - Handlungsoptionen.....	27
3.1.1 Prozesssubstitution und Prozessoptimierungen	30
3.1.2 Handlungsoptionen zur Erhöhung der Effizienz bei Material- und Energieeinsatz	35
3.1.3 Verminderung der Verluste bei Energiewandlern von Endenergie auf Nutzenergie (inklusive der Verteilung der Nutzenergie)	39
3.1.4 Flexibilisierung der Stromnachfrage und -eigenerzeugung.....	40
3.1.5 Transformation durch Energieträgersubstitution	41
3.1.6 Erste Gesamteinschätzung der Minderungspotenziale der diskutierten Handlungsoptionen	42
3.2 Grundlegender Wandel der Nachfrage nach industriell gefertigten Waren	46
3.2.1 Die Rolle der privaten Nachfrage für die Industrieproduktion und die Treibhausgasemissionen.....	46
3.2.2 Handlungsoptionen für die Nachfrage nach industriellen Produkten..	53
4 Deutschland als Teil des Weltmarktes: relevante Entwicklungen, Chancen und Risiken für Transformation und Strukturwandel der deutschen Industrie im Hinblick auf 2050	58
4.1 Status Quo der Markt- und Güterstruktur des industriellen Exportes Deutschlands.....	59
4.2 Mögliche Entwicklungstendenzen des Weltmarktes und damit verbundene Risiken für typische deutsche Exportbranchen.....	66

4.3	Möglichkeiten zur Minderung der Energieintensität der Industrie durch industriellen Strukturwandel	76
4.3.1	Der historische Strukturwandeleffekt und sein Einfluss auf den Energiebedarf in Wirtschaft und Industrie	77
4.3.2	Ausblick auf einen politisch unterstützten Strukturwandel von Wirtschaft und Industrie bis 2050	81
5	Analyse ausgewählter Industriebranchen	86
5.1	Zur Wahl der hier betrachteten Branchen	86
5.2	Bedeutung des europäischen Emissionshandels für die untersuchten Branchen	88
5.3	Zementindustrie	93
5.3.1	Bedeutung für die deutsche Wirtschaft, Grundzüge der Zementherstellung	93
5.3.2	Bedeutung für den Klimaschutz, Treibhausgasemissionen und Energieeinsatz	94
5.3.3	Produktions- und nachfrageseitige Handlungsoptionen zur THG-Reduktion	99
5.3.4	Mögliche Entwicklung von Produktion und Nachfrage	107
5.4	Grundstoffchemie	108
5.4.1	Bedeutung der Grundstoffchemie für die deutsche Wirtschaft	108
5.4.2	Bedeutung für den Klimaschutz, THG-Emissionen und Energieeinsatz	109
5.4.3	Produktions- und nachfrageseitige Handlungsoptionen zur THG-Reduktion	110
5.4.4	Mögliche Entwicklung von Produktion und Nachfrage	112
5.4.5	Analyse ausgewählter Produkte der Grundstoffchemie	115
5.5	Papierindustrie	134
5.5.1	Bedeutung für die deutsche Wirtschaft, Grundzüge der Papierherstellung	134
5.5.2	Bedeutung für den Klimaschutz, THG-Emissionen und Energieeinsatz	136
5.5.3	Produktions- und nachfrageseitige Handlungsoptionen zur THG-Reduktion	138
5.5.4	Mögliche Entwicklung von Produktion und Nachfrage	141
5.6	Eisen- und Stahlindustrie	145
5.6.1	Bedeutung für die deutsche Wirtschaft, Grundzüge der Eisen- und Stahlherstellung	145

5.6.2	Bedeutung für den Klimaschutz, THG-Emissionen und Energieeinsatz	148
5.6.3	Produktions- und nachfrageseitige Handlungsoptionen zur THG-Reduktion sowie Entwicklung von Produktion und Nachfrage	150
6	Fazit und Empfehlungen	156
6.1	Zusammenfassendes Fazit	156
6.2	Empfehlungen	161
7	Literaturverzeichnis	169
8	Anhang	183
8.1	Methodisches Vorgehen	183

Abkürzungsverzeichnis

BAU	=	Business as Usual
BTL	=	Bio mass to liquids
BVT	=	Beste verfügbare Technik
CCS	=	Carbon Capture and Storage
CCU	=	Carbon Capture and Use
Cl ₂	=	Chlor
CO ₂	=	Kohlendioxid
CO ₂ äq.	=	Kohlendioxid - Äquivalent
ETBE	=	Ethyltertiärbutylether
FuE	=	Forschung und Entwicklung
GJ	=	Giga Joule (10 ⁹ Joule)
HCl	=	Chlorwasserstoff
HVC	=	high value chemicals
KWh	=	Kilowattstunde
KWK	=	Kraftwärmekopplung
LNG	=	Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
MTBE	=	Methyltertiärbutylether
MW	=	Megawatt
N ₂	=	Stickstoff
NaOH	=	Natriumhydroxid (Natronlauge)
NH ₃	=	Ammoniak
PJ	=	Petajoule (10 ¹⁵ Joule)
PVC	=	Polyvinylchlorid
SNG	=	Substitute Natural Gas
THG	=	Treibhausgas
TWh	=	Terawattstunde (10 ¹² Wattstunden)
VET	=	Verified Emissions Table

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen der Industrie 1990 bis 2014.....	12
Abbildung 2: Absolute Veränderung des BIP in Euro pro Kopf und Jahr im den Studien Klimaschutzszenarien 2050 sowie Energiereferenzprognose)	17
Abbildung 3: Minderung der Gesamt-THG-Emissionen der Industrie 2020 bis 2050 ggü. 1990	18
Abbildung 4: Minderung der energiebedingten Emissionen der Industrie gegenüber 1990 in verschiedenen Referenz- und Ziel-Szenarien, 2020 bis 2050	19
Abbildung 5: Minderung der prozessbedingten Emissionen der Industrie 2020 bis 2050 ggü. 1990	20
Abbildung 6: Szenarienspezifische Entwicklung des Endenergiebedarfs der Industrie (inkl. Industriekraftwerke) in den Jahren 2010 bis 2050	21
Abbildung 7: Szenarienspezifische Entwicklung des Strom- und Brennstoffbedarfes der Industrie in PJ zwischen den Jahren 2010 bis 2050	21
Abbildung 8: Zur Bedeutung von Konsum- und Investitionsausgaben an der inländischen Verwendung des BIP	46
Abbildung 9: Verfügbares Einkommen, Konsumausgaben und Sparen der privaten Haushalte in Deutschland, 1991 bis 2013	47
Abbildung 10: Der Struktur- und Technologieeffekt zur Verminderung des Primärenergieverbrauchs der Gesamtwirtschaft (45 Branchen) 1995 bis 2012	79
Abbildung 11: Der Struktur- und Technologieeffekt zur Verminderung des Primärenergieverbrauchs des Verarbeitenden Gewerbes (19 Branchen) 1995 bis 2012	80
Abbildung 12: Der Struktur- und Technologieeffekt zur Verminderung des Primärenergieverbrauchs des GHD-Sektors (18 Wirtschaftszweige) 1995 bis 2012	81
Abbildung 12: Direkte Treibhausgasemissionen der hier untersuchten Branchen sowie der restlichen Industrie, im Jahr 2014 (Zement: 2013) in Mio. t CO ₂ äq. Gesamtmenge angeben, dazu auch Anteil Prozessemissionen.....	87
Abbildung 14: Treibhausgasemissionen der Papierherstellung im Jahr 2007	136
Abbildung 15: Schematische Abbildung und Aufteilung des Energiebedarfs bei der Papierherstellung	138

Abbildung 16: Abwärmeströme einer Papierfabrik.....	141
Abbildung 17: Entwicklung des Papierverbrauchs bzw. der Papierproduktion bis zum Jahr 2025, unterschieden nach verschiedenen Regionen in der Welt sowie unterschiedlichen Papiersorten (Einheit: jährliche Wachstumsraten)	142
Abbildung 18: Papierverbrauch [kg/cap] in Abhängigkeit des Brutto-Nationalproduktes [\$/cap]	143
Abbildung 19: Stahlverwendung in Deutschland	146
Abbildung 20: Entwicklung des Kohlenstoffeinsatzes zur Roheisenerzeugung	151

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ökonomische Rahmenannahmen der untersuchten Szenarien für die Periode 2010 bis 2030	16
Tabelle 2:	Ökonomische Rahmenannahmen der untersuchten Szenarien für die Periode 2030 bis 2050	17
Tabelle 3:	Endenergieverbrauch der deutschen Industrie nach 14 Industriebranchen und nach Energieträgern, 2013 in PJ.....	24
Tabelle 4:	Endenergieverbrauch und Nutzenergiebedarf nach Anwendungszwecken in der Industrie im Jahr 2013	25
Tabelle 5:	Grober Überblick über Ansatzpunkte und mögliche Handlungsoptionen im Bereich der Industrie zur Reduktion der THG-Emissionen in Deutschland bis zum Jahr 2050	43
Tabelle 6:	Ausgewählte historische Sparquoten der privaten Haushalte in Deutschland, 1950 bis 2014	47
Tabelle 7:	Aufteilung der Konsumausgaben der privaten Haushalte in 2013.....	49
Tabelle 8:	Anteile der deutschen Warenexporte in ausgewählte EU-Länder, Nicht-OECD-Länder und OECD-Länder, die kein Mitglied der EU sind.....	59
Tabelle 9:	Anteile Deutschlands an den Importen ausgewählter EU-Länder, BRICS-Ländern und OECD-Ländern außerhalb Europas im Jahr 2014	60
Tabelle 10:	Deutsche Exporte nach wichtigen Gütergruppen und Kontinenten 2014.....	62
Tabelle 11:	Exporte von Gütern des Umwelt- und Klimaschutzes der deutschen Industrie, 2002 bis 2013	65
Tabelle 12:	Wirtschaftswachstum (BIP) von Weltregionen und Ländern 2010 bis 2050	68
Tabelle 13:	Geographische Struktur der Weltexporte 2012 mit Trend-Szenario für 2030 und 2060	71
Tabelle 14:	Zuteilungssituation nach Tätigkeiten 2014; modifiziert nach (DEHSt 2015b).....	90
Tabelle 15:	Energieeinsatz in der Zementproduktion.....	94
Tabelle 16:	Spezifische CO ₂ -Intensität der Klinkerproduktion	97
Tabelle 17:	Spezifische und absolute Emissionen der Zementproduktion in Deutschland.....	98

Tabelle 18:	Entwicklung der Marktanteile der verschiedenen Zementarten in Deutschland	100
Tabelle 19:	Klinkerfaktor der deutschen Zementproduktion	101
Tabelle 20:	Bruttoproduktionswert und Endenergieverbrauch (ohne nicht-energetischer Verbrauch) der Chemischen Industrie in Deutschland.....	109
Tabelle 21:	Zusammenfassende Darstellung der derzeitigen THG-Emissionen der Ammoniakproduktion (energiebedingte Emissionen: 2013; Prozessemissionen: 2014)	117
Tabelle 22:	Zusammenfassende Darstellung der derzeitigen THG-Emissionen der Ethylen- und Propylenproduktion (2014).....	121
Tabelle 23:	Zusammenfassende Darstellung der derzeitigen THG-Emissionen der Methanolproduktion (2014).....	126
Tabelle 24:	Zusammenfassende Darstellung der derzeitigen THG-Emissionen der Chlorproduktion (2014).....	130
Tabelle 25:	Darstellung des spezifischen Energiebedarfs (typische Bereiche) in Abhängigkeit von der Papiersorte.....	137
Tabelle 26:	Effizienzpotenziale bei der Nutzung von Niedrigtemperatur-Abwärme	139
Tabelle 27:	Entwicklung der Rohstahlerzeugung und Umsatzerlöse der Stahlindustrie in Deutschland.....	146

1 Zur Notwendigkeit der Transformation in der deutschen Industrie

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 % bis zu 95 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren (BMWi und BMUB 2010). In absoluten Zahlen entspricht dies einer Reduktion von 1.248 Mio. t CO₂-Äquivalentemissionen (CO₂ äq.) in 1990 auf dann noch ca. 62 bis 250 Mio. t CO₂ äq. in 2050.

Dieses Ziel ist nur dann zu erreichen, wenn alle Sektoren, deren Wirtschaftstätigkeit mit Emissionen verbunden ist, diese so weit wie möglich reduzieren. Dies gilt insbesondere auch für den Sektor Industrie, der in Deutschland im Jahr 2014 mit ca. 183 Mio. t CO₂ äq. ca. 20 % zu den Gesamtemissionen beiträgt (UBA 2016b)¹. Die Prozessemissionen und die Emissionen durch Produktverwendung betragen im Jahr 2014 knapp 63 Mio. t CO₂ äq. (UBA 2016a). Hinzu kommen ca. 127 Mio. t indirekte CO₂-Emissionen aufgrund des Strombezugs aus der Energiewirtschaft.²

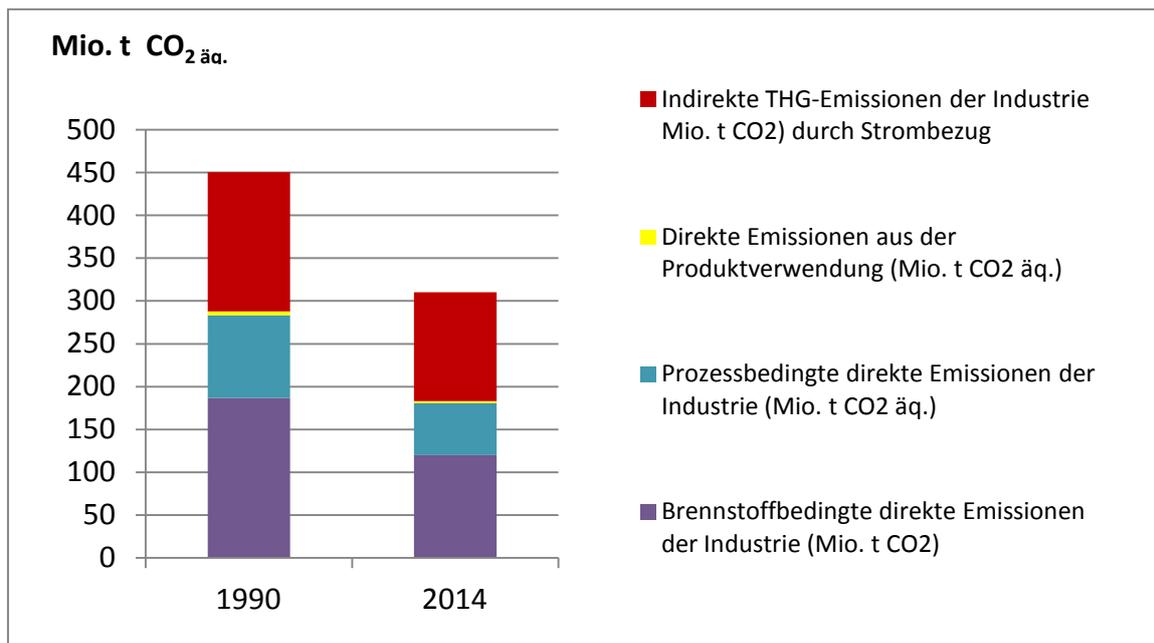
Der Sektor Industrie hat seine Emissionen seit 1990 von 283 auf 183 Mio. t CO₂ um 35 % verringert (UBA 2016b). Seit 15 Jahren stagnieren die Emissionen der Industrie jedoch und es sind im Wesentlichen geringe, konjunkturbedingte Schwankungen zu beobachten. Die in der internationalen Treibhausgas-Berichterstattung nicht der Industrie zugerechneten CO₂-Emissionen, die durch den Strombezug der Industrie aus Kraftwerken der allgemeinen Versorgung bedingt sind, gingen von 162 Mio. t CO₂ in 1990 bis 2014 um knapp 22 % (auf 127 Mio. t) zurück. Die Industrie als wesentlicher Stromnachfrager ist als Akteur also für einen wesentlich höheren Anteil an den Gesamtemissionen zumindest mitverantwortlich.

Jüngere ökonomische Analysen zu den Wirkungen des Klimawandels machen auf Folgendes (Burke et al. 2015; Moore und Diaz 2015) aufmerksam

- bei ungebremstem Zuwachs der THG-Emissionen hätten drei Viertel aller Länder bis 2100 erhebliche ökonomische Wachstumsverluste durch den Klimawandel (relativ zu einer Begrenzung auf 2 °C Erhöhung der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche ggü. vorindustriellem Niveau). Ein Teil der betroffenen Länder wäre in 2100 sogar ärmer als heute;
- die bisherigen Wachstumsprognosen sowohl für die Schwellen- und Entwicklungsländer als auch die Industrieländer wären bei ungebremstem Zuwachs der THG-Emissionen als deutlich zu optimistisch, wenn nicht vollkommen obsolet anzusehen, da das weltweite Wachstum auch die Exporte der Industriestaaten – und damit deren Wachstum – beeinflusst.

¹ Inklusive 2 Mio. t CO₂ äq. aus der Produktverwendung (z.B. F-Gase)

² Eigene Berechnung



Quelle: UBA 2016b; AGE B 2016

Abbildung 1: Entwicklung der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen der Industrie 1990 bis 2014

Ohne Zweifel bedeutet eine Zielsetzung der Verminderung der Treibhausgas-Emissionen der deutschen Industrie um 80 % oder mehr eine Transformation des gesamten Produktions- und Kapitalstocks der deutschen Industrie. Dieses genauer darzustellen und zu bewerten ist das Anliegen der hier vorliegenden Analyse.

1.1 Zielsetzung der Studie

Um die notwendigen THG-Minderungen der Industrienationen (mindestens -80 % in 2050 ggü. 1990) zu erreichen, ist eine Transformation des Gebäudebestandes, des Produktionssystems der Industrie und der Verkehrsinfrastruktur sowie auch der Stromerzeugung erforderlich.

Für die Transformation des Produktionssystems der deutschen Industrie bis 2050 bleibt nur sehr wenig Zeit. Viele der Produktionsanlagen der energie-intensiven Grundstoffindustrieweige, wie z.B. Erzeugung von Rohstahl, Zement, Ziegeln, Ethylen oder Chlor haben sehr lange Reinvestitionszyklen von drei bis vier Jahrzehnten und teilweise noch darüber hinaus (Marceau et al. 2006; Pauliuk et al. 2012; Arens et al. 2016; Fleiter et al. 2013). Anlagen, die heute oder in wenigen Jahren neu in Betrieb gehen, sollten daher eigentlich mindestens 80 % weniger Treibhausgase als 1990 emittieren. Alternativ müssten z.B. zusätzlicher Raum und Anflanshmöglichkeiten vorgesehen werden, um später nachgeschaltete Emissionsminderungen durch technische Ergänzungen zu ermöglichen.

Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist es, neben der breiten Problemdarstellung, die Möglichkeiten für die Industrie einer Transformation zu einer klimaverträglichen Produktionsstruktur zu analysieren und daraus erste Empfehlungen für politische Maßnahmen der Bundesregierung zu entwickeln. Im Einzelnen hat die Studie folgende Teilziele:

- eine knappe Darstellung der Entwicklung der Treibhausgasemissionen sowie des bisherigen und heutigen Energiebedarfs der Industrie sowie eine Analyse vorliegender Zielszenarien (insbesondere der Klimaschutzszenarien 2050 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) mit der Intention darzulegen, inwieweit die deutsche Industrie als Sektor in der Lage ist, das bundesweit im Durchschnitt aller Sektoren angestrebte Emissionsminderungsziel von 80 bis 95 % zu erreichen (Kapitel 2).
- eine Darstellung der derzeit vorhandenen oder sich in Forschung und Entwicklung befindlichen technischen Möglichkeiten zur Reduktion von Primär-, End- und Nutzenergiebedarfen (und damit der THG-Emissionen) der industriellen Produktion (Kapitel 3.1).
- eine Analyse der Bedeutung der Nachfrage privater Haushalte für die Industrieproduktion und deren Emissionen (Kapitel 3.2).
- eine Analyse der Auswirkungen eines möglichen Strukturwandels hin zu emissionsintensiven Branchen in der deutschen Industrie bis 2050 sowie der möglichen Rolle des Außenhandels hierfür (Kapitel 4).
- genauere Analysen für einige emissionsintensive Industriezweige, um zur Diskussion über die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit einer Transformation der Industrie an konkreten Beispielen beizutragen (Kapitel 5).

Aus diesen Aspekten folgen erste mögliche politische Handlungsoptionen, die abschließend dargestellt werden (Kapitel 6).

Die Zielsetzung der vorliegenden Studie ist breit gefächert und ambitioniert. Das Papier ist daher als ein erster konkretisierender Problemaufriss zu verstehen.

Hinweise zum methodischen Vorgehen finden sich im Anhang.

2 Zielszenarien für die THG-Emissionen der Industrie bis 2050 sowie die Relevanz des Energieverbrauchs

Um die Transformation der deutschen Industrie hin zu einer klimaverträglichen Produktionsstruktur bis Mitte dieses Jahrhunderts im Weiteren darstellen zu können, werden

- zum einen aktuelle Zielszenarien zur Entwicklung der Treibhausgase für den Sektor Industrie einander gegenübergestellt (vgl. Kapitel 2.1) und daraus erste Schlüsse für die notwendigen Minderungsleistungen der Industrie gezogen;
- und zum anderen die heutige Energieverbrauchsstruktur der Industrie und ihrer Branchen differenziert dargestellt, um Ansatzpunkte für Energieeffizienz und Energieträgersubstitution zu erläutern und daraus Möglichkeiten zur Emissionsminderung ableiten zu können.

2.1 Aussagen aktueller Zielszenarien zu notwendigen Treibhausgasminderungen in der Industrie bis 2050

In welcher Größenordnung der Industriesektor seine THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 mindern müsste, damit das Gesamtziel nicht gefährdet wird, zeigen aktuelle, auf Modellrechnungen basierende Zielszenarien. Eine Studie nimmt an, dass andere Sektoren nicht überproportionale Emissionsminderungen erbringen können, um der Industrie unterproportionale Emissionsminderungen zu ermöglichen (Klimaschutzszenario 80 und 95). Eine andere Studie hält höhere Minderungsbeiträge bei anderen Sektoren „zugunsten“ der Industrie für möglich (Prognos et al. 2014a).

Betrachtet wurden dabei hier die Referenz- und Ziel-Szenarien folgender Studien:

- Öko-Institut/Fraunhofer ISI: Klimaschutzszenario 2050, 2. Modellierungsrunde; Auftraggeber BMUB
 - Aktuelle-Maßnahmen-Szenario („**AMS**“); Business-as-usual Entwicklung
 - Klimaschutzszenario 80 („**KS80**“); Zielerreichung Minderungsziel -80 %
 - Klimaschutzszenario 95 („**KS95**“); Zielerreichung Minderungsziel -95 %
- Prognos; EWI & GWS: Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose (2014); Auftraggeber BMWi
 - Trend-Szenario („**EnRef-Trend**“)
 - Zielszenario -80 % („**EnRef ZS**“)

Außerdem wurde die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 (2014)“ des UBA analysiert und für den Vergleich herangezogen. Bei dem dort beschriebenen „Zielszenario -95 %“ („**THGND**“) handelt es sich nicht um ein Zielszenario im engeren Sinne³. Die Studie stellt vielmehr eine Vision einer möglichen

³ Die Studie selbst spricht hier von einem „Zielszenario“, allerdings handelt es sich nicht um eine Modellstudie, die makroökonomische Rahmendaten modellgestützt verarbeitet. Auch trifft die Studie im Ergebnis keine Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der diskutierten Optionen oder makroökonomische Effekte einer Zielerreichung. Von einem „Zielszenario“ im engeren Sinne kann daher hier nicht gesprochen werden. Ziel der Studie ist es, zu zeigen, dass ein treibhausgasneutrales Deutschland mit vorwiegend technischen Maßnahmen zu erreichen ist.

technischen Entwicklung für das Jahr 2050 dar, ohne den Pfad bis dorthin zu modellieren.

Diese Szenarien sind aktuell und bilden hinsichtlich der Emissionsentwicklung den Zeithorizont bis 2050 ab. Sie treffen darüber hinaus Aussagen über die Emissionsentwicklung des Sektors Industrie (was bei einigen anderen Studien nicht der Fall ist).

Die zukünftige Entwicklung der THG-Emissionen der Industrie hängt von verschiedenen Szenarien-spezifischen Rahmenbedingungen und weiteren Ereignissen ab. Letztere können prinzipiell nicht antizipiert werden. Als Rahmenbedingungen sind hier grundsätzlich besonders von Bedeutung:

- die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland
- das unterstellte Wirtschaftswachstum (pro Einwohner und Jahr),
- der inter- und intra-sektorale Strukturwandel der Wirtschaft, der seit Jahrzehnten zu einer Verminderung des Energiebedarfs infolge des überproportionalen Wachstums des Dienstleistungssektors und energieextensiver Industriezweige beiträgt (vgl. auch Kapitel 4.3),
- die Entwicklung gesellschaftlich weit verbreiteter Werte und Konsummuster (vgl. Kapitel 3.2) mit entsprechenden Wirkungen auf den Ressourcenverbrauch oder die Arbeitsproduktivität der Wirtschaft (siehe unten).

Diese sowie einige weitere⁴ Einflüsse wirken mehr oder weniger stark auf die physikalische Produktion der Industriebranchen und damit auf die Entwicklung der THG-Emissionen ein.

Ausgewählte Rahmenannahmen der untersuchten Szenarien

Bei der Betrachtung der zukünftigen Entwicklung der Industrie in Deutschland gehen die Autoren aller hier zitierten Szenarien von einer bei etwa 80 Mio. Einwohnern stagnierenden oder auf rd. 75 Mio. schrumpfenden Bevölkerung aus. Die Bevölkerung stellt über die Endnachfrage unter anderem einen essentiellen Treiber der Nachfrage nach Gebrauchs- und Verbrauchsgütern sowie Bauleistungen dar, die ihrerseits die Produktion emissionsintensiver Grundstoffe erforderlich machen. Die untersuchten Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Annahmen zur Produktionsentwicklung der deutschen Industrie (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2).

Bei der BIP-Entwicklung der Energierferenz-Szenarien von Prognos, EWI & GWS ist zu hinterfragen, ob der zukünftige Zuwachs des BIP mit 523 € pro Kopf und Jahr (Periode 2020-2030) bzw. 606 € pro Kopf und Jahr (Periode 2030-2050) nicht überschätzt wird (vgl. Abbildung 2). In den vergangenen fünf Jahrzehnten betrug dieser Wert nur etwa 400 € pro Kopf und Jahr, und es gibt durchaus auch Gründe die für eine Abschwächung des durchschnittlichen jährlichen Pro-Kopf-Wachstums in Zukunft sprechen. Die Klimaschutzszenarien 2050 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) legen diese eher zurückhaltende Wirtschaftsentwicklung zugrunde.

Die Studie zeigt, dass Deutschland „prinzipiell seine Treibhausgasemissionen bis 2050 um 95 % gegenüber 1990 senken kann“.

⁴ Z.B. die Nachfrage nach deutschen Exportgütern (vgl. Kap. 4.1), die Standortstrategien großer internationaler Industriekonzerne, deren Reaktion auf den Klimawandel sowie der technologische Fortschritt

Tabelle 1: Ökonomische Rahmenannahmen der untersuchten Szenarien für die Periode 2010 bis 2030

Annahmen 2030	AMS	KS80	KS95	THGND	ENRef ZS
BIP-Wachstum Gesamt [%/a ; 2010/2011-2030]	0,93	0,93	0,93	0,7	1,1
BIP gesamt absolut [Mrd. € ₂₀₁₀]	3009	3009	3009		
BWS Verarb. Gewerbe absolut [Mrd. € ₂₀₁₀]	518	518	518		583,8
BWS-Wachstum Verarb. Gewerbe [%/a ; 2010/2011-2030]	0,8	0,8	0,8		1,25
Erdgaspreis [€ ₂₀₁₀ /GJ]	9,4	9,4	9,4		7,9
Preis EUA [€ ₂₀₁₀ /t]	30	50	87		36,7
Erwerbstätige [Mio.]	39,3	39,3	39,3		38,3
Erwerbstätige Verarb Gewerbe [Mio.]	5,6	5,6	5,6		
Erwerbstätige Produz. Gewerbe [Mio.]	8,7	8,7	8,7		8,5

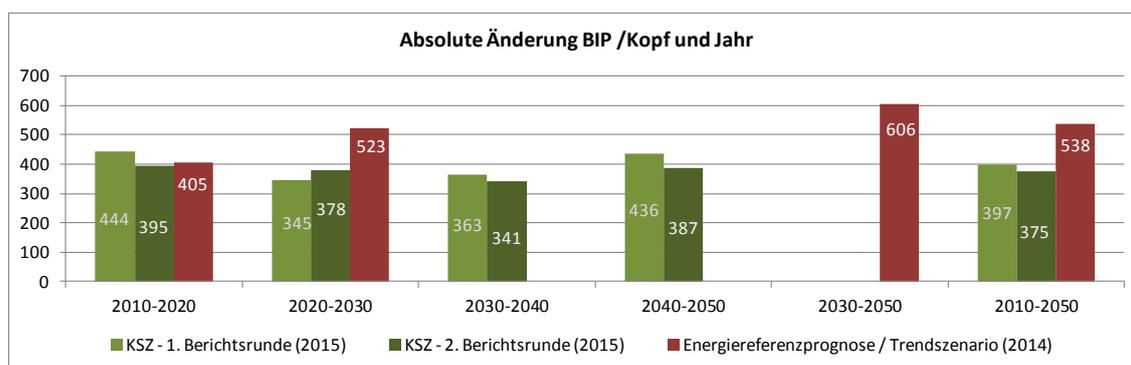
Quellen: Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; UBA 2014b; Prognos et al. 2014a

Es fällt auf, dass die Wirkungen eines ambitionierten Transformationsprozesses in der Industrie sich scheinbar nicht in den Annahmen zur Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes widerspiegeln. Denn mit zunehmender Transformation müssten beispielsweise die veränderte Wertschöpfung in der Investitionsgüter-Industrie und der Kfz-Industrie (siehe hierzu auch Kapitel 4) positive Veränderungen in der Bruttowertschöpfung der Industrie insgesamt verursachen. Auch die mit den verschärften Ziel-Szenarien einhergehenden geringeren Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe bei der Öko-Institut und Fraunhofer ISI-Studie (2015) müssten sich in leicht negativ veränderten Werten der Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes niederschlagen. In Summe dürfte ein positiver Nettoeffekt resultieren, da die „sonstige“ Industrie erheblich höhere absolute Anteile an der deutschen Bruttowertschöpfung hat als die Grundstoffindustrien (siehe auch Kapitel 5.1).

Tabelle 2: Ökonomische Rahmenannahmen der untersuchten Szenarien für die Periode 2030 bis 2050

Annahmen 2050	AMS	KS80	KS95	THGND	ENRef ZS
BIP-Wachstum Gesamt [%/a ; 2030-2050]	0,61	0,61	0,61	0,7	1
BIP gesamt absolut [Mrd. € ₂₀₁₀]	3402	3402	3402		
BWS VG absolut [Mrd. € ₂₀₁₀]	593	593	593		705,9
BWS-Wachstum VG [%/a ; 2030-2050]	0,7	0,7	0,7		0,95
Erdgaspreis [€ ₂₀₁₀ /GJ]	13,9	13,9	13,9		8,4
Preis EUA [€ ₂₀₁₀ /t]	50	130	200		69,8
Erwerbstätige [Mio.]	37,2	37,2	37,2		35,9
Erwerbstätige VG [Mio.]	4,4	4,4	4,4		
Erwerbstätige PG [Mio.]	6,9	6,9	6,9		7,1

Quellen: Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; UBA 2014b; Prognos et al. 2014a



Quelle: IREES 2016 berechnet nach Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; Prognos et al. 2014a

Abbildung 2: Absolute Veränderung des BIP in Euro pro Kopf und Jahr in den Studien Klimaschutzszenarien 2050 sowie Energiereferenzprognose

Vergleich der wesentlichen Ergebnisse der untersuchten Szenarien

Gemäß (Prognos et al. 2014a) werden die energieintensiven Branchen im Betrachtungszeitraum an Bedeutung verlieren. Im Jahr 2011 trugen sie 13,9 % zur industriellen Wertschöpfung bei. Im Jahr 2030 sind es noch 11,4 % und 2050 nur noch 10,0 %. Die Branchen Herstellung von Investitionsgütern, Gebrauchs- und Konsumgütern wachsen dagegen im gleichen Zeitraum überdurchschnittlich.

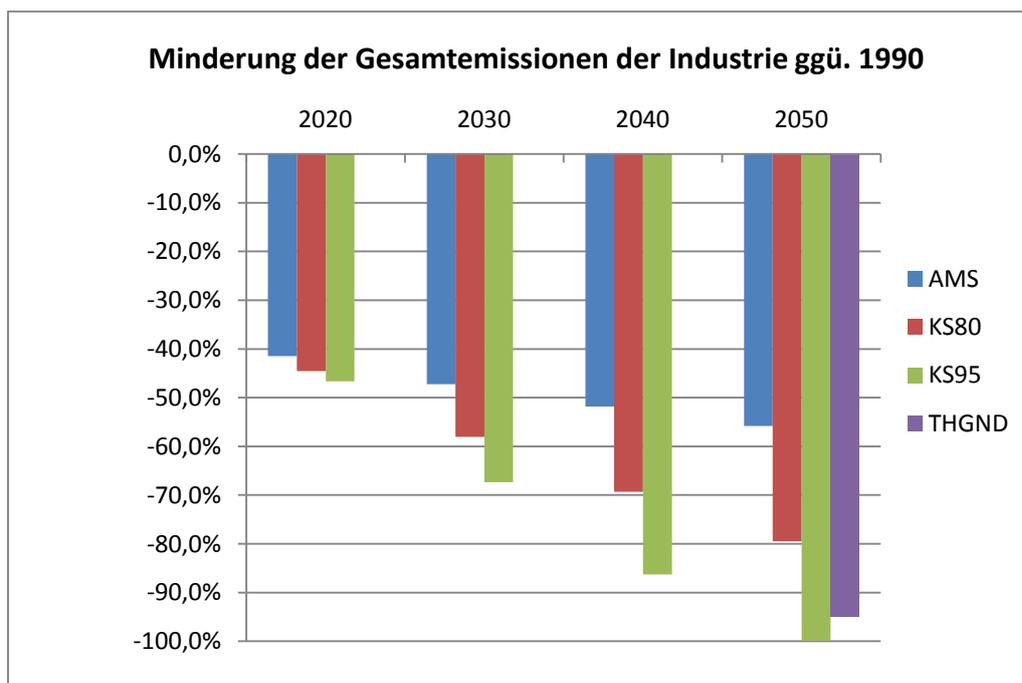
Dabei unterstellt die Energiereferenzprognose einen geringeren Preisanstieg für Energie und ETS-Zertifikate (EUA) als die Klimaschutzszenarien 2050 (vergleiche Tabelle 1 und Tabelle 2).

Die Energiereferenzszenarien analysieren ausschließlich die Energiebedarfsentwicklung der Industrie und emissionsseitig daher auch nur die energiebedingten THG-Emissionen. Die bedeutenden industriellen Prozessemissionen (etwa 61 Mio. t CO₂ äq. im Jahre 2014, entsprechend rund einem Drittel der gesamten THG-Emissionen der Industrie; vgl. UBA 2016b) werden nicht untersucht.

Bei der Studie Treibhausgasneutrales Deutschland, die das Ziel einer THG-Minderung um 95 % ggü. 1990 (UBA 2014b) betrachtet, handelt es sich um eine technologieorientierte Machbarkeitsstudie, die eine technologisch machbare Entwicklung (ohne diese im Sinne eines Pfades zu beschreiben) ohne fossilen Energieträger-Einsatz aufzeigen will; es verbleiben lediglich geringe prozessbedingte THG-Emissionen.

Das Referenzszenario „AMS“ (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) verfehlt mit 56 % das Minderungsziel klar. Die untersuchten Zielszenarien für das Jahr 2050 müssen daher diese Lücke schließen. Die Zielszenarien zeigen, dass die Minderung im Sektor Industrie jeweils nahezu dem Gesamtminderungsziel für Deutschland entspricht. Das Szenario „KS80“ kommt für die Industrie auf eine Minderung um 79,5 % ggü. 1990, „KS95“ sogar auf eine überproportionale Minderung um 99,5 % ggü. 1990.

Die Szenarien zeigen: Der Industriesektor muss gegenüber der Business-as-usual Entwicklung seine Emissionsminderung deutlich steigern. Die Studie von Öko-Institut/Fraunhofer ISI sieht keine Möglichkeit, dass andere Sektoren zu Gunsten des Industriesektors ihre Emissionen überproportional mindern könnten (vgl. Abbildung 3).



Quellen: Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; UBA 2014b

Abbildung 3: Minderung der Gesamt-THG-Emissionen der Industrie 2020 bis 2050 ggü. 1990

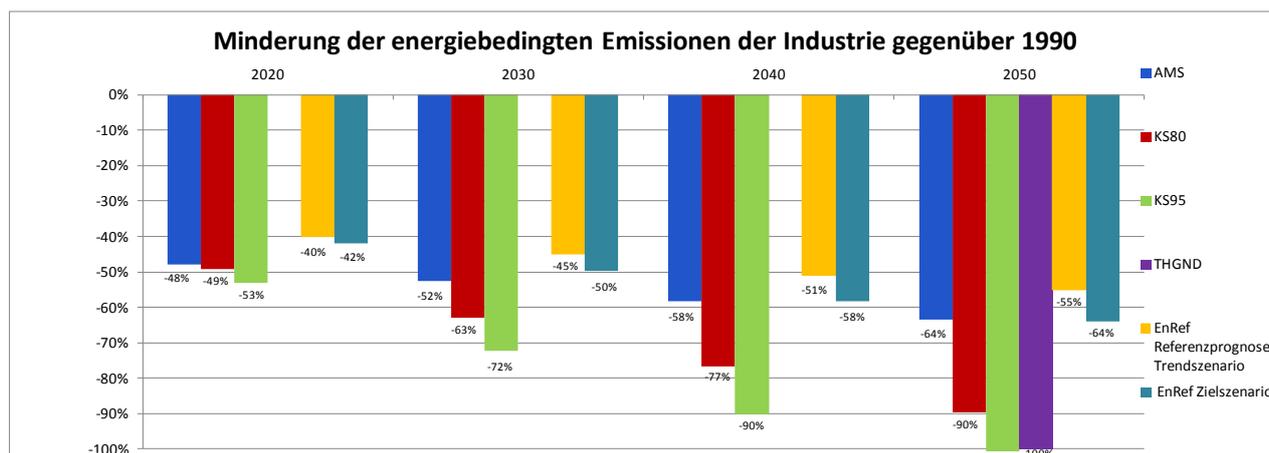
Das Referenzszenario „EnRef Trend“ (Prognos et al. 2014a) erreicht eine Reduktion um 55 %, dies sind 8 Prozentpunkte weniger als beim „AMS“ (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015)

Das Zielszenario „EnRef ZS“ (Prognos et al. 2014a) übersteigt mit einer Minderung um 64 % in 2050 kaum das Niveau des Referenz-Szenarios „AMS“ (63 %). Dies ist möglich, weil andere Sektoren die unzureichende Minderung kompensieren: die privaten

Haushalte mit einer Minderung um 90 %, der GHD-Sektor mit 92 % und die Energiewirtschaft mit 83 % (Prognos et al. 2014a, S. 242). Daher können die energiebedingten THG-Emissionen im Sektor Industrie hier höher sein als in den Ziel-Szenarien der anderen Autoren. Allerdings bleibt der Makel, dass sich diese Szenarien-Analyse nur den energiebedingten THG-Emissionen widmet.

Die Ergebnisse von Öko-Institut/Fraunhofer ISI zeigen, **dass die Minderung bei den energiebedingten THG-Emissionen notwendigerweise über das Gesamtziel von -80 % oder -95 % hinausgehen muss**, weil bei den prozessbedingten THG-Emissionen unterstellt wird, dass letztere nicht proportional zur Zielerreichung beitragen können (vgl. Abbildung 4). Im Szenario „KS95“ ergibt sich sogar eine negative Restemission: dies wird durch die Kombination von Biomasseverfeuerung mit CCS erreicht, sodass netto Kohlendioxid dem Kreislauf entzogen wird.

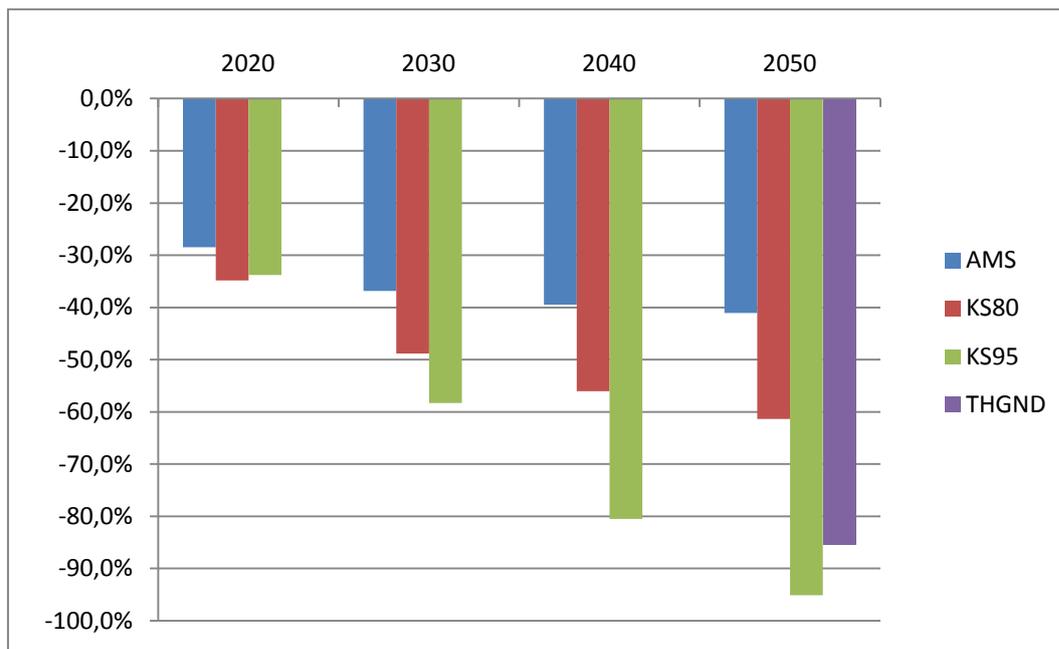
Das „THGND“ Szenario (UBA 2014b) verzichtet auf diese Option und setzt stattdessen sehr stark auf Sekundärenergieträger auf der Basis erneuerbaren Stroms, so dass die energiebedingten Emissionen genau auf null zurückgefahren werden (siehe zu diesen Technologieoptionen auch die Ausführungen in Kapitel 3.1.1 und in der Analyse der Grundstoffindustrien in Kapitel 5).



Quellen: Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; UBA 2014b; Prognos et al. 2014a

Abbildung 4: Minderung der energiebedingten Emissionen der Industrie gegenüber 1990 in verschiedenen Referenz- und Ziel-Szenarien, 2020 bis 2050

Eine Betrachtung der prozessbedingten Emissionen (Abbildung 5) zeigt, dass auch in diesem Bereich ein erheblicher Fortschritt gegenüber dem Business-as-usual Szenario erforderlich ist. Die Emissionsminderungen fallen in allen Szenarien etwas schwächer aus, was auf der Einschätzung der Autoren der Szenarien beruht, dass eine Verminderung der energiebedingten Emissionen technisch einfacher und ökonomisch günstiger ist.



Quellen: Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; UBA 2014b

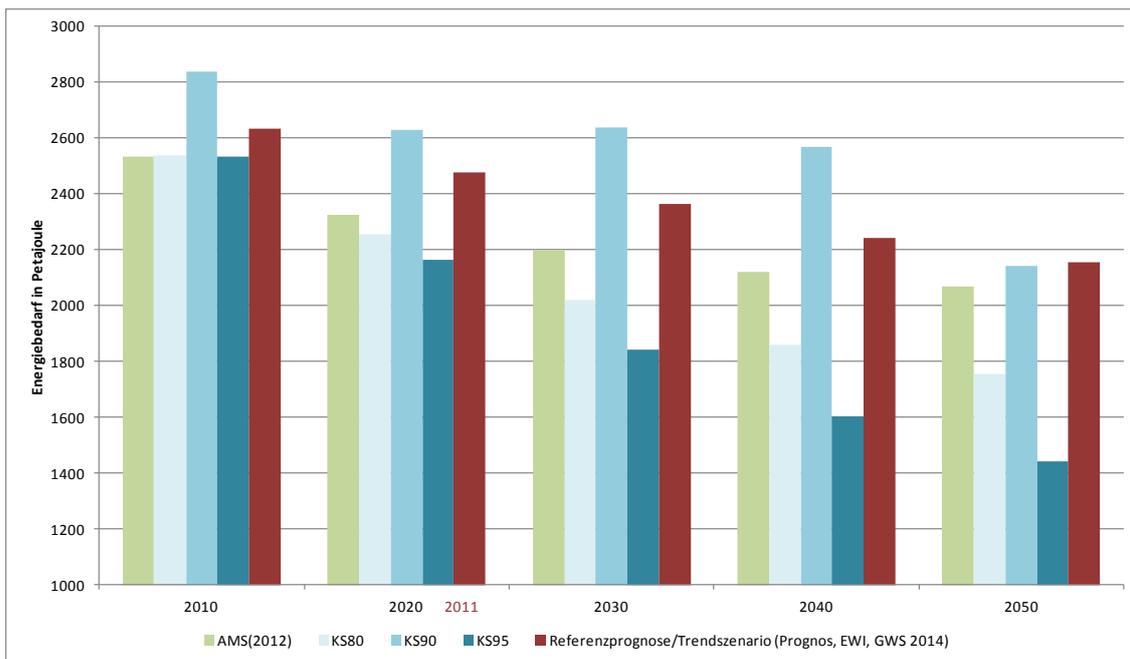
Abbildung 5: Minderung der prozessbedingten Emissionen der Industrie 2020 bis 2050 ggü. 1990

Entwicklung des Energieverbrauchs der Industrie in den untersuchten Szenarien

Abschließend soll hier noch ein Blick auf die Aussagen der Szenarien zur Entwicklung des Energieverbrauchs der Industrie geworfen werden.

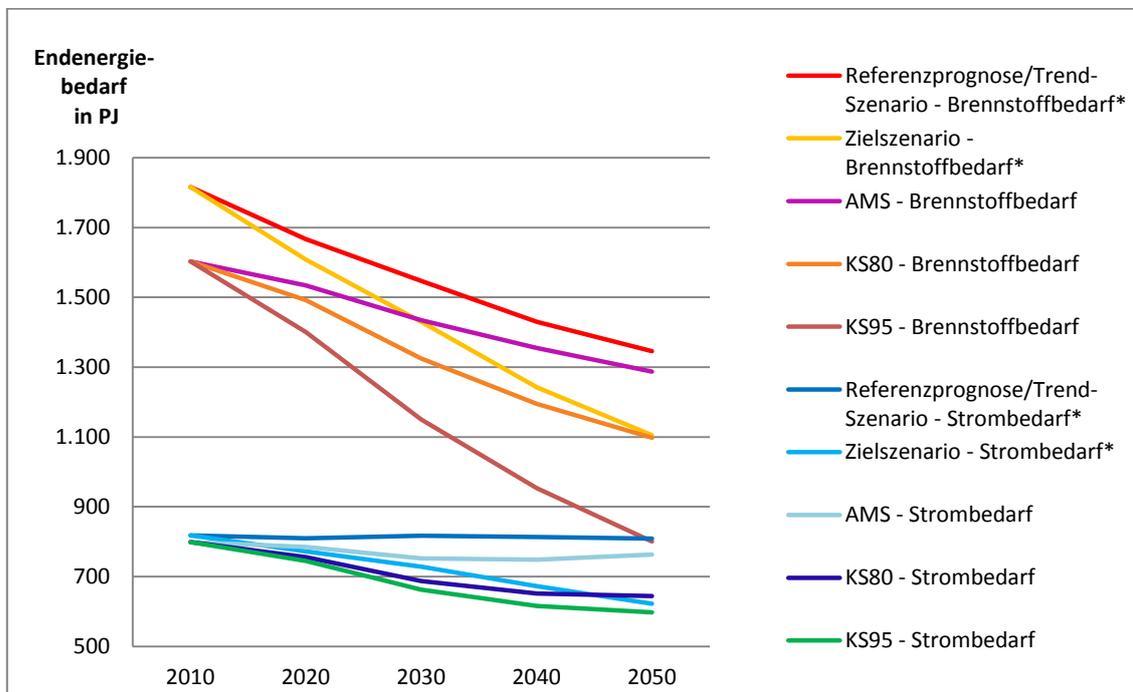
In dem Szenario "AMS" (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) sinkt der Endenergiebedarf der Industrie von 2.500 PJ im Jahr 2010 auf etwa 2.100 PJ im Jahr 2050 (vgl. Abbildung 6). Dieses Referenzszenario bildet also den Ist-Stand (bis Oktober 2012) der energie- und klimapolitischen Rahmensetzungen ab (allerdings ohne die in 2014 von der Bundesregierung beschlossenen Programme „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ und „Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz“). Das Trend-Szenario von Prognos, EWI & GWS kommt zu einem leicht höheren Endenergiebedarf von 2.160 PJ (vgl. Abbildung 6).

Während der Brennstoffbedarf der Industrie in Abhängigkeit von den Szenarien und den hinterlegten Rahmenannahmen bis 2050 zwischen 32 % und 50 % ggü. 2010 sinkt, verharrt der Strombedarf auf etwa gleichem absolutem Niveau oder sinkt bis 2050 – je nach Ziel-Szenario - um maximal 24 % ab (vgl. Abbildung 7). Dies spiegelt die in den Szenarien hinterlegte Elektrifizierung wider. Der Endenergiebedarf sinkt damit insgesamt deutlich weniger stark als die Emissionen (vgl. Abbildung 4), es findet gewissermaßen eine „Entkopplung“ zwischen der Entwicklung der Emissionen und des Energiebedarfs statt, indem die Energieträger zunehmend erneuerbar werden.



Quelle: Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; Prognos et al. 2014a

Abbildung 6: Szenarienspezifische Entwicklung des Endenergiebedarfs der Industrie (inkl. Industriekraftwerke) in den Jahren 2010 bis 2050



Quelle: Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015; Prognos et al. 2014a

* : Startwert für die Referenzprognose/Trendszenario bzw. das Zielszenario ist jeweils das Jahr 2011

Abbildung 7: Szenarienspezifische Entwicklung des Strom- und Brennstoffbedarfes der Industrie in PJ von 2010 bis 2050

Als Fazit dieses kurzen Szenarien-Überblicks lässt sich festhalten, dass das Innovationsvermögen der deutschen Industrie voll gefordert sein wird, um die enorme Reduktion der Treibhausgasemissionen der Industrie von heute etwa 300 Mio. t CO₂ äq. (einschließlich 120 Mio. t CO₂ für den Strombezug) auf unter 87 Mio. t CO₂ äq. (inkl. der CO₂-Emissionen für den Strombezug) zu erbringen.

Exkurs: Kritik der Wachstumsannahmen

Angesichts der im Folgenden exemplarisch angerissenen Faktoren wird sich für zukünftige Szenarienarbeiten die Frage stellen, ob die bisher in den Szenarien angenommenen Wachstumsraten in der Periode 2030 bis 2050 zu hoch angesetzt sind:

- **Ökonomisch:** unterdurchschnittliche Rentensteigerung, zunehmende Altersarmut (Bertelsmann Stiftung 2015) und Abnahme des Erwerbspersonenpotenzials. Das Verhältnis von Beitragszahlern zu Rentnern von 3,25 im Jahre 2010 wird sich deutlich verändern: auf 2,2 im Jahre 2030 und 1,9 im Jahre 2040 (Rürup Kommission 2003). Diese Entwicklung könnte etwas abgemildert werden, wenn die Netto-Einwanderung mit jüngeren Menschen deutlich größer wäre, als in den Szenarien in Kapitel 2 mit ca. 200.000 jährlich unterstellt. Das Erwerbspersonenpotenzial dürfte sich zwischen 7 und 23 % - je nach Bevölkerungsentwicklung und Arbeitsmarktgesetzgebung - gegenüber heute reduzieren (Börsch Supan und Wilke 2007). Es ist nicht auszuschließen, dass mit Eintreten einer solchen Entwicklung auch Produktivitätsverluste und damit Wachstumseinbußen einhergehen würden.
- **Sozialpsychologisch:** Risiken erhöhter Berufsunfähigkeit infolge zunehmender psychischer Erkrankungen (Bundespsychotherapeutenkammer 2013), gesteigerte Dokumentationspflichten bei einer Reihe von Dienstleistungen (z.B. Schulbildung, ärztliche Behandlung, öffentliche Förderung, Banken- und Versicherungsdienstleistungen) sowie weiterhin zunehmende Lebensformen der Individualisierung (Vereinzelung ohne Nachbarschafts- und Familienhilfe); dies könnte zu geringeren Produktivitätsfortschritten führen als in den Wachstumsmodellen angenommen wurde.
- **Wertewandel:** Leistungsselbstbegrenzung bei relativ hohem Einkommen durch Lebenshaltungen des nachhaltigen Konsums und der Suffizienz (vgl. Kapitel 3.2.1 und Scherhorn 2015), letztlich ein abnehmender Grenznutzen des zusätzlichen materiellen Wohlstandes; auch diese Faktoren könnten sich, ausgehend von der Nachfrage der privaten Haushalte und des zur Verfügung stehenden Arbeitsvolumens, negativ auf die Wachstumsraten auswirken.

Diese – vermutlich wachstumshemmenden – Trends werden in den verschiedenen wissenschaftlichen Fachdisziplinen derzeit sehr unterschiedlich bewertet. In der Regel werden bei negativ einzuschätzenden Wirkungen Vorschläge gemacht, um derartige Wirkungen zu vermeiden oder gering zu halten. Seitens der Ökonomen, die die Wachstumsmodelle nutzen, werden derartige Trends und ihre möglichen Auswirkungen auf das Wirtschaftswachstum bisher nicht oder kaum (z.B. Erwerbspersonenpotenzial) beachtet. Möglicherweise sind daher die Wachstumsannahmen der vorliegenden Szenarien

rien für die Periode 2030 bis 2050 zu hoch, weil in dieser Zeit die genannten Trends besonders wachstumsrelevant werden könnten. Es sei aber darauf hingewiesen, dass zur Bestätigung solcher Vermutungen weitere Analysen sowie die Auswertung jüngster Ergebnisse sozialwissenschaftlicher Forschung erforderlich wären, zumal auch positive Faktoren zu beobachten sind (z.B. im Gesundheitswesen), deren potenziell produktivitätssteigernder Effekt in den Szenarien ebenso unberücksichtigt ist.

2.2 Derzeitiger Energiebedarf in der deutschen Industrie sowie ausgewählte Technologien

Der Endenergieverbrauch der deutschen Industrie (Verarbeitendes Gewerbe ohne Mineralölwirtschaft) lag im Jahr 2013 bei gut 2.550 PJ entsprechend einem Anteil von etwa 28 % am gesamten Endenergieverbrauch Deutschlands. Der Energieverbrauch der Industrie wird dabei von den Energieträgern Strom (32 %) und Gas (35 %, insbesondere Erdgas) dominiert (vgl. Tabelle 3).

Im Jahre 1995 lag der Endenergiebedarf der deutschen Industrie kaum niedriger bei 2.470 PJ, mit einem deutlich geringeren Stromanteil (27,7 %). Bei einem Zuwachs der Bruttowertschöpfung um durchschnittlich 1,8 % jährlich verbesserte sich die Endenergieintensität der Industrie während des genannten Zeitraums um durchschnittlich 1,5 % jährlich.

Würde man diese Entwicklung der Endenergieintensität bis zum Jahre 2050 fortschreiben, so läge die Endenergieintensität der Industrie um 41 % niedriger als im Jahre 2013. Wenn man von einem Wachstum der Bruttowertschöpfung der Industrie von 0,7 % pro Jahr ausgeht, würde sich der Endenergiebedarf der Industrie bis 2050 um 25 % reduzieren.

Nach Branchen differenziert hatte die Metallerzeugung (im Wesentlichen die Stahlerzeugung) den höchsten Anteil am Endenergiebedarf der Industrie mit 21 % (knapp 540 PJ). Weitere energieintensive Branchen sind die Grundstoffchemie, das Papiergewerbe, die Verarbeitung von Steinen und Erden (hier insbesondere Zement, Ziegel und Kalk), Glas und Keramik und die Ernährungsindustrie (inklusive Tabak), die in Summe einen Anteil von etwa 46 % (1.185 PJ) am Endenergiebedarf der Industrie darstellen. Die sonstigen Industriebranchen (Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau, sonstige chemische Industrie, Gummi- und Kunststoffwaren, NE-Metalle und –gießereien, Metallbearbeitung, Maschinenbau, Fahrzeugbau, sonstige Wirtschaftszweige) summieren sich auf ca. 32 % (830 PJ) des gesamten Endenergieverbrauchs der Industrie im Jahr 2013 (vgl. Tabelle 3).

Die verfügbaren Informationen bei Strom- und Prozesswärmeanwendungen sind aufgrund der Vielzahl der Prozesse in den verschiedenen Branchen sehr begrenzt. Sie wurden anhand technologischer Analysen und Literaturlauswertungen von IREES abgeleitet. So fällt zum Beispiel in der Branche „Grundstoffchemie“ mit 55 % der größte Teil des Prozesswärmebedarfes bei Temperaturen über 500 °C an, während bei der sonstigen chemischen Industrie der größte Anteil des Wärmebedarfes, nämlich 42 %, bei Temperaturen unter 100 °C anfällt.

Tabelle 3: Endenergieverbrauch der deutschen Industrie nach 14 Industriebranchen und nach Energieträgern, 2013 in PJ

Nr.	Industriebranchen	Endenergiebedarf in PJ	Strom in PJ	Brennstoffe in PJ, darunter u.a.				Brennstoffe insgesamt
				Kohle	Gase	Erneuerbare Energien	Fernwärme	
1	Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau	16	6	3	5	0	0	9
2	Ernährung und Tabak	207	64	8	112	2	10	143
3	Papiergewerbe	227	71	14	80	27	31	156
4	Grundstoffchemie	478	161	12	184	2	76	317
5	Sonstige chemische Industrie	100	26	4	36	1	22	74
6	Gummi- u. Kunststoffwaren	81	50	0	21	0	5	31
7	Glas u. Keramik	82	18	0	62	0	0	65
8	Verarbeitung v. Steine u. Erden	191	26	56	42	18	0	165
9	Metallerzeugung	536	73	294	159	0	1	463
10	NE-Metalle, -gießereien	110	60	9	37	0	1	50
11	Metallbearbeitung	121	62	0	49	1	2	59
12	Maschinenbau	78	40	0	25	0	4	38
13	Fahrzeugbau	130	66	0	41	0	20	64
14	Sonstige Wirtschaftszweige	194	84	1	47	39	15	110
Industrie insgesamt		2.551	807	401	900	90	187	1.744
Anteile der Energieträger		100%	32%	16%	35%	4%	7%	68%

Quelle: AGE B 2014, eigene Zusammenstellung und Berechnungen

Insgesamt lag der Brennstoffbedarf aller Industriebranchen im Jahr 2013 bei knapp 1.750 PJ (vgl. Tabelle 3). Wird davon der Brennstoffbedarf (200 PJ), welcher zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser benötigt wird abgezogen, bleiben 1.550 PJ Brennstoffbedarf zur reinen Erzeugung von Prozesswärme über alle Industriebranchen übrig. Weitere gut 120 PJ an Endenergiebedarf zur Prozesswärmeerzeugung werden außerdem nicht durch Brennstoffe sondern mittels Strom gedeckt (z.B. für die Erzeugung von Elektrostahl, Gießereien und Metalloberflächenbehandlung oder Keramiköfen).

600 PJ des Strombedarfes entfielen auf die mechanische/elektrische Antriebsenergie, 40 PJ für den Strombedarf für die Beleuchtung und ebenfalls 40 PJ für den Betrieb von IuK-Anwendungen. Insgesamt bestand im Jahr 2013 somit ein Strombedarf von 807 PJ (vgl. Tabelle 3).

Da letztlich sämtliche Prozesswärme als Abwärme in die Umgebung gerät, stellt sich für die Transformation der Industrie die Frage, wie viel davon grundsätzlich genutzt und wie viel Endenergie (und letztlich THG-Emissionen) damit eingespart werden könnte (siehe Aussagen zu derzeit rentablen Potenzialen unten).

KWK-Nutzung

Insgesamt etwa 40 % der für eine Erzeugung mittels konventioneller KWK in Frage kommenden Wärmemenge bei Temperaturen bis 300 °C wurde im Jahr 2012 durch KWK Anlagen zur Verfügung gestellt (Jochem und Reitze 2014). Eine genauere Angabe ist nicht möglich, weil die BHKW-Anlagen unter 1 MW statistisch nicht erfasst sind und daher unbekannt ist, welchen Beitrag die 55.000 kleinen BHKW-Anlagen 2012 zum industriellen Wärmebedarf lieferten.

Der durch KWK erzeugte Stromanteil am Gesamtstrombedarf der Industrie ist mit 11 % im Industriedurchschnitt relativ gering. Die höchsten Anteile erreicht er aufgrund der vorherrschenden Anforderungen an den Wärmebedarf bezüglich der Temperaturniveaus und den notwendigen Bedarf an Dampf – in der Grundstoffchemie und der Papierindustrie mit rund 30 %. Das größte Zuwachspotenzial bei der Stromerzeugung

mittels KWK wird derzeit von den Autoren in den Nahrungsmittel-, Investitions-, Konsum- und Gebrauchsgüterindustrien gesehen (Prognos et al. 2014b).

Nutzenergiebedarf und Nutzung von Abwärme

Der durchschnittliche Nutzungsgrad von Endenergie als Nutzwärme hat sich bei den Prozesswärmeanwendungen zwar kontinuierlich auf 65 % verbessert (insbesondere in den Kesselanlagen) (vgl. Tabelle 4). Dennoch werden im Jahr 2013 im Bereich der Prozesswärme noch immer 35 % des anfallenden Endenergiebedarfes (582 PJ) ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Die Industrie weist somit aktuell noch große Effizienzpotenziale im Prozesswärmebereich auf, welche insbesondere im Temperaturbereich zwischen 200 °C und mehr als 1.400 °C anfallen.

Tabelle 4: Endenergieverbrauch und Nutzenergiebedarf nach Anwendungszwecken in der Industrie im Jahr 2013

Anwendungszweck	Endenergie		Nutzenergie	
	%	PJ	NG (%)	PJ
Prozesswärme	65,2%	1.663	65,0%	1.081
Raumwärme, Warmwasser	8,5%	216	77,8%	168
Mechanische Energie	23,4%	596	69,9%	417
Beleuchtung	1,5%	39	25,6%	10
IuK	1,4%	36	91,6%	33
Insgesamt	100%	2.550	67%	1.709

NG: Nutzungsgrad

Quelle: IREES 2016 eigene Berechnungen, AGEB 2016

Die Abwärmepotenziale der deutschen Industrie

Angaben zu den genauen Abwärmepotenzialen in der Industrie sind bislang nur in wenigen Studien (Hirzel et al. 2013; Jochem et al. 2010) veröffentlicht. Überträgt man die Ergebnisse einer norwegischen Studie auf die deutsche Industriestruktur, so erhält man für die deutsche Industrie ein technisches Abwärmepotenzial bei Temperaturen über 140 °C von knapp 320 PJ pro Jahr (~12 % des industriellen Endenergieeinsatzes in Deutschland) und weitere 160 PJ pro Jahr (etwa 6 % des industriellen Endenergieeinsatzes in Deutschland) zwischen 60-140 °C.

Neben diesen Potenzialen von zusammen 480 PJ, die vorrangig in großen Unternehmen der Eisen-, Aluminium-, Papier-, Holz- und Chemieindustrie anfallen, gibt es weitere Potenziale in kleinen und mittleren Unternehmen. Die rentablen Abwärmepotenziale liegen in Deutschland derzeit zwischen 150 PJ bis 200 PJ (Pehnt et al. 2010).

Industriebranchen mit einem weit überdurchschnittlichen Abwärmeeinfall über 140 °C sind die Verarbeitung von Steinen und Erden, die Metallerzeugung oder die Grundstoffchemie.

Die hier dargestellten Zahlen sowohl zu Energieverbräuchen, teilweise nach Branchen, Energieträgern und Anwendungsbereichen disaggregiert, als auch zu den gewaltigen noch ungenutzten Abwärmepotenzialen geben erste Hinweise auf Ansatzpunkte für eine Transformation der Produktionsstruktur. Darüber hinaus stecken auch heute noch große Effizienzpotenziale in der Umwandlung von Endenergie zu Nutzenergie. Diese könnten zum Teil bereits durch Verhaltensänderung des Nutzers gehoben werden (z.B. durch regelmäßige Wartung und Reinigung von technischen Anlagen und Komponenten).

3 Transformationsprozess in der Industrie

Aus dem nationalen Klimaschutzziel für 2050 und der Analyse der Zielszenarien (Kapitel 2) folgt, dass die Industrie die notwendigen Treibhausgasreduzierungen nicht durch ein reines Ausschöpfen der - *unter den heutigen Produktionsbedingungen* – bestehenden Möglichkeiten (z.B. der Hebung aller rentablen Material- und Energieeffizienzpotenziale) realisieren kann – auch wenn dies natürlich ein sehr wichtiger Aspekt ist – sondern dass neue technische, strukturelle und organisatorische Möglichkeiten durch diverse Akteure innerhalb dieses Innovationssystems (z.B. Hersteller, F&E) eröffnet und realisiert werden müssen. Dies bedeutet auch, die Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen unter dem Gesichtspunkt der THG-Emissionen neu zu betrachten. Daher sprechen wir im Folgenden von einem Transformationsprozess.

In diesem zentralen Kapitel soll gezeigt werden, welche Optionen für einen umfassenden insbesondere technologischen und organisatorischen Wandel der Industrie möglich oder denkbar sind, um die angestrebten Minderungsziele erreichen zu können. Es werden mögliche Handlungsoptionen aufgezeigt, so weit möglich, grundlegende Potenzialableitungen getroffen und Herausforderungen für die weitere Entwicklung benannt. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, sowohl die industrielle Produktion an sich als auch die Nachfragemärkte in den Blick zu nehmen. Der Strukturwandel der deutschen Industrie sowie deren Einbettung in den Außenhandel, mögliche Entwicklungen und daraus resultierende Möglichkeiten für die Reduktion von Treibhausgasemissionen, sind Themen von Kapitel 4.

Im Weiteren wird zwischen zwei Ansatzpunkten eines grundlegenden transformatorischen Wandels,

- der industriellen Produktion und
 - der Nachfrage nach treibhausgasintensiven industriellen Gütern,
- unterschieden.

3.1 Grundlegender Wandel der Produktion - Handlungsoptionen

Die industrielle Produktion orientiert sich einerseits an den Veränderungen des gesellschaftlichen Bedarfs sowie der nationalen oder internationalen Märkte, andererseits an den technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten, die im folgenden in ihrer Vielfalt umrissen und beispielhaft für energieintensive Branchen in Kapitel 5 genauer beschrieben werden.

Der grundlegende Wandel der Produktion hin zu einer nahezu emissionsfreien Wirtschaftsweise muss äußerst vielfältige technisch-organisatorische Lösungsoptionen berücksichtigen. Dies sind unter anderem die Steigerung der Materialeffizienz- und -substitution, Prozesssubstitutionen und Optimierungen, die Flexibilisierung der Stromnachfrage sowie der Eigenerzeugung, die Substitution fossiler Energien durch erneuerbare Energieträger sowie die Verminderung von Verlusten bei Energiewandlern und bei der Verteilung der Nutzenergie.

Herausforderungen für den grundlegenden Wandel der Produktion

Es müssen jedoch nicht nur einzelne technische, teilweise auch organisatorische, Lösungsoptionen erkannt, bewertet und letztlich implementiert werden; darüber hinaus gibt es eine Reihe übergreifender einzel- und volkswirtschaftlicher Faktoren, die für eine erfolgreiche Transformation berücksichtigt werden müssen und die handelnden Akteure vor enorme Herausforderungen stellen.

Grundlegende Herausforderungen für die deutsche Industrie und das gesamte Innovationssystem hinsichtlich der Entwicklung, Demonstration und Marktdurchdringung technischer und organisatorischer Möglichkeiten für eine signifikante THG-Intensitätsminderung - und damit für eine grundlegende Transformation - sind u.a.:

- Die langen Zeitspannen für die Entwicklung und Erprobung von Prozessinnovationen und den Einsatz von besten verfügbaren Technologien (BVT) in der Industrie stellen eine große Herausforderung für einen grundlegenden Wandel der Produktion dar. Weiterhin hängt die Marktdiffusion dieser Optionen stark von den Re-Investitionszyklen dieser Technologien ab. Dabei gilt der genauen Untersuchung des „Window of Opportunity“ ein besonderes Augenmerk.
- Die Wettbewerbsfähigkeit unterschiedlicher Industrien sowie Unternehmen und die politischen Rahmenbedingungen in anderen Industrie- und Schwellenländern erhöhen den Druck auf zukünftige Investitionsentscheidungen in Deutschland. Die zukünftige Rolle von Subventionen und steuerlichen Vorteilen stellt darüber hinaus eine weitere Herausforderung dar.
- Viele Optionen der Materialeffizienz und Materialsubstitution könnten in erster Linie Materialkosten für den Herstellern einsparen. Die Beiträge zur THG-Minderung sind nicht trivial ermittelbar und aus heutiger Sicht nicht oder nur schwer quantifizierbar. Die notwendige Akzeptanz einer Substitution energieintensiver Grundstoffe stellt eine große Herausforderung für die Marktdurchdringung dieser Optionen dar; hier spielen beispielsweise Sicherheitsbedenken eine Rolle.
- Die Beiträge der Energieeffizienz und der Flexibilisierung der Stromnachfrage und Eigenerzeugung hängen von den energiewirtschaftlichen Marktbedingungen und der Überwindung der Hemmnisse bei unterschiedlichen Akteuren im Innovationssystem, v.a. hinsichtlich von Investitionsentscheidungen seitens der Industrie ab. Die stärkere Beachtung der Rolle (Lösch et al. 2016) von Intermediären und Technologieherstellern könnte einen Teil der Hemmnisse beseitigen.
- Bei der Substitution von fossilen, emissionsintensiven Energieträgern durch andere fossile oder erneuerbare Energieträger oder Eigenerzeugung (KWK, ORC) stellt die Wirtschaftlichkeit der Alternativen gegenüber den konventionellen Technologien, sofern externe Kosten weiterhin vernachlässigt werden, eine besondere Herausforderung dar.

Insbesondere die sehr langen Re-Investitionszyklen bei Anlagen der Grundstoffindustrie und auch bei Großkessel- und KWK-Anlagen sind zu beachten, wenn sich die Frage stellt, *wann* bestimmte Handlungsoptionen angegangen werden sollen. Lebensdauern von 30 bis 40 Jahren sind hier die Regel. Anlagen, wie z.B. ein neuer Hochofen zur Roheisenherstellung (Pauliuk et al. 2012; Arens et al. 2016) oder ein Drehrohrofen in der Zementindustrie (Marceau et al. 2006) mit jeweils hohen brennstoff- und prozess-

spezifischen THG-Emissionen, die heute installiert würden, wären mit hoher Wahrscheinlichkeit im Jahre 2050 noch in Betrieb. Deren jeweilige Mindest-Emissionsmenge (unter Annahme einer optimal-effizienten Anlagenfahrweise) bis 2050 ist dann in der Regel festgelegt. Damit wäre auch ein Teil des Gesamt-Emissionspfades von heute bis 2050 bereits festgelegt.

Um solche Lock-In-Effekte soweit wie möglich zu vermeiden, müssten bereits heute anspruchsvolle technische Standards hinsichtlich des Material- und Energieverbrauchs dieser Anlagen während ihrer Lebensdauer oder bei jeglicher Re-Investition umgesetzt werden. Darüber hinaus sollten Produktionsanlagen so modular wie möglich konstruiert werden, so dass sich neue Optionen für Retro-Fit-Maßnahmen ergeben können. Auch neue, wirklich „transformative“ Lösungsoptionen wie Produktsubstitutionen und Prozesssubstitutionen, müssen bereits heute entwickelt und möglichst bald zur Marktreife gebracht werden.

Es wäre zu prüfen, ob es Wege gibt, über Landesgrenzen hinweg Kooperationen zur Produktion von Industriegütern zu suchen, wenn diese volkswirtschaftlich für alle Beteiligten und zudem ökologisch sinnvoll sind. So sind in Island große rentable Potenziale von ca. 20 GW Wasserkraft derzeit ungenutzt, die zur Erzeugung stromintensiver Grundstoffe wie beispielsweise Primäraluminium bei Gestehungskosten von 4 cts/kWh genutzt werden könnten (Hreinsson 2008), während in Deutschland diese Primärproduktion zur Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit durch verschiedene Maßnahmen (kostenlose ETS-Zertifikats-Zuteilungen und Kompensationen, Energiesteuer-Entlastungen, etc.) direkt und indirekt langfristig subventioniert werden müsste – mit, mittelfristig, fraglichem Erfolg. Denn ob die Arbeitsplätze derartiger Grundstoffproduktionen trotz dieser Maßnahmen konkurrenzfähig bleiben können, ist eine offene Frage.

Einflüsse auf die zukünftige Industrieproduktion

Der in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten zu beobachtende Strukturwandel hin zu weniger energieintensiven Produkten und dafür mehr produktbegleitenden Dienstleistungen führt dazu, dass im Durchschnitt dieses langjährigen Trends die Verminderung der Energieintensität der industriellen Produktion etwa 0,5 % pro Jahr größer ist als durch den technisch bedingten Energieeffizienzfortschritt (Jochem et al. 2011 und Kapitel 4.3.1).

Der intra- und inter-sektorale Strukturwandel könnte künftig eine noch größere Bedeutung für die Verminderung der Energienachfrage und damit auch der Treibhausgasemissionen der Industrie spielen, nämlich dann, wenn die Möglichkeiten der Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungsketten konsequent ausgeschöpft werden. Dies wird letztlich, wenn man die Wertschöpfungsketten bis an ihren Anfang zurückverfolgt, zu einer deutlichen Verminderung des Bedarfs an energieintensiven Grundstoffen führen. Die Autoren halten eine zusätzliche Energiebedarfssenkung um bis zu 0,5 % pro Jahr durch einen bewusst geförderten Strukturwandel, der u.a. die Möglichkeiten und Maßnahmen der Materialeffizienz konsequent berücksichtigt, hin zu energieextensiven Industriebranchen für möglich. Auch prozessbedingte Emissionen ließen sich so bis zu einem gewissen Grad durch Minderung der Nachfrage nach einigen Grundstoffen (z.B. Roheisen, Zement) reduzieren.

Bis zum Jahr 2050 werden eine zunehmende Verflechtung der verschiedensten Wissenschafts- bzw. Technikdisziplinen (Mechatronik, Nano- und Kunststofftechnologie (Roes 2011), Bioverfahrenstechnik (Hermann 2010), Bionik, Leichtbau, Maschinenbau, Elektro- und Medizintechnik, Robotik, etc.) sowie eine deutlich verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit neue Chancen bei der Generierung von Innovationen in der Industrie eröffnen (Zweck et al. 2015; Bender et al. 2016). Durch den rascheren Technologiewandel aufgrund der „Digitalisierung“ der Produktion sowie inkrementeller oder grundlegender Innovationen in verschiedensten Bereichen könnte eine Dynamisierung der Produktlebenszyklen, d.h. der Verkürzung der Zeit zwischen zwei Produktgenerationen, stattfinden. Gleichzeitig dürfte es in manchen Bereichen zu einer Miniaturisierung der Komponenten und Bauteile kommen sowie zu einer verbesserten Abstimmung der Produktion bzw. Produkte mit den Wünschen individueller Kundengruppen oder gar einzelner Kunden. Sowohl Miniaturisierung als auch Individualisierung der Produktion könnten zu deutlichen Treibhausgaseinsparungen führen. Eine Quantifizierung dieser Effekte ist derzeit schwer möglich, da noch zu viele der genannten Entwicklungen im Pilotstadium sind.

Fazit: wesentliche Einflussfaktoren für den zukünftigen Wandel der Produktion sind

- intra- und inter-sektoraler Strukturwandel
- Steigerung der Materialeffizienz und -substitution und gleichzeitige Berücksichtigung der Nachfrageminderung
- Innovationen durch die Verflechtung unterschiedlicher Technikdisziplinen

3.1.1 Prozesssubstitution und Prozessoptimierungen

Um eine möglichst große Wirkung auf das heutige Niveau der THG-Emissionen des Industriesektors zu erzielen, darf nicht nur die rein energetische Seite der Industrieproduktion betrachtet werden, sondern es muss auch an den aktuellen Prozessemissionen der Industrie (2014: 61 Mio. t CO₂) angesetzt werden. Dabei machten die prozessbedingten Emissionen der Eisen- und Stahlindustrie sowie der Zementindustrie laut den Angaben des NIR bzw. UNFCCC zusammen im Jahr 2012 rund 42 % der gesamten prozessbezogenen THG-Emissionen der Industrie in Deutschland aus (UBA 2016b; UNFCCC 2015).

Die Ergebnisse des KS80-Szenarios aus den Klimaschutzszenarien (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015), weisen beispielsweise einen Rückgang der prozessbedingten THG-Emissionen der Industrie von 94 Mio. t in 1990 auf 44 Mio. t im Jahre (-53%) bzw. auf 34,5 Mio. t im Jahr 2050 (-63 %) aus. Die prozessbedingten CO₂-Emissionen der gesamten Eisen- und Stahlindustrie reduzieren sich dabei im KS80-Szenario zwischen 2010 und 2030 von 17 Mio. t CO₂ auf 12 Mio. t CO₂, d.h. um ca. 30 % (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015). Spezifisch (auf die Tonne Rohstahl bezogene, nicht-energiebedingte THG-Emission) entspricht dies einem Rückgang um ca. 17 %. Bis zum Jahr 2050 reduzieren sich die THG-Emissionen des KS80-Szenarios bei der Eisen- und Stahlindustrie gar gegenüber dem Jahr 2010 um 58 % auf 7,2 Mio. t CO₂ % (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015). Dabei ist zu beachten, dass diese Emissionsentwicklung selbstverständlich von der im Modell hinterlegten Produktionsentwicklung der entsprechenden Branche abhängt.

Beispiele für aussichtsreiche Handlungsansätze im Bereich der Prozesssubstitution zur Reduktion der THG-Emissionen der Industrieproduktion sind für ausgewählte energieintensive Industriebranchen in Kapitel 5 dargestellt.

Die in den Produktionsprozessen erforderliche Wärme, Kälte oder Kraft (einschließlich Druckluft) ist abhängig von der jeweiligen Produktionstechnik, die häufig tradiert ist über Jahrzehnte und nur kleinere optimierende Innovationen erfahren hat (IREES und ISI 2015).

Für einen transformativen Wandel der Produktion geht es hier in erster Linie um den Einsatz der besten verfügbaren Technologien, die Nutzung von Abwärme oder Verfahrenssubstitutionen, so z.B.:

- Verfahren zur Stofftrennung nicht mehr mit thermischen Verfahren (z.B. Rektifikation, Destillation), sondern mit Membrantechniken, Absorption oder Extraktion, die alle einen deutlich geringeren spezifischen Nutzenergiebedarf haben (Knauf et al. 1998).
- Die mechanischen Verfahren zur Trocknung werden häufig zu wenig ausgenutzt, zu früh werden thermische Trocknungsverfahren eingesetzt, häufig ohne hinreichende Regelung mit dem Ergebnis von Übertrocknung.
- Die Wiedererwärmung von Metallen bei der Weiterverarbeitung könnte vermieden werden (endabmessungsnahes Gießen (Kaspar 2002; Arens und Worell 2014)), für Kunststoff-Spritzgießen könnte Abwärme verwendet werden statt Strom.
- Die Rückgewinnung von Abwärme eröffnet riesige Nutzenergie-Einspar-Potenziale via ORC-Anlagen⁵ (z.B. in der stahlerzeugenden Industrie: Krenn et al. 2008), Nutzung des Seebeck-Effektes (Zeier et al. 2011), von Temperatur-Kaskaden (Ludwig 2012), Einspeisung in Nah- und Fernwärmenetze, Bremsenergie-Wandlung zu Strom (Jochem 2005)).

Das Potenzial zur Verminderung des spezifischen Nutzenergiebedarfs in der Industrie ist vom technischen Blickwinkel betrachtet sehr groß und könnte bis 2050 – je nach Innovationskraft – den Nutzenergiebedarf der Industrie etwa halbieren (Jochem et al. 2004).

Die Entwicklungen von Prozesssubstitutionen und -innovationen brauchen ihre Zeit, durchaus im Bereich eines Jahrzehnts, um das Vertrauen der Anwender zu gewinnen, bevor die eigentliche Diffusion der neuen Technik starten kann. Es wäre daher zu empfehlen, im Zeitraum bis 2030 eine intensiviertere Forschung zur Weiterentwicklung bestehender und neuer Verfahren zur Produktion energieintensiver Grundstoffe oder alternativer Verfahren zur Produktion energieintensiver Grundstoffe zu betreiben (z.B. für Rohstahlerzeugung ohne fossile Kohlenstoffträger, verbesserte Katalysatoren).

⁵ ORC (Organic Rankine Cycle) Anlagen nutzen, im Gegensatz zu herkömmlichen Dampfturbinen, organische Medien als Arbeitsmittel. ORC-Anlagen können z.B. zur Verstromung von Abwärme eingesetzt werden.

Darüber hinaus wäre es sinnvoll, eine Reihe von Pilot- und Demonstrationsanlagen für die Produktion neuartiger Materialien (wie z.B. innovative Bindemittel als Ersatz für klassischen Zement, Carbonfaserhaltige oder Biopolymere) im industriellen Maßstab in Betrieb zu nehmen (Hermann 2010).

Eine deutliche Reduktion von Produktionsausschuss (z.B. durch Verschnitt) bzw. von Fehlchargen kann durch verstärkte Simulation der betroffenen Produktionsabläufe (inklusive Einbezug der Zulieferer) erzielt werden (Schubert und Kreysa 2010). Hierzu trägt die Prozessoptimierung durch verstärkten Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien bei. Darunter fällt auch die Etablierung durchgängiger Informationssysteme zur Planung, Steuerung und Regelung der gesamten Produktion, welche es den Unternehmen erlaubt, flexibel auf die Kundenwünsche zu reagieren und die Produkte dementsprechend anzupassen. Durch solch eine zentrale Steuereinheit erschließen sich dann weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Arbeitsabläufe in den Produktions- und Logistikbereichen. Zur weiteren Reduktion der Produktionsausschüsse kann auch der Einsatz ganzheitlicher Simulationen der kompletten Produktionssysteme bzw. Produkte beitragen, welche gleichzeitig zur Erhöhung der Prozesssicherheit beitragen.

Prozessoptimierungen und modulare Erweiterungen in der Industrie können auch die Nutzung und Speicherung von CO₂ einschließen, wie im Folgenden analysiert wird:

Carbon Capture and Usage (CCU)

Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Usage (CCU) werden derzeit häufig diskutiert, wenn es um die Frage geht, wie insbesondere im Industriesektor (CCS betreffend auch in der Energiewirtschaft) die notwendigen tiefen Emissionsminderungen bis zur Mitte des Jahrhunderts bewerkstelligt werden können (Styring et al. 2011). Oftmals werden diese beiden Optionen gemeinsam diskutiert. Trotz technischer Überschneidungen, z.B. hinsichtlich der Abscheidung von CO₂, unterscheiden sich CCU und CCS hinsichtlich der verfolgten Ziele (Nutzung/Kreislaufführung oder dauerhafte Lagerung von CO₂) aber auch möglicher Risiken erheblich. Daher sollten CCS und CCU generell getrennt voneinander diskutiert werden (Naims et al. 2015).

Unter CCU werden verschiedene Optionen zur chemischen Nutzung und Weiterverarbeitung von CO₂ zusammengefasst, das durch technische Maßnahmen in möglichst reiner Form aus den Abgasströmen beispielsweise von Industrieprozessen abgeschieden wird. Das Treibhausgas kann als Rohstoff für die chemische Industrie für die Produktion einer Reihe von Produkten (z.B. Polycarbonate, Acrylsäure, Ameisensäure und einige weitere) von Interesse sein. Für einige dieser Produkte gibt es bereits Pilotanlagen.

Ein weiteres Anwendungsfeld wäre die Umsetzung von CO₂ und Wasserstoff zu Methanol z.B. mit Hilfe von überschüssigem Windstrom, dies wird in der Regel unter dem Stichwort „Power to X“ als Möglichkeit zur chemischen Speicherung von elektrischer Energie diskutiert. Dies wäre insbesondere für zukünftig überschüssigen Windstrom interessant. Wenn die verschiedenen Möglichkeiten von CCU zum einen technisch ausgereift und zum anderen wirtschaftlich konkurrenzfähig werden, stellen sie durchaus ernstzunehmende Optionen zur Nutzung oder Kreislaufführung insbesondere von

Prozess-CO₂ dar (da dieses als Abfallprodukt bei einigen Branchen bereits relativ rein vorliegt und nicht aufwändig gereinigt werden müsste). Die technische Reife und wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit muss sich allerdings erst noch erweisen bzw. vorangerieben werden. Die Nutzung von CO₂ zur chemischen Speicherung von Energie konkurriert mit einigen anderen Technologien wie z.B. der direkten Nutzung von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff als Energieträger und auch mit einem möglichen Export von erneuerbarem Überschussstrom (Naims et al. 2015).

Die Potenziale zur Treibhausgas-Minderung hängen in erheblichem Maße davon ab, was mit dem genutzten CO₂ geschieht: wenn es zur chemischen Speicherung von Energie eingesetzt wird und damit letztlich die Substituierung fossiler, nicht-fluktuierender Energieträger durch erneuerbare Energieträger ermöglicht, kann von dauerhaften CO₂-Minderungen ausgegangen werden. Wird das CO₂ jedoch für die Produktion von Produkten genutzt, ist für jedes einzelne Produkt zu prüfen, wie lange das CO₂ tatsächlich gespeichert bleibt und ob und wann es gegebenenfalls wieder in die Atmosphäre freigesetzt wird. Es ist also zu unterscheiden zwischen der genutzten und der dauerhaft gespeicherten CO₂-Menge (IASS). Die resultierenden CO₂-Mengen, die durch die verschiedenen CCU-Optionen gemindert werden könnten, sind daher derzeit noch schwer abschätzbar. In (Naims et al. 2015) wird die Abschätzung zitiert, dass selbst unter sehr optimistischen Annahmen und auch langfristig höchstens 6 % der anthropogenen Emissionen für die Produktion von Materialien und Kraftstoffen genutzt werden können (Ausfelder und Bazzanella 2008; Le Quéré et al. 2014).

Carbon Capture and Storage (CCS)

CCS ist ein Prozess der genutzt wird um CO₂, das bei der Energieversorgung oder bei industriellen Prozessen anfällt, aus den Abgasströmen abzuscheiden (capture), anschließend zu verdichten sowie zu einer geeigneten Verpressungsstelle zu transportieren (in der Regel mit Pipelines) und schließlich in tiefe, unterirdische Steinformationen zu injizieren. Ziel ist es, das Treibhausgas dort dauerhaft einzuschließen und zu speichern. In der Regel wird das Gas in eine Tiefe von zwei Kilometern oder mehr verpresst. Derzeit sind weltweit 15 CCS-Anlagen im Industriemaßstab aktiv, davon sind 14 industriellen Prozessen zuzurechnen (Global CCS Institute 2016).

Aus Unternehmenssicht liegen die Vorteile von CCS auf der Hand: Mit einer „Nachschaltung“ an die eigentliche Produktion müssten die Produktionsstrukturen nicht radikal geändert werden, wie dies ohne CCS wohl unumgänglich wäre, insbesondere für die Minderung der industriellen Prozessemissionen. CCS stellt jedoch immer eine Verdrängungs- und nicht Vermeidungsoption dar: CO₂ wird als nicht mehr weiter zu verwertender Abfall in unterirdischen Deponien verklappt. In Deutschland stünden als Lagerstätten hauptsächlich tiefe saline Aquifere (wasserführende Schichten, die nicht für die Trinkwassergewinnung genutzt werden können) und in deutlich geringerem Umfang erschöpfte Erdgasfelder zur Verfügung. Hinsichtlich der möglichen Speicherkapazitäten in Deutschland finden sich sehr unterschiedliche Aussagen in verschiedenen Studien. Die Autoren der Studie „Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung“ (Wietschel et al. 2010) gehen von einer maximalen Onshore-Speicherkapazität in Deutschland von maximal 80 Jahren für die in 2010 vorhandenen Kraftwerksemissionen aus, das wären in Summe THG-Emissionen in Höhe von ca. 28 Mrd. t CO₂. Diese Emissionsmenge entspricht wiederum dem rund 155-fachen

der derzeitigen Gesamtemissionen der Industrie (rund 180 Mio. t CO₂ äq.) oder dem 460-fachen der derzeitigen Prozessemissionen der Industrie (rund 60 Mio. t CO₂ äq.).

Eine „Knappheit“ hinsichtlich der theoretisch möglich erscheinenden Speicherkapazität zur Speicherung von industriellen Prozessemissionen wäre damit nicht gegeben. Eine Reihe weiterer Studien (van der Straaten et al. 1996; Christensen und Holloway 2004; May et al. 2005; Vangkilde-Pedersen et al. 2009) die in der Studie (Viebahn et al. 2012) zur Ableitung einer eigenen Einschätzung zu Grunde gelegt werden, weist eine Spannweite möglicher aquiferer Lagerkapazitäten von 0,5 bis 42 Mrd. t CO₂ auf.

Die Autoren dieser Studie (Viebahn et al. 2012) führen eine Reihe von einschränkenden Faktoren auf, die zu einer konservativen Abschätzung der vorhandenen aquiferen Onshore-Speicherkapazität von 0,84 Mrd. t CO₂ führen. Hinzu kommen demnach aquifere Offshore-Kapazitäten von 2,9 Mrd. t CO₂. In Summe, unter Berücksichtigung möglicher weitere Lagerstätten, gelangen die Autoren zu der Einschätzung, dass in Deutschland realisierbare Lagerstätten im Umfang von 5 Mrd. t CO₂ zur Verfügung stünden. Dies entspräche dem knapp 28-fachen der gesamten derzeitigen Industrieemissionen und dem 83-fachen der derzeitigen industriellen Prozessemissionen. Die Bandbreite der in verschiedenen Studien für Deutschland angegebenen Werte zeigt, dass bezüglich der Frage der Speicherkapazität derzeit noch kein Konsens zu herrschen scheint.

Die Einspeisung von CO₂ in saline Aquifere ist mit verschiedenen Risiken verbunden: die Prozesse, die nach Einspeisung des CO₂ im Wasser und den Gesteinsschichten ablaufen sind noch nicht hinreichend bekannt und untersucht. Darüber hinaus ist es möglich, dass durch Störungen in den Deckschichten das CO₂ teilweise oder auch ganz wieder freigesetzt werden könnte. Dies macht jeweils umfassende geologische Prüfungen und Risikoabschätzungen für jede potentielle Speicherstätte unabdingbar, ohne dass diese eine absolute Gewähr für die Sicherheit des Speichers liefern könnten (Wietschel et al. 2010).

Sollte CCS in industriellem Maßstab eingesetzt werden, besteht nach Auffassung der Autoren das Risiko, dass aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen der hierfür getätigten Investitionen die vorhandenen Speichermöglichkeiten auch vollständig ausgeschöpft würden. Dies würde zum einen dazu führen, dass man Milliarden von Tonnen eines für die Stabilität des Ökosystems schädlichen Stoffes nicht vermeidet, sondern lagert, ohne eine absolute Gewissheit dafür zu haben, dass dieser Stoff tatsächlich dauerhaft risikofrei gebunden wird und nicht zurück in das Ökosystem gelangt. Zum anderen würden die auf der Nutzung fossiler Energieträger basierenden Produktionsstrukturen dauerhaft erhalten bleiben und – auf lange Sicht – sowieso unentbehrliche Innovationen unterbleiben bzw. nicht hinreichend vorangetrieben werden.

3.1.2 Handlungsoptionen zur Erhöhung der Effizienz bei Material- und Energieeinsatz

Die Berücksichtigung von Materialeffizienzaspekten ist in Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland noch keine Selbstverständlichkeit; der wichtigste Treiber für die Unternehmen, Materialeffizienzbestrebungen voranzutreiben, liegt heute bei den hohen Materialkosten. Diese stellen nach wie vor den höchsten Kostenblock im Verarbeitenden Gewerbe dar (Maass 2016; Destatis 2014).

Prinzipiell müssten die Materialeffizienz- und Materialsubstitutionspotenziale entlang des gesamten Lebenszyklus (Rohstoffgewinnung, Rohstoffverarbeitung zu Grundstoffen oder Zwischenprodukten, Produktentwicklung, Produktion, Nutzung, Recycling/Entsorgung) der entsprechenden Grundstoffe, Zwischenprodukte und Produkte betrachtet werden. Diese Studie reißt nachfolgend eine Reihe von Handlungsoptionen zur weiteren Steigerung der Materialeffizienz innerhalb der Industrie an, die jedoch die beiden ersten Schritte der jeweiligen Lebenszyklen, die Rohstoffgewinnung sowie die Rohstoffverarbeitung zu Grundstoffen oder Zwischenprodukten, nicht explizit ansprechen.

Bei exemplarischen Beispielen für einzelne Branchen oder Unternehmen sollte stets auch die Übertragbarkeit auf die gesamte Branche oder andere Branchen des Verarbeitenden Gewerbes beachtet werden. Bislang sind kaum Untersuchungen zur Wirkung einer gesteigerten Materialeffizienzpolitik in Bezug auf mögliche THG-Einsparungen vorhanden bzw. öffentlich verfügbar. Im Klimaschutzszenario 95 der Klimaschutzszenarien (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) wird für die energieintensiven Grundstoffe eine gesteigerte Materialeffizienz unterstellt, die langfristig (2050) in einer Reduktion der produzierten Menge um 3-5 % resultiert. Dabei handelt es sich jedoch eher um konservative Schätzungen, die jüngste technische Entwicklungen, z.B. der Informations- und Kommunikationstechnik mit ihren neuen Dienstleistungen bei Pooling und Nutzungsintensivierung, noch nicht berücksichtigen (Zweck et al. 2015; Jochem et al. 2016) bzw. zudem aus der Nutzung von CCS zur Emissionsvermeidung zur Erreichung des ambitionierten Minderungsziels im Modell resultieren. In einer Potenzialstudie schätzen die befragten Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes, dass sie im Mittel 7 % ihres Materialverbrauchs in der Produktion einsparen könnten, wenn sie die heute verfügbaren technischen Möglichkeiten optimal ausnutzen würden (ISI 2011).

Steigerung der Materialeffizienz

Eine deutliche Erhöhung der Aktivitäten zur Steigerung der Materialeffizienz (z.B. bei den energieintensiven Grundstoffen) könnte deutlich zur Minderung von THG-Emissionen beitragen. Drei Hauptbereiche lassen sich dabei identifizieren: i) Ausbau einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft (inkl. Rückführung und Recycling), ii) Vermeidung von Nachfragen nach Grundstoffen (inkl. Nutzungsintensivierung/Pooling) und iii) optimierte Produktgestaltung.

Ein verstärktes Pooling von Produkten (Nutzungsintensivierung) sowie der Ausbau einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft, die nach Möglichkeit die in der Industrieproduktion eingesetzten Materialien und Rohstoffe vollständig in einen kontinuierlichen Wert-

stoffkreislauf zurückführt (IREES und ISI 2015; Wilts et al. 2016), könnten erheblich zur Minderung der THG-Emissionen der Industrie beitragen (Eichhorst und Spermann 2015; Spindler et al. o. J.). Letztendlich könnte sich durch solch ein Vorgehen Wirtschaftswachstum und Materialverbrauch weiterhin voneinander entkoppeln und ein großer Beitrag zur dauerhaften Nachhaltigkeit der Industrieproduktionen in Deutschland erzielt werden.

Zum Aufbau eines intelligenten Kreislauf- bzw. Material-Recycling-Systems von Grund- und Rohstoffen trägt auch die Weiterentwicklung von Verfahren zur sortenreinen Stoff- und Materialtrennung bei Metallen und Kunststoffen bei. Beachtung finden sollte die Entwicklung innovativer Recyclingmethoden, mit deren Hilfe sich z.B. Seltene Erden ,z.B. aus Elektromotoren, (Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH 2014; TU Clausthal 01.06.2015) oder Wolfram zurückgewinnen lassen. Auch branchenübergreifende Kreislaufsysteme, z.B. Phosphorrecycling aus Klärschlamm (Krüger und Adam 2014), etc., können ausgebaut werden. Die Vermeidung von Nachfrage nach Grundstoffen und Zwischenprodukten ist dabei der beste Ansatz zur Reduktion von Treibhausgasen. Dieser Nachfragerückgang wird auch durch den technischen Trend der fortschreitenden Miniaturisierung gefördert. Der nächste Schritt ist die Verminderung der Emissionen durch Rückführung von Ausschuss in den Produktionsprozess oder durch Recycling gebrauchter Endverbraucherprodukte oder -materialien. Das Recycling von Wert- und Rohstoffen, auch aus alten Deponien, stellt ebenfalls eine Option dar, die nicht vernachlässigt werden sollte (Fehring et al. 2013; Fehring et al. 2014; Moser-Marzi und Erdelean 2014; Öko-Institut 2012). Eine bewusste Förderung von Pooling/Leasing (z.B. für Straßenfahrzeuge, Baumaschinen, Handwerker- und Garten-Maschinen) kann die Innovationszyklen verkürzen, das heißt, die Einführung effizienter Produkte beschleunigen. Dieser Effekt ist bei Produkten mit hohen Steigerungsraten der Effizienz besonders von Bedeutung (z.B. bei Kraftfahrzeugen mit sinkenden Flottenverbräuchen). Außerdem führt das Pooling/Leasing zu deutlich höheren jährlichen Nutzungszeiten der entsprechenden Produkte und einer insgesamt geringeren Nachfrage nach den betroffenen Produktgruppen.

Die verschiedenen ökologischen, ökonomischen und sozialen Wirkungen des Pooling/Leasings müssen noch detaillierter untersucht werden, um eine fundierte Basis bezüglich ihrer Wirkung zu erhalten. Beispielsweise sollte noch weiter untersucht werden inwieweit das Pooling/Leasing zu einer Reduktion der THG-Emissionen beitragen kann oder ob es wohlmöglich gar zu einer Erhöhung der THG-Emissionen z.B. aufgrund von Rebound-Effekten kommen könnte (Gsell et al. 2015). Prinzipiell ist zu erwarten, dass sich durch die Sharing Economy (Pooling/Leasing) im Vergleich zur Einzelnutzung eine Reduktion der Produktion und dadurch eine Verminderung der Materialnachfrage erzielen lassen sollte.

Die Materialwissenschaften sollten sich in der Zukunft weiter vom Vorbild „Natur“ inspirieren lassen. Eine optimierte Produktgestaltung, welche z.B. auf bionischen Grundlagen und Erkenntnissen aufsetzt, kann den Materialbedarf zur Produktion industrieller Produkte branchenübergreifend signifikant reduzieren. Hierzu kann auch ein generell optimiertes Konstruktionsdesign („Leichtbau“) beitragen. Durch konsequente Berücksichtigung der diversen Ausprägungen der Materialeffizienz lassen sich beispielsweise in der metallverarbeitenden Industrie nach einer aktuellen Studie des VDI Zentrum

Ressourceneffizienz (VDI ZRE 2013) Einsparpotenziale bei den Materialkosten gegenüber dem heutigen Stand von rund 0,8 bis 2,4 Milliarden € im Jahre 2030 realisieren. Bezogen auf den Materialbedarf der Branche „Herstellung von Metallerzeugnissen“ entspricht dies einem Einsparpotenzial zwischen 2 % und 6 % des Gesamterzeugnisses. Das größte Einsparpotenzial ist dabei aus heutiger Sicht in der Branche „Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh- und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen“ identifiziert worden (VDI ZRE 2013). Diese VDI-Analyse hält zugleich für die Branche „Herstellung von Metallerzeugnissen“ Material- und Energieeffizienzpotenziale von 5-14 % bis 2030 für durchaus realistisch.

Die Stärkung der Wiederverwertbarkeit am Lebensende der Produkte und eine generelle Verlängerung der Produktlebensdauer von Produkten, deren THG-Emissionen im Wesentlichen auf die Herstellung zurückzuführen sind oder bei denen ein kürzerer Produktlebenszyklus nicht zu (weiteren) Effizienzverbesserungen führt, bereits bei Planung und Gestaltung der entsprechenden Produkte, kann zu einer Minderung von Emissionen beitragen (siehe Kapitel 3.2).

Ziel dieser verschiedenen Ansätze ist die Minimierung des „CO₂-Rucksacks“ der Produkte über deren gesamte Lebensdauer und die deutliche Erhöhung von deren Produktnutzungsintensität (Schlacke et al. 2012; Scholl et al. 2010; Scholl et al. 2013). Die Vielfalt an Materialeffizienzmaßnahmen zur Verminderung der Nachfrage nach energieintensiven Grundstoffen und Zwischenprodukten (z.B. optimiertes Konstruktionsdesign bzw. Produktgestaltung, Reduktion von Produktionsausschuss, korrigierte Qualitätsanforderungen, intelligentes Material-Recycling-System, etc.) bietet insgesamt einen erheblichen Beitrag zum Ziel eines transformativen Pfades der Industrie mit einem jährlichen Reduktionspotenzial der direkten und indirekten energiebedingten THG-Emissionen in der deutschen Industrie von etwa 0,5 % pro Jahr bzw. 1,5 Mio. t CO₂ jährlich (Jochem und Reitze 2014; Jochem et al. 2016). Das CO₂-Reduktionspotenzial bei den energetischen THG-Emissionen der Industrie summiert sich dadurch bis zum Jahr 2050 auf gut 36 Mio. t CO₂ auf (unter der Annahme, dass sich das jährliche Reduktionspotenzial aufgrund der teilweisen Erschöpfung der genannten Potenziale ab 2030 um die Hälfte reduziert).

Möglichkeiten der Material- bzw. Werkstoffsubstitution sowie des Materialdesigns hin zu weniger energieintensiven Materialien

Es gibt in der Industrie eine sehr große Vielfalt an unterschiedlichen Werkstoffen, welche wiederum in verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden können. Je nach Anwendung und Funktionalität erfordert die Auswahl des optimalen Materials bzw. Werkstoffes viel Erfahrung und Know-how. Zukünftig kommt der Entwicklung neuer Materiallösungen (z.B. Metall-Keramik-Verbunde, Legierungen, Hochtemperaturwerkstoffe, etc.) als Innovationstreiber in verschiedensten Bereichen der Industrie eine Schlüsselrolle zu (Viebahn et al. 2012; VDI-GME 2014; Peters 2012).

Häufig werden heutzutage schwere Werkstoffe (z.B. Stahl) durch leichtere Werkstoffe (Leichtmetalle, Aluminium, Magnesium, faserverstärkte Kunststoffe, Faserkeramiken, Biopolymere, Mehrkomponenten-Materialien, Metallschäume, etc.) ersetzt, allerdings findet diese Substitution auch in der Gegenrichtung statt, so können z.B. hoch- und höchstfeste Stähle aufgrund ihrer Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften direkt mit

Aluminiumlegierungen konkurrieren und gleichzeitig aufgrund filigraner Konstruktionen zum Leichtbau beitragen. Ob eine konkrete Materialsubstitution tatsächlich zu einer Minderung der in dem Produkt oder der verwendeten Komponente „gespeicherten“ THG-Emissionen führt, kann daher nicht generell gesagt werden, sondern muss jeweils geprüft werden. Dabei sind sowohl die emissionsrelevanten Auswirkungen der Materialsubstitution als auch des Designs zu untersuchen (PTJ und WING 2007).

Ungeachtet dessen eröffnen die sehr vielfältigen neuen Möglichkeiten der innovativen Materialsubstitution und des neuen Werkstoffdesigns (Leichtbau, z.B. Metallschäume, faserverstärkte Kunststoffe) vermutlich erhebliche Optionen zur Minderung von THG-Emissionen (durch die Senkung des Rohstoff- und Energiebedarfs für die Produktion der eingesetzten Werkstoffe; Ersatz emissionsintensiver Materialien z.B. durch biogene Materialien, etwa Holz)) gegenüber einem „Szenario“, das sich mit dem Einsatz „klassischer“ Materialien und Werkstoffe für den jeweiligen Einsatzzweck begnügt.

Die THG-Emissionen der industriellen Produktion lassen sich zudem durch Steigerung der Anteile von biogenen Abfallstoffen bzw. die Förderung der Substitution Erdölbasierter Rohstoffe durch biogene Materialien (z.B. Ersatz von Kunststoffen durch Biokunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen oder der Ersatz mineralölbasierter Dämmstoffe durch Dämmstoffe aus natürlichen Materialien, z.B. Ersatz von Polyesterol durch Hanf, Seegrass, Cellulose, Holzfaserdämmplatten oder Schafswolle, etc.) deutlich reduzieren. Nutzungskonflikte müssen beim Einsatz der Biomasse natürlich stets beachtet und in die Entscheidungsfindung über neue Optionen mit einbezogen werden. Außerdem ist anzuraten, dass vor einer großflächigen Nutzung der innovativen Materialien eine Ökobilanzierung durchgeführt wird, um negative Wirkungen auf Mensch und Umwelt zu verhindern.

Laut European Bioplastics wird der weltweite Markt der Biokunststoffindustrie zwischen 2014 und 2019 um 350 % wachsen (European Bioplastics 2016). Dazu tragen sowohl biologisch abbaubare Biopolymere (PLA, PHA, Stärkeblends) als auch biologisch nicht abbaubare haltbare Biopolymere (bio-basiertes PE oder PET) bei, wobei es zunächst insbesondere in den Anwendungsbereichen Textilien, Automobil und bei Gebrauchsgütern zu einem Anstieg des Anteils von Biokunststoffen kommen dürfte. Derzeit werden etwa 1,8 Mio. t biogen-basierter Kunststoff und 1,8 Mio. t andere chemische Produkte in Deutschland erzeugt (Carus et al. 2011; Nova 2013; Carus et al. 2016).

Die reine Substitution eines Werkstoffes durch einen alternativen Werkstoff stellt oft nicht die beste Lösung dar; zielführender ist häufig die Kombination verschiedener Werkstoffe zu einem Verbundwerkstoff mit „optimalen“ Eigenschaften (Technica 2014). Heutzutage werden Verbundwerkstoffe insbesondere in der Luftfahrt- und Automobilindustrie eingesetzt.

Welcher Material-Mix in den verschiedenen Industrieproduktionen tatsächlich zum Einsatz kommen wird ist sehr schwer vorherzusagen. Außer dem Gewicht der eingesetzten Materialien und Werkstoffe sind für die Industrieproduktion weitere Aspekte von großer Bedeutung: Sicherheit, Funktionalität, Optik und Design, mechanische und physikalische Eigenschaften, gute Verfügbarkeit der Rohstoffe, kostengünstige Herstellung, etc.

Letztendlich werden die Material- und Werkstoffentwickler in der Zukunft noch stärker gefordert sein, die Ausgangsmaterialien der Produktion zu modifizieren oder alternative Werkstoffe zur Verfügung zu stellen. Prinzipiell ist heute noch nicht exakt abzusehen welche der klassischen energieintensiven Grundstoffe (Aluminium, Stahl, Zement, etc.) in welchem Umfang bis 2050 durch alternative Materialien ohne Risiko für den Erbauer oder Nutzer substituiert werden können. Schließlich werden Grundstoffe, wie z.B. Zement oder Stahl, beim Bau komplexer und sehr langlebiger Infrastruktureinrichtungen und Gebäude verwendet (z.B. Brücken, Fundamente erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen, Industriegebäude, etc.). Langzeituntersuchungen zum Verhalten und zur Beständigkeit alternativer Materialien bzw. Grundstoffe stehen systembedingt derzeit noch nicht zur Verfügung.

Es ist ebenso derzeit schwer abzuschätzen, welche Materialsubstitutionen in den kommenden Jahrzehnten durch politische Maßnahmen beeinflusst werden könnten.

3.1.3 Verminderung der Verluste bei Energiewandlern von Endenergie auf Nutzenergie (inklusive der Verteilung der Nutzenergie)

Bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie lassen sich zukünftig noch große Einsparungen innerhalb der gesamten Industrie erzielen. Solche Effizienzverbesserungen betreffen in erster Linie die i) Querschnittstechnologien im Bereich Strom wie z.B. viele Stromanwendungen (z.B. Elektromotoren mit höherem Wirkungsgrad) und ii) die Querschnittstechnologien im Bereich Wärme- und Kältebereitstellung z.B. die Wärmeerzeugung in Kesselanlagen und mittels Wärmepumpen. Ein grundlegender, transformativer Wandel der Produktion sollte daher in diesem Bereich zukünftig folgende Ansatzpunkte berücksichtigen (IREES und ISI 2015):

- Angesichts der weiter fortschreitenden Automatisierung und des großen Anteils des Strombedarfs für elektrische Antriebe am Energiebedarf der Industrie muss unbedingt der Trend hin zu hocheffizienten E-Motoren fortgeführt werden. Die Optimierung muss die gesamten Elektromotoren-Systeme (Antrieb, Steuerung, Software, etc.) mit einbeziehen.
- Die Druckluftherzeugung könnte durch den konsequenten Einsatz von drehzahlregelten Kompressoren im Durchschnitt um etwa 30 % effizienter gestaltet werden (Ruppelt 2003). Weitere Einsparungen lassen sich durch eine zentrale übergeordnete Steuerung sowie eine Fernüberwachung des gesamten Systems (inklusive der Zu- und Ableitungen) erzielen.
- Die ganzheitliche Optimierung des Anlagenkonzeptes von Kompressionskälteanlagen (inklusive Regelung, Betriebsführung und Wartung) dürfte zu Stromeinsparungen von über 30 % führen (Meyer et al. 2012). Gleichzeitig könnte in diesem Bereich bei den Kompressoren anfallende Abwärme zum Betrieb von Absorptionskälteanlagen genutzt werden (Mattes et al. 2006).
- Der Faktor Mensch muss durch Informations- und Aufklärungskampagnen mit in die Effizienzbemühungen einbezogen werden. Insbesondere die regelmäßige Wartung und der optimierte Betrieb der Kessel- und Kälteanlagen (regelmäßige Reinigung der Wärmeüberträger, etc.) sowie der Pumpen und Kompressoren führt zu großen Einsparungen. Gleichzeitig sollten vermehrt Maßnahmen ergriffen werden, die den

Energieverantwortlichen, den Maschinen- und Anlagenführern mehr Eigenverantwortung und Anerkennung geben, aber auch mehr Anforderungen an sie stellen. Der Erfahrungsaustausch unter den Energieverantwortlichen in Energieeffizienz-Netzwerken wirkt ebenfalls wie ein Innovationsbeschleuniger.

3.1.4 Flexibilisierung der Stromnachfrage und -eigenerzeugung

Die Transformation des Energiesystems und auch der Industrie wird in erheblichem Umfang ein fluktuierendes Stromangebot (durch Sonnen- und Windenergie bedingt) bedeuten. Beim Stromangebot ist dies bereits heute zu beobachten. Neben den verschiedenen, relativ kostspieligen Speicher- und Power to X –Konzepten dürfte die flexible Stromnachfrage und Stromeigenerzeugung in Industriebetrieben zukünftig eine - auch aufgrund relativ geringer Kosten - wichtige Rolle spielen. Die Eigenerzeugung, im Wesentlichen über KWK, ist bereits heute relativ etabliert. Das flexible Verhalten auf Stromspitzen und -senken seitens der großen Elektrolyse- und KWK-Anlagen in der Grundstoff-Industrie mit mehreren MW Leistung hat eine jahrzehntelange Tradition, aber für kleine Leistungen war dies bislang nicht möglich. Aber infolge der heutigen kostengünstigen Mess-, Regel- und Kommunikationstechnik lassen sich auch kleine Leistungen von einigen 10 kW kosteneffizient für Minuten- und Stunden-Leistungen bündeln und an die Strombörse bringen (Mai und Glaser 2015). Die weitere Diffusion von KWK in der Industrie und die Flexibilisierung der Nachfrage bedeuten eine weitere Optimierung der Energienachfrage der Industrie und dementsprechend eine Reduktion der THG-Intensität. So kann durch die Flexibilisierung gegebenenfalls die Spitzenlast entsprechender Unternehmen reduziert werden.

Teil eines transformativen Pfades muss daher die Ausschöpfung dieser neuen Möglichkeiten sein, die in vielen Fällen deutlich kostengünstiger sind als die thermischen und chemischen Speichermöglichkeiten für Strom, die heute große Aufmerksamkeit genießen (IREES und ISI 2015). Erste Untersuchungen zeigen sowohl Flexibilisierungspotenziale im Bereich von Querschnittstechniken (z.B. Lüftung, Pumpensysteme, Warmwasserspeicher, Rücklauf von Fernwärmenetzen als Wärmespeicher) als auch in Prozessen mit Zwischenspeichern für Produkte (z.B. Klinker vor dem Zementmahlen; Weiterverarbeitung von Rohstahl oder chemischen Grundstoffen) oder Prozesse mit Speichercharakter (z.B. Waschbäder, Speicher für Sprinkleranlagen, Schwimmbäder, Kühlhäuser, klimatisierte Gebäude). Siehe auch (Mai und Glaser 2015). Bei gekoppelter Erzeugung besteht gegenüber der ungekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme noch immer ein erheblicher Vorteil in der CO₂-Bilanz. Bei Nutzungsdauern von etwa 10 Jahren für fossil betriebene Blockheizkraftwerke (Prognos et al. 2014b) dürfte der Lock-In-Effekt einer Investition in fossile Energieumwandlungssysteme vertretbar sein; Optionen für weitgehend CO₂-freie Erzeugungstechnologien zu späteren Zeitpunkten bleiben offen.

Eine ähnliche Flexibilisierung ist auch im Zusammenhang mit (kleinen) industriellen KWK-Anlagen (BHKW-Anlagen) und Notstromaggregaten in der Industrie gegeben. In Zukunft dürften auch ORC-Anlagen als weitere Option zur Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme hinzukommen.

Nach einer konservativen Schätzung des Bremer Energieinstitutes und des Deutschen Institutes für Luft- und Raumfahrt (Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. 2011) liegt das industrielle Potenzial für Strom und Wärme aus KWK bei jährlichen Einsparungen von 20 Mio. t CO₂. Ein weitere Studie (Prognos et al. 2014b), die sich mit einer Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse für KWK beschäftigt, hält jährliche CO₂-Einsparungen von 32-33 Mio. t im Zeitraum zwischen 2030 und 2050 für realisierbar, sofern ein ambitioniertes Politik-Szenario unterstellt wird.

3.1.5 Transformation durch Energieträgersubstitution

Neben den in den vorhergehenden Unterkapiteln behandelten Optionen geht dieses Kapitel auf Substitutionsmöglichkeiten bei fossilen Energieträgern ein.

Energieträgersubstitution

CO₂-intensive Stein- und Braunkohlen werden in der Industrie derzeit ausschließlich in einigen Prozessen und KWK-Anlagen der Grundstoffindustrie eingesetzt (Anteil am Endenergieverbrauch der Industrie im Jahre 2012: 15,6 % oder 400 PJ/a mit Emissionen von 39 Mio. t CO₂/a). Weitere 94 PJ (gut 7 Mio. t CO₂) werden in Form von Heizölen verbraucht (AGEB 2014). Ein großer Teil dieser fossilen Energieträger könnte durch Erdgas bzw. Flüssiggas (Verminderung ca. 8 Mio. t CO₂ /a) bis 2020 bzw. 2030 substituiert werden. Mittelfristig wird jedoch auch Erdgas, das bei 880 PJ jährlicher Nutzung mit etwa 50 Mio. t CO₂/ a die höchsten direkten brennstoffbedingten Emissionen verursacht, durch nicht-fossile Alternativen substituiert werden müssen.

Es wird zu prüfen sein, ob nicht weitere Mengen an Biomasse (z.B. Holzhackschnitzel) oder organischen Abfallstoffen (z.B. in der Nahrungsmittel-, pharmazeutischen oder Papierindustrie; derzeit 113,7 PJ/a oder 4,5 % des industriellen EEV), Fernwärme beim Niedertemperaturbedarf (derzeit 174 PJ/a; 6,8 % des EEV der Industrie; AGEB 2016) und nicht-erneuerbarer Abfallstoffe oder Abwärme aus dem eigenen Produktionsprozess oder einem Nachbarbetrieb (derzeit ca. 73 PJ; d.h. 3,8 % des EEV der Industrie) genutzt werden könnten (Pehnt et al. 2010). Auch gibt es vereinzelt Wärmepumpen und solarthermische Anwendungen, wobei letztere hauptsächlich im Sommerhalbjahr als „fuel saver“ dienen. Summiert man die Mengen der CO₂-neutralen Brennstoffe und Abwärmern, erhält man mit 154 PJ/a einen Anteil von 7,3 % am industriellen Endenergieverbrauch des Jahres 2014.

Teil einer Transformation muss es sein, die fossilen Energieträger, darunter insbesondere die Stein- und Braunkohlen-Anwendungen und die Heizölnutzung, schnell zu reduzieren und dabei jeweils zu prüfen, ob eine Umstellung auf einen CO₂-neutralen Brennstoff oder Abwärme möglich ist.

3.1.6 Erste Gesamtschätzung der Minderungspotenziale der diskutierten Handlungsoptionen

Tabelle 5 fasst die in Abschnitt 3.1 diskutierten Handlungsoptionen zur Reduktion von industriellen THG-Emissionen bis zum Jahre 2050 zusammen und unternimmt zugleich den Versuch einer ersten Priorisierung dieser Optionen hinsichtlich ihres THG-Minderungspotenzials. Die angegebenen mittel- bis langfristigen Minderungspotenziale sind der einschlägigen Literatur entnommen. Dabei handelt es sich je nach Angabe in der Originalquelle um jährliche THG-Einsparungen oder auch um Energieeinsparungen (Strom, Brennstoff). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Vielfalt der zitierten Quellen und die unterschiedliche Datenlage sowie variierende Rahmenannahmen in den verwendeten Studien es nicht erlauben, eine einheitliche Bezugsgröße für die Minderungspotenziale zu verwenden. Auch muss Abstand von einer kumulativen Betrachtungsweise dieser Potenziale genommen werden, da eine überschneidungsfreie und gesamtheitliche Datengrundlage nicht gewährleistet ist.

Trotz der lückenhaften und schwer vergleichbaren Potenzialangaben, die nur in Ansätzen quantitative Vergleiche zulässt, wurde eine erste Priorisierung der unterschiedlichen Optionen vorgenommen; darüber hinaus wurde von den Autoren dieser Studie zusätzlich eine überschlägige Schätzung der F&E-Aufwendungen zur Umsetzung der Maßnahmen vorgenommen. Die durchgeführte Bewertung der Minderungspotenziale und des Markteintrittes bzw. der Diffusion basiert dabei auf dem Expertenurteil der Autoren, im Falle des Minderungspotenzials auch auf den in der Tabelle dargestellten externen Potenzialangaben, wenn diese auch, wie erwähnt, nur sehr eingeschränkt miteinander vergleichbar sind. Im Rahmen weiterführender Analysen wird sich die Priorisierung der Handlungsoptionen ggf. verändern müssen. Die hier vorgenommene Einschätzung und Priorisierung kann keine Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten einer Nutzung dieser Potenziale treffen, da hierfür auch eine Reihe ökonomischer, politischer und weiterer Faktoren berücksichtigt werden müsste; dies ist zum einen im Rahmen dieser Untersuchung nicht leistbar, zum anderen besteht hier sicherlich noch erheblicher Forschungsbedarf.

Tabelle 5: Grober Überblick über mögliche Minderungspotenziale von diskutierten Handlungsoptionen im Bereich der Industrie in Deutschland im Hinblick auf 2050

	mittel- bis langfristiges Minderungspotenzial in PJ pro Jahr (Strom, Brennstoffe) oder Mio. t CO ₂	notwendige F&E Aufwendungen	Bewertung Minderungspotenzial		Bewertung Markteintritt und Diffusion Industrie
			energie- intensive Industrie	energie- extensive Industrie	
Kategorie	Potenziale, Quellenangaben, ggf. sonstige Angaben		0, +, ++, +++ ¹		
Prozesssubstitution & Prozessoptimierung		kurz- bis langfristig 2020-2050	+++	+++	++
Prozessinnovationen	Einsparpotenzial bis 2035 bei 15 PJ/a (Strom) und 55 PJ/a (Brennstoffe) (Fleiter et al. 2013)	hoch kurz- bis mittelfristig (auf energetische Emissionen bezogene Innovationen) 2020-2035 mittel- bis langfristig (auf Prozessemissionen bezogene Innovationen) 2030-2050	+++	++	++
Einsatz von besten verfügbaren Technologien (BVTs) und optimierte Prozessführung (z.B. verstärkte Simulation)	Gesamtes Potenzial bis 2035 bei 22 PJ/a (Strom) und 85 PJ/a (Brennstoffe) (Fleiter et al. 2013)	hoch kurz- bis mittelfristig 2020-2035	++	+	++
Nutzung von Abwärme	Gesamtes Einsparpotenzial bei 8 PJ/a (Strom) und 52 PJ/a (Brennstoff) bis 2035 (Fleiter et al. 2013)	hoch mittel- bis langfristig 2030-2050	+++	++	+++
Carbon Capture and Usage (CCU)	Langfristig höchstens 6% anthropogener Emissionen nutzbar Technisch genutztes CO ₂ etwa 0,75 Mio.	mittel bis hoch bis 2040	+++	+	++

	t/a (ISI 2010)				
Carbon Capture and Storage (CCS)	Kapazitäten für ca. 0,5 bis 42 Mrd. t CO ₂	Mittel bis Hoch bis 2040	+++	+	+
Materialeffizienz & Materialsubstitution	Jährliches Reduktionspotenzial der energiebedingten THG-Emissionen (Strom, Brennstoff) der deutschen Industrie 0,5 % bzw. 1,5 Mio. t CO₂ jährlich; ab 2030 halbiert sich das jährliche Potenzial; kumuliert ca. 21. Mio t CO₂ bis 2030, ca. 36 Mio t CO₂ bis 2050 (Jochem und Reitze 2014)	mittel bis hoch bis 2035	+++	+++	++
Ausbau einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft (Rückführung und Recycling)	Durch Recycling bis zu 500 PJ Einsparungen für 2030 (ISI 2010)	mittel bis hoch eher Entwicklung bis 2030	+++	+++	++
Vermeidung von Nachfrage nach Grundstoffen (inkl. Nutzungsintensivierung/Pooling)	Umfangreiche Szenarienberechnungen zur Quantifizierung notwendig (ISI et al. 2016)	mittel bis hoch mittelfristig bis 2035	++	+	++
Optimierte Produktgestaltung & Materialsubstitution (Leichtbau, Verbundwerkstoffe, biogene Rohstoffe)	z.B. durch Leichtbau ca. 80-100 PJ Einsparungen in den nächsten Dekaden (ISI 2010)	mittel bis hoch kurz- bis mittelfristig 2020-2040	+++	++	+++
Verminderung von Verlusten bei Energiewandlern; inkl. Verteilung der Nutzenergie (Energieeffizienz)		niedrig bis mittel kurz- bis mittelfristig 2020-2030	++	++	+++
Querschnittstechnologien Strom	z.B. 26 TWh Einsparungen durch Elektromotoren bis 2050 (ISI 2010)	Niedrig bis 2030	+ - ++	++ - +++	++ - +++
Querschnittstechnologien Wärme & Kälte	bis 2030 31 Mio Tonnen CO ₂ im Industriesektor	Mittel bis 2035	++	++ - +++	++

Flexibilisierung der Stromnachfrage und –eigenerzeugung		niedrig kurz- bis mittelfristig 2020-2030	++	++	++
Speicher- und Power to X-Konzepte (thermische und chemische Speichermöglichkeiten)	Einsparpotenzial von ca. 56 bis 115 Mio. t CO ₂ äq (Dena 2016)	mittel kurz- bis mittelfristig 2020-2030	+++	+++	++
Flexibilisierungspotenziale im Bereich von Querschnittstechniken/Prozessen mit Speichercharakter	Keine Quantifizierung durch fehlende Ausgestaltung der Flexibilisierung möglich (ISI et al. 2016)	niedrig kurz- bis mittelfristig 2020-2030	++	++	++
KWK (z.B. BHKWs, KWKK) und ORC	20 bzw. 33 Mio. t CO ₂ -Einsparung pro Jahr (durch KWK) (Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. 2011; Prognos et al. 2014b)	niedrig kurz- bis mittelfristig 2020-2030	++	++	++
Substitutionen bei fossilen Rohstoffen und Energieträgern		niedrig bis mittel kurz- bis mittelfristig 2020-2030	++	++	+++
Kohlesubstitution durch Erd- und Flüssiggas	Verminderung ca. 8 Mio. t CO ₂ /a	Niedrig kurz- bis mittelfristig 2020-2030	+ - ++	+ - ++	++ - +++
Nutzung von nicht-fossilen Alternativen (Abfälle und andere Reststoffe, erneuerbare Energien, biogene Energieträger)	k.A.	niedrig kurz- bis mittelfristig 2020-2030	++ - +++	++ - +++	++

1 : 0 : keine Potenzial, + : geringeres Potenzial bzw. Diffusion, ++ : gesteigertes Potenzial bzw. Diffusion, +++ : hohes Potenzial bzw. beschleunigte Diffusion

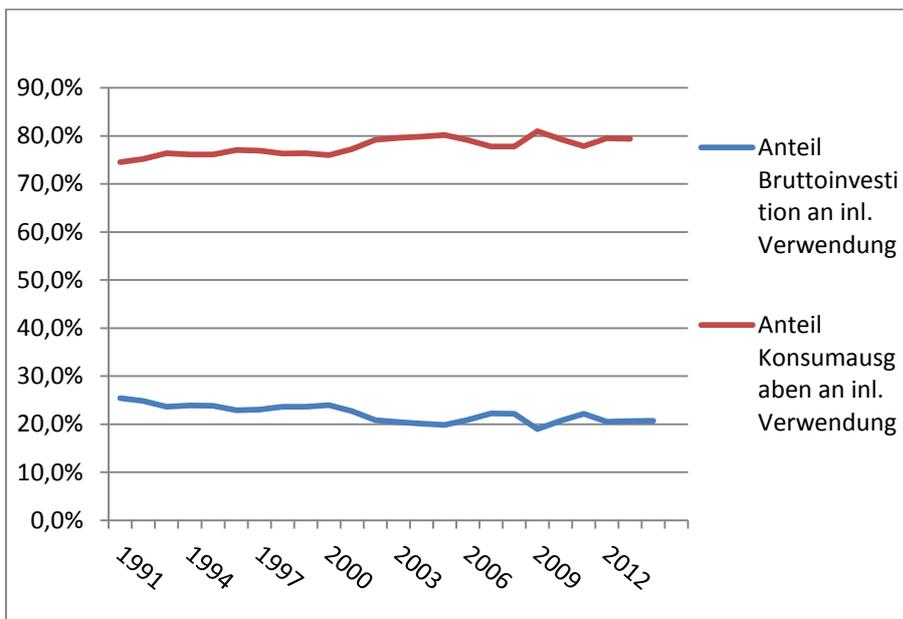
Quelle: IREES 2016

3.2 Grundlegender Wandel der Nachfrage nach industriell gefertigten Waren

Nachfrage und Produktion von Waren und Dienstleistungen bedingen einander. Die Nachfrage und Nachfrageänderungen verursachen Niveau und strukturelle Änderungen der industriellen Produktion einer Volkswirtschaft. Die Strukturwandelexeffekte innerhalb einzelner Branchen, der intra-sektorale Strukturwandel, als auch diejenigen zwischen verschiedenen Branchen, der inter-sektorale Strukturwandel, sind eng mit der Nachfrage (sowohl Inlands- als auch zunehmend Auslandsnachfrage) verknüpft. Die Nachfrage stellt gewiss nur einen wichtigen Einflussfaktor dar; es spielen z.B. auch Produktionsverlagerungen von endkundennahen massenhaft produzierten Waren aus Kostengründen eine große Rolle, wie es in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten in der Textil- und Bekleidungsindustrie oder der Gebrauchsgüter-Industrie zu beobachten war. Verstärkende Wechselwirkungen zwischen Angebot und Nachfrage sind auch denkbar: durch bestimmte Konsummuster (hier: immer schneller wechselnde Modetrends) führen zu einem Druck auf die Anschaffungspreise und forcieren damit auch den Strukturwandel durch Produktionsverlagerungen.

3.2.1 Die Rolle der privaten Nachfrage für die Industrieproduktion und die Treibhausgasemissionen

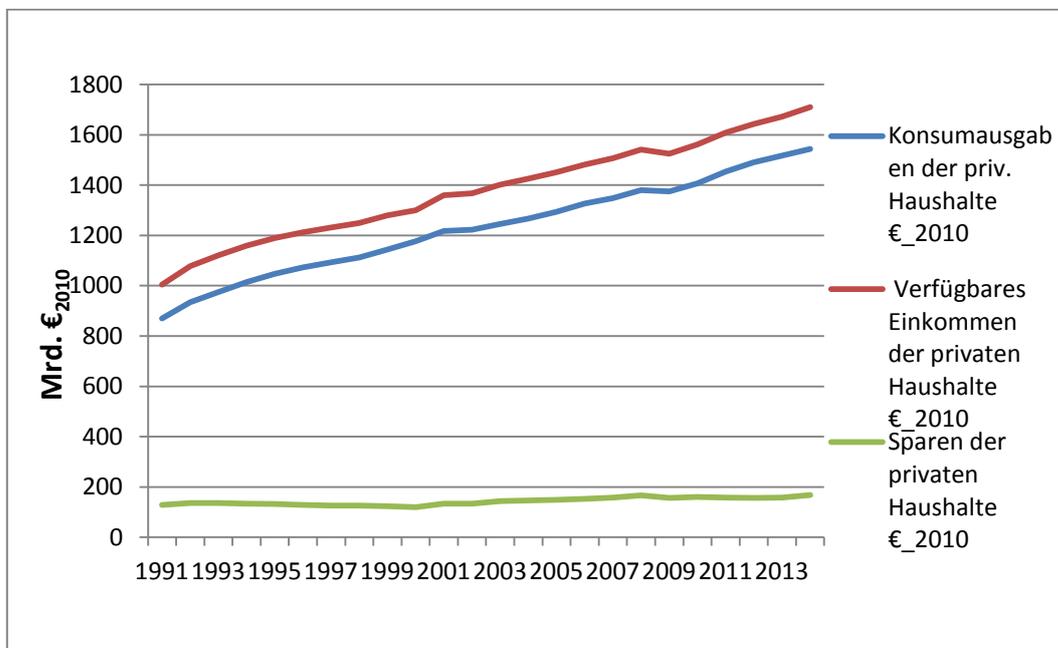
In den letzten knapp 25 Jahren ist der Anteil des Konsums an der inländischen Verwendung des BIP (dies entspricht der Summe aus Konsumausgaben und Bruttoinvestitionen) von ca. 75 auf 80 % gestiegen, dementsprechend sind die Bruttoinvestitionen von ca. 30 auf 25 % zurückgegangen (Abbildung 8); dies verdeutlicht die gewachsene volkswirtschaftliche Bedeutung des Konsums.



Quelle: Destatis 2015c

Abbildung 8: Zur Bedeutung von Konsum- und Investitionsausgaben an der inländischen Verwendung des BIP

Abbildung 9 zeigt, dass zusätzliches Einkommen der privaten Haushalte seit Beginn der 90er Jahre ausschließlich oder nahezu ausschließlich für zusätzlichen Konsum aufgewendet wird, während die real gesparten Summen ungefähr konstant geblieben sind: die Sparquote sinkt also. Tabelle 6 verdeutlicht dies nochmals und zeigt, dass die Sparquote bereits seit der ersten Hälfte der 70er Jahre sinkt, während sie zuvor seit der Nachkriegszeit gestiegen war.



Quelle: Destatis 2015c

Abbildung 9: Verfügbares Einkommen, Konsumausgaben und Sparen der privaten Haushalte in Deutschland, 1991 bis 2013

Tabelle 6: Ausgewählte historische Sparquoten der privaten Haushalte in Deutschland, 1950 bis 2014

Jahr	Sparquote der privaten Haushalte
1950	3,20%
1964	>10%
ca. 1970-1975	14-15%
1980	13,10%
1985	11,70%
1991	12,60%
1995	11%
2000	9%
2005	10,10%
2010	10%
2014	9,50%

Quelle: Destatis 2015c

Hinsichtlich des Sinkens der Sparquote zwischen 1970 und Mitte der 90er Jahre lässt sich vermuten, dass politische und wirtschaftliche Stabilität sowie eine wachsende Produktivität der Volkswirtschaft hinreichende Sicherheit für die finanzielle Zukunft vermitteln, so dass die Sparquote sinkt.

Die genannten Faktoren tragen dazu bei, dass die Ausstattung der privaten Haushalte mit Gebrauchsgütern (Haushaltgeräte, Unterhaltungselektronik, PKW, Informations- und Kommunikationstechnik) in den Jahrzehnten seit dem „Wirtschaftswunder“ so deutlich gestiegen ist, dass heute (im hochaggregierten Durchschnitt) von Sättigung gesprochen werden kann. Während in den 60er Jahren nur ca. 15 % der privaten Haushalte über ein Telefon verfügten, so liegt die Quote heute bei nahezu 100 %. Im gleichen Zeitraum stieg die Ausstattungsrate für PKW von 25 % auf knapp 80 % (Weber 2010; Destatis 2015c). Dies zeigt, dass Konsum heute oftmals entweder Ersatzkonsum ist, oder dass andere Faktoren als ein rein funktionalistisch-materiellen Nutzen das Konsumverhalten wesentlich mitbestimmen. Veränderte und oftmals kürzere Konsumzyklen sind die Folge. So können besondere Konsumformen (reelle oder empfundene) Gruppenzugehörigkeiten schaffen, aber auch zur Abgrenzung von anderen und damit zu einer gewünschten (reellen oder empfundenen) Individualisierung beitragen. Generell lässt sich sagen, dass die Art und Weise des Konsumierens mit den Werthaltungen von sozialen Gruppen und Individuen zusammenhängt. In vielfach gesättigten Märkten ist es für die Produzenten und Händler wichtig, solche und andere neue, nicht-materielle Nutzenvorstellungen bei den potentiellen Kunden zu generieren und positiv zu besetzen. Auch dies treibt Konsumzyklen an.

Grundsätzliche Bedeutung des privaten Konsums in Deutschland für den Sektor Industrie

Die Verteilung der privaten Konsumausgaben auf einzelne Ausgabenbereiche ist in den vergangenen zehn Jahren relativ konstant geblieben. Die Zahlen für das Jahr 2013 zeigt Tabelle 7. Die hier vorgenommene Aufteilung entspricht nicht der Struktur der Wirtschaftszweige, so beinhaltet „Verkehr“ hier z.B. auch die Konsumausgaben für die Anschaffung von PKW. Der Industrie, d.h. dem Verarbeitenden Gewerbe gemäß der Struktur der Wirtschaftszweige, lassen sich insgesamt ca. 36-42 %⁶ der Konsumausgaben insofern „zuordnen“, als dass diese Ausgaben letztlich durch die industrielle Produktion erst ermöglicht werden bzw. dass die industrielle Produktion von Konsumausgaben in dieser Höhe abhängig ist. Dies lässt keine Rückschlüsse auf die dem Sektor Industrie aus dem Konsum zufließenden finanziellen Mittel, auf die Höhe der inländischen Produktion oder auf die dem Konsum industrieller Produkte zuzurechnenden Treibhausgasemissionen zu. Denn je nach Art und Qualität eines Konsumguts mag ein erheblicher Teil der inländischen Nachfrage durch Importe abgedeckt werden (z.B. Bekleidung und Schuhe sowie Nahrungsmittel. Es zeigt allerdings eindrucksvoll quanti-

⁶ Zuteilung zu Verarbeitendem Gewerbe mit Hilfe detaillierterer Aufschlüsselung der Ausgabenbereiche in der Fachserie 15 führt zu einem Ergebnis von 39 %. Angenommenes Fehlerintervall in beide Richtungen 3 %. Hierbei wurden die folgenden in der Tabelle 6 gelisteten aggregierten Ausgabenbereiche vollständig oder teilweise der Industrieproduktion zugeordnet: Nahrungsmittel etc., Bekleidung/Schuhe, Innenausstattung/Haushaltsgeräte, Verkehr, Freizeit/Unterhaltung/Kultur, Andere Waren.

tativ die Bedeutung der kausalen Abhängigkeit zwischen privatem Konsum und industrieller Produktion *als Ganzem* auf.

Tabelle 7: Aufteilung der Konsumausgaben der privaten Haushalte in 2013

Aufteilung der Konsumausgaben in 2013	
	[%]
Nahrungsmittel, Getränke, Tabakwaren	13,8
Bekleidung und Schuhe	4,9
Wohnen, Energie, Wohnungsinstandhaltung	34,5
Innenausstattung, Haushaltsgeräte	5
Gesundheitspflege	4,2
Verkehr	14
Post und Telekommunikation	2,7
Freizeit, Unterhaltung, Kultur	10,7
Bildungswesen	0,9
Beherbergungs- und Gaststätdienstleistungen	5,3
Andere Waren und Dienstleistungen	4,1

Quelle: Destatis 2013

Konsum und Treibhausgasemissionen

Die Bedeutung der durch (privaten) Konsum bedingten (nationalen) Industrieproduktion für die (nationalen) Treibhausgasemissionen zu analysieren ist sehr komplex. Sie kann daher hier im Wesentlichen nur in ihrer Breite und qualitativ diskutiert werden. Die Komplexität resultiert ganz entscheidend aus Abgrenzungsschwierigkeiten:

- in der nationalen Emissionsberichterstattung wird gemäß des Quellprinzips bilanziert, so dass nur „auf inländischem Boden“ emittierte Treibhausgase erfasst werden. Im- und Export von Konsumgütern und damit die „konsumbezogene Treibhausgas-Handelsbilanz“ werden bei dieser Form der Berichterstattung nicht mit einbezogen. Diese Handelsbilanz wird, um nur einige Faktoren zu nennen, unter anderem durch die Art der im- und exportierten Produkte, deren Wertschöpfungstiefe, deren Qualität (insbesondere im Hinblick auf die Lebenszeit) und durch die Effizienz der Produktion in den Produktionsländern bestimmt.

- Die Zusammenhänge zwischen (privatem) Konsum und industrieller Produktion sind durch die heterogene Produktstruktur der Produktion und die oftmals langen Wertschöpfungsketten hochkomplex. Es stellt sich die Frage, welche Wertschöpfungsstufen wie bei der Ermittlung der produktbezogenen Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden sollen.

Hinsichtlich der Frage, welche Mengen an Treibhausgas durch Konsum (im weiteren Sinne) bedingt und durch internationalen Handel zwischen verschiedenen Staaten und Staatengruppen verschoben werden, existiert eine aufschlussreiche Studie aus dem Jahr 2011 (Peters et al. 2011). Die Autoren untersuchen darin anhand verschiedener Modelle, welche Mengen an CO₂ Emissionen (d.h. ohne Betrachtung anderer Treibhausgase) durch internationalen Handel insbesondere zwischen den entwickelten Ökonomien (Indikator: Annex B Staaten des Kyoto- Protokolls) und den Entwicklungsländern (Nicht-Annex B Staaten) verschoben werden und wie sich dies über die Zeitschiene von 1990 bis 2008 entwickelt hat. Die benutzten Modelle sind global, die verwendeten Daten und Ergebnisse aber disaggregiert bis auf die Ebene der Nationalstaaten. Die gesamten Wertschöpfungsketten der untersuchten Produkte wurden dabei berücksichtigt.

Die Studie zeigt folgende, für die Überlegungen zur Bedeutung des Konsums wesentliche, Ergebnisse:

- Während die jährlichen inländischen CO₂-Emissionen der Annex-B Staaten (die Grundlage sind für die UNFCCC Berichterstattung) in Summe zwischen 1990 und 2008 leicht zurückgegangen sind (1990: 11,3 Mrd. t CO₂; 2008: 10,8 Mrd. t CO₂), sind die durch den „Gesamtkonsum“⁷ bedingten CO₂ Emissionen im gleichen Zeitraum von 14,5 auf 15,5 Mrd. t gestiegen. Daraus folgt, dass es hier zu einem absoluten Anstieg des emissionswirksamen „Gesamtkonsums“ und nicht nur zu einer reinen Produktionsverlagerung gekommen ist.
- Die Differenz zwischen diesen beiden Entwicklungen erklärt sich aus der „CO₂-Handelsbilanz“ dieser beiden Staatengruppen. Gemeint ist, dass beispielsweise Emissionen durch Produktion von Waren in Inland durch Konsum dieser Waren im Ausland bedingt wurden. Generell gibt es zwei Faktoren, die hier unterschieden werden müssen: ein genereller Anstieg der Nachfrage und des Welthandels einerseits, andererseits eine Produktionsverlagerung. Wurden durch den Handel mit den Annex-B Staaten im Jahr 1990 noch insgesamt, als Netto-Wert über alle Sektoren, 0,4 Mrd. t CO₂ der „domestic emissions“ der Nicht Annex-B Staaten verursacht, so waren dies im Jahr 2008 bereits 1,6 Mrd. t CO₂. Dies entspricht einem jährlichen Wachstum in dem genannten Zeitraum von 17 %.

⁷ Der Begriff „(Gesamt-)Konsum“ ist hier sehr weitgefasst im Sinne von „Produktionsverwendung“ und unterscheidet nicht zwischen z.B. Konsum und Investition. Hier gilt: CO₂ Emissionen „Gesamtkonsum“ = inländische Emissionen plus Emissionen der Netto-Handelsbilanz

- Für Deutschland gilt, dass im Jahr 2008 Netto 222 Mio. t CO₂ durch den Handel mit Nicht-Annex B Staaten auf deren Treibhausgasbilanz verschoben wurden. Vergleicht man dies mit den inländischen Emissionen des Jahres 2008 entspricht dies ca. 25 %, die bei einer Konsum- oder Verbrauchsorientierten Bilanzierung „on Top“ kämen.
- Bei sektoraler Betrachtung der „CO₂-Handelsbilanz“ zwischen den beiden Staaten-gruppen Annex B und Nicht-Annex B zeigt sich, dass über die gesamte Zeitreihe von 1990 bis 2008 der Sektor „non energy-intensive manufacturing“, der auch alle gehandelten Konsumgüter im engeren Sinne umfasst, den größten Beitrag zu dieser unausgewogenen Bilanz beisteuert. Im Jahr 1990 betrug der Anteil dieses Sektors an der Handelsbilanz-Differenz von 0,4 Mrd. t CO₂ rund 45 %, im Jahr 2008 waren es rund 43 % der Handelsbilanz-Differenz von 1,6 Mrd. t CO₂.

Es zeigt sich also, dass die Industriestaaten, darunter auch Deutschland, eine erhebliche Verantwortung auch für die Emissionen anderer Staaten, insbesondere der Schwellen- und Entwicklungsländer, tragen. Bei der Ausgestaltung des Transformationsprozesses in Deutschland sollte dies, insbesondere für die deutsche Industrie, seitens der Politik berücksichtigt werden. Ein Beispiel aus der deutschen Außenhandelsstatistik soll dies untermauern: im Jahr 2013 betrug der Gesamtwert aller eingeführten Güter aus China, die sich im Wesentlichen den kurzlebigen Konsumgütern zurechnen lassen, ca. 91 Mrd. €. Dem stehen deutsche Ausfuhren derselben Güterabteilungen von ca. 45 Mrd. € gegenüber (Destatis 2015a). Kurzlebige Konsumgüter haben, naturgemäß aufgrund ihrer geringen Lebensdauer, oftmals einen hohen spezifischen CO₂-Fußabdruck. Die Verlagerung dieser kurzlebigen und nur in sehr geringem Maße forschungsintensiven Konsumgüter in Staaten mit deutlich geringeren Stückkosten ist volkswirtschaftlich nachvollziehbar, lässt die Verlagerung von Emissionen allerdings außer Acht. Es ist auch zu vermuten, dass die Emissionsintensität der Produktion in den Produktionsländern höher ist als die bei einer Produktion in den westlichen Absatzländern wäre; dies muss jedoch für jedes Produkt im Einzelfall geprüft werden.

Konsumzyklen von Kleidung und Konsum-Elektronik

Ein sehr bedeutendes Konsumgut im Bereich der privaten Haushalte, das durch industrielle Produktion hergestellt wird, ist **Kleidung**. In Deutschland werden pro Jahr ca. 50 Mrd. € für Kleider ausgegeben, pro Kopf und Jahr werden 13 kg Kleidung gekauft (der weltweite Wert beträgt 8 kg pro Kopf und Jahr) (Leismann und Enterlein 2012).

Kleidung ist weiterhin typisch für ein Konsumgut, dass nicht nur der Befriedigung existenzieller Bedürfnisse (Schutz vor Kälte, Nässe) dient, sondern in ganz erheblichem Maße kulturell-sozialen Nutzen vermittelt, wie beispielsweise als Ausdrucksmittel der Zugehörigkeit zu einer Gruppe oder der Individualität. Ein erheblicher Teil dieser Kleidung wird in Asien produziert. So standen hier im Jahr 2013 Ausfuhren von Deutschland nach China im Wert von ca. 505 Mio. € Einfuhren aus China von ca. 15,4 Mrd. € gegenüber (Destatis 2014). Diese Ware unterliegt – sowohl modebedingt als aufgrund der oftmals geringen Qualität sowie wegen der günstigen Anschaffungskosten – sehr

kurzen Konsumzyklen.⁸ Dies führt zu einem hohen Ressourcenumsatz. Auch der interkontinentale Transport verursacht erhebliche CO₂ Emissionen.

Da der ganz überwiegende Teil der in Deutschland konsumierten Kleidung insbesondere aus Schwellen- und Entwicklungsländern importiert wird, erscheint klar, dass es sich hierbei um ein Beispiel für inländischen Konsum handelt, der sich nur marginal in der nationalen Treibhausgasbilanz Deutschlands niederschlägt. Bei einer isolierten Betrachtung des notwendigen Transformationsprozesses unter Zugrundelegung der Treibhausgasbilanzierung nach Quellprinzip erscheint dies daher kein vordringliches Handlungsfeld zu sein. Dies zeigt, wie eingeschränkt diese Herangehensweise der Problematik gerecht werden kann.

Eine weitere Produktgruppe mit kurzen und tendenziell weiterhin abnehmenden Konsumzyklen ist die Consumer-Elektronik. Für die Trends in dieser Produktgruppe sind aus Sicht der Autoren folgende Faktoren entscheidend:

- Ein „Top-Runner/First-Mover Statuskonsum“: Wechsel des Smartphones alle ein-zwei Jahre, befeuert durch entsprechende Marketingstrategien und Produktgestaltung (nicht austauschbare Akkus und Displays, etc.)
- Durch billige, evtl. sogar subventionierte Verkaufspreise forcierte Wegwerfmentalität: als Entscheidungskriterium der Endverbraucher dient oftmals, insbesondere bei in ihrer Funktionalität sehr ähnlichen Produkten, der Verkaufspreis. Durch eine Begrenzung der Produktlebensdauer sowie durch teure aber notwendige Verbrauchsmaterialien wird das Geschäft für die Hersteller betriebswirtschaftlich rentabel, während Reparaturen, wenn überhaupt möglich, aufgrund der geringen Anschaffungspreise für den Kunden unrentabel sind und somit wiederum der Neukauf forciert wird. Dies geht mit einem erheblichen Ressourcenumsatz einher. Ein prominentes Beispiel hierfür sind Tintenstrahldrucker- bzw. Office-Kombilösungen für den privaten Gebrauch.

Fazit privater Konsum: Der private Konsum hat in Deutschland (und zunehmend auch weltweit) einen erheblichen Anteil an der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, wobei genauer untersucht werden müsste, wie sich der Konsum von Industriewaren und Dienstleistungen jeweils entwickelt. Die Intensität sowie Struktur der Endnachfrage durch die Verbraucher ist äußerst relevant für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland und, aufgrund der großen Handelsvolumina von Konsumgütern, weltweit. Eine genauere Analyse, wie hoch die Treibhausgasemissionen sind und zukünftig sein werden, die sich auf den privaten Konsum in Deutschland zurückführen lassen, kann an dieser Stelle nicht geleistet werden. Den Autoren (abgesehen von typisierten Daten zur Ermittlung des CO₂ Fußabdrucks von Produkten (Wiedmann und Minx 2008) keine genaue Gesamtanalyse dieser Fragestellung bekannt. Mögliche Handlungsoptionen zur Verminderung der konsumbedingten THG-Emissionen werden im folgenden Kapitel umrissen.

⁸ Auf die oftmals menschenunwürdigen Produktionsbedingungen soll hier nicht explizit eingegangen werden.

3.2.2 Handlungsoptionen für die Nachfrage nach industriellen Produkten

Aufgrund der in Kapitel 3.2.1 erläuterten Situation gibt es zentrale Ansatzpunkte für Maßnahmen von Politik und Wirtschaft, aber auch einzelner Unternehmen als „First Mover“ und „Trendsetter“ sowie für die Zivilgesellschaft. Hauptansatzpunkt ist hier letztlich der private Verbrauch mit seinen Kaufentscheidungen. Hinsichtlich der Frage, welche Gruppen privater Haushalte die Transformation der Industrie am ehesten durch ihre Nachfrage nach Konsum- und Gebrauchsgütern bzw. Dienstleistungen mittragen würden bzw. mitgestalten könnten, empfiehlt sich ein Blick in die Definition der Milieus von Sinus (Ludwig 2009, S. 13). Dieses Institut unterscheidet die privaten Haushalte nach ihrem Einkommen und ihren Werthaltungen. Als besonders geeignet erscheinen die beiden Milieus „Traditionsverwurzelte“ und „Moderne Performer“ mit zusammen 24 % der Bevölkerung. Sehr hohe Überzeugungsarbeit wäre hingegen bei den Milieus „Konsum-Materialisten“, „Hedonisten“ und „Etablierte“ mit insgesamt 33 % der Bevölkerung erforderlich.

3.2.2.1 Nachfrage entlang der industriellen Wertschöpfungskette

Konsum verursacht über die Zulieferungen von Waren innerhalb der Industrie eine industrielle Zwischennachfrage. So benötigen z.B. die Kfz-Hersteller die Lieferungen von Robotern, Fließbändern, Elektronik oder Druckluftanlagen zur Fertigung der Kfz in ihren Fabriken. Diese industrielle Zwischennachfrage – z.B. der Investitionsgüterhersteller – wird dann noch ergänzt durch die Exporte für derartige Waren.

Diese industrielle Zwischennachfrage und die Exporte sind jeweils abhängig von der jeweils verwendeten Technologie zu einem Zeitpunkt und in einem bestimmten Land:

- Je intensiver die privaten oder öffentlichen Haushalte nach nachhaltigen Produkten verlangen und nach solchen die nachhaltig produziert wurden, desto größer sind die Chancen, dass das Produkt bzw. die Produktionstechnik, mit der diese Güter hergestellt werden tatsächlich ökologisch nachhaltiger (material- und energieeffizienter sowie emissionsärmer) sind und werden.
- Je intensiver die inländische und ausländische Nachfrage nach den ökologisch nachhaltigen Technologien ist, desto intensiver forschen und entwickeln die Hersteller in diese Richtung und desto höhere Skaleneffekte können sie mit den neuen Technologien erzielen, d.h. Produkte und Investitionsgüter kostengünstig anbieten.
- Je intensiver die Politik diese ökologisch nachhaltigen Technologien fordert und fördert und die betroffenen Wirtschaftsverbände diese Signale für ihre Mitglieder verstärken, desto mutiger sind die First Mover – die zunächst in die nachhaltigen Lösungen investierenden Unternehmen – und desto schneller und aufmerksamer werden die Wettbewerber dieser First Mover sein, um nicht Marktanteile zu verlieren.

Endkundennahe Branchen und Familienunternehmen stehen den ökologisch nachhaltigen Technologien heute deutlich näher. „Grüne“ Produkte und Dienstleistungen (z.B. CO₂-freie Mobilität) sind im letzten Jahrzehnt aus der „Ökonische“ herausgekommen und erobern neue Teilmärkte im Bereich der Gebrauchs- und Konsumgüter. Gebrauchsgüter-Hersteller fordern immer häufiger einen ökologischen Fußabdruck von den Produkten ihrer Vorlieferanten (Klenk 2009).

Sowohl bei der Nachfrage entlang der industriellen Wertschöpfungskette als auch bei den Möglichkeiten, nachfrageseitig die THG-Emissionen zu vermindern, gibt es Hemmnisse die verstärkt adressiert werden könnten:

- Wenn sehr hohe **Qualitätsanforderungen** seitens eines Herstellers oder einer Herstellerbranche an Zulieferer gestellt werden, ohne dass der hohe Aufwand (einschliesslich Energie und Recycling für mangelhafte Produkte) durch einen Nutzenmehrwert gerechtfertigt wäre, könnte man durch Anpassung der Qualitätsanforderungen einen hohen Energieverbrauch und Materialverlust vermindern (Die Anforderungen an die High-End-Oberflächen für Autos und Consumer-Elektronik oder die Größe der zulässigen Luftbläschen in Autoglas sind Beispiele zu hoher Qualitätsanforderungen, die den Autoren seitens der Zulieferer im Rahmen der Energieeffizienz-Netzwerke berichtet wurden). Ob in derartigen Fällen die Qualitätsanforderungen noch angemessen oder überhöht sind, müsste man prüfen. Eine Alternative könnte ein Angebot von zwei Qualitätsstufen sein, wie man es in der Porzellan-Industrie seit mehr als 100 Jahren kennt.
- Bei den Ausschreibungen für die **Beschaffung** bzw. den Einkauf könnten die Unternehmen durch gezielte technische Energieeffizienz-Vorgaben die Abnahme von energie- und materialeffizienten Investitions- und Gebrauchsgütern deutlich erhöhen. Wenn ineffiziente Geräte, Produkte oder Anlagen, die derartigen Vorgaben nicht entsprechen, weniger Absatz finden, werden sich Hersteller und Großhandel schnell anpassen. Diese Nachfragemacht der Unternehmen wird derzeit wenig genutzt. Dabei gibt es nicht nur bzgl. einzelner Merkmale eines Produktes (z.B. ein hocheffizienter Antriebsmotor) eine Standardisierung (z.B. durch die Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie), die der Einkauf einfordern könnte, sondern es gibt auch einen Indikator bzgl. der „grünen“ Produktionsweise des Vorlieferanten: den „ökologischen Fußabdruck“ oder den „Treibhausgas-Fußabdruck“. Werte zu diesen Indikatoren seitens des Einkaufs einzufordern, wäre ein weiterer kleiner Treiber zur Transformation der deutschen Industrie und der ausländischen Zulieferer (Klenk 2009; Liedtke et al. 2013).

3.2.2.2 Nachfrage durch private Endverbraucher

Die Handlungsoptionen zur Reduktion der konsumbedingten Treibhausgasemissionen für die privaten Endverbraucher sind bereits heute sehr vielfältig, und es gibt eine ganze Reihe von positiven Entwicklungen „im Kleinen“. Bislang fehlte es vor allem an einer klaren politischen Strategie für auf Dauer angelegte und wirksame Maßnahmen in diesem Bereich. In diesem Jahr wurde erstmals ein „Nationales Programm für nachhaltigen Konsum“ vom Bundeskabinett verabschiedet (Bundesregierung 2016). Das Programm benennt die grundlegende Bedeutung des Konsums für Fragen der Nachhaltig-

keit, darunter auch für den Klimaschutz, definiert Leitbilder für nachhaltigen Konsum (planetare Belastungsgrenzen als äußerste Grenzen wirtschaftlichen Handelns) und Leitideen einer Politik für nachhaltigen Konsum. Die Maßnahmen, die Bedürfnisfeldern wie z.B. Ernährung und Mobilität zugeordnet werden, setzen vor allem auf die Schaffung und Vermittlung von Wissen: auf Informationen, Forschung, Bildung und Transparenz. Es bleibt abzuwarten, ob die noch sehr allgemein formulierten Maßnahmen tatsächlich spürbare Effekte haben können. Ein Monitoring des Programms auf Basis eines Indikatorensets ist vorgesehen. Das Nationale Programm für nachhaltigen Konsum ist ein vielversprechender Ansatz, der jedoch konsequent und langfristig weiterverfolgt werden müsste. Ein breiter politischer Konsens zu den grundlegenden Fragen, welche Rolle der private Konsum für ein langfristig angelegtes, nachhaltiges Wirtschaften spielen kann und muss und welche Gestaltungsspielräume die Politik wahrnehmen sollte, ist derzeit in Deutschland nicht zu erkennen. (Scherhorn 2015) spricht die zentralen Problem- und Entscheidungsfelder an: Bedürfnisse und Ersatzbedürfnisse, Güterwohlstand oder Zeitwohlstand, Job oder Tätigkeit, Ausbeutung oder Erhaltung von Gemeingütern. Er zeichnet die Grundzüge einer Nachhaltigen Entwicklung, die auch die Transformation der Industrie befördern würde.

Mögliche Handlungsansätze lassen sich grob in zwei wesentliche Handlungsfelder strukturieren, die zu einer Verringerung der THG-Emissionen des produktbezogenen Konsums der privaten Endverbraucher führen. Zum einen handelt es sich um die Verringerung der Nachfrage nach neuen Produkten, zum anderen um die Verschiebung der Nachfrage hin zu nachhaltiger produzierten Waren.

Verstärkte Adressierung des Handlungsfeldes „Verringerung der Nachfrage nach Produkten“

Insbesondere für die durch eine Verlängerung der Lebensdauer von Produkten erzielbaren Erfolge zur Minderung des Ressourceneinsatzes und damit auch der Emissionen von Treibhausgasen, ist es hilfreich, wenn der Staat wirksame Maßnahmen ergreift, da es hier auch auf Änderungen in der Produktion bzw. im Produktdesign ankommt. Denn wenn Produkte so gestaltet werden, dass ihre Produktlebenszyklen notwendigerweise kurz sind oder eine Verlängerung der Lebensdauern durch Maßnahmen auf Seiten der Endverbraucher verunmöglicht wird, kann dies eine Verringerung der Nachfrage nach diesen Produkten verhindern, wenn man davon ausgeht, dass der gewünschte Nutzen durch diese Produkte weiterhin befriedigt werden soll. Dies bedeutet nicht, dass eine solche aus Nachhaltigkeitsaspekten negative Produktgestaltung alleine den Herstellern „anzulasten“ ist. Eine aktuelle Studie des UBA (Prakash et al. 2016) zeigt auf, dass Gebrauchsgüter aus verschiedensten Gründen ersetzt werden und dabei verschiedene Obsoleszenzformen (werkstoffliche, funktionale, psychologische) zusammenwirken. Die Studie weist daher darauf hin, dass die häufig eindimensional geführte Debatte um eine „geplante Obsoleszenz“ durch die Hersteller zu Ungunsten der Verbraucher zu kurz greift; die Frage, ob Hersteller generell die Lebensdauer ihrer Produkte bewusst planen, wird jedoch eindeutig bejaht. Eine solche Planung kann auch im Hinblick auf eine (ökonomisch wie ökologisch) sinnvolle Ressourcennutzung optimiert werden, indem die technische Produktlebensdauer so geplant wird, dass sie der Produktnutzungsdauer entspricht – sofern man die üblichen Produktnutzungsdauern für die jeweiligen Produkte als gegeben und nicht zu beeinflussen annimmt. Letztlich wäre, unter diesem Blickwinkel, auch hier wieder das Konsumver-

halten der Verbraucher der Hauptansatzpunkt, insofern sich die Hersteller auch hinsichtlich der Planung von technischen Lebensdauern an „typischen“ Kundenerwartungen ihres Marktsegmentes orientieren. Geplante Obsoleszenz im Sinne einer manipulativen, für den Verbraucher negativen Beeinflussung von Produktlebensdauern war nicht Gegenstand der genannten Studie. Die Autoren empfehlen, aufbauend auf der genannten Studie, dieser Frage mit weiteren Analysen nachzugehen.

In diesem Zusammenhang wäre sowohl eine Prüfung ordnungsrechtlicher Maßnahmen zur Einhaltung bestimmter Mindest-Standards hinsichtlich der Lebensdauer von spezifischen Produktgruppen (evtl. angelehnt an die Ökodesign-Richtlinie) als auch von Maßnahmen zur Verbesserung der Transparenz (Kennzeichnungspflichten oder Unterstützung freiwilliger Kennzeichnungs-Initiativen) empfehlenswert. Auch eine Optimierung der Reparatur- sowie Nach- und Umrüsfähigkeit von Produkten sind wichtige Aspekte für die Verlängerung der Lebensdauern. Die Lebensdauer sowie die Reparatur-, Nach- und Umrüsfähigkeit der Produkte könnten den Verbrauchern verpflichtend transparent gemacht werden – ebenso, als Entscheidungshilfe, könnte der Kaufpreis auf die durchschnittliche Lebensdauer der Produkte heruntergebrochen werden, so dass die Verbraucher über einen einfachen und nachvollziehbaren ökonomischen Indikator verfügen.

Die unter dem Begriff „Nutzen statt Besitzen“ zusammengefassten Konzepte können ebenfalls vom Staat unterstützt werden. Hier sind neue regulierende Maßnahmen allerdings kaum vorstellbar, vielmehr sollte der Staat prüfen, wie er bereits bestehende Regularien so anpassen kann, dass diese für neue Geschäftsmodelle und nicht-kommerzielle Initiativen keine Hindernisse darstellen. Die Konsumenten und die Wirtschaft wären dabei ebenso in die Verantwortung zu nehmen. Für nicht-kommerzielle Initiativen, wie z.B. Leih- und Verschenkläden, sind darüber hinaus staatliche Förderprogramme, aber auch Informationskampagnen und Fortbildungsangebote denkbar.

Verstärkte Adressierung des Handlungsfeldes „Verschiebung der Nachfrage“

Die Politik kann mit verbindlichen Effizienzstandards und begleitenden Informations- und Transparenzmaßnahmen für die Verbraucher zur Förderung eines „Top-Runner-Konsums“ beitragen. Deutschland kann eine führende Rolle einnehmen, wenn es darum geht, auf EU-Ebene die Weiterentwicklung der Ökodesign-Richtlinie voranzutreiben. Auch Verbote, wie z.B. das von der EU bereits beschlossene Verbot von Plastiktüten, können an manchen Stellen helfen. Darüber hinaus wären die Verbraucher bei ihrer Entscheidungsfindung zu unterstützen. Die vielfältigen Vorteile z.B. des regionalen Konsums (besonders im Bereich der Lebensmittel und mancher Verbrauchs- und Gebrauchsgüter) oder auch der Substitution von Produkten aus petrochemisch-basiertem Kunststoff durch solche aus nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Fenster, Gebäude-Isolation) sollten mit Hilfe breiter, intelligenter Informationskampagnen sowie in der beruflichen Aus- und Fortbildung vermittelt werden.

Grundsätzlich sind die Faktoren

- persönliche Präferenzen und Werthaltungen
- Werbung und Marketing
- Prioritäten der Binnen-Wirtschaftspolitik

von herausragender Bedeutung für die Rolle und die zukünftige Entwicklung des Konsums. Diejenigen Akteure, die vom Absatz der Konsumprodukte leben, haben ein hohes Interesse daran, vorhandene „Konsumlust“ und Ersatzbedürfnisse zu steigern oder solche zu wecken (Scherhorn 2015). Der Kunde soll davon überzeugt werden, dass er das jeweilige Produkt braucht. Die durch Werbung und Marketing transportierten Argumente, warum es gerade dieses Produkt sein soll, werden entweder aus bestehenden Trends heraus aufgegriffen und auf das Produkt bezogen oder gezielt neu geschaffen. Sowohl die vorhandenen persönlichen Präferenzen und Werthaltungen der Menschen (worauf projizieren die Menschen ihre Sehnsüchte und Wünsche?) als auch das Verhalten der Marktteilnehmer auf der Angebotsseite wären unter dem Aspekt der Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen näher zu untersuchen.

Die Wirtschaftspolitik müsste sich verstärkt der Frage stellen, was Wohlstand eigentlich bedeutet und wie man die Entwicklung des Wohlstandes sinnvoll misst. Bezogen auf den privaten Konsum ist die derzeit gängige Wohlstandsmessung, die meistens nur das Bruttoinlandsprodukt heranzieht, für die Entwicklung eines nachhaltigen Konsums, wie er hier geschildert wurde, sehr wahrscheinlich kontraproduktiv. Wohlstand wird derzeit durch das BIP am jährlichen Austausch von Gütern und Dienstleistungen gemessen, dieser wiederum wird auch durch kurze Konsumzyklen und eine Steigerung des absoluten Konsums angetrieben, ohne das sonstige, nicht-monetäre Aspekte wirtschaftlichen Handelns in Betracht gezogen werden. Ob mit der Steigerung des BIP eine tatsächliche Steigerung des Wohlstandes (oder der Lebensqualität) verbunden ist, wird infolge der zunehmenden „reparierenden“ und nicht-produktiven Dienstleistungen z.B. im Gesundheitswesen (wegen Fehlernährung, Bewegungsarmut), im Umweltschutz, in Adaptationsmaßnahmen für Wetterextremereignisse, zunehmend bezweifelt (England 1998). Die Debatten, die beispielsweise im Zuge der Enquete Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität Wege zu nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlichem Fortschritt in der Sozialen Marktwirtschaft“ (Bundestag 2013) zu diesem Themenkomplex geführt wurden, sollten fortgesetzt und in einen direkten Zusammenhang mit der Transformation hin zu einem klimaneutralen Wirtschaften gestellt werden.

4 Deutschland als Teil des Weltmarktes: relevante Entwicklungen, Chancen und Risiken für Transformation und Strukturwandel der deutschen Industrie im Hinblick auf 2050

Die deutsche Industrie sowie die übrige Wirtschaft sind bei ihrem Transformationsprozess – neben anderen Faktoren – erheblich von der Entwicklung des Außenhandels abhängig. Jahrzehntelang gab es in der konjunkturellen Entwicklung der deutschen Wirtschaft das Muster, dass der Export die entscheidende, zeitweise gar einzige Antriebskraft für ein wirtschaftliches Wachstum war. Gemäß der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung des Bundes stieg der Exportüberschuss in den vergangenen 20 Jahren nahezu stetig und vervierfachte sich zwischen 2000 und 2014 auf knapp 220 Mrd. € (Destatis 2015a).

Die meisten Ökonomen gehen davon aus, dass die Dynamik des Welthandels die Triebkräfte des Binnenmarktes in Deutschland auch in Zukunft übertrifft. Demnach würde über Einkommen und Beschäftigung weiterhin wesentlich auf den internationalen Märkten mitentschieden. Die internationale Wettbewerbsfähigkeit ist daher die Nagelprobe für die Leistungsfähigkeit der deutschen Wirtschaft (Legler et al. 2000).

Daher sollen zur Analyse möglicher Entwicklungen einer bis 2050 „transformierten“ deutschen Industrie zunächst bestehende und zukünftig denkbare Verflechtungen mit der Weltwirtschaft beschrieben werden (vgl. Kapitel 4.1). Getrennt beschrieben wird der spezielle Wachstumsmarkt der „Klimaschutzgüter“ in seiner möglichen Rolle für die deutsche Industrie in den kommenden Jahrzehnten (vgl. Kapitel 4.1).

Es gibt mindestens zwei langfristig stabile, übergreifende und zugleich globale Entwicklungen, die für die deutsche (und auch die europäische) Industrie sehr bedeutsam sein werden:

- Das Wirtschaftswachstum in den Schwellenländern der Weltregionen Lateinamerika und Asien (dort insbesondere in China und Indien) wird erhebliche Auswirkungen auf die deutsche Industrie haben. Phasen hoher Exporterfolge im Bereich der Investitionsgüterindustrie oder gehobener Fahrzeugtechnik werden nur dann langfristig zu erhalten sein, wenn die Innovationskraft und der Wissensvorsprung in Deutschland (und Europa) erhalten bleiben (Breitschopf et al. 2005).
- Durch Fusionen werden die Unternehmen in vielen Industriebranchen, insbesondere in den Grundstoff-Industriezweigen, bei den Herstellern von Großanlagen und öffentlichen Verkehrssystemen sowie von massenweise hergestellten Gebrauchsgütern immer internationaler und ökonomisch-politisch einflussreicher, so dass die Politik auf nationaler Ebene relativ an Einfluss verlieren könnte, selbst bei Ländern mit großer internationaler politischer Bedeutung wie Deutschland.

Angesichts dieser globalen Trends sind hohe Innovationsraten in den exportorientierten Branchen und der Erhalt der „natürlichen“ Standortvorteile Deutschlands wichtig: ein hoher Standard im Bereich der wissenschaftlichen und beruflichen Ausbildung, Nähe zwischen wissenschaftlicher und angewandter Forschung und innovierenden Unternehmen, hohe Produktivität und Produktqualität (Nusser 2008; Gehrke, B., Grupp, H. 1994; Gerke, B., Legler, H. 1997), Termintreue und geringe Zahl von Streiktagen, eine leistungsfähige Verkehrs- und IuK-Infrastruktur sowie ein stabiles politisch-ökonomisches Umfeld.

4.1 Status Quo der Markt- und Güterstruktur des industriellen Exportes Deutschlands

Der heutige Status Quo des Außenhandels wird hier kurz beschrieben, bevor der Frage nachgegangen wird, ob sich diese Strukturen in den kommenden 35 Jahren erhalten könnten oder eher nicht. Dazu wird die Struktur der Exporte nach Zielländern und nach wichtigen Gütergruppen für das Jahr 2014 angegeben.

Zielländer deutscher Exporte

Die weltweiten Exporte Deutschlands summierten sich in 2014 auf 1.130 Mrd. €, die Exporte nach Europa auf 771 Mrd. €, entsprechend rund 68%. Die wichtigsten Zielländer deutscher Warenexporte sind damit die EU-Länder. Gut 18 % der deutschen Exporte gehen in kleinere EU-Länder, fast so viel wie in alle Nicht-OECD-Länder zusammen (20,4 %; UN 2015a) (vgl. Tabelle 8). Die Exporte in alle anderen weltweiten Teilmärkte (Asien/Afrika/Amerika) sind also zusammengenommen geringer als diejenigen nach Europa.

Tabelle 8: Anteile der deutschen Warenexporte in ausgewählte EU-Länder, Nicht-OECD-Länder und OECD-Länder, die kein Mitglied der EU sind

Länder	Export-Anteile von Deutschland
Frankreich	9,0 %
Großbritannien	7,5 %
Nicht- OECD-Länder, insgesamt	20,4 %
China	6,7 %
OECD-Länder, Nicht-EU-Mitglieder, insgesamt	21,0 %
USA	8,6 %

Quelle: UN 2015a

Am Export-Weltmarkt hatte Deutschland 2014 einen Anteil von 8,2 %. Besonders hoch sind die Lieferanteile Deutschlands verständlicherweise in den EU-Ländern mit im Durchschnitt fast 16 % im Jahr 2014 (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Anteile Deutschlands an den Importen ausgewählter EU-Länder, BRICS-Ländern und OECD-Ländern außerhalb Europas im Jahr 2014

Länder	Import-Anteile aus Deutschland
Österreich	> 40,0 %
Frankreich	> 20,0 %
Polen	< 30,0 %
BRICS-Länder, insgesamt	7,8 %
OECD-Länder, außerhalb Europas, insgesamt	7,2 %

Quelle: UN 2015a

Fazit: Damit ist die bisherige und derzeitige Regionalstruktur der deutschen Exporte für die Teilhabe an den Wachstumspotenzialen der Zukunft weniger günstig; denn die Verflechtung mit Ländern mit schwacher Wirtschaftsdynamik und geringem Steigerungspotenzial der Importnachfrage (Europa) ist hoch und die Lieferanteile in hochdynamische Länder, insbesondere die Schwellenländer, sind relativ gering (vgl. Tabelle 9).

Erfolgsfaktoren der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und Struktur der deutschen Exporte

Um die Frage zu beantworten, ob eine erfolgreiche Exportorientierung der deutschen Wirtschaft deren Wachstum längerfristig stützen könnte, ist bei den bisher erfolgreich exportierten Waren zu prüfen, ob und wo die deutsche Produktion zukünftig im veränderten internationalen Wettbewerb weiterhin erfolgreich sein kann.

Eine Volkswirtschaft hat im internationalen Wettbewerb bei jenen Gütern und Dienstleistungen (komparative) Vorteile, bei denen sie relativ zum Durchschnitt des eigenen Außenhandels⁹ überdurchschnittlich viel exportiert und unterdurchschnittlich importiert. Die deutschen Spezialisierungsvorteile konzentrieren sich dabei auf eine breite Palette von forschungsintensiven Waren. Dabei muss man deutlich unterscheiden zwischen (Legler et al. 2000; EFI 2015)

- dem relativ schmalen Sektor von Erzeugnissen der **Spitzentechnologie** – das sind Produktionen, bei denen ein außergewöhnlich hoher Anteil der Kosten auf Forschung und experimentelle Entwicklung (FuE) entfallen (z.B. Medikamente, neuere Kunststoffe, Medizintechnik, Mess-, Steuer- und Regeltechnik, Anlagenbau inklusive Kraftwerkstechnik sowie Luftfahrt und Militärtechnik) und die teilweise Basis- oder Querschnittsfunktionen haben, d.h. mit ihren Innovationen weit in die übrige Wirtschaft diffundieren (z.B. Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse)

⁹ Die Betonung **relativ** ist erforderlich, weil der absolute Außenhandelsüberschuss einer Volkswirtschaft von vielen Faktoren abhängt (z.B. Währungskurse, Überschüsse oder Defizite bei den übrigen Leistungsbilanzkomponenten).

- und dem breiten Sektor von (traditionell so bezeichneten) „**Hochwertigen Technologien**“, die ebenfalls überdurchschnittlich forschungsintensiv produzieren, jedoch bei ihrer FuE-Intensität bei weitem nicht an Spitzentechnologien heranreichen (Kraft- und Schienenfahrzeuge, Maschinen, Chemische Erzeugnisse, Nachrichten- und Elektrotechnische Ausrüstungen).

Die deutsche Industrie hat ihre Spezialisierungsvorteile vor allem im Bereich der „Hochwertigen Technologien“. Die Vorteile sind: Einsatz von Forschung und Entwicklung, hochqualifizierte Facharbeiter und technologische Innovationen, in hohem Maße auch organisatorische und Systeminnovationen sowie Netzwerke- und Clusterbildung. Dies ist auch meist Merkmal des speziellen Segments der Umwelt- und Klimaschutztechnologien, auf die später im Detail eingegangen wird. Auf dem Feld der Hochwertigen Technologien haben neben Deutschland insbesondere Japan und Korea Spezialisierungsvorteile.

Besonders hohe Bedeutung im Außenhandel haben Spitzentechnologien in den USA, Frankreich, der Schweiz und Korea. Dagegen ist China im hochwertigen Technologiebereich sehr importabhängig; der Niedrigtechnologiebereich (meist Gebrauchs- und Verbrauchsgüter) ist noch außergewöhnlich dominant (EFI 2015).

Die Spezialisierungsmuster des Außenhandels prägen deutlich die Ausrichtung der sektoralen Wirtschaftsstruktur. Nimmt man die wissensintensiv erbrachten privaten Dienstleistungen (z.B. Unternehmens- und Rechtsberatung, Bildung/Wissenschaft/Kultur, IuK-Dienstleistungen, Finanzwesen) zum forschungsintensiven Industriesektor hinzu, dann werden derzeit in Deutschland, der Schweiz, den USA, Großbritannien und Schweden die höchsten Anteile an der nationalen Wertschöpfung in Sektoren erbracht, die auf hoch qualifiziertes Personal sowie Leistungen in Wissenschaft und Forschung zurückgreifen (EFI 2015, 2016).

Betrachtet man die sektorale Struktur der deutschen Warenexporte, dann spielen die Exporte folgender Sektoren eine große Rolle (vgl. auch Tabelle 10):

- *Kraftwagen und Kraftwagenteile*: Ihr Anteil an den gesamten Exporten in europäische Länder macht im Jahr 2014 etwa ein Sechstel aus, der Anteil an den Exporten in außereuropäische Länder lag zwischen gut 22 % (Asien) und mehr als 26 % (Amerika und Australien/Ozeanien). Ein sehr großer Anteil dieser Exporte ist dabei „intra-industrieller Handel“, d. h. wechselseitiger Austausch von Modellen und Komponenten. Die Globalisierung in der Kfz-Industrie ist bestimmt durch die Strategie der großen Hersteller, die Produktion an einzelnen Standorten jeweils auf bestimmte Modelle zu konzentrieren (und so Skalenvorteile zu nutzen) und von dort aus den Absatzmarkt zu versorgen (Legler et al. 2009). Die überragende Bedeutung des Kraftwagenbaus in Deutschland ist nicht risikofrei, zumal hier ein Technologiewechsel zu Elektrofahrzeugen ansteht, der seitens der deutschen Kfz-Industrie bislang nur halbherzig – im Gegensatz zu China - verfolgt wird.
- *Produkte des Maschinenbaus*: die Export-Anteile an den Exporten in die jeweilige Zielregion liegen zwischen rund 12 % (Europa) und gut 20 % (Afrika, Asien). Auch hier war – wie auch bei allen anderen betrachteten Gütergruppen – Europa in absoluten monetären Zahlen betrachtet der wichtigste Teilmarkt, da der europäische Markt für deutsche Exporte wesentlich größer ist als alle anderen.

- *Erzeugnisse der Chemischen Industrie:* Die Export-Anteile betragen für die wesentlichen Zielregionen (Europa, Afrika, Amerika, Asien) ca. 8 bis 10 % an den deutschen Gesamtexporten; auf den bedeutenden asiatischen und amerikanischen Märkten rangieren sie an vierter Position der als führend genannten Warengruppen.
- *Sonstige Waren:* Diese haben einen merklichen Anteil an den deutschen Exporten nach Europa von rund 6 % und betonen damit die Breite der deutschen Exportwirtschaft. Bei den Exporten nach Asien spielen auch *elektrotechnische Ausrüstungen* mit knapp 8 % eine wichtige Rolle.

Fazit: die Güterstruktur des deutschen Exportangebots kann – anders als die Regionalstruktur der Zielländer deutscher Exporte – als positiv eingeschätzt werden. Dieser Faktor einer starken Wettbewerbsposition bei hochwertigen Technologien in den genannten Warengruppen spricht für eine weiterhin günstige Position der deutschen Industrie und eine Teilhabe am erwarteten Wachstum am Welthandel in diesem Güterbereich. Dies mag nicht für alle genannten Warengruppen gleichermassen zutreffen.

Tabelle 10: Deutsche Exporte nach wichtigen Gütergruppen und Kontinenten 2014

Region	Gütergruppe	Werte Mio. €	Exportanteile in % bezogen auf	
			Kontingent	Welt
			2014	
	Europa	770.918	100,0	68,2
29	Kraftwagen und Kraftwagenanteile	116.607	15,1	10,3
28	Maschinen	94.858	12,3	8,4
20	Chemische Erzeugnisse	7.683	10,0	6,8
89	Sonstige Waren	63.339	8,2	5,6
26	Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse	55.980	7,3	5,0
	Afrika	22.618	100,0	2,0
29	Kraftwagen und Kraftwagenanteile	5.421	24,0	0,5
28	Maschinen	4.623	20,4	0,4
20	Chemische Erzeugnisse	2.312	10,2	0,2
27	Elektrische Ausrüstungen	4.858	6,7	0,1
26	Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse	1.413	6,2	0,1
	Amerika	135.530	100,0	12,0
29	Kraftwagen und Kraftwagenanteile	35.364	26,1	3,1
28	Maschinen	24.091	17,8	2,1
21	Pharmazeutische und ähnliche Erzeugnisse	13.502	10,0	1,2
20	Chemische Erzeugnisse	10.391	7,7	0,9
26	Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse	10.339	7,6	0,9

Region Gütergruppe	Werte Mio. €	Exportanteile in % be- zogen auf	
		Kontingent	Welt
2014			
Asien	191.421	100,0	16,8
29 Kraftwagen und Kraftwagenanteile	42.650	22,3	3,8
28 Maschinen	39.456	20,6	3,5
26 Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse	20.901	10,9	1,8
20 Chemische Erzeugnisse	16.636	8,7	1,5
27 Elektrische Ausrüstungen	15.008	7,8	1,3
Australien/Ozeanien	9.578	100,0	0,8
Zusammen	1.130.065	0,0	100,0

Quelle : Destatis 2015a

Vor dem Hintergrund dieser globalen Trends und der zusätzlichen Annahme, dass sich die deutsche Energie- und Klimapolitik auf Bundes- und Länderebene weiterhin intensiv und beständig an den gesetzten nationalen Zielen für 2030 und 2050 orientiert, sind folgende Entwicklungen denkbar:

- Die Notwendigkeit einer schnellen Reduktion der Treibhausgas-Emissionen wirkt wie ein wichtiger Innovationstreiber, der auch die technische Entwicklung einiger der in Tabelle 9 genannten Warengruppen beeinflusst und deren Exportpotenziale erhöht.
- Die deutsche Industrie erarbeitet sich sowohl über energie- und materialeffiziente Lösungen als auch durch die Nutzung von erneuerbaren Energien und die Entwicklung und Nutzung von emissionsarmen Prozessinnovationen eine Vorreiterrolle und damit Wettbewerbsvorteile im Außenhandel.
- Die deutsche Grundstoffindustrie erhält geringere Freistellungen von der Energie- und Stromsteuer sowie von Umlagen der erneuerbaren Energien; dies könnte die schwierige internationale Wettbewerbsposition, die aufgrund von Überkapazitäten von Grundstoffproduktionen in Schwellenländern ohnehin besteht, weiter schwächen. Dadurch könnte die Produktion von Grundstoffen in der deutschen Industrie erheblich sinken. Wettbewerbsvorteile bei den Investitionsgüterherstellern für Grundstoffe könnten dadurch ebenfalls deutlich sinken.

Exporte und Wettbewerbsfähigkeit deutscher Klima- und Umweltschutzgüter

Der Sektor der Klima- und Umweltschutzgüter passt sehr gut zu dem Anforderungsprofil an die deutsche Industrie im internationalen Wettbewerb, das sich aus ihren Standortfaktoren ergibt (Legler et al. 2006): Er ist weitgehend in forschungsintensiven Industrien verankert (insbesondere Maschinenbau, MSR-Technik, Elektrotechnik, chemische- und Kunststoffherzeugnisse, Fahrzeugtechnik) und baut auf eine hohe Qualifikation seiner Beschäftigten. Allerdings sind auf den Klima- und Umweltschutzmärkten vielfach noch nationalstaatliche Regelungskompetenzen vorherrschend, d.h., die Märkte sind segmentiert. Ein stark expandierendes Welthandelsvolumen ist bei Klima- und Umweltschutzgütern daher – trotz stärkerer Diffusion von Umweltstandards im Rahmen der EU und transnationaler Umweltabkommen - nicht automatisch anzunehmen (DIW et al. 2007; Gehrke und Schasse 2015; Gehrke et al. 2015; Legler et al. 2006)

Vielmehr bedarf es für technologische Neuerungen jeweils stetiger Impulse innerhalb eines konsistenten Ordnungsrahmens (z.B. Top-Runner Modelle, Fortschreibung der Mindeststandards der Techniken unter der Ökodesign-Richtlinie, wettbewerbliche Ausschreibungen). Allerdings ist die Ausfuhrdynamik von Klimaschutzgütern seit etwa 2010 unterbrochen, der im Ausland erzielte Anteil am Umsatz hat bei deutschen Anbietern nachgegeben und ist aktuell unterdurchschnittlich. Gründe hierfür sind:

- Der Einbruch bei Photovoltaik und übrigen Solarenergiegütern (Gehrke et al. 2015).
- Viele Technologien der erneuerbaren Energien erfordern kein spezielles Produktions-Know-how. Bei den Effizienzgütern (Rationelle Energieverwendung) gingen die Exporte nach 2008 sogar leicht zurück (vgl. Tabelle 11).
- Die Imitationsspielräume sind breit und geben Anbietern aus Niedrigeinkommensländern die Chance, ihre bessere Wettbewerbsfähigkeit hinsichtlich der Lohnstückkosten auf den Märkten der westlichen Industrieländer zu nutzen. Auf diese Weise hat China einen guten Platz auf einigen Märkten für Umwelt- und Klimaschutzgüter gefunden.

In der Periode 2008-2013 fällt die Ausweitung der deutschen Ausfuhren von Klimaschutzgütern mit 1,4 % jährlich deutlich geringer aus als bei Industriewaren insgesamt (2,6 % jährlich; vgl. Tabelle 11) – wenn auch mit schrumpfendem Abstand (Gehrke und Schasse 2013). Noch ist ihr absoluter Anteil mit rund 1,9 % der deutschen Exporte von verarbeiteten Industriewaren gering. Allerdings ist der Wert der Klimaschutzgüter (zu jeweiligen Preisen und Wechselkursen) von 2002 bis 2013 jährlich um 7,1 % gestiegen; der Anstieg war in den Jahren vor der Finanzkrise von 2002 bis 2008 mit 12 % pro Jahr wesentlich höher als danach (1,4 % pro Jahr).

Tabelle 11: Exporte von Gütern des Umwelt- und Klimaschutzes der deutschen Industrie, 2002 bis 2013

Umwelt- und Klimaschutzgüter	in Mrd. €	Anteil in %	Jahresdurchschnittliche Veränderung in %		
			2013	2002-2013	2002-2008
Ausfuhr					
Mess- u. Regeltechnik	8,2	16,2	6,7	6,3	7,1
Klimaschutztechnik	19,2	38,2	7,1	12,0	1,4
darunter:					
Rationelle Energieverwendung	7,0	14,0	4,9	9,7	-0,7
Rationelle Energieumwandlung	2,9	5,7	4,8	1,0	9,6
Erneuerbare Energiequellen	9,3	18,6	10,2	18,5	1,0
Verarbeitete Industriewaren	1037,1		4,5	6,1	2,6

Quelle: Gehrke und Schasse 2015

Die Zuordnung von Warengruppen aus der Statistik (9¹⁰-Steller-Ebene des Güterverzeichnis für die Produktionsstatistik¹¹) zu den genannten Bereichen der Klimaschutztechniken ist aufwändig. Zudem sind einige Gütergruppen nicht eindeutig dem Umwelt- oder Klimaschutz zuzuordnen, wie beispielsweise die Mess- und Regelungs-technik (multiple use Güter), so dass zusätzliche Schätzungen für den speziellen Einsatz dieser Güter erforderlich sind.

Unter den deutschen Exporten von Klimaschutzgütern hatten 2013 Güter zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen mit rund 48 % das größte Gewicht, Güter zur rationellen Energieverwendung standen für 36 % und Güter zur rationellen Energieumwandlung für 15 % der Exporte von Klimaschutzgütern. Im Zeitraum 2002 bis 2013 sind die Exporte von Gütern zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen mit gut 10 % pro Jahr überdurchschnittlich angestiegen, aber seit der Finanzkrise war das Wachstum (mit 1 % pro Jahr) deutlich unterdurchschnittlich. Die Exporte von Gütern zur rationellen Energieverwendung sind zwischen 2008 und 2013 sogar etwas rückläufig. Im Gegensatz dazu sind die Exporte von Gütern zur rationellen Energieumwandlung in den letzten Jahren kräftig gewachsen (z.B. BHKWs, Wärmepumpen). Die Exporte der Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR), die seit 2002 unbeeindruckt von der Finanz- und Konjunktur-Krise stetig zunahm, machten 2013 rund 8,2 Mrd. € aus.

¹⁰ Güterverzeichnis für die Produktionsstatistik (GP), Fassung von 2009. Es enthält über 5.000 Produktgruppen.

¹¹ Das GP berücksichtigt neben Waren nur industrielle Dienstleistungen (Montagen, Reparaturen, Instandhaltungen und Veredelungen).

Deutsche Exporteure hatten bei Klimaschutzgütern 2013 einen Welthandelsanteil von 13 %, bei Gütern zur rationellen Energieverwendung war er mit 14,6 % etwas höher. Bei MSR-Gütern hatte Deutschland mit 21,8 % einen besonders hohen Weltmarktanteil. Gegenüber 2002 hat sich der Weltmarktanteil bei Klimaschutzgütern nur wenig verändert.

Fazit: Klimaschutzgüter haben – je nach Quelle und Abgrenzung der betrachteten Produktgruppen – derzeit ein Exportvolumen zwischen 20 und knapp 30 Mrd. € oder 2 bis 3 % der Gesamtexporte der deutschen Industrie. Bezieht man die Exportzahlen der Klimaschutzgüter auf die Exporte des Maschinenbaus sowie der Datenverarbeitung und elektronischer und optischer Messgeräte mit einem Exportvolumen von 255 Mrd. €, dann haben die Klimaschutzgüter schon signifikante Anteile von knapp 8 % bis knapp 12 %. Da die Energieintensität dieser Branchen sehr gering ist, würde ein überproportionales Produktionswachstum für Klimaschutzgüter infolge einer bewussten Klimapolitik, die den Pariser Beschlüssen vom 12.12.2015 folgt, auch den Strukturwandel hin zu weniger energieintensiven Industriebranchen unterstützen (vgl. Kapitel 4.3). Die Stärkung des Exports dieser Güter könnte also mehrfach zum Klimaschutz – in Deutschland und international – beitragen.

4.2 Mögliche Entwicklungstendenzen des Weltmarktes und damit verbundene Risiken für typische deutsche Exportbranchen

Die Wachstumsperspektiven in den Zielländern deutscher Exporte können mit Hilfe der Entwicklung des realen BIP dieser Zielländer beschrieben werden (vgl.

Tabelle 12). Hohes Wirtschaftswachstum bedeutet grundsätzlich auch eine schnelle Ausweitung des Absorptionspotenzials für Waren deutscher Provenienz. Allerdings ist auch zu erwarten, dass die Schwellenländer, insbesondere China, mit zunehmendem Wachstum ihrer Wirtschaft und damit ihres Bedarfs, verstärkt geschlossene Wertschöpfungsketten aufbauen werden, um mehr Wertschöpfung im Inland zu bewirken.

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese „Politik der Inlands-Produktion“ mehr die Verbrauchs- und Gebrauchsgüter-Produktionen betrifft und dass der Bedarf an Gütern der Hoch- und Spitzentechnologie nicht vollständig durch Importe

aus anderen Schwellenländern oder durch inländische Produktion befriedigt werden kann, sodass hier Potenzial für ein zusätzliches Wachstum europäischer und deutscher Exporte in diesen Märkte besteht. Hierbei dürften auch die Wettbewerbsvorteile der OECD-Staaten mit hohem Bildungs- und Forschungsstand sowie unternehmerischen Standards (z.B. die Ausnutzung von Skaleneffekten bei der Produktion an Standorten der „alten Industrieländer“) für den Weltmarkt eine Rolle spielen.

Die Werte für 2010 und die Veränderungsrate zu konstanten Preisen bis 2019 sind der World Economic Outlook Database April 2014 des Weltwährungsfonds entnommen (IMF 2014). Die Fortschreibung bis 2050 erfolgte mit den Veränderungsraten aus dem MaGE-Modell (Fouré et al. 2012; Fouré et al. 2013).

Die von Fouré getroffenen Wachstumsannahmen für die Industrieländer – z.B. für die EU-Länder mit 1,6 % jährlich oder für die OECD-Länder mit 1,9 % jährlich - werden von den Autoren dieser Untersuchung als sehr hoch eingeschätzt, sofern es nicht zu unerwartet hohen zusätzlichen Einwanderungsbewegungen (wobei sich hier, wie derzeit zu beobachten, in nicht unerheblichem Maße die Akzeptanzfrage stellt) und/ oder zu extrem günstigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Wachstumsbedingungen in den OECD-Ländern kommt. Denn die Pro-Kopf-Steigerung des BIP der OECD-Länder liegt seit Jahrzehnten linear bei etwa 400 € pro Kopf und Jahr, was bei den (meisten) OECD-Ländern mit einem BIP pro Kopf von rd. 40.000 € (IMF 2014) eine Wachstumsrate des BIP von derzeit etwa 1 %/a mit abnehmender Tendenz bedeutet.

Die vergleichsweise geringen Wachstumsraten der europäischen und der sonstigen OECD-Länder gegenüber denen der Nicht-OECD-Länder, insbesondere der Schwellenländer, führen zu einer deutlichen Verschiebung bei den Anteilen von Ländern und Ländergruppen am Welt-BIP, mit Konsequenzen für Niveau und Struktur der deutschen Exporte. Der Anteil der EU am Welt-BIP geht in diesem Szenario von 25,8 % im Jahr 2010 auf 14 % im Jahr 2050 zurück. Der Rückgang betrifft fast alle heutigen Industrieländer (vgl.

Tabelle 12; sonstige OECD-Länder: von fast 44 % auf rund 30 %). Bei Japan ist der Rückgang – gemessen an demjenigen der EU-Länder – aufgrund des Vorteils der regionalen Nähe zu den schnell wachsenden asiatischen Schwellenländern etwas geringer.

Die BRICS-Länder hätten demnach 2050 einen Anteil am Welt-BIP von gut 37 %, davon China allein 23,3 %, fast so viel wie die EU-Länder heute. Der Anteil der Länder mit mittlerem und niedrigem Einkommen an der Weltwirtschaft dürfte demnach auch 2050 (obwohl das BIP dieser Ländergruppe in absoluten Zahlen doppelt so hoch sein könnte wie heute) nur 10,4 % ausmachen. Allerdings könnten einige dieser Länder, z.B. die Mittel- und Niedrigeinkommensländer Lateinamerikas und Sub-Sahara Afrikas, Anteile am Welt-BIP erreichen, die höher sind als diejenigen mancher Länder in der EU, die heute die bedeutendsten Handelspartner Deutschlands sind.

Wegen der Marktgröße und der Kundennähe investieren auch viele Unternehmen der OECD-Länder in den Wachstumsregionen Asien (China, Indien) und Südamerika (Lichtblau et al. 2014). Auch dadurch werden Export-Wachstumspotenziale in diese Schwellenländer vermindert.

Tabelle 12: Wirtschaftswachstum (BIP) von Weltregionen und Ländern 2010 bis 2050

	Durchschnittliche jährliche Veränderungsrate des BIP zu konstanten Preisen und Wechselkursen von 2010				Struktur (Anteile am Welt-BIP)			
	2020/2010	2030/2020	2050/2030	2010	2020	2030	2050	
EU 27*	1,4%	1,5%	1,6%	25,8%	21,8%	18,4%	14,0%	
darunter:								
Spanien	0,6%	2,3%	2,2%	2,2%	1,7%	1,6%	1,3%	
Frankreich	1,4%	1,7%	1,6%	4,0%	3,4%	3,0%	2,3%	
Deutschland	2,0%	2,0%	1,7%	3,6%	3,3%	2,9%	2,3%	
Italien	0,3%	0,4%	0,9%	3,2%	2,5%	1,9%	1,2%	

Sonstige OECD-Länder	2,3%	2,1%	1,9%	43,6%	40,5%	36,5%	29,5%
darunter:							
USA	1,1%	2,0%	1,1%	8,6%	7,1%	6,3%	4,3%
Japan	2,5%	1,7%	1,7%	23,5%	22,2%	19,0%	14,9%
Sonstige	2,9%	3,1%	2,6%	11,4%	11,2%	11,2%	10,3%

Struktur Durchschnittliche jährliche Veränderungsrate des BIP zu konstanten Preisen und Wechselkursen von 2010 (Anteile am Welt-BIP)							
	2020/2010	2030/2020	2050/2030	2010	2020	2030	2050
Sonstige Hocheinkommensländer	4,3%	2,1%	1,7%	2,6%	2,9%	2,6%	2,0%
BRICS	5,7%	5,5%	4,2%	18,4%	23,7%	29,5%	37,1%
darunter:							
Brasilien	2,7%	3,2%	2,6%	3,4%	3,2%	3,2%	3,0%
China	7,3%	6,0%	4,2%	9,3%	14,0%	18,3%	23,3%
Indien	6,1%	6,2%	5,1%	2,7%	3,6%	4,7%	7,2%
Alle Länder*	3,1%	3,2%	3,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
*Ohne Deutschland							

Quellen: IMF 2014; Fouré et al. 2013; eigene Berechnungen

Eine mögliche Entwicklung – ein Szenario bis 2060

Um Vorstellungen davon zu gewinnen, wie sich der internationale Handel in Zukunft entwickeln könnte, werden die oben beschriebenen Wirtschaftsentwicklungen mit den in der Vergangenheit beobachteten Trends bei den Treibern des internationalen Handels als Basis für eine Projektion der zukünftigen Entwicklung bis 2050 genutzt. Dabei geht es auch um die Frage, ob die energie- und emissionsseitig extensiven Exportbranchen der „Hochwertigen Technologien“ auch langfristig überproportional zum Wirtschaftswachstum in Deutschland und damit zur Transformation der deutschen Industrie beitragen können.

Das gesamte Handelsvolumen wird zunächst anhand der Exportelastizität, d.h. dem Verhältnis von globalem Exportwachstum zu globalem Wirtschaftswachstum analysiert. Diese lag seit 1970 bis zur Wirtschaftskrise 2008 deutlich über eins. In der Wirtschaftskrise 2009 ist sie erheblich gefallen, danach ist sie wieder gestiegen, hat aber die Vorkrisenwerte bisher nicht wieder erreicht. Für die hohen Werte waren zwei Tendenzen entscheidend: (1) die zunehmende Integration von Schwellenländern in die Weltwirtschaft und (2) die Verbreitung geographisch fragmentierter Wertschöpfungsketten. Für die niedrigeren Werte nach 2008 werden neben Konjunkturerinbrüchen bei den Schwellenländern der Verfall der Rohstoffpreise (insbesondere betroffen sind Russland und

Brasilien) sowie verstärkte protektionistische Tendenzen und Kreditengpässe infolge restriktiverer Außenfinanzierungen als mögliche Ursachen diskutiert (EZB 2015).

Bei den Projektionen bis 2060 wurde angenommen, dass das weltwirtschaftliche Wachstum weniger stark (relativ zur bisherigen Entwicklung) handelsgetrieben sein wird und dass sich die Fragmentierung von Wertschöpfungsketten aufgrund technischer und ökonomischer Grenzen nicht im früheren Umfang fortsetzt. Die globale Exportelastizität bleibt größer als eins, wird aber etwas geringer sein als im Zeitraum 1970 bis 2008. Das Verhältnis des Welthandels zum Welt-BIP, das derzeit in einer Größenordnung von gut 25 % liegt, würde demnach bis 2060 auf fast 45 % ansteigen. Bei einem Wachstum der Weltwirtschaft in der Größenordnung von 3 % pro Jahr könnte der Welthandel mit rund 3,5 % pro Jahr zunehmen (zum Vergleich: 1990 bis 2007: fast 7 % pro Jahr).

Die Exporte der Eurozone würden bei einer Fortsetzung der Trends der Vergangenheit in 2060 nur noch 12 % der weltweiten Exporte ausmachen, gegenüber 19 % in 2012 (vgl.

Tabelle 13). Damit geht der Weltmarktanteil der Eurozone am stärksten von allen Regionen zurück. Diese Tendenzen gelten auch für die Exporte des Verarbeitenden Gewerbes. Dies bedeutet, dass die deutschen Exporte weiterhin moderat zunehmen dürften, da die Exportmärkte insgesamt gegenüber heute weiterhin wachsen, auch wenn die relativen Handelsanteile der Eurozone deutlich abnehmen.

Die Veränderungen der Struktur der Weltexporte zeigen auch, mit welchen Ländern Deutschland in Zukunft auf internationalen Märkten stärker konkurrieren wird. Afrikanische Länder und Indien gewinnen langfristig Weltmarktanteile, mittelfristig bis 2030 vor allem China und weitere asiatische Länder.¹²

Somit werden sich auch die Handelskonstellationen verändern. Während gegenwärtig noch fast die Hälfte des Welthandels zwischen OECD-Ländern stattfindet, dürfte es laut diesem Szenario im Jahr 2060 nur noch ein Viertel sein. Dementsprechend verdoppelt sich der Anteil des Welthandels zwischen den Nicht-OECD-Ländern (vgl.

¹² Der Welthandelsanteil Chinas geht nach 2030 in den hier dargestellten Szenarien zurück, weil dann auch dort das Wirtschaftswachstum pro Kopf nur linear verlaufen dürfte.

Tabelle 13). USA und Japan verlieren weniger deutlich als die Eurozone Marktanteile, nicht zuletzt aufgrund der regionalen Nähe zu den südamerikanischen bzw. asiatischen Schwellenländern.

Tabelle 13: Geographische Struktur der Weltexporte 2012 mit Trend-Szenario für 2030 und 2060

Zielland bzw. -region	Exporte als Anteile an den Weltexporten in %			Veränderung 2060-2012 in Prozentpunkten
	2012	2030	2060	
Eurozone	19	14	12	-7
UK	5	4	3	-2
Kanada	3	3	2	-1
USA	14	12	11	-3
Japan	7	4	5	-2
China	12	19	15	3
Indien	2	3	7	5
Indonesien	1	2	2	1
Afrika	3	4	10	7
Lateinamerika	5	5	5	0
Übriges Asien	13	15	16	3
Übrige Regionen	16	15	12	-4
Innerhalb der OECD-Länder	47		25	-22
Innerhalb der Nicht-OECD-Länder	15		33	18
Zwischen OECD- und Nicht-OECD-Ländern	38		42	4

Quelle: Château et al. 2014 und eigene Berechnungen.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass Deutschland bei den Ländern, die in Zukunft überdurchschnittlich wachsen werden (vgl.

Tabelle 12), derzeit besonders geringe Lieferanteile hat (vgl. Tabelle 10). Wenn diese länderspezifischen Lieferanteile Deutschlands unverändert bleiben, sinkt in Zukunft der Weltmarktanteil deutscher Exporteure deutlich. Dies wäre allerdings aus nationaler Sicht nicht problematisch, solange die deutsche Exportwirtschaft ihren Exportanteil an der inländischen Wertschöpfung - insbesondere mit ihren „Hochwertigen Technologien“ (vgl. Tabelle 10) - erhalten könnte.

Risiken für die bisher erfolgreichen inländischen Exportbranchen

Die traditionelle Stärke der deutschen Exportwirtschaft garantiert allerdings keineswegs dass der Anteil der Exportwirtschaft an der inländischen Wertschöpfung auf dem heutigen Niveau erhalten werden kann. Denn schon heute gibt es Risiken für einige der bisher erfolgreichen Export-Branchen, auf die hier kurz eingegangen wird:

Automobilindustrie

- Die Straßenfahrzeuge als Export-Top-Runner sind in Deutschland hinsichtlich entscheidender Innovationen besonders konservativ und laut dem Innovationsranking des Center of Automotive Management (2015) im internationalen Vergleich nicht in den vorderen Reihen zu finden. Die drei größten Neuerungen des letzten Jahrzehnts, (1) das erste serienmäßige Brennstoffzellenauto von Toyota, (2) das Elektroauto von Tesla und (3) das Hybridauto von Toyota kommen von keinem deutschen Hersteller. Der Verbrennungsmotor mit Getriebe hat einen Wirkungsgrad von nicht mehr als 25 %, diese Fahrzeugtechnik hat keine Möglichkeit, die Bremsenergie zurückzugewinnen oder substantielle Wirkungsgradverbesserungen zu realisieren.
- So rutschten die deutschen Autohersteller auf der globalen Liste der innovativen Unternehmen von 2013 mit Positionen zwischen Platz 9 (BMW) und 19 (Audi) binnen Jahresfrist um rund 9 Positionen nach hinten: BMW (18) und Audi (28) (BCG 2014, 2015). Tesla holte zwischen den beiden Jahren von Platz 41 auf Platz 7 auf, Toyota fiel allerdings von Platz 5 auf Platz 8 zurück.

Die hohe Abhängigkeit der deutschen Exporte vom Automobilbau ist in praktisch allen anderen Indikatoren zur Beurteilung der Standortstärke einer Volkswirtschaft ersichtlich, sei es die Beanspruchung von „Ausbildungskapital“ für sektorspezifisches technologisches Wissen in Unternehmen sowie Wissenschaft/Forschung, seien es die Impulse für Innovationen, Beschäftigung und Wertschöpfung in vor- und nachgelagerten Wirtschaftszweigen. Der direkte und indirekte Beitrag des Automobilbaus zur Wertschöpfung lag in Deutschland im Jahre 2014 mit 7,7 % beinahe doppelt so hoch wie in den nächstfolgenden Industrieländern Korea (4,7 %), Japan (3,8 %) sowie Schweden, Tschechien und Ungarn (jeweils rund 4 %).

Erschwerend hinzu kommt, dass Elektrofahrzeuge heute mit weniger Knowhow herzustellen sind als die Verbrennungsmotoren und die Getriebe der konventionellen Fahrzeuge, d.h., ein Standortvorteil der deutschen Kfz-Industrie könnte durch den (zwangsläufigen) Technologiewechsel verloren gehen.

Chemische industrie

- Die Chemische Industrie (ohne Pharmaindustrie) als ein guter konjunktureller Frühindikator liefert im Wesentlichen Material und Vorprodukte und kündigt mit Produktionssteigerungen früh einen Aufschwung an. Sie hat in den vergangenen 20 Jahren eine zwiespältige Entwicklung genommen, insbesondere was das Innovationspotenzial betrifft (Legler et al. 2009; Rammer et al. 2009).
- Weltweit haben die FuE-Anstrengungen gemessen an der Produktion bis ca. 2005/07 eine recht niedrige Dynamik gezeigt, die FuE-Intensität dieses einstmals außergewöhnlich forschungsintensiven Sektors ist deutlich zurück gegangen und dabei im OECD-Gebiet unter den Durchschnitt der Verarbeitenden Industrie gerutscht. Streng genommen zählt die Chemieindustrie nicht mehr zu den forschungsintensiven Industriezweigen. In Deutschland wird jedoch immer noch ein höherer Anteil des Personals in FuE und für Innovationen eingesetzt als im Durchschnitt der weltweiten Chemischen Industrie. Insofern hat die deutsche Chemieindustrie im Innovationswettbewerb immer noch Ausstattungsvorteile vorzuweisen (Legler et al. 2009).
- Allerdings betrug im Jahre 2014 der Anteil deutscher Unternehmen an den weltweiten FuE-Aufwendungen gut 13 %, der Anteil des Standorts Deutschland an den weltweiten FuE-Ausgaben in der Chemie nahm dagegen stetig von fast 16 % (2000) auf 9,4 % (2014) ab. Die Globalisierung in der Chemieindustrie erfolgte deutlich früher als in anderen Branchen. Bei FuE wird sie jedoch besonders deutlich: 30 % der FuE-Ausgaben deutscher Chemieunternehmen entfielen auf Auslandsstandorte. Von den gesamten in Deutschland getätigten FuE-Aufwendungen in der Chemieindustrie entfielen 14 % auf Unternehmen mit Sitz im Ausland (Rammer et al. 2015). Eine weltweit zunehmende Ausschöpfung der Innovationspotenziale bei marktgängigen chemischen Erzeugnissen bedeutet, dass andere Wettbewerbsfaktoren hier an Bedeutung gewinnen, für die Deutschland kaum komparative Vorteile besitzt, nämlich Arbeits-, Energie-, Transport- und Umweltkosten. Selbst die forschungsintensiven Sparten der Chemieindustrie konnten ihren Stand auf dem Weltmarkt sowie auf dem Binnenmarkt gegenüber der ausländischen Konkurrenz (China, Korea) nicht halten. Dies bedeutet allerdings nicht, dass Innovation in der chemischen Industrie in Zukunft keine Bedeutung als Wettbewerbsfaktor mehr hätte: ganz im Gegenteil wird es darauf ankommen, bei erkanntem Nutzen eines neuen Verfahrens bzw. eines neuen chemischen Produktes alle Kräfte auf deren Innovation zu setzen. Für die Chemische Industrie in Deutschland könnte dies in Zukunft ganz zentral sein. Die Aufnahme eines Wettbewerbs mit China und anderen um die günstigsten Lohn- und Energiekosten kann als aussichtslos angesehen werden.
- Bei forschungsintensiven Organika ist Deutschland mittlerweile Nettoimporteur (Rammer et al. 2015). In einer Projektion bis 2050 werden der Chemischen Grundstoffindustrie in Deutschland mit wenigen Ausnahmen (z.B. Methanol oder Sauerstoff) keine Wachstumsaussichten mehr zugetraut (Kirchner et al. 2009). Im Gegenteil: Sie dürfte in bestimmten Bereichen wegen des Kapazitätsaufbaus in den Rohstoffländern schrumpfen – ähnlich wie andere energieintensive Industrien (Steine/Erden, Papier, Glas, Metallherzeugung) (Rammer et al. 2009). Dies würde den Energiebedarf der deutschen Grundstoffindustrie deutlich vermindern.

- Sehr günstig steht die Pharmaindustrie im internationalen Vergleich dar, an zweiter Stelle hinter den USA. Mitentscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit sind neben dem Ausbildungssystem, der Marktgröße und dem Ausbau des Gesundheitswesens die Möglichkeiten zu vorklinischen und klinischen Untersuchungen für neue Medikamente (Nusser et al. 2007;). Diese günstigen Angebots- und Nachfragemerkmale für die Wettbewerbsposition könnten für diese Branche auch langfristig erhalten bleiben.

Maschinen- und Anlagenbau

- Im Maschinen- und Anlagenbau der Schwellenländer sinken die Marktanteile ausländischer Exporteure erheblich, weil die steigende Nachfrage (z.B. in China) in zunehmendem Umfang von inländischen Produzenten bedient wird. Dies muss allerdings nicht zwangsläufig mit absolut sinkenden Exporten in diese Märkte einhergehen. Es sind auch Unternehmen aus den Industriestaaten daran beteiligt, mit in den Schwellenländern errichteten Produktionsstätten die Nachfrage inländisch zu bedienen. Eine Umfrage des Arbeitgeberverbandes Gesamtmetall (2015) ergab für die Gründe der Produktionsverlagerung der Produktion ins Ausland folgende Prioritäten: kostengünstigere Produktion als in Deutschland (66 %), Marktzugang (56 %), Abwanderung wichtiger Kunden aus Deutschland (38 %) und Netzwerke/Kooperationen (23 %) (IW Consult 2015).
- Anders als viele andere Industrieländer hat der deutsche Maschinenbau die Exportoffensiven von China und Korea bisher ohne Verluste an Welthandelsanteilen überstanden. Er hat auch mit am stärksten von der steil expandierenden chinesischen Importgüternachfrage nach Maschinen und Anlagen profitiert. Insbesondere Kraftwerke (auch zur rationellen Energienutzung und zum Einsatz regenerativer Energieträger) und Spezialmaschinen sind die Träger dieser Entwicklung (IW Consult 2015).
- FuE ist im Maschinenbau kein guter Indikator für die Innovationsaktivitäten, weil ein großer Teil als Unikat gefertigt wird und Entwicklung und Produktion Hand in Hand gehen. Besser wird man dem Maschinenbau gerecht, wenn man vom Anteil hoch qualifizierter Erwerbstätiger, vom Patentgeschehen oder von den europäischen CIS-Erhebungen (Community Innovation Survey des ZEW) ausgeht, die für Deutschland eine klare Position in der internationalen Spitzengruppe nachweisen.

Elektronik

- Die Elektrotechnische Industrie/Elektronik gehört zu den traditionell exportstarken und wettbewerbsfähigen deutschen Industriezweigen. Gemessen am internationalen Maßstab entsprechen die FuE-Anstrengungen nicht dem Niveau, das man im forschungsintensiven Industriesektor aus Deutschland gewohnt ist. Die Welthandelsposition ist partiell ins Wanken geraten. Das hängt vor allem mit der schwachen Position der besonders wachstumsstarken Sparten Datenverarbeitung/Elektronik/Nachrichtentechnik zusammen, während die weniger expansive „klassische“ Elektrotechnik und die MSR-Technik/Optik ihren Stand auf dem Weltmarkt noch geringfügig verbessern konnten. Gerade im IuK-Sektor wirkt sich der schnelle Weg dieser Güter im „Produktlebenszyklus“ aus: Angesichts der Geschwindigkeit, mit der Neuerungen auf den Markt kommen, geraten Produkte sehr rasch in die „Imitations-

phase“, in der nicht mehr Innovationen zählen, sondern allein die Produktionskosten über die Wettbewerbsfähigkeit entscheiden. So ist die Endgerätefertigung beinahe komplett aus den (forschenden) Industrieländern (wie USA, Japan und Großbritannien) in Entwicklungs- und Schwellenländer verlagert worden.

Fazit: Die wachstumsfördernde Funktion des Exportes von innovationsintensiven Produkten aus der Investitionsgüterindustrie sowie der chemischen Industrie (inklusive der pharmazeutischen Industrie) wird bis 2060 andauern, wenn die betroffenen Branchen ihre Wettbewerbsvorteile systematisch erhalten können. Da diese Industriezweige alle sehr energieintensiv sind, besteht über den Erhalt der Exportfähigkeit und die damit einhergehenden überproportionalen Wachstums-Chancen dieser Industriezweige die Möglichkeit, die Energieintensität der deutschen Industrie insgesamt langfristig zu vermindern – da zudem davon auszugehen ist, dass die Grundstoffindustrien zukünftig stagnieren oder sogar schrumpfen werden.

Allerdings ist aufgrund der derzeit ungünstigen Struktur der Zielmärkte der deutschen Exportwirtschaft darauf zu achten, dass die Exporte in die Schwellenländer absolut zunehmen, auch wenn ihre Anteile aufgrund des deutlich höheren Wachstums der Zielmärkte relativ betrachtet gegenüber heute abnehmen dürften. Zudem ist in vielen der Exportbranchen von einem zunehmendem Anteil von Dienstleistungen an der Wertschöpfung auszugehen. Gründe hierfür sind eine steigende Komplexität der Maschinen und Anlagen, der Wunsch nach Systemlösungen sowie hochwertigen Dienstleistungen (in den Bereichen Planung, Wartung und Finanzierung) und eine zunehmende Stagnation der Absatzmöglichkeiten physischer Produkte. Zusätzliche produktbegleitende Dienstleistungen sind eine Option, die Wertschöpfung sowie die Kundenbindung eines Industrieunternehmens zu erhöhen; so werden sie zunehmend zu „Mothers of Invention“ und damit auch Treiber des intra-industriellen Strukturwandels (vgl. auch Kapitel 4.3).

Die Transformation des Industriesektors, getrieben durch die Energiewende und den Klimaschutz, nutzt insbesondere den Investitions- und Gebrauchsgüterherstellern wie dem Maschinenbau, der elektrotechnischen Industrie, den Fahrzeugherstellern sowie den Herstellern chemischer Spezialitäten (Deutsche Bank Research 2007); diese sind ökonomisch in einer guten Verfassung, meist überdurchschnittlich exportstark und können die nötigen Investitionen für die Transformation im Inland (sowohl für ihre Produktionsanlagen als auch für die Entwicklung ihrer Produkte) wegen im Durchschnitt guter Ertragslage und Bonität auch finanzieren. Die ökologisch nachhaltigen Produkte dieser Branchen würden aufgrund der merklichen Importanteile auch den Transformationsprozess in den belieferten Ländern unterstützen.

Die steigende Nachfrage nach den ökologisch nachhaltigen Produkten im In- und Ausland würde zu Lern- und Skaleneffekten bei den deutschen Herstellern in diesem Produktbereich führen und ihre Position im Wettbewerb mit Herstellern im Ausland festigen.

4.3 Möglichkeiten zur Minderung der Energieintensität der Industrie durch industriellen Strukturwandel

Zunächst soll im Folgenden kurz erläutert werden, was im Zusammenhang der hier untersuchten Thematik unter Strukturwandel in der Industrie zu verstehen ist.

Der Strukturwandel in Industrie und sonstiger Wirtschaft ist das Ergebnis von Änderungen diverser Einflussfaktoren technischer, ökonomischer und demographischer Art. Der Strukturwandel ist – neben der technischen Energieeffizienz - ein wesentlicher Indikator, um die Entwicklung der Energieintensität und der spezifischen Treibhausgasemissionen der Wirtschaft zu erklären.

Dabei unterscheidet man zwischen inter-industriellem und intra-industriellem Strukturwandel:

- Unter inter-industriellem Strukturwandel versteht man das unterschiedlich schnelle Wachstum und damit die Anteilsverschiebungen der Branchen der Industrie oder des GHD-Sektors untereinander. Wenn die energie- oder emissionsintensiven Branchen langsamer als der Durchschnitt der Industrie oder der Wirtschaft wachsen, dann ist, auf der Ebene der Industrie oder Wirtschaft als Ganzes, die Zuwachsrate des Energiebedarfs bzw. der spezifischen THG-Emissionen der Produktion geringer als das Produktionswachstum.
- Unter intra-industriellem Strukturwandel versteht man Strukturveränderungen, die innerhalb einer Branche zu Veränderungen der Energie- oder Emissionsintensität der betroffenen Branche führen, die man aber wegen fehlender Daten (energie- oder produktionsseitig) nicht quantifizieren, sondern nur qualitativ beschreiben kann. So führen beispielsweise die produktbegleitenden Dienstleistungen in der Investitionsgüter- oder Kfz-Industrie (z.B. für Finanzierung, Planung, Inbetriebnahme, Wartung oder Carsharing) zu mehr Wertschöpfung, aber nur in wesentlich geringerem Umfang zu einer Steigerung des Energiebedarfs. Auch die Erhöhung der Fertigungstiefe und Veränderungen in der Produktstruktur (Verschiebung zu höherwertigen „Spezialitäten“) führt zu intra-industriellem Strukturwandel.

Zentrale Treiber des inter-industriellen Strukturwandels

- Das unterproportionale Wachstum der Inlandsproduktion von Grundstoffen (z.B. Stahl, Zement, Ethylen, Glas, etc.) relativ zur Gesamtwirtschaft. Die Inlandsproduktion wird bestimmt durch die Inlandsnachfrage und den Nettoaussehandel der Grundstoffe. Die meisten Grundstoffe wachsen seit einigen Jahren und teilweise auch Jahrzehnten unterproportional zum Durchschnitt der deutschen Industrie. Gründe hierfür sind: die Infrastruktur von Deutschland ist weitgehend aufgebaut (im Gegensatz zu Schwellenländern), die privaten Haushalte haben eine hohe Geräte- und Kfz-Ausstattung. Die Inlandsnachfrage nach Grundstoffen wird entscheidend von den Re-Investitionszyklen bestimmt. Die Entwicklung der Materialeffizienz und -substitution sowie des Recycling und des Pooling können die Inlandsnachfrage nach Grundstoffen merklich vermindern. Das Wachstum des Nettoaussehandels an Grundstoffen ist ebenfalls unterdurchschnittlich bezogen auf den Durchschnitt des Nettoaussehandels der deutschen Industrie insgesamt, weil die rohstoffreichen Länder selbst in die Erzeugung und Verarbeitung einsteigen (z.B. Öl und Erdgas: Raffinerien und Petrochemie) oder weil die Schwellenländer, die einen erhöhten

Bedarf aufweisen, selbst in die Grundstoffproduktion einsteigen und sich teilweise zu Nettoexporteuren entwickeln (z.B. China als stark wachsender Stahlexporteur).

- Die Entwicklung der Produktion der Investitions- und Gebrauchsgüterindustrie ist hingegen oftmals überproportional zum Durchschnitt der deutschen Industrie. Dieser Zuwachs wurde in der Vergangenheit durch Automation in Produktion und privaten Haushalten, IuK-Anwendungen, größere PKW, Verlagerung des Gütertransports von der Schiene auf die Straße und Innovationen ausgelöst und darüber hinaus durch zunehmende Netto-Exporte dieser Branchen unterstützt.

Zentrale Treiber des intra-industriellen Strukturwandels

- Die bereits angesprochenen produktbegleitenden Dienstleistungen vermindern die Energieintensität in aller Regel deutlich.
- Auch demographische Einflussfaktoren können zum Strukturwandel beitragen. Die Zunahme von Ein-Personen-Haushalten erhöht tendenziell die Nachfrage nach Wohnflächen, Gebrauchsgütern und Kfz während durch die zunehmende Alterung der Bevölkerung die Nachfrage nach Gebrauchsgütern und Kfz eher sinkt.
- Werteveränderungen innerhalb der Gesellschaft haben Einfluss auf Art und Volumen der Gebrauchsgüternachfrage. Junge Menschen in der Stadt bevorzugen beispielsweise zunehmend Carsharing; Haushalte mit mittlerem und hohem Einkommen tendieren zu immer größeren Autos.
- Der Netto-Aussenhandel von Investitions- und Gebrauchsgütern bestimmt die inländische Produktion mit. Trends zu höherwertigen Exportgütern und innovativen Produkten führen zu einer Verminderung der Energieintensität infolge der höheren Wertschöpfung pro physischer Produktionseinheit.

Angesichts der derzeit hohen Anteile der Exporte an der industriellen Wertschöpfung, des Trends zu produktbegleitenden Dienstleistungen sowie dem überdurchschnittlichen Zuwachs der Investitions- und Gebrauchsgüterindustrie sowie der Kfz-Industrie stellt sich die Frage, wie weit die Regierung den Erhalt der hohen Exportanteile und die beschriebenen Trends unterstützen könnte. Denn solange diese energieextensiven und emissionsarmen Branchen überdurchschnittlich wachsen, würde auch zukünftig ein Strukturwandel von Industrie und sonstiger Wirtschaft zugunsten des Umwelt- und Klimaschutzes stattfinden.

Deshalb wird in diesem Kapitel zunächst der Struktureinfluss auf den Energiebedarf der Wirtschaft in der Vergangenheit betrachtet (vgl. Kapitel 4.3.1). Anschließend wird die Frage aufgeworfen, ob und (wenn ja) wie eine breit angelegte Politik in den Bereichen Forschung, Bildung, Wirtschaft, Aussenhandel sowie Umwelt- und Klimaschutz diesen klimapolitisch wünschenswerten Strukturwandel der Industrie und sonstiger Wirtschaft unterstützen könnte (vgl. Kapitel 4.3.2).

4.3.1 Der historische Strukturwandeleffekt und sein Einfluss auf den Energiebedarf in Wirtschaft und Industrie

Ein energie- und klimapolitisch erwünschter Strukturwandel mit geringerer Energie- und Emissionsintensität ist in Deutschland bereits seit den 1980er Jahren zu beobachten (Morovic et al. 1987). Er wird auch durch die Nachfragespezifika einer relativ wohlhabenden Ökonomie unterstützt, in der sich Investitionen in die Infrastruktur eines

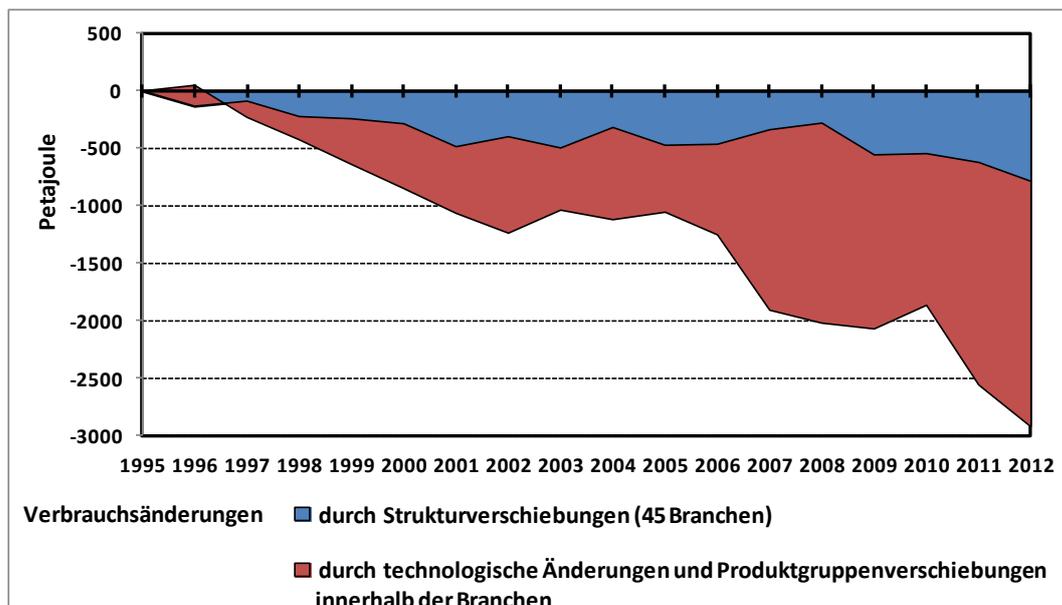
Landes zu weiten Teilen auf Ersatzinvestitionen beschränken. Für den Zeitraum 1995 bis 2012 zeigt sich, dass der Strukturwandel sowohl in der Gesamtwirtschaft als auch im Verarbeitenden Gewerbe deutlich zu einer Stagnation des Primärenergiebedarfs beigetragen hat (Destatis 2015b, 2015c):

- In der Gesamtwirtschaft (Produzierendes Gewerbe und GHD-Sektor) nahm der Primärenergieverbrauch von 1995 bis 2012 von 9.307 PJ auf 8.992 PJ leicht ab (-3,4 %); in der gleichen Periode stieg die Bruttowertschöpfung (in Preisen von 2010) von 1.885 Mrd. € auf 2.411 Mrd. €, d.h. um 27,8 %. Damit verminderte sich die Primärenergieintensität um 32 % (knapp 1,7 % pro Jahr).
- Im Verarbeitenden Gewerbe lag der Primärenergieverbrauch 2012 beim selben Wert wie 1995: 5.200 PJ. Damit entfallen gut 55 % des Primärenergieverbrauchs der Gesamtwirtschaft auf die Industrie, aber nur 23 % der Bruttowertschöpfung entstehen dort. Diese Unterschiede zeigen die deutlich unterschiedliche Energieintensität des Verarbeitenden Gewerbes und des GHD-Sektors, der in der energiewirtschaftlichen Rechnung auch die Landwirtschaft umfasst.

Hätte es zwischen 1995 und 2012 weder technologische noch strukturelle Änderungen in der deutschen Wirtschaft gegeben, hätte diese in 2012 einen Primärenergieverbrauch von wachstumsbedingt gut 11.900 PJ gehabt (+28 %). Das Verarbeitende Gewerbe hätte - bedingt durch den Anstieg seiner Bruttowertschöpfung - einen um 32,7 % auf 6.900 PJ gestiegenen Primärenergieverbrauch gehabt. Dies zeigt, dass es auch innerhalb des Verarbeitenden Gewerbes einen bedeutenden Strukturwandel gegeben haben muss.

Die Differenz der Werte zwischen Primärenergieverbrauch von 2012 bei konstanter Industriestruktur und Technologie seit 1995 (11.900 PJ) und beobachtetem Verbrauch im Jahre 2012 (8.992 PJ) ist auf zwei Haupteinflüsse zurückzuführen: die Änderungen der Branchenstruktur und den energietechnischen Fortschritt, der zu einer energieeffizienteren Produktion führt (vgl. Abbildung 10 für die Gesamtwirtschaft). Zur Ermittlung des Struktureffektes konnte zwischen 45 Branchen unterschieden werden (Destatis 2015b, 2015c):

- Die veränderten Branchenanteile zugunsten der weniger energieintensiven Branchen führte in der Periode 1995–2012 zu einer Verminderung von 784 PJ des Primärenergieverbrauchs.
- Die technologischen Energieeffizienzgewinne (und die brancheninternen strukturellen Einflüsse innerhalb der 45 untersuchten Branchen, (z.B. überdurchschnittliches Wachstum von Transportbeton als produktbezogene Dienstleistung innerhalb der Steine und Erden-Industrie)) verminderten den Primärenergiebedarf um 2.126 PJ.



Quelle: Destatis 2015b, 2015c; BMWi 2016b; eigene Berechnungen

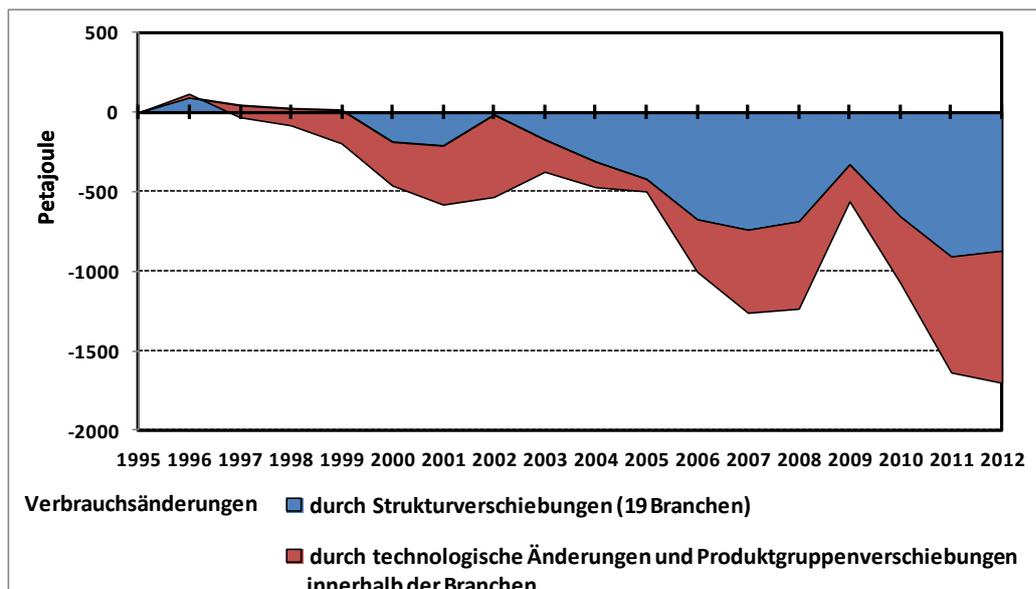
Abbildung 10: Der Struktur- und Technologieeffekt zur Verminderung des Primärenergieverbrauchs der Gesamtwirtschaft (45 Branchen) 1995 bis 2012

Die Primärenergieintensität der Gesamtwirtschaft verminderte sich durch Strukturveränderungen zwischen den 45 Branchen zugunsten weniger energieintensiver Branchen zwischen 1995 und 2012 um 6,6 %, d.h. um 0,4 % pro Jahr. Die Effizienzgewinne und der intra-industrielle Strukturwandel führten zu einer Intensitätsverbesserung von 1,2 % pro Jahr.

Betrachtet man das Verarbeitende Gewerbe allein, dann sind die beiden Effekte etwa gleichgewichtig mit 870 PJ durch strukturelle Effekte zwischen den untersuchten 19 Branchen bzw. 830 PJ durch höhere Energieeffizienz, und intra-industriellen Strukturwandel (vgl. Abbildung 11). Im Durchschnitt trugen demnach

- der inter-industrielle Strukturwandel zwischen 19 Industriebranchen hin zu weniger energieintensiven Branchen mit 0,8 % pro Jahr einerseits und
- die Energieeffizienz, Trends zu produktbegleitenden Dienstleistungen oder höheren Produktqualitäten sowie Strukturveränderungen innerhalb der 19 Branchen mit knapp 0,8 % pro Jahr andererseits

zu dem Gesamtergebnis der Verminderung der Energieintensität des Verarbeitenden Gewerbes um 1,7 % pro Jahr bei.

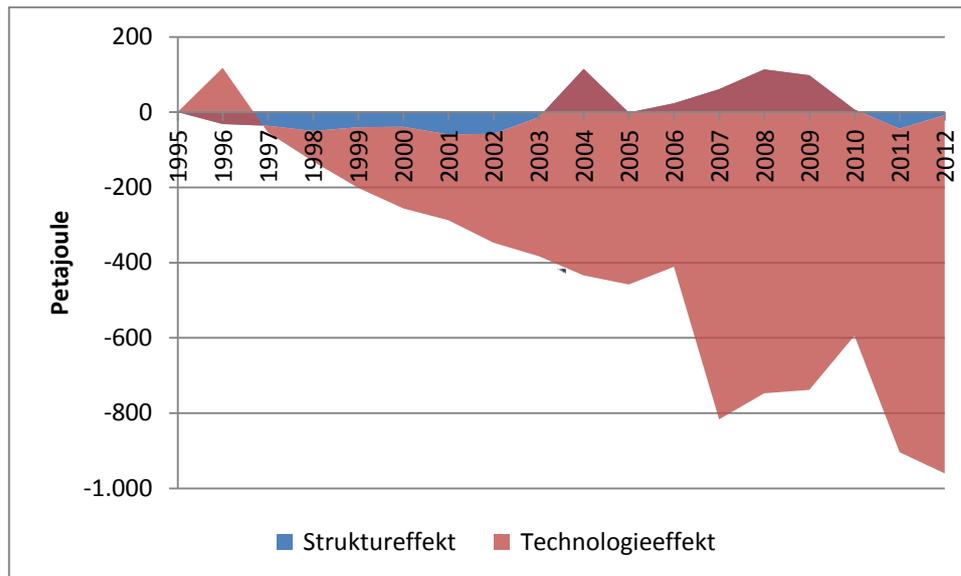


Quelle: Destatis 2015b, 2015c; BMWi 2016b; eigene Berechnungen

Abbildung 11: Der Struktur- und Technologieeffekt zur Verminderung des Primärenergieverbrauchs des Verarbeitenden Gewerbes (19 Branchen) 1995 bis 2012

Die Ergebnisse der Strukturanalyse des GHD-Sektors mit 18 Wirtschaftszweigen (inklusive Land- und Forstwirtschaft) sind signifikant unterschiedlich (vgl. Abbildung 122):

- Es gibt im Gesamt-GHD-Sektor netto keine energiesparende Strukturänderung innerhalb der betrachteten Zeitperiode, strukturelle Änderungen in Teilbereichen können sich gegenseitig aufgehoben haben. Bis etwa 2003 gab es eine minimale strukturelle Primärenergie-Einsparung (50 PJ pro Jahr), dann bis 2009 einen mehrverbrauchenden Effekt (100 PJ). In 2012 war der Struktureinfluss wieder bei netto Null.
- Durch effizientere Energienutzung benötigte der GHD-Sektor im Jahre 2012 rund 950 PJ weniger Energie als im Jahre 1995; dies sind durchschnittlich 1,9 % jährlich. Die Minderung des Primärenergieverbrauchs des GHD-Sektors um absolut 7 % bei einer Steigerung der Bruttowertschöpfung um 28,5 % ist in der betrachteten Periode also praktisch ausschließlich durch die Änderungen der spezifischen Energieverbräuche, d.h. eine höhere Energieeffizienz und Trends zu höherer Wertschöpfung innerhalb der Wirtschaftszweige, erklärbar.



Quelle: Destatis 2015b, 2015c; BMWi 2016b; eigene Berechnungen

Abbildung 122: Der Struktur- und Technologieeffekt zur Verminderung des Primärenergieverbrauchs des GHD-Sektors (18 Wirtschaftszweige) 1995 bis 2012

Fazit: Der Strukturwandel hin zu weniger energieintensiven Branchen und Produktionen ist innerhalb des Verarbeitenden Gewerbes (Industrie) ein in Deutschland seit etwa Anfang der 1970er Jahre zu beobachtender Prozess. Dies ist u.a. zurückzuführen auf Sättigungseffekte bei vielen energieintensiven Grundstoffen mit sehr hohem spezifischen Energiebedarf und dem darauf folgenden Trend zur Dienstleistungsgesellschaft.

Im Gegensatz dazu ist ein Strukturwandel zu weniger energieintensiven Wirtschaftszweigen im GHD-Sektor zwischen 1995 und 2012 nicht festzustellen, wohl aber sehr deutliche Fortschritte bei der Energieeffizienz.

Damit stellt sich die Frage, ob Politik und Wirtschaft diesen sich „autonom“ entwickelnden Strukturwandel zu einer nachhaltigen Dienstleistungs- und Industriegesellschaft bewusst unterstützen könnten, um damit einen weiteren Beitrag zur Transformation der Wirtschaft hinsichtlich einer beschleunigten Reduktion von Treibhausgasemissionen zu leisten.

4.3.2 Ausblick auf einen politisch unterstützten Strukturwandel von Wirtschaft und Industrie bis 2050

Die oben im Fazit genannte Frage, ob der autonome Strukturwandel zu geringerer Energie- und Treibhausgasintensität durch Politik und Wirtschaft unterstützt werden könnte, sei im Folgenden kurz umrissen.

Viele der wachstumsstarken Industriebranchen in der Investitions- und Gebrauchsgüterindustrie haben Energiekostenanteile am Bruttoproduktionswert von unter 1,5 %, während die meisten Grundstoffindustrieweige einen Energiekostenanteil von mindestens 10 % (Gewinnung von Steinen und Erden, Herstellung von Roheisen und Stahl sowie Glas und Glaswaren) oder darüber aufweisen (Papier 11,3 %, Zement und

Kunststoffe in Primärform 16 %, organische Grundstoffe 24 %). Die Energiekostenanteile unterscheiden sich also um einen Faktor 10 oder mehr. Da aber die Energiepreise bei den Grundstoffindustriezweigen deutlich unter denen der genannten energieextensiven Branchen liegen, ist die Energieintensität der Grundstoffindustrien (z.B. gemessen in Endenergie pro Bruttowertschöpfungswert) im Durchschnitt um deutlich mehr als den Faktor 10 höher (Destatis 2016). Dies bedeutet, dass relativ kleine Verschiebungen der Bruttowertschöpfung zugunsten der energieextensiven Branchen erhebliche Wirkungen auf die Energieintensität des Verarbeitenden Gewerbes haben können.

Für einen politisch bewusst unterstützten Strukturwandel stehen unter anderem folgende Optionen offen:

- Eine Verminderung der Nachfrage nach energieintensiven Grundstoffen (vgl. Kapitel 3.1.2).
- Es stellt sich zusätzlich die Frage, ob Teile der erforderlichen Produktion von Grundstoffen ins Ausland verlagert werden könnten, ohne Carbon Leakage zu erzeugen (z.B. die vermehrte Herstellung von Hüttenaluminium in Island mit noch vorhandenen Wasserkraftpotenzialen).
- Stärkung der Nachfrage nach Produkten der energieextensiven Branchen, z.B. der Investitionsgüterindustrie, der Pharma- oder Fahrzeugindustrie, hier insbesondere Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, durch verstärkte inländische Nachfrage (vgl. Kapitel 4.3.12) oder verstärkte Exporte höherwertiger Technologien sowie von Umwelt- und Klimaschutzgütern (vgl. Kapitel 4.2).

Hierbei wird man die interindustrielle Verflechtung beachten müssen, d.h., ein zusätzliches Wachstum des Maschinenbaus, der Elektrotechnik oder des Fahrzeugbaus benötigt zusätzliche Mengen an Stahl, NE-Metallen oder Kunststoffen. Dieser Zusatzbedarf ist allerdings relativ gering und könnte durch die oben erläuterten Maßnahmen der Materialeffizienz und -substitution mehr als kompensiert werden (vgl. Kapitel 3.1.2), so dass es im Ergebnis bei gleichbleibender Wirtschaftsentwicklung zu einer absoluten Senkung der THG-Emissionen kommen kann.

Für den Zeitraum bis 2030 kann man davon ausgehen, dass der bisherige Strukturwandel zwischen den 19 beobachteten Industriebranchen von 0,8 % pro Jahr (vgl. Kapitel 4.3.1) auch weiterhin „autonom“ wirksam sein wird, da die diese Entwicklung treibenden Einflussfaktoren auch weiterhin wirksam sein werden. Damit würde das unterstellte Wachstum der Bruttowertschöpfung der Industrie von 0,8 % pro Jahr (siehe Kapitel 4.3.1) primärenergieseitig voll kompensiert. Dabei ist zu erwarten, dass der wachstumsbedingte Anstieg des Primärenergiebedarfs durch Effizienzgewinne und Struktureffekte in der Energiewirtschaft (Abschalten der Kern- und Braunkohlekraftwerke und ihre Substitution durch hocheffiziente Kraftwerke, z.B. Gas- und Dampfturbinenkraftwerke, Wind- und Photovoltaik-Stromerzeugung) gedämpft wird. Auf Seiten des Endenergiebedarfs dürfte der Struktureffekt deshalb vermindert sein und bei rund 0,5 % pro Jahr liegen. Ohne Energieeffizienz-Fortschritt würde daher der Endenergiebedarf um etwa 0,3 % pro Jahr zunehmen.

Mehrere Analysen aus der letzten Zeit besagen, dass ein politisch unterstützter oder vorangetriebener Strukturwandel - durch mehr Materialeffizienz und -substitution sowie Nutzungsintensivierung (Pooling) und Lebensdauerverlängerung - zu einem geringeren Wachstum der Grundstoffindustrieweige führen könnte und dieser Strukturwandel bis zu 0,5 % pro Jahr an geringerem Energiebedarf der Industrie gegenüber einer Referenzentwicklung ausmachen könnte (Jochem et al. 2004; Jochem und Reitze 2014; Kristof und Hennicke 2010; Milford et al. 2011; Allwood et al. 2013), entsprechend einer jährlichen Reduktion der THG-Emissionen um ca. 1,5 Mio. t CO₂ äq. Nach 2030 ist davon auszugehen, dass sich diese Potenziale teilweise, schätzungsweise um die Hälfte, erschöpfen werden.

Allein diese bewusste Nachfragereduktion auf Seiten der Grundstoffindustrie würde mehr Forschung, Meß- und Regeltechnik, IuK-Technik sowie Maschinen und Anlagenbau erforderlich machen, d.h. einen Impuls für das Wachstum der energieextensiven Investitionsgüterbranchen geben.

Hinzu käme eine Politik der Unterstützung der energieextensiven Branchen der Technologiehersteller, der pharmazeutischen Industrie und der Herstellung von Gütern für einen energieeffizienten und klimafreundlichen Verkehr. Dies könnte durch eine Reihe von Politikmaßnahmen seitens des Bundes und der Länder, aber auch durch Maßnahmen und Angebote Dritter erfolgen (Nusser et al. 2007;):

- eine weiterhin qualitativ hohe Ausbildung in allen Schultypen und Berufen,
- eine (deutlich stärker als bisher) an technischen Neuerungen und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen orientierte Fortbildung, bei der auch die Kammern und Innungen sowie andere Fortbildungseinrichtungen Verantwortung tragen,
- eine an den technischen Chancen orientierte Forschungs- und Entwicklungspolitik, die auch Entwicklungsideen aus der industriellen Praxis aufgreift,
- eine Förderung der inländischen Nachfrage nachhaltiger Technologiebereiche wie Energieeffizienz, erneuerbare Energien, emissionsarme Produktionsverfahren oder öffentliche Verkehrsmittel durch eine entsprechende Energieeffizienz-, Verkehrs- und Klimapolitik,
- eine Stärkung der Nachfrage aus dem Ausland in allen Bereichen, in denen die deutsche Exportindustrie derzeit eine gute Wettbewerbsposition hat und die zugleich zur Minderung von Emission führt (vgl. Kapitel 4.1). Hier wäre insbesondere die Stärkung des Exports in die Schwellenländer zur Verbesserung der Regionalstruktur der deutschen Exporte von Bedeutung.

Für die deutsche Industrie ergeben sich bei einer weltweiten Transformation zu einer nachhaltigen Industrieproduktionsstruktur auch neue Exportchancen bei der Umwelt- und Klimaschutztechnik, d.h. insbesondere Technologien der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien (Gehrke und Schasse 2015). Bezüglich der Perspektiven der Umweltschutzwirtschaft bis 2025 gehen Roland Berger Strategy Consultants davon aus, dass der Anteil der Umweltschutztechnologien am deutschen BIP von 11 % im Jahr 2011 bis zum Jahr 2025 auf über 20 % ansteigen könnte (Roland Berger Strategy Consultants 2014). Auf dem Weltmarkt für Umwelttechnologien, der sich bis 2025 auf über 4.400 Mrd. € gegenüber heute (2.100 Mrd. €) mehr als verdoppeln soll, geht die Studie davon aus, dass die deutschen Exporteure ihren derzeitigen globalen Marktanteil

teil an den Umwelttechnologien von durchschnittlich 15 % bis 2025 halten können. Dieses Segment hätte ein jährliches Wachstum von 5 % pro Jahr.

Wie sehr sich diese Unterstützung der energieextensiven Branchen auf den Strukturwandel der Industrie und damit auf den Energiebedarf der Industrie und ihre Treibhausgasemissionen insgesamt auswirken könnte, wurde bisher nicht untersucht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Emissionen sich Netto deutlich verringern werden, auch wenn man evtl. Mehrverbräuche an Energie durch die Gewinnerbranchen mit einbezieht. Der Energieverbrauch der energieextensiven Branchen macht heute nur ca. 20 % des gesamten Energieverbrauchs der Industrie aus.

Fazit: Zusätzlich erzielbare Materialeffizienz und -substitution in all ihren möglichen technischen und organisatorischen Formen, die politisch angestoßen werden könnten, würden die Nachfrage nach Grundstoffen in Deutschland bis 2030 merklich reduzieren und die jährlichen energiebedingten CO₂-Emissionen der Grundstoffindustrie um bis zu 0,5 % vermindern, d.h. insgesamt bis zu knapp 7 % bis 2030. Durch zusätzlich denkbare Energieeffizienzfortschritte in der Grundstoffindustrie würde eine weitere Verminderung der energiebedingten THG-Emissionen von zusätzlichen 0,3 % pro Jahr möglich werden.

Für die Periode 2030 bis 2050 gehen die Autoren davon aus, dass sich sowohl der „autonome“ als auch der politisch zusätzlich induzierbare Strukturwandel halbieren dürfte, weil bestimmte Materialeffizienz- und -substitutions-Potenziale abnehmen oder sich erschöpft haben (z.B. Materialrecycling). Dies würde bedeuten, dass der Energiebedarf der Industrie zwischen 2030 und 2050 sich aufgrund des gesamten Strukturwandeles um 10 % langsamer entwickeln würde; dies bei einem angenommenen Produktionszuwachs von 15 % (0,7 % pro Jahr). Dies entspräche einer Reduktion der CO₂-Emissionen um ca. 36 Mio. t CO₂äq. gegenüber der Referenzentwicklung.

Insgesamt kann man davon ausgehen, dass der „autonome“ sowie der politisch beförderte Strukturwandel im Verarbeitenden Gewerbe dazu führen würden, dass der wachstumsbedingte Energiemehrbedarf und seine CO₂-Emissionen kompensiert würden. Um eine absolute Minderung der CO₂-Emissionen der Industrie gegenüber dem heutigen Niveau (direkte Emissionen in 2014 von 183 Mio. t) zu erreichen, ist zusätzlich natürlich die Nutzung der vielfältigen anderen Möglichkeiten (mehr Energieeffizienz und Substitution der fossilen Energieträger durch erneuerbare Energieträger sowie Prozess- und Verfahrensinnovationen zur deutlichen Reduktion der Prozessemissionen der Grundstoffindustrie) erforderlich.

Ein abschliessender Blick auf den GHD-Sektor kommt zu dem Ergebnis, dass ein struktureller Einfluss auf den Energiebedarf kaum nennenswert sein dürfte. Denn die spezifischen Energieverbräuche dieser Wirtschaftssektoren liegen nicht weit auseinander (abgesehen von einigen wenigen relativ kleine energieintensive Subsektoren, wie einige Handwerkergerwerke).

Der strukturelle Einfluss auf den zukünftigen Energiebedarf der Wirtschaft als Ganzes ist im Wesentlichen intersektoral über das schnellere Wachstum des GHD-Sektors gegenüber dem energieintensiveren Industriesektor zu erwarten. Für die Periode 2010 bis 2030 geht man von einem um 15 % höheren Wachstum der Bruttowertschöpfung des GHD-Sektors im Vergleich zum Industriesektor aus. Mehr Dienstleistungen (Pla-

nung, Inbetriebnahme, Organisation, Wartung, Finanzierung, Versicherung und berufliche Fortbildung) bedeuten meist verminderten Ressourcenverbrauch. Insofern setzt eine auf Ressourceneffizienz bedachte Politik auch Impulse hin zu mehr Dienstleistungen. Quantitativ ist dieser Struktureffekt jedoch bisher wenig analysiert.

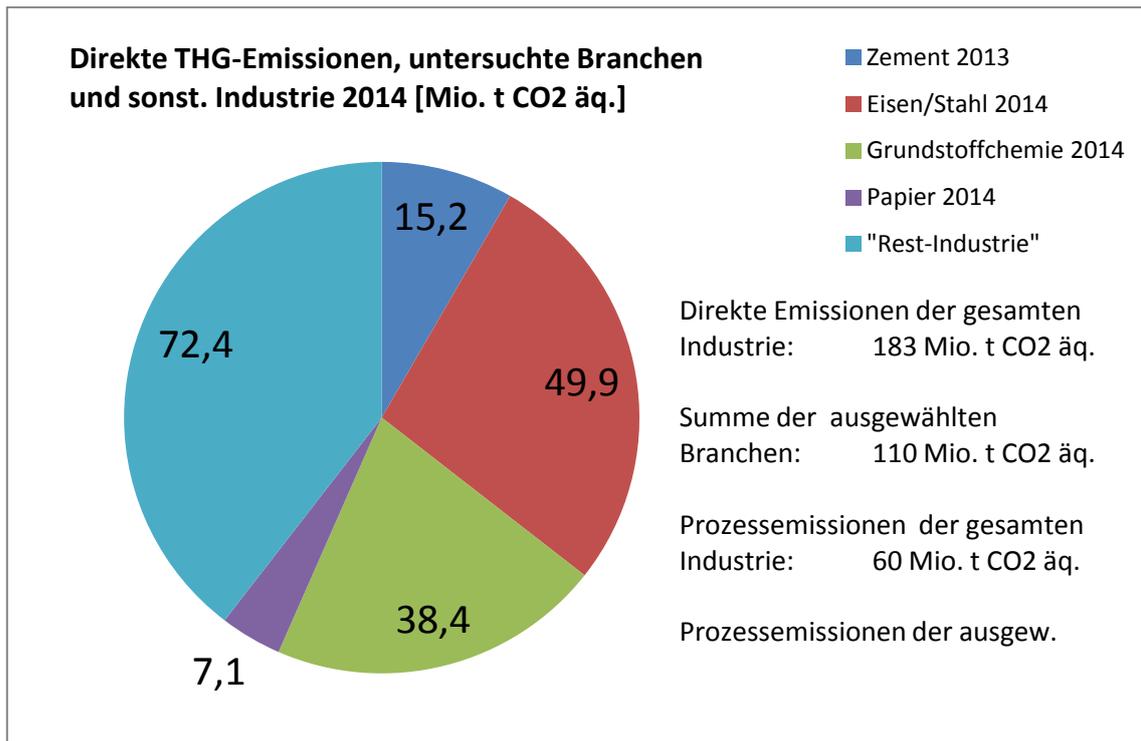
5 Analyse ausgewählter Industriebranchen

Die bisher vorliegenden langfristigen Szenarien behandeln den Transformationsprozess in der Industrie häufig sehr allgemein. Falls einzelne Produkt- oder Prozessbeispiele genannt werden sind diese oftmals wenig repräsentativ (Prognos et al. 2014a, S. 252–255; Kirchner et al. 2009, S. 305–309). Deshalb widmet sich dieses Kapitel detaillierter der Frage, welche Herausforderungen und Chancen der Transformationsprozess für ausgewählte Industriebranchen mit sich bringt, und welche technischen, organisatorischen und politischen Lösungsoptionen (potentiell) zur Verfügung stehen. Dabei wird jeweils auch der Status-Quo dieser Branchen hinsichtlich typischer Produktionsprozesse sowie der Treibhausgasemissionen dargestellt.

5.1 Zur Wahl der hier betrachteten Branchen

Die hier beispielhaft analysierten Branchen wurden aufgrund ihrer Bedeutung für den Transformationsprozess der deutschen Industrie ausgewählt. Dies sind die Branchen der Grundstoffindustrien, die heute besonders hohe spezifische und/oder absolute Treibhausgasemissionen aufweisen und die daher bei der in Kapitel 2 beschriebenen notwendigen ambitionierten Treibhausgasminderung der Industrie insgesamt nicht außen vor bleiben können. Die ausgewählten Branchen Eisen- und Stahlherstellung, Herstellung von Zement, Papier sowie die Grundstoffchemie sind derzeit für ca. 110 Mio. t CO₂ äq. verantwortlich, dies sind 60 % der gesamten Industrieemissionen von derzeit (2014) 183 Mio. t CO₂ äq. (vgl. Abbildung 13)¹³. Dies zeigt, von welcher Wichtigkeit für das Gelingen der Transformation hin zu einem klimaneutralen Wirtschaften es ist, dass insbesondere diese Branchen zukünftig erhebliche Minderungsbeiträge leisten. Zugleich stellt die Transformation diese Branchen vor besondere Herausforderungen, da diese notwendigen Minderungsbeiträge, insbesondere dort, wo Prozessemissionen eine herausragende Rolle spielen wie bei der Stahl- und der Zementherstellung, erhebliche Veränderungen bei den Produktionsprozessen erfordern würden.

¹³ Für diese Übersicht mussten verschiedene Quellen herangezogen werden. Daher ist anzunehmen, dass die Gesamtsummen der untersuchten Branchen und der restlichen Industrie im Sinne einer einheitlichen Bilanzierung fehlerbehaftet sind. Für die hier getroffenen Aussagen sind diese Zahlen allerdings dennoch hinreichend akkurat.



Quelle: UBA 2016b; VDZ 2013; VCI 2016; Darstellung und Aggregation IREES

Abbildung 13: Direkte Treibhausgasemissionen der hier untersuchten Branchen sowie der restlichen Industrie, im Jahr 2014 (Zement: 2013) in Mio. t CO₂ äq.

Während die Treibhausgasemissionen ganz erheblich von den genannten Branchen mitbestimmt werden, ist der wirtschaftliche Erfolg Deutschlands, bei einer reinen Berücksichtigung der Leistungsgrößen im engeren Sinne, nur zu einem Bruchteil von der Wertschöpfung dieser Branchen abhängig. Nur ca. 7 % der Bruttowertschöpfung des Jahres 2013 fielen auf die vier untersuchten Branchen. Allerdings ist bei einer Betrachtung der Branchen der Grundstoffindustrie auch zu berücksichtigen, dass die nachfolgende Wertschöpfungskette der deutschen Industrie bislang in erheblichem Maße von diesen Grundstoffen abhängig ist. Zukünftig wird man sich also vermehrt der Frage stellen müssen, welche Bedeutung diese Branchen für die deutsche Volkswirtschaft der Zukunft haben können und sollen.

5.2 Bedeutung des europäischen Emissionshandels für die untersuchten Branchen

Im Folgenden wird das System des europäischen Emissionshandels (ETS) sowie seine grundlegende Bedeutung dargestellt, vor dem Hintergrund, dass dieser für die in diesem Kapitel diskutierten Branchen einschlägig ist und einen großen Teil der Emissionen dieser Branchen prinzipiell abdeckt. Das Funktionieren des Emissionshandels ist im Wesentlichen von seiner Ausgestaltung und nicht von spezifischen Gegebenheiten einzelner Branchen abhängig, daher wird das ETS hier allgemein diskutiert und in den Branchenanalysen nicht oder nur sehr punktuell angesprochen.

Durch den Handel mit Zertifikaten innerhalb der Europäischen Union (EU), die zur Emission von Treibhausgasen berechtigen (EUAs), soll eine kosteneffiziente Verringerung von Treibhausgasemissionen erzielt werden. Denn durch den Handel mit Zertifikaten, so die Annahme, werden Treibhausgasemissionen dort umgesetzt, wo sie am kostengünstigsten zu realisieren sind. Das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (BMJV 2011) dient als Rechtsgrundlage und zur Einführung des diesem Zweck dienenden EU-weiten Emissionshandelssystems (ETS) in Deutschland. Rechtsgrundlage auf EU-Ebene ist die Richtlinie 2003/87/EG. Das ETS verfolgt den Ansatz des „Cap and Trade“-Prinzips (DEHSt 2015a), indem es eine Mengenbegrenzung für CO₂ einführt und zugleich einen Markt für Emissionsberechtigungen schafft. Die Zertifikate werden den Anlagenbetreibern der Industrie nach Antragsstellung und im Rahmen eines nationalen Zuteilungsplans kostenlos zugeteilt oder in geringerem Umfang – derzeit 20% (DEHSt 2016) - versteigert. Die Stromwirtschaft muss ihren Bedarf dagegen zu 100% am Markt decken (DEHSt 2014).

Die Identifikation und Zuordnung einer Tätigkeit bzw. Anlage, welche vom TEHG erfasst wird, erfolgt über die Gesamtfeuerungswärmeleistung der betroffenen Anlagen zur Verbrennung fossiler Energieträger (z.B. von Heizkesseln, Turbinen, Industrieöfen, Kalzinierungsöfen, Trocknern etc.) oder über die Produktionsleistung. Entsprechende Schwellenwerte für die Zuordnung sind im Anhang des TEHG hinterlegt.

Anhang 1 Teil 2 des TEHG beinhaltet einige Tätigkeiten bzw. Anlagen, die für die hier betrachteten Industriebranchen von besonderem Interesse sind. Hierzu gehören im Allgemeinen:

Verbrennungseinrichtungen, einschließlich Dampfkessel, zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas mit einer Feuerungswärmeleistung im Bereich von 20-50 MW oder darüber hinaus, sowie Anlagen zum Antrieb von Arbeitsmaschinen (Verbrennungsmotoren und Gasturbinen) mit einer Feuerungswärmeleistung von 20 MW oder mehr.

Mit dem Übergang von der 2. Handelsperiode (2008 bis 2012) zur 3. Handelsperiode (2013 bis 2020) kam es zur Ausweitung der emissionshandelspflichtigen Tätigkeiten bzw. Anlagen, auch unter Ausweitung auf Emissionsquellen für N₂O, z.B. auf Prozesse der Grundstoffchemie (z.B. Produktion von Salpetersäure).

Die nachfolgenden Tätigkeiten bzw. Anlagen betreffen die in dieser Untersuchung im Folgenden näher betrachteten Branchen; häufig sind dabei nur Anlagen ab einer gewissen Mindest-Produktionsleistung erfasst:

Zementindustrie:

- Anlagen zur Herstellung von Zementklinker

Grundstoffchemie:

- Anlagen zur Herstellung von Salpetersäure
- Anlagen zur Herstellung von Ammoniak
- Anlagen zur Herstellung organischer Grundchemikalien (Alkene – wie Ethylen und Propylen – , Alkine, Aromaten, Phenole, Alkohole, Aldehyde, Ketone, Carbonsäuren usw.)
- Anlagen zur Herstellung von Wasserstoff oder Synthesegas durch Reformieren, partielle Oxidation, Wassergas-Shift-Reaktion oder ähnliche Verfahren

Papierindustrie:

- Anlagen zur Gewinnung von Zellstoff aus Holz, Stroh oder ähnlichen Faserstoffen
- Anlagen zur Herstellung von Papier, Karton

Eisen- und Stahlindustrie:

- Anlagen zur Trockendestillation von Steinkohle oder Braunkohle (Kokereien)
- Anlagen zum Rösten, Schmelzen, Sintern oder Pelletieren von Metallerzen
- Anlagen zur Herstellung oder zum Erschmelzen von Roheisen oder Stahl einschließlich Stranggießen, auch soweit Konzentrate oder sekundäre Rohstoffe eingesetzt werden
- Anlagen zur Herstellung oder Verarbeitung von Eisenmetallen (einschließlich Eisenlegierung) bei Betrieb von Verbrennungseinheiten; die Verarbeitung umfasst insbesondere Walzwerke, Öfen zum Wiederaufheizen, Glühöfen, Schmiedewerke, Gießereien, Beschichtungs- und Beizanlagen

Nach Angaben des Umweltbundesamtes (DEHSt 2015b) emittierten die ca. 1.900 emissionshandlungspflichtigen stationären Anlagen der Sektoren Energie und Industrie in Deutschland im Jahre 2014 insgesamt rund 461 Mio. t CO₂ äq. Dabei entfielen auf die 465 Industrieprozessanlagen, deren Branchen in diesem Arbeitspapier näher untersucht werden (vgl. Tabelle 14), etwa 77 Mio. t CO₂ äq, also etwa ein Sechstel der vom TEHG erfassten Emissionen. Gemessen an den kumulierten emissionshandlungspflichtigen Emissionen der energieintensiven Industrie von ca. 123 Mio. t CO₂ äq im Jahre 2014, ergibt sich ein Anteil von rund 63%. Bezieht man die 123 Mio. t CO₂ äq der emissionshandlungspflichtigen Industrieanlagen auf die Gesamtemissionen der deutschen Industrie im Jahre 2014 von etwa 180 Mio. t CO₂ äq, so ergibt sich ein Maß für die Reichweite des Emissionshandels innerhalb dieses Sektors. Ungefähr 68% aller Industrieemissionen werden in Deutschland vom Emissionshandel erfasst.

Den 77 Mio. t CO₂ äq standen für die betrachteten Branchen und Tätigkeiten bzw. Anlagen zugeteilte Emissionsberechtigungen für etwa 92 Mio. t gegenüber. Insgesamt wurden der emissionshandlungspflichtigen Industrie im Jahre 2014 rund 133 Mio. Emissions-

berechtigungen zugeteilt, mit dem Resultat eines Zuteilungsüberschusses von 10 Mio. Berechtigungen für die Gesamtheit aller Industrietätigkeiten.

Tabelle 14: Zuteilungssituation nach Tätigkeiten 2014; modifiziert nach (DEHSt 2015b)

Branche	Bezeichnung der Tätigkeit	Zahl der Anlagen	Verifizierte Emission nach VET 2014 [kt CO ₂ äq/a]	Zuteilungsmenge 2014 [EUAs]
Zementindustrie	Herstellung von Zementklinker	37	19.598	18.398
Grundstoffchemie	Herstellung von Ammoniak	5	4.276	3.857
	Herstellung von Salpeter- und Adipinsäure	11	874	1.826
	Herstellung von organischen Grundchemikalien	119	8.301	9.605
	Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas	14	1.782	1.604
Papierindustrie	Herstellung von Zellstoff	5	135	99
	Herstellung von Papier	148	5.273	6.715
Eisen- und Stahlindustrie	Kokereien	4	3.836	1.770
	Verarbeitung von Metallerzen	1	71	70
	Herstellung von Roheisen und Stahl	31	26.977	43.770
	Verarbeitung von Eisenmetallen	90	5.418	4.777
Gesamt		465	76.541	92.491

In Anbetracht des Überangebotes an Zertifikaten - vor allem im Bereich der Herstellung von Roheisen und Stahl - im industriellen Sektor und unter Berücksichtigung der derzeit niedrigen Zertifikatpreise stellt sich für die Industrie die Frage nach der Wirksamkeit des Emissionshandels als ökonomisches Instrument zur anreizbasierten CO₂-Minderung in seiner aktuellen Form.

Darüber hinaus zeigt eine Studie (Öko-Institut 2014) des Öko-Instituts unter den größten Unternehmen in den vier wichtigsten Industriebranchen in Deutschland, dass keines der betrachteten Industrieunternehmen aufgrund der übertragenen Überzuteilungen aus der 2. Handelsperiode - sogenanntes Banking - einen erheblichen Zukaufbe-

darf in der 3. Handelsperiode zu erwarten hat. Vielmehr weist die Analyse darauf hin, dass einige Unternehmen sogar Zusatzerlöse durch den Verkauf von kostenlos zugeordneten Zertifikaten erzielen können.

Durch die bereits verabschiedete Marktstabilitätsreserve soll eine Anpassung des Angebotes an Emissionsberechtigungen anhand der jährlich ermittelten Überschussituation im Emissionshandelsmarkt erfolgen. Übersteigt die Überschussmenge einen Wert von 833 Mio. Zertifikaten, wird die jährliche Versteigerungsmenge um 12% des Überschusses verringert. Im gegenläufigen Fall erhöht sich die Versteigerungsmenge um 100 Mio. Zertifikate, sofern der rechnerische Überschuss unterhalb von 400 Mio. Zertifikaten sinkt bzw. starke Preissprünge auftreten. Durch Einstellung in bzw. Ausgabe aus der Reserve erfolgt die Verringerung oder Erhöhung der Versteigerungsmenge. Die Marktstabilitätsreserve soll zum 1. Januar 2019 starten. Die im Zeitraum 2014 bis 2016 zurückgehaltenen 900 Mio. Zertifikate (Backloading), die das vorherrschende Überangebot abfedern sollten, werden direkt in die Reserve überführt. Ergänzt werden diese Zertifikate gegebenenfalls durch nicht versteigerte Berechtigungen aus der 3. Handelsperiode (2013-2020), vorbehaltlich einer Prüfung, ob diese nicht im Zuge kostenloser Zuteilungen an die Industrie nach 2020 benötigt werden (BMWi 2016a).

Der Reformvorschlag der EU-Kommission vom Juli 2015 sieht darüber hinaus ab 2019 eine Verknappung der insgesamt zugänglichen Zertifikate um etwa 1,5 Milliarden (VDI 2015) Berechtigungen vor, die der Marktstabilitätsreserve zugeführt werden sollen, um so den Marktpreis anzuheben. Die schrittweise Reduktion der zugänglichen Zertifikate – bisher um jährlich 1,74%, noch bis 2020 und danach voraussichtlich um 2,2% - und der sinkende Anteil an kostenlosen Zuteilungen bis 2020 - mit einer geplanten Festschreibung des Auktionsanteils für die Industrie von 57% - könnten den Innovationsdruck auf die Industrie spürbar erhöhen.

Die deutsche Industrie steht den Reformvorschlägen für die Zeit ab 2021 kritisch gegenüber. So beklagt etwa der BDI (BDI und BDA 2015;) unter anderem die Vorgehensweise bei der freien Zuteilung von Zertifikaten anhand festgelegter Emissionswerte für die Produktion einzelner Produkte - sogenannter Benchmarks -, die in der 4. Handelsperiode nochmals verschärft werden sollen (nach Plänen der EU Kommission abhängig von der jährlichen Emissionsreduktion eines Sektors zwischen 7,5% - 22,5% in 2021 und 10% - 30% in 2026 (CEP 2015)) sowie die neue Methodik hinter der Erstellung der Carbon-Leakage-Liste, welche die Wettbewerbsfähigkeit einzelner industrieller Branchen schützen soll. Die EU Kommission plant die Reduktion der von Carbon-Leakage-Schutz betroffenen Branchen von derzeit 177 auf 50 (POLITICO 2015). Desweiteren spricht die deutsche und europäische Industrie dem Reformvorschlag die Fähigkeit ab, langfristig berechenbare politische Rahmenbedingungen für Investitionen und Innovationen zu schaffen, wodurch, so der BDI, eine wirtschaftliche Bewertung deutlich erschwert wird.

Nach Ansicht des BDI (BDI 2016) sollte die weitere pauschale Verschärfung der heute existierenden Benchmarks überdacht werden. Der Verband spricht sich für eine branchenspezifische Anpassung der Benchmarks aus, sofern technologischer Fortschritt nachweisbar ist. Lässt sich technologischer Fortschritt in einer Branche nicht nachweisen, so empfiehlt der BDI das Festhalten an geltenden Benchmarks. Auch die Festschreibung des Auktionsanteils an der Gesamtheit der Zertifikate wird vom BDI

kritisch betrachtet. Hier fordert der Verband höhere Anteile für die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten von mindestens 45%. Im Hinblick auf die geplante Marktstabilitätsreserve spricht etwa der VCI (VCI 06.05.2015) von einer Unvereinbarkeit mit dem Marktsystem des Emissionshandels und einer künstlichen Preissteigerung der Zertifikate, welche mit massiven Mehrbelastungen für die energieintensiven Branchen einhergehen würde. Um die Verfügbarkeit von Zertifikaten für die Industrie zu gewährleisten, spricht sich der Verband für die Einführung einer Industriereserve aus.

Eine gegensätzliche Position vertritt der WWF (WWF 2015). Dieser plädiert für stärkere Reformen des bestehenden Handelssystems, unter anderem durch die Löschung der 900 Mio. Backloading-Zertifikate sowie der gesamten Überschusszertifikate durch eine gesetzliche Regelung. Außerdem spricht sich die Umweltorganisation für eine jährliche Reduktion der Emissionsobergrenze um mindestens 2,6 % statt der geplanten 2,2 % aus und empfiehlt die Versteigerung von Zertifikaten als Standardmethode für die Industrie. Ein angemessener Ausgleichmechanismus für nachprüfbar Carbon-Leakage gefährdete Branchen könnte laut dem WWF bspw. über diese Versteigerungseinnahmen finanziert werden.

Eine Studie unter Beteiligung des DIW Berlin schlägt zur Reduktion von Treibhausgasen in der Grundstoffindustrie eine Kombination aus dynamischer Zertifikatszuteilung und ergänzender Verbrauchsabgabe auf CO₂-intensive Grundstoffe vor. Laut der Studie sollen Grundstoffhersteller kostenlose Zertifikate (im Rahmen der insgesamt für die Industrie zur Verfügung stehenden kostenfreien Zertifikate) entsprechend ihrer aktuellen Produktionsmengen und gültiger Benchmarks für eine effiziente Produktion erhalten und nicht mehr auf Basis früherer Daten. Durch die zusätzliche Konsumabgabe bei der Verwendung von Grundstoffen soll ein Preissignal für den Ausstoß von Treibhausgasen geschaffen werden, welches Anreize für die effizientere Nutzung von Grundstoffen in der Industrie und Bauwirtschaft setzen soll. Gemäß den Autoren, seien Endkunden von dieser Wirkung nur moderat betroffen.

Die Autoren dieser Studie gehen aufgrund der in Summe (siehe Tabelle 14) vorliegenden aktuellen Überallokation von kostenlosen Zertifikaten bei den im Folgenden untersuchten Branchen davon aus, dass das ETS als Klimaschutzinstrument derzeit relativ wirkungslos ist, da es aktuell kein Knappheitssignal hinsichtlich der für die Produktion zur Verfügung stehenden Emissionen zur Verfügung stellt; darüber hinaus stehen den Unternehmen überschüssige Zertifikate aus der letzten Handelsperiode in nicht unerheblichem Umfang zur Verfügung (Banking), sodass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Unternehmen in der dritten Handelsperiode überhaupt Zertifikate in nennenswertem Umfang auf dem Markt zukaufen müssen. Auch die derzeit und bereits seit einigen Jahren sehr niedrigen Zertifikatspreise sorgen nicht dafür, dass der Faktor Emissionsintensität bei Investitionsentscheidungen der Industrie eine stärkere Rolle einnehmen kann.

5.3 Zementindustrie

5.3.1 Bedeutung für die deutsche Wirtschaft, Grundzüge der Zementherstellung

Wirtschaftliche Entwicklung

Die Zementindustrie ist, wie einige weitere Steine-und-Erden-Industrien (Ziegelindustrie, Kalkindustrie, etc.), im wesentlichen Vorlieferant für die Bauindustrie. Zement ist ein auf mineralischen Rohstoffen basierendes Bindemittel für Baustoffe, d.h. im wesentlichen Beton und Mörtel.

Die Zementindustrie besteht in Deutschland aus derzeit 22 Unternehmen, die insgesamt 55 Zementwerke betreiben. Die deutsche Zementindustrie hat in den letzten 15 Jahren einen Konzentrationsprozess durchgemacht und abgeschlossen: im Jahr 2000 gab es in Deutschland noch 38 Unternehmen mit 64 Werken, seit 2008 sind es nur noch 22 Unternehmen mit 55 Werken. Die Zahl der Beschäftigten nahm in der gleichen Zeit deutlich ab: von 11.144 Personen im Jahr 2000 auf 7.694 Personen im Jahr 2008 (-31 %); derzeit beträgt die Anzahl der Beschäftigten knapp 8.000 Personen und ist demnach stabil (VDZ 2015). Nach Angaben des VDZ beschäftigt das Cluster aus Zementindustrie sowie vor- und nachgelagerten Branchen derzeit rund 75.000 Personen in Deutschland. Insgesamt wurde von der Industrie in Deutschland durch die Zementherstellung im Jahr 2013 eine Bruttowertschöpfung von 862,2 Millionen € erzielt (Destatis 2015a). Dies entspricht 0,2 % der gesamten Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden (507,4 Milliarden €) im Jahr 2013 (Destatis 2015a).

Die Produktion und der Verbrauch von Zement in Deutschland sind in den letzten 10 Jahren relativ stabil. Im Jahr 2014 wurden 32 Mio. t Zement produziert, 27,1 Mio. t verbraucht, 6,2 Mio. t exportiert und 1,3 Mio. t importiert (VDZ 2015). Bezogen auf die Produktion hatte der Export in 2014 damit einen Anteil von knapp 20 %, der Import von 4 %.

Grundzüge der Zementherstellung

Reiner Portlandzement besteht nahezu ausschließlich aus gemahlenem Zementklinker. Dieser Klinker ist wesentlich dafür verantwortlich, dass die Zementherstellung sehr CO₂-intensiv ist. Bei der Herstellung von Portlandzement aus Zementklinker entstehen sowohl prozessbedingte als auch energiebedingte Treibhausgasemissionen in erheblichen Mengen.

Wichtigste Rohstoffe für die Herstellung von Portlandzement, und aller Zementarten die auf diesem beruhen, sind Kalkstein, Ton, und deren natürlich vorkommendes Gemisch Kalkmergel. Der Ausgangsstoff für den Klinker besteht zu 70-80 Massenprozent aus Kalkstein und zu 20-30 Massenprozent aus Ton (VDZ 2015). Diese Rohstoffe werden anschließend zu Rohschotter gebrochen, homogenisiert und dann mit Hilfe von Kugel- oder Wälzmühlen zu Rohmehl vermahlen. Das verwendete Rohmehl muss vor dem Brennen getrocknet werden. Dies geschieht in einem mehrstufigen Verfahren. Zwischen 100 °C und 400 °C erfolgt die Austreibung des adsorptiv an die Tonminerale

gebundenen Wassers, ab 750 °C zersetzen sich die Tonminerale und auch das chemisch gebundene Wasser wird frei. Zwischen 550 °C und 600 °C setzt die Entsäuerung des Kalksteins ein und das Prozess-CO₂ wird in Teilen freigesetzt.

Im Drehrohrofen herrschen die für das eigentliche Klinkerbrennen notwendigen Temperaturen von ca. 1450 °C; diese sind für das Ablaufen der chemischen Prozesse notwendig, welche wiederum für das Endprodukt erforderlich sind. Die wichtigsten dabei entstehenden Verbindungen sind Dicalciumsilikat und Trikalciumsilikat, welche für Bindung und Verfestigung des Zements verantwortlich sind. Nach dem Brennen wird der fertige Klinker gekühlt und zu Zement vermahlen.

5.3.2 Bedeutung für den Klimaschutz, Treibhausgasemissionen und Energieeinsatz

Die Zementproduktion geht in erheblichem Umfang sowohl mit energiebedingten als auch mit prozessbedingten Treibhausgasemissionen einher. Dabei wird fast ausschließlich CO₂ emittiert. Die direkten absoluten Treibhausgasemissionen der Zementproduktion - von derzeit ca. 15 Mio. t CO₂ pro Jahr (vgl. Tabelle 17) - entsprechen einem Anteil von ca. 8,2 % an den direkten absoluten Treibhausgasemissionen der gesamten Industrie in Deutschland (mit derzeit ca. 183 Mio. t CO₂ äq.).

Sowohl die absoluten als auch die spezifischen Energieeinsätze sind in den letzten zehn Jahren relativ konstant geblieben, konjunkturelle Schwankungen innerhalb dieses Zeitraumes sind allerdings zu erkennen (vgl. Tabelle 15). Die konstanten absoluten Werte entsprechen der im gleichen Zeitraum stagnierenden Produktion. Die stagnierenden spezifischen Verbräuche sprechen dafür, dass die Energieeffizienz in der Zementindustrie in den letzten zehn Jahren nur geringfügig vorangebracht wurde. Beim spezifischen Stromverbrauch ist durchaus eine Tendenz zu höheren spezifischen Verbräuchen zu erkennen. Nach Angaben des VDZ ist dies auf höhere Anforderungen an die Produktqualität, insbesondere auf den gestiegenen Bedarf an fein aufgemahlene leistungsstarken Zementen zurückzuführen.

Zwischen 1990 und 2000 gab es einen deutlichen Rückgang der spezifischen und absoluten Verbrauchswerte. Dies ist insbesondere auf die Modernisierung der Zementwerke in den neuen Bundesländern zurückzuführen.

Der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch pro Tonne Zement liegt heute bei ca. 3.200 MJ (VDZ 2013 & Tabelle 15).

Tabelle 15: Energieeinsatz in der Zementproduktion

Jahr	Therm. En.Einsatz [PJ/a]	Elektr. En.Einsatz [TWh/a]	En.Einsatz gesamt [PJ/a]	Therm. En.Einsatz [MJ/t Zement]	Elektr. En.Einsatz [kWh/t Zement]	En.Einsatz gesamt [MJ/t Zement]
1990	109,5	3,67	122,7	3.200	107,4	3.587
1995	102,8	3,64	115,9	3.000	106,5	3.383
2000	99,3	3,55	112,1	2.835	101,5	3.200

2005	88,7	3,24	100,4	2785	101,9	3.152
2010	88,1	3,37	100,2	2.874	109,8	3.269
2013	90,4	3,49	103,0	2.857	110	3.253
2014	92,5	3,57	105,4	2.882	110	3.278
Durchschnitt 2005- 2014	92,4	3,4	104,8	2.823	105	3.201

Quelle: VDZ 2013, Darstellung IREES

Wie energieintensiv die Branche ist, zeigt ein Vergleich der Leistungsgrößen mit den Energiekosten. Im Jahr 2012 hatten die Energiekosten mit insgesamt 504,8 Mio. € einen Anteil von 18,6 % am Bruttowertschöpfungswert von 2,72 Mrd. €. Bezieht man die Energiekosten auf die Bruttowertschöpfung des gleichen Jahres (855,8 Mio. €) ergibt dies ein Verhältnis von 0,59:1 (Destatis 2014). Dies macht klar, welch großes ökonomische Eigeninteresse die Zementproduzenten an einer Reduktion ihrer Energiekosten haben müssten.

Auch der Vergleich mit der Gesamtwirtschaft verdeutlicht den besonders hohen Energieverbrauch der Zementindustrie. Ein Endenergieverbrauch¹⁴ von insgesamt 103 PJ im Jahr 2013 entspricht einem Anteil von 54 % am gesamten Endenergieverbrauch des Wirtschaftszweiges Verarbeitung von Steine und Erden (mit 191 PJ Endenergie in 2013 und einem Anteil von immerhin knapp 4,1 % am gesamten Endenergieverbrauch des Verarbeitenden Gewerbes (mit 2.535 PJ in 2013), (AGEB 2016)). Neben der Zementindustrie gehören noch die Kalkindustrie und die Ziegelherstellung dem Wirtschaftszweig „Verarbeitung von Steine und Erden“ an. Die obigen Angaben sollen nochmals die große Bedeutung der Zementindustrie innerhalb des Industriesektors bezogen auf ihren Endenergiebedarf vor Augen führen.

Der Teilprozess mit den höchsten spezifischen Treibhausgasemissionen bei der Zementherstellung ist das Klinkerbrennen (IG BAU 2013).

Diese entstehen hier im Wesentlichen durch:

- Prozessbedingte Emissionen: Aus dem Kalkstein entweicht notwendigerweise CO₂, wenn die chemischen Reaktionen zur Erzeugung der wesentlichen Klinkerkomponenten im Drehrohrofen ablaufen. Das Kalziumcarbonat (CaCO₃) des Kalksteins wird dabei in Kalziumoxid (CaO) und Kohlendioxid (CO₂) zerlegt. Dies nennt man auch Entsäuerung des Kalksteins oder Kalzinierung.
- Brennstoffe/Prozesswärme: Betrieb des Drehrohrofens, Aufrechterhaltung der Sintertertemperatur von 1.450 °C.
- Strom: Antrieb des Drehrohrofens und Prozesssteuerung, Mahlen des Rohmehls und des Klinkers.

¹⁴ Es wird der Einfachheit halber hier angenommen, dass es sich bei den Energiemengen in Tabelle 1 ausschließlich um Endenergie handelt. Inwieweit hier z.B. ein Brennstoffeinsatz für eigenerzeugten KWK-Strom mit bilanziert wird, kann derzeit nicht gesagt werden. Der Aussagegehalt wird dadurch allerdings nicht oder nur sehr unwesentlich verfälscht.

Auch die spezifischen Treibhausgasemissionen sind in den vergangenen zehn Jahren im Wesentlichen stabil geblieben. Bei der Produktion von einer Tonne Zementklinker entstehen derzeit ca. 810 kg CO₂-Emissionen (vgl.

Tabelle 16). Berücksichtigt werden hier zur Bestimmung der Werte die prozessbedingten Emissionen und der gesamte Brennstoffeinsatz (nicht jedoch der – relativ geringe – Stromeinsatz).

Tabelle 16: Spezifische CO₂-Intensität der Klinkerproduktion

Jahr	Produktionsmenge Klinker [Mio. t]	CO ₂ -Intensität Klinker [t CO ₂ / t Klinker]	CO ₂ Emissionen absolut [Mio. t]
2000 - 2004 ¹⁵	25,9	0,848	22,0
2005	24,4	0,823	20,1
2010	23	0,808	18,6
2011	24,8	0,806	20,0
2005 - 2011	24,7	0,812	20,0

Quelle: IG BAU 2013; Darstellung IREES

Die spezifischen und absoluten Emissionswerte für die Zementproduktion in Deutschland zeigt Tabelle 17. Die spezifischen Emissionswerte für Zement insgesamt sind deutlich geringer als diejenigen des Klinkerbrennens (vgl. Tabelle 16). Dies zeigt die besondere Rolle des Klinkers für die Emissionsintensität der Zementproduktion. Laut Nationalem Inventarbericht (UBA 2016b) betragen die Prozessemissionen der Klinkerherstellung in Deutschland im Jahr 2014 insgesamt 12,7 Mio. t CO₂, bei einer Gesamtproduktion von 23,8 Mio. t Klinker, dies entspricht einem Prozessemissionsfaktor von rund 0,53 t CO₂ / t Klinker.

Der in Tabelle 16 dargestellte Rückgang der spezifischen CO₂-Emissionen des Brennstoffeinsatzes bei der Zementproduktion ist hauptsächlich auf die in den letzten Jahren stark zunehmende Verwendung von Ersatzbrennstoffen (Altreifen, Industrie- und Siedlungsabfälle, biogene Abfälle und Reststoffe, Lösungsmittel, etc.) zurückzuführen, wohingegen die Verwendung der „klassischen“ fossilen Brennstoffe (hauptsächlich Steinkohle und Braunkohle) stark zurückgegangen ist.

Die in Tabelle 17 dargestellten Werte für die spezifischen CO₂-Emissionen des Brennstoffeinsatzes berücksichtigen nur die „klassischen“ fossilen Brennstoffe. Die CO₂-Emissionen aus alternativen Brennstoffen werden nicht berücksichtigt, da sie, so der VDZ, „fossile Brennstoffe ersetzen und somit zu einer CO₂-Minderung an anderer Stelle führen“ (VDZ 2013). Bei der Ausweisung der spezifischen Emissionsfaktoren für den Klinker ist dies nicht der Fall, dort werden auch diese Ersatzbrennstoffe berücksichtigt. Dies erscheint auf den ersten Blick inkonsistent, daher sollte zukünftig die tatsächliche Emissionswirkung der verschiedenen Ersatzbrennstoffe detailliert analysiert werden. Hier muss allerdings zunächst mit diesen Werten gearbeitet werden. Ein Vergleich mit

¹⁵ Durchschnittswerte für 2000 – 2004. Hierbei handelt es sich um die Basisperiode für die erste Handelsperiode des ETS ab 2005.

offiziellen Emissionsdaten ist hier leider nicht möglich, da der Nationale Inventarbericht (UBA 2016b) die energiebedingten Emissionen und damit die Gesamtemissionen der Zementindustrie nicht separat ausweist. So erklärt sich die Tatsache, dass z.B. im Jahr 2011 für die Klinkerproduktion insgesamt ein höherer absoluter Emissionswert angegeben wird (vgl. Tabelle 16) als für die Zementproduktion, obwohl die Emissionen der Klinkerproduktion eigentlich in den Emissionswerten für die Zementproduktion enthalten sind und somit die Emissionen der Zementproduktion (vgl. Tabelle 17) über den Emissionen der reinen Klinkerproduktion liegen müssten.

Die spezifischen Prozessemissionen der Zementherstellung sind in den letzten zehn Jahren im Wesentlichen stabil geblieben.

Tabelle 17: Spezifische und absolute Emissionen der Zementproduktion in Deutschland

Jahr	Spezifische CO ₂ -Emissionen [t CO ₂ / t Zement]				Produktion [Mio. t]	Absolute CO ₂ -Emissionen [Mio. t]	
	Thermisch bedingt	Prozessbedingt	Elektrisch bedingt	Summe		Direkte Emissionen	Direkte und indirekte Emissionen
1990	0,280	n.a.	0,072	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
1995	0,25	n.a.	0,071	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
2000	0,20	0,43	0,068	0,69	36,1	22,6	25,1
2004	0,16	0,43	0,068	0,65	31,9	18,6	20,7
2005	0,13	0,41	0,068	0,61	31,0	16,7	18,8
2010	0,10	0,40	0,074	0,58	29,9	15,0	17,2
2013	0,10	0,39	0,074	0,56	31,3	15,2	17,5
2004-2013	0,12	0,40	0,0699	0,59	32,1	16,6	18,8

Quelle: VDZ 2013, Darstellung IREES

Werden die Werte in Tabelle 17 analysiert, so lässt sich festhalten, dass die prozessbedingten Treibhausgasemissionen derzeit (im Durchschnitt von 2004-2013) für ca. 68 % der gesamten Treibhausgasemissionen der Zementproduktion verantwortlich sind. Will man deutliche Emissionsminderungen in der Zementindustrie erreichen, geht dies nicht ohne auch am eigentlichen Produktionsprozess und an der Zusammensetzung des Endprodukts anzusetzen. Neben den prozessbedingten Emissionen haben die brennstoffbedingten Emissionen eine große Bedeutung, während der Strombedarf relativ betrachtet eine geringe Rolle für die Emissionen spielt.

Der Branchenverband VDZ sieht nur geringe Möglichkeiten zur weiteren Absenkung der spezifischen und absoluten Treibhausgasemissionen der Zementproduktion in Deutschland und begründet dies mit den bereits ergriffenen Effizienzmaßnahmen (VDZ 2013). So könnten insbesondere die durch die Entsäuerung des Rohmaterials Kalkstein bedingten Emissionen nicht weiter reduziert werden, da bereits heute das Poten-

zial zur Substituierung von Zementklinkern durch die Nutzung von alternativen Hauptbestandteilen weitgehend ausgereizt sei (VDZ 2013). Als alternative Hauptbestandteile anstelle von Kalkstein werden bereits heute verwendet:

- Hüttensand (hergestellt aus Hochofen-Schlacken),
- Flugasche sowie
- ungebrannter Kalkstein in Portland-Kompositzementen.

Hinsichtlich der Steigerung der Energieeffizienz wird auf die Studie „Cement Technology Roadmap“ der IEA von 2009 verwiesen, die auf globaler Ebene nur einen Minderungsbeitrag von etwa 10 % erkennen kann (IEA 2009).

Die Autoren dieser Untersuchung hingegen halten es sehr wohl für möglich, die Treibhausgasemissionen der Zementproduktion in Deutschland deutlich weiter abzusenken. Dafür sind jedoch teilweise umfassende politische und technische Maßnahmen erforderlich, die in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben werden.

5.3.3 Produktions- und nachfrageseitige Handlungsoptionen zur THG-Reduktion

Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl an Handlungsmöglichkeiten zur Verringerung der Emissionsintensität der Zementproduktion in Deutschland. Diese sollen hier grob umrissen und ihr Minderungspotenzial mindestens qualitativ, wo immer möglich quantitativ, gegebenenfalls auch unter Rückgriff auf Expertenschätzungen, umrissen werden.

Möglichkeiten der Produkt- und Prozesssubstitution

Wie oben beschrieben ist das Klinkerbrennen mit Abstand der emissionsintensivste Teilprozess der Zementherstellung; nur hier entstehen prozessbedingte Emissionen, das Klinkerbrennen ist aber auch sehr brennstoffintensiv. Möglichkeiten der Prozesssubstitution müssen daher vor allem hier gesucht werden.

1. Substitution von Klinker zur Reduktion des Klinkermoduls

Die Reduktion des sogenannten Klinkermoduls bei der Zementherstellung, d.h. des Anteils der Hauptkomponente Klinker relativ zu weiteren Hauptkomponenten, ist als Möglichkeit zur Reduktion der Klinkermenge bereits bekannt und ist in Deutschland in den letzten Jahren auch verstärkt zur Anwendung gekommen. Die klassischen Portlandzemente werden somit teilweise durch andere Zementarten mit reduziertem Klinkeranteil ersetzt.

Gemäß der europäischen Norm DIN EN 197-1 gibt es 27 sogenannte Normalzemente, die sich in fünf Kategorien eingliedern lassen:

- CEM I: Portlandzemente
- CEM II: Portlandkompositzemente
- CEM III: Hochofenzemente
- CEM IV: Puzzolanzemente
- CEM V: Kompositzemente

Portlandzemente nach CEM I enthalten als Hauptbestandteil mindestens 95 Massenprozent Klinker. Dahingegen ist der Klinkeranteil bei den anderen gelisteten Zementtypen geringer. Portlandkompositzemente nach CEM II bestehen aus mehreren Hauptbestandteilen, deren Anteil zwischen 6 und 35 Massenprozent betragen darf. Dabei kommen verschiedene mineralische Ausgangsmaterialien zum Einsatz, zum Beispiel Hüttensand (aus Hochofenschlacken) und Flugasche. In Deutschland überwiegt der Einsatz von Hüttensanden und ungebranntem Kalkstein für den Einsatz in Portlandkompositzementen (VDZ 2015). Die CEM III Zemente verfügen über einen besonders hohen Anteil an Hüttensand.

Tabelle 18: Entwicklung der Marktanteile der verschiedenen Zementarten in Deutschland

Zementsorte	Absolut Marktanteil		absolut Marktanteil							
	1993	1997	2001	2003	2005	2007	2009	2011		
Portlandzement	23.414	76,6%	21.623	16.279	14.173	13.226	8.932	8.031	8.286	31,6%
Portlandhüttenzement	979	3,2%	1.023	4.533	3.719	3.701	5.229	3.051	3.812	14,5%
Hochofenzement	3.956	12,9%	3.916	3.965	2.772	3.621	4.883	4.212	5.664	21,6%
Portlandkalksteinzement	1.055	3,4%	1.957	2.951	3.614	3.878	3.837	5.584	5.573	21,3%
Sonstige Zementsorten	1.178	3,9%	187	306	379	669	2.519	2.710	2.883	11,0%
Inlandsversand gesamt	30.582	100,0%	28.706	28.034	24.657	25.095	25.400	23.588	26.218	100,0%

Quelle: IG BAU 2013

Der Markt für Zement in Deutschland hinsichtlich der genutzten Zementarten hat sich in den vergangenen 20 Jahren bereits sehr deutlich differenziert (IG BAU 2013):

Der klassische Portlandzement hat zwar nach wie vor und mit Abstand den höchsten Marktanteil, dieser ist jedoch von ca. 75-80 % Mitte der 90er Jahre auf heute ca. 30 % zurückgegangen. Insbesondere Hochofen- und Portlandkalksteinzemente hatten enorme Zuwachsraten in diesem Zeitraum zu verzeichnen.

Betrachtet man hingegen die Entwicklung der Klinkerproduktion, beispielsweise zwischen den Jahren 2000-2004 (Mittelwert) und dem Jahr 2011, so lässt sich lediglich eine Reduktion von 25,9 Mio. t auf 24,8 Mio. t (vgl.

Tabelle 16), d.h. um ca. 4,2 % in ungefähr neun Jahren feststellen, wohingegen der Marktanteil des Portlandzements im gleichen Zeitraum von 57,5 % in 2003 auf 31,6 % in 2011 zurückgegangen ist; bezogen auf den Marktanteil in 2003 entspricht dies bis 2011 einem Rückgang um 45 %.

Im Vergleich dazu lag die Klinkerproduktion in Deutschland im Jahr 1995 mit rund 29 Mio. t noch deutlich höher. Somit fand in der Periode 1995 bis 2011 ein signifikanter Rückgang der Klinkerproduktion um rund 14,5 % statt. Im Jahr 2014 lag die Klinkerproduktion bei etwa 23,9 Mio. t, der Rückgang der Klinkerproduktion gegenüber 1995 entspricht 18 % (vgl.

Tabelle 19).

Der Rückgang der Klinkerproduktion in Deutschland liegt u.a. an den im Vergleich zum Portlandzement geringeren (aber nicht unwesentlichen) Klinkeranteilen der verschie-

densten Zementarten. Eine weitere Erklärung für diese stark auseinanderfallenden Werte könnte sein, dass die hier gezeigte Klinkerproduktion sich auf die Gesamtproduktion, auch für den Export, bezieht, während die gezeigten Marktanteile nur die Produktion für den inländischen Markt erfassen. Somit müssten die deutschen Zementexporte zu einem ganz erheblichen Anteil aus klassischem Portlandzement bestehen. Dies ist allerdings nicht der Fall, wie die beim VDZ verfügbaren Exportdaten zeigen (VDZ 2015). Allerdings gibt es vom VDZ Angaben zum „Gesamtklinkerfaktor“ der deutschen Zementproduktion, also dem durchschnittlichen Anteil des Klinkers im Zement über alle im jeweiligen Jahr in Deutschland produzierten Zementarten hinweg. Es zeigt sich, dass der Klinkerfaktor in den vergangenen zehn Jahren nach und nach von 0,76 geringfügig auf 0,73 zurückgegangen ist (siehe Tabelle 19), entsprechend einem Rückgang um knapp 4 % in diesem Zeitraum.

Eine genauere Analyse zum Auseinanderfallen der Marktanteile der Zementarten und der Klinkerproduktion bzw. des Klinkerfaktors ist daher notwendig, im Rahmen dieser Studie jedoch nicht möglich.

Ungeachtet dessen sehen die Autoren ein gewisses Potenzial zur weiteren Verminderung des Klinkerfaktors durch konsequentes Ausnutzen der Möglichkeiten zur Klinkersubstitution. Entscheidend hierfür sind jedoch ganz wesentlich die unterschiedlichen Produkteigenschaften und damit die möglichen Anwendungszwecke der nicht-klassischen Zemente. Hier besteht ebenfalls weiterer Analysebedarf. Die Autoren gehen davon aus, dass das Potenzial zur absoluten Treibhausgasminde rung bei der unterstellten Produktionsentwicklung (siehe dazu weiter unten) durch konsequente Klinkersubstitution im niedrigen einstelligen Mio. t-Bereich liegen könnte, vielleicht zwischen 1,0 und 2,5 Mio. t CO₂.

Tabelle 19: Klinkerfaktor der deutschen Zementproduktion

Jahr	Klinkerproduktion [Mio. t]	Zementproduktion [Mio. t]	Klinkerfaktor (Klinker/Zement)
1995	29,1	35,9	-
2005	24,4	31,0	0,76
2010	23,0	29,9	0,74
2014	23,9	32,1	0,73

Quelle: VDZ 2015, Darstellung IREES

2. Schnellere und breitere Etablierung neuartiger Zemente bzw. Herstellungsprozesse

Mit neuartigen Zementen sind hier, im Gegensatz zu den unter 1. „Substitution von Klinker zur Reduktion des Klinkermoduls“ aufgeführten Zementarten, nicht solche gemeint, die „nur“ einen geringeren Klinkerfaktor haben, sondern solche, bei denen aufgrund eines neuartigen Herstellungsverfahrens die chemische Zusammensetzung des Klinkers selbst eine andere ist. Das einzige den Autoren bekannte Beispiel, das sich derzeit in Entwicklung befindet, ist „Celitement“.

Celitemente sind wie Zemente auch hydraulische Bindemittel, d.h., sie werden mit Wasser angemacht und härten dann aus. Wie Zemente auch werden Celitemente mit Wasser, Sand und Kies zu Beton verarbeitet. Die Grundlagen der Celitemente sind

eine Entwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Die Celitement GmbH, welche die Celitelemente weiterentwickelt und auf den Markt bringen will, ist eine Ausgründung von Wissenschaftlern des KIT und der Schwenk Baustoffgruppe (Celitement 2015).

Nach Angaben der Celitement GmbH werden für die Herstellung im einfachsten Fall wie bei den normalen Zementen ein Calcium-Träger, dies wird in der Regel Kalk sein, sowie ein Silizium-Träger, z.B. Sand eingesetzt. Das benötigte (molare) Mengenverhältnis zwischen Calcium und Silizium ist jedoch deutlich niedriger als bei Portlandzement, d.h., es muss weniger Kalk für die gleiche Menge an Endprodukt entsäuert werden (da der Anteil an überschüssigem Calciumoxid (CaO) im Endprodukt ggü. Zement wesentlich reduziert ist). Die rohstoffbedingten CO₂-Emissionen ließen sich so um bis zu 50 % reduzieren (Celitement 2015).

Die Herstellung erfolgt bei 300 °C, also bei deutlich geringeren Temperaturen als die Portlandzementherstellung, was zu deutlichen Brennstoffeinsparungen führt. Celitelemente sollen darüber hinaus mit Portlandzementen kompatibel sein (Celitement 2015).

Dieses neuartige Celitement-Verfahren könnte ein großes Potenzial für die zukünftige Treibhausgasminderung in der deutschen Zementproduktion bergen. Genaueres lässt sich vermutlich frühestens nach 2022 feststellen, wenn die ersten konkreten Erfahrungen und Ergebnisse aus dem praktischen Betrieb der ersten Celitementanlage im industriellen Maßstab vorliegen. Allerdings wird es ohne Zweifel ganz erhebliche Markteintrittshemmnisse geben, da der Zementmarkt in Deutschland gesättigt ist und die Anlagen der „klassischen“ Zementproduktion über sehr hohe Lebensdauern verfügen. Zudem hängt die Marktdurchdringung einer neuen Technologie von sehr vielen verschiedenen Faktoren (Normung, Regelwerke, REACH, Baukonjunktur, wirtschaftliches Umfeld, Genehmigungsverfahren, etc.) ab. Eine erste industrielle Anlage, die Celitement-Zement produziert, wird in Deutschland nach Auskünften der Celitement GmbH nicht vor dem Jahr 2020 in Betrieb gehen. Erst nach einem darauffolgenden ein- oder zweijährigem Betrieb dieser Anlage und aufbauend auf den daraus resultierende Erfahrungen wird sich zeigen, ob weitere Anlagen, die nach dem Celitement-Verfahren produzieren, in Deutschland errichtet werden könnten.

Dies könnte dazu führen, dass die Zementunternehmen kein betriebliches Eigeninteresse daran haben werden, ihre (zumindest zu großen Teilen) abgeschriebenen Anlagen zu ersetzen, insbesondere nicht durch Anlagen eines grundlegend anderen Verfahrens; insbesondere da bislang keine Bau-, Investitions- und Betriebserfahrungen vorliegen. Weiterhin ist ebenfalls davon auszugehen, dass die Nachfrager in der Bauwirtschaft, die seit vielen Jahrzehnten mit den bekannten (und bewährten) Zementen arbeiten, völlig neuen Produkten sehr skeptisch gegenüberstehen. Dies liegt unter anderem auch an rechtlichen Fragen der Haftung bzw. Gewährleistung, da u.a. die zu großen Teilen mit Zement und Stahl erbauten Infrastruktureinrichtungen (Brücken, Gebäude, etc.) über Jahrzehnte ihre Funktion zuverlässig erfüllen müssen. Mittel- oder gar langfristige Erfahrungen mit derartigen neuen Zementarten und deren Langzeiteigenschaften, wenn sie Umwelteinflüssen und täglichen Belastungen ausgesetzt sind, liegen jedoch noch nicht vor bzw. können noch gar nicht vorliegen.

Um wirklich tiefe Emissionsminderung bei der deutschen Zementproduktion zu realisieren, führt nach Auffassung der Autoren auf lange Sicht (ab 2025-2030) an der breiten

Marktdurchdringung solcher neuartiger Zemente allerdings kein Weg vorbei. Dann könnten, bei insgesamt stagnierendem Markt und wenn die neuartigen Zemente die traditionellen in allen wesentlichen Anwendungsbereichen technisch tatsächlich ersetzen können, die zu erzielenden Minderungen durchaus im Rahmen von 50-70 % der derzeitigen Emissionen der Branche liegen, das wären also bis zu ca. 13 Mio. t CO₂. Die notwendigen Entwicklungsschritte bis zur breiten Markteinführung sowie die zu erwartenden Markteintrittshemmnisse müssen genauestens analysiert und anschließend durch politische Maßnahmen adressiert werden.

Aufgrund der zu erwartenden enormen Widerstände und Hemmnisse gehen die Autoren davon aus, dass diese nur mit entsprechend weitreichenden politischen Maßnahmen überwunden werden können, wie beispielsweise durch einen rechtlich vorgeschriebenen Minderungspfad für den Klinkerfaktor. Dies käme einem „Phase out“ der klassischen Zemente, zumindest dort, wo es technisch möglich ist, gleich. Möglich wären allerdings auch, alternativ oder komplementär zu ordnungsrechtlichen Maßnahmen, massive staatliche Förderprogramme.

Möglichkeiten der nicht-branchenspezifischen THG-Minderung

1. Forcierung der Abwärmenutzung

Ein hohes Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz bietet in vielen energieintensiven Branchen die bessere Nutzung von Abwärme. Dies gilt auch für die Zementproduktion in Deutschland. In den letzten Jahren ist hier schon einiges umgesetzt worden: mit Hilfe des Abgases des Drehrohrofens wird das Rohmehl vorgewärmt (und teilweise auch kalziniert). Die Verbrennungsluft wiederum wird durch das gebrannte Brenngut vorgeheizt und ein Teil der Wärme somit dem Drehrohrofen wieder zugeführt, dies spart direkt Brennstoff zur Erhaltung der Sintertemperatur ein (Schlomann et al. 2011). Dennoch gibt es enorme Abwärmemengen, insbesondere die Wärmestrahlung des Drehrohrofens stellt bislang eine enorme Verlustwärme dar.

Grundsätzlich gibt es drei Kategorien der Abwärmenutzung, die auch für die Zementindustrie in Frage kommen:

- interne Nutzung der Abwärme im Sinne einer Kaskadennutzung (wie in erheblichem Umfang schon genutzt)
- Abwärmeabgabe an Dritte
- Verstromung von Abwärme

Wo möglich, sollte zunächst die interne Nutzung der Abwärme eingeführt bzw. verstärkt werden. Die technisch maximal mögliche Anzahl an mit Abwärme beheizten Zylinder- oder Vorwärmern sollte eingesetzt werden (die Autoren gehen jedoch davon aus, dass dies auch bereits weitgehend so erfolgt). Vorkalzinerer können nicht nur die Abwärme des Drehrohrofens nutzen, sondern auch dessen benötigte Länge reduzieren. Somit vermindern sich die Abstrahlverluste des Drehrohrofens, die mit seiner Länge skalieren. Auch die Klinkerkühler sollten stetig optimiert werden.

Neben diesen mehr optimierenden Maßnahmen, die mit bestehender Technik umzusetzen sind, sollten neue Technologien vorgebracht werden, die insbesondere die große Wärmeabstrahlung des Drehrohrofens nutzen könnten. Möglich wären zum Bei-

spiel technische Lösungen, die sich den Seebeck-Effekt zunutze machen: hierbei entsteht bei Anlegen einer Temperaturdifferenz zwischen zwei unterschiedlichen und geeigneten elektrischen Leitern eine Spannung, abgegriffen werden kann. Diese wäre also eine Form der Abwärmeverstromung. Die Autoren halten das Potenzial für groß, allerdings ist hier noch einiges an Entwicklungsarbeit zu investieren, um diese Möglichkeit industriell nutzen zu können.

Abwärmeverstromung mit heute schon in industriellem Maßstab zur Verfügung stehenden Technologien ist in der Zementindustrie heute nur ganz vereinzelt anzutreffen. Den Autoren sind zwei Fälle bekannt:

- Im Zementwerk Rohrdorf der Südbayerischen Portland-Zementwerke Gebr. Wiesböck und Co. GmbH wurde im Juni 2012 das erste Abhitze-Kraftwerk Europas in Betrieb genommen. Genutzt wird Abgaswärme des Drehrohrofens und des Klinkerkühlers sowie von Nebenanlagen. Die Leistung des Kraftwerkes beträgt 6 MW, dies ist durchaus beachtlich. Nach Angaben des VDZ werden somit 30.000 t CO₂ pro Jahr durch die Substitution von Fremdstrombezug eingespart (IG BAU 2013). Das Vorhaben wurde vom Bundesumweltministerium gefördert.
- Ebenfalls vom Bundesumweltministerium gefördert wird im Werk Lengfurt der HeidelbergCement AG bereits seit 1999 aus der Abluft des Klinkerkühlers Strom erzeugt. Hier wurde, erstmals überhaupt in einem Zementwerk, das ORC Verfahren genutzt. Mit Hilfe des ORC Verfahrens kann auch Abwärme auf einem Temperaturniveau unter 275 °C genutzt werden (IG BAU 2013).

Für die Zementindustrie insgesamt ist, trotz der mit einer Verstromung immer verbundenen Wirkungsgradverluste, die Verstromung der Abwärme einer Abgabe an Dritte vermutlich vorzuziehen. Denn das Zementwerk wird während der Produktion immer einen bedeutenden Strombedarf decken müssen. Der Strombedarf fällt parallel zur Verfügbarkeit der Abwärme an. Daher dürften die Hemmnisse für die Umsetzung einer Abwärmeverstromung geringer als für die Abgabe der Abwärme an Dritte sein.

Die Abgabe von Abwärme an Dritte hängt von der räumlich nahen Verfügbarkeit der Abwärmesenken und von den betrieblichen Anforderungen des abnehmenden Unternehmens ab. So müssen beispielsweise die Zeitschienen der Wärmebereitstellung und der Wärmeabnahme möglichst weitgehend übereinstimmen, soweit nicht in größerem Maßstab Wärmezwischenspeicher eingesetzt werden können. Ein großes Hemmnis ist die Frage der Risikoabsicherung: wer garantiert die kalkulierten Kapitalrückflüsse für die notwendigen Investitionen sowohl auf Seiten der Wärmeabgabe als auch auf Seiten der Wärmenutzung, wenn einer der beiden Partner seine Verpflichtungen aus welchen Gründen auch immer nicht mehr erfüllen kann? Hier ist die Entwicklung von intelligenten Versicherungslösungen gefragt.

Von Seiten der Industrie sollte genauestens analysiert werden, wo Abwärmepotenziale in der Zementindustrie anfallen und wie diese im Einzelfall am sinnvollsten genutzt werden können. Evtl. müssten dazu politisch entsprechende Berichtspflichten für die Unternehmen dieser Branche neu eingeführt werden. In der Gesamtschau der Möglichkeiten des Anlagenparks können dann in der Reihenfolge ihres Minderungspotenzials und ihrer Kosteneffizienz technische Maßnahmen ergriffen werden. Auf der Ebene der politischen Maßnahmen kommen auch hier verschiedene Maßnahmentypen in Frage, die von finanzieller Förderung bis hin zu sehr spezifischen Abwärmennutzungs-

geboten reichen können. Zwar gibt es im BImSchG bereits ein Gebot zur effizienten Nutzung von Energie, dieses ist jedoch nicht hinreichend operationalisiert und daher auch für die Genehmigungsbehörden wenig aussagekräftig. Neue Möglichkeiten, wie die Nutzung des Seebeck-Effektes, sollten gezielt und umfassend gefördert werden. Um eine Eigenstromerzeugung aus Abwärme nicht unnötig zu hemmen, sollte die EEG-Umlage auf Eigenstrom kritisch geprüft werden.

2. Möglichkeiten zur Steigerung der Stromeffizienz

Relativ zum Bedarf an Brennstoffen betrachtet ist der Stromverbrauch in der Zementindustrie gering. Absolut betrachtet sind es derzeit aber immerhin ca. 3,5 TWh bzw. 12,6 PJ pro Jahr und damit knapp 1,6 % des derzeitigen Stromverbrauchs der Industrie (2013: ca. 801 PJ), die hier eingesetzt werden (AGEB 2016). Damit gingen in 2013 Emissionen von ca. 2,3 Mio. t CO₂ einher.

Die traditionell beim Mahlen des Rohmehls und des Klinkers eingesetzten Rohr- oder Kugelmühlen haben einen spezifischen Strombedarf von etwa 30 bis 50 kWh/t (Schlomann et al. 2011). Sie werden von Elektromotoren angetrieben und arbeiten sehr ineffizient, da nur ca. 5 % der von den Elektromotoren zur Verfügung gestellten mechanischen Energie in Zerkleinerungsarbeit umgesetzt werden. Wesentlich effizienter sind sogenannte Gutbett-Walzmühlen. Diese sparen gegenüber den Kugelmühlen zwischen 15 und 50 % der elektrischen Energie ein, liefern jedoch nicht die gleiche Qualität (nicht die gleiche Korngrößenverteilung des Gemahlenden) wie die Kugelmühlen und wie sie für das Endprodukt benötigt wird. Bei Neuanlagen hat sich in Deutschland daher für das Mahlverfahren eine Kombination aus Gutbettwalzenmühlen für die Vormahlung und Kugelmühlen für die anschließende Feineinstellung der Qualität etabliert (Schlomann et al. 2011).

Als politische Maßnahme wäre zu prüfen, ob eine Umrüstpflcht auf das geschilderte Kombimahlverfahren für Altanlagen eingeführt werden kann. Es ist allerdings an dieser Stelle tatsächlich abzuwägen, ob die hier vorhandenen Einsparpotenziale ein solches Vorgehen rechtfertigen können. Alternativ sollte die Nutzung des Förderprogramms für Produktionstechnologien des BMWi für diesen Zweck durch Kampagnen und Informationen forciert werden.

Darüber hinaus sollten die Querschnittstechnologien (Elektromotoren, Druckluft, Gebläse, Transportbänder und weitere) regelmäßig auf den neuesten Stand gebracht werden.

3. CCU

Carbon Capture and Usage (CCU) könnte grundsätzlich eine Option für die Verminderung von Emissionen der Zementherstellung darstellen; allerdings müsste das CO₂ hierfür entweder bereits in relativ reiner Form vorliegen (hierzu liegen derzeit keine Informationen vor) oder entsprechend gewaschen werden. Darüber hinaus müssen die entsprechenden Absatzmärkte bzw. Verwendungszwecke in ausreichendem Maße vorhanden sein. Insgesamt wird das Potenzial für CCU derzeit relativ zurückhaltend eingeschätzt. Siehe für weitere Informationen zu CCU auch Kapitel 3.1.

4. CCS

Carbon Capture and Storage (CCS) ist aus Sicht der Autoren eher eine Verdrängungs- als eine tatsächliche Vermeidungsoption, da diese nicht die Entstehung des CO₂, sondern, sofern die Technik in der Praxis beherrschbar ist, nur dessen Emission vermeidet. Das Potenzial für CO₂ Lagerstätten in Deutschland wird derzeit sehr unterschiedlich eingeschätzt, darüber hinaus sind Risiken und Akzeptanzfragen ebenfalls noch ungeklärt. Grundsätzlich, technisch, könnte CCS für die Zementindustrie zum Einsatz kommen. Siehe für weitere Informationen zu CCS auch Kapitel 3.1.

Nachfrageseitige Handlungsoptionen

Als Handlungsoptionen zur Reduktion des Einsatzes von Beton und damit auch zur Produktionsreduktion von Zement sind folgende Möglichkeiten in Betracht zu ziehen:

- die verstärkte Nutzung alternativer Baumaterialien, beispielsweise Holz, im Wohngebäudebereich,
- Verbesserung der Haltbarkeit von Beton und damit Steigerung der Lebensdauer von Bauwerken in allen Sparten (Hoch- und Tiefbau, Wohn- und Nichtwohngebäudebau),
- eine Steigerung der Wiederverwendung von Betonbruch aus Bauschutt zur teilweisen Substitution von Neubeton.

Der wichtigste Nachfrager nach Bindemitteln und damit Zement ist die inländische Bauwirtschaft.¹⁶ Die Zementindustrie ist von der Nachfrage dieses Wirtschaftszweiges abhängig und damit auch von dessen Konjunkturzyklen einerseits und dessen Materialeffizienz andererseits.

In den vergangenen Jahren sind die Bauinvestitionen in Deutschland ganz erheblich gestiegen. Von knapp 200 Mrd. € in 2005 stiegen die absoluten Bauinvestitionen in Deutschland auf rund 293 Mrd. € in 2014 (in jeweiligen Preisen), der Anteil der Bauinvestitionen am gesamten jeweiligen BIP Deutschlands stieg im gleichen Zeitraum von 8,7 % auf 10,1 %. Im gleichen Zeitraum stieg die Zementproduktion lediglich von 31 Mio. t auf 32,1 Mio. t bzw. 3,5 %.¹⁷

Folgende Faktoren kommen alleine oder in Kombination als Erklärung für diese augenfällige Differenz in Frage:

- Die Werthaltigkeit des Bauens hat sich gesteigert und/oder Beton wurde effizienter eingesetzt
- Es wurde verstärkt Zement importiert
- Zement wurde effizienter eingesetzt.

¹⁶ Direkte Abnehmer von Zement waren zu folgenden Anteilen in 2011: Transportbeton (56 %), Hersteller von Betonbauteilen (26 %), Sackzement (7 %), weitere 11 % für Mörtel, Putz und Estriche VDZ 2015.

¹⁷ Zu beachten ist bei diesem Vergleich, dass die Zementproduktion über den gesamten genannten Zeitraum bei geringem Anstieg stabil geblieben ist, es zwischen einzelnen Produktionsjahren innerhalb dieses Zeitraums jedoch Schwankungen gab, die größer waren als der hier genannte Anstieg im direkten Vergleich 2005 mit 2014.

Um einen besseren Einblick in die Werthaltigkeit des Bauens und die Entwicklung der Baukosten/Baupreise bzw. die aktuellen Qualitäts- und Ausstattungsstandards zu erhalten, kann auf die Berichte der Baukosten-Senkungs-Kommission verwiesen werden (Neitzel et al. 2015). Die Entwicklung der Werthaltigkeit des Bauens kann an dieser Stelle jedoch nicht näher untersucht werden.

Die Importe von Zement und Klinker in Summe (wobei Klinker nur einige wenige Tausend Tonnen ausmacht) sind zwischen 2008 und 2012 nahezu unverändert geblieben (zwischen maximal 1,388 Mio. t in 2013 und minimal 1,209 Mio. t in 2009) (VDZ 2015). Dieser Faktor kommt also als Erklärung nicht in Frage

Erwähnt werden sollte auch, dass die Produktion von Transportbeton in den vergangenen Jahren in Deutschland deutlich gestiegen ist und somit auch der Lieferverkehr zugenommen hat. Wurden in 2007 noch 40,8 Mio. m³ Transportbeton produziert, waren es im Jahr 2014 46,8 Mio. m³, dies entspricht einer Steigerung um 14,7 % (BBS 2015). Der Bruttoproduktionswert der Transportbetonproduktion ist im Zeitraum 2008 bis 2013 um 12,6 % gestiegen, der Bruttoproduktionswert des Trocken-Betons im gleichen Zeitraum um 18,2 % (Destatis 2014).

Die Produktion von Beton und Zement fallen also in den letzten Jahren auseinander. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

5.3.4 Mögliche Entwicklung von Produktion und Nachfrage

Die Produktion von Zement nimmt global betrachtet zu. Wurden im Jahr 2008 2.842 Mio. t Zement produziert, waren dies im Jahr 2012 bereits 3.727 Mio. t; dies entspricht einem Wachstum von über 30 % in nur vier Jahren. Die Produktionsentwicklung divergiert je nach Weltregion sehr stark. In Europa betrug die Produktion im Jahre 2008 insgesamt knapp 320 Mio. t, im Jahr 2012 waren es noch rund 248 Mio. t, was einem Rückgang um rund 22 % entspricht. Dagegen stieg die Produktion Asien von 2.030 Mio. t in 2008 auf 2,941 Mio. t in 2012 an, entsprechend einem Wachstum von 45 % in nur vier Jahren (VDZ 2015).

Die Produktion von Zement ist direkt an die Konjunktur der Bauwirtschaft gekoppelt, und so spiegeln diese Produktionsdaten auch die beiden Faktoren „allgemeine wirtschaftliche Entwicklung“ sowie „Struktur der wirtschaftlichen Entwicklung“ wieder.

Die Autoren gehen davon aus, dass der zukünftige Bedarf an Baumaterialien und damit auch an Bindemitteln wie Zement in unterschiedlichen Gruppen von Ländern von unterschiedlichen Faktoren abhängt. Es ist anzunehmen, dass:

- es **in den entwickelten Ländern** nur wenige Entwicklungen geben wird, die für eine Zunahme des Bedarfs an Baumaterial sprechen. Das Bevölkerungswachstum als ein wichtiger Treiber wird maximal stagnieren, falls die Migrationsbewegungen dauerhaft anhalten und an Stärke eher noch zunehmen. Der Trend hin zu Ein-Personen-Haushalten und zu größeren Wohnflächen pro Kopf wird in Sättigung gehen. Daher **ist von maximal stagnierendem bis abnehmendem Bedarf auszugehen**, auch wenn der Bau von Infrastruktureinrichtungen z.B. für erneuerbare Energieanlagen (Fundamente für Biogasanlagen und Windkraftträder, etc.) sowie von, falls der bestehende Investitionsstau überwunden werden sollte, zusätzlicher

oder erneuerter Verkehrsinfrastruktur für einen gewissen zusätzlichen Bedarf an Zement sorgen wird.

- es **in den Schwellen- und Entwicklungsländern** aufgrund des bis 2050 deutlich stärkeren Wirtschaftswachstums (siehe Kapitel 4) und der ebenso deutlich stärker wachsenden Bevölkerung zu ganz erheblichen Bedarfszuwächsen kommen wird. Durch das steigende Wohlstandsniveau wird die beanspruchte Wohnfläche pro Kopf steigen, wenn man annimmt, dass in der Tendenz auch weiterhin das „westliche Wohlstandsmodell“ als Vorbild dient. Ob auch der bei uns zu beobachtende Trend hin zu weniger Personen pro Haushalt zu beobachten sein wird, lässt sich aus Sicht der Autoren derzeit nicht sagen. Unabhängig von diesem letzten Punkt **ist in Summe von einem deutlich steigenden Bedarf an Baumaterialien auszugehen**, denn auch der durch das Wirtschaftswachstum getriebene zunehmende Bedarf an beispielsweise Verkehrsinfrastruktur wird hier den ein wesentlicher Treiber sein.

Die Produktion und der Bedarf der Weltregionen an Zement fallen zusammen, Handel findet nur und auch nur in geringem Umfang innerhalb der einzelnen Weltregionen statt, da der Zementmarkt aufgrund der relativ zur Werthaltigkeit des Produktes hohen Transportkosten einen Lokal- oder Regionalmarkt darstellt (Schlomann et al. 2011). In Deutschland betrug der Gesamtexport im Jahr 2014 knapp 6,2 Mio. t Zement bzw. rund 19 % der Gesamtproduktion. Davon gingen rund 5,1 Mio. t bzw. 83 % in die EU, rund 0,8 Mio. t oder rund 12 % in das restliche Europa und rund 0,2 Mio. t bzw. rund 2,5 % nach Afrika (vermutlich in die Staaten des Maghreb und nach Ägypten). Die Exporte in alle anderen Weltregionen sind unerheblich (VDZ 2015).

Wesentliche Änderungen an diesen Verhältnissen sind nicht zu erwarten, allenfalls, dass die geringen Exporte nach Afrika durch Produktion vor Ort ersetzt werden. Die Zementproduktion in Deutschland wird sich auch weiterhin im Wesentlichen parallel zum Bedarf in Deutschland entwickeln.

5.4 Grundstoffchemie

5.4.1 Bedeutung der Grundstoffchemie für die deutsche Wirtschaft

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Chemische Industrie in Deutschland (ohne die Pharmazeutische Industrie) ist nach dem Umsatz, mit einem Anteil von ca. 28,4 % an der Produktion, die größte in der EU. Das entspricht ca. 4,7 % der weltweiten Chemieproduktion (Cefic 2014). Sie setzte 2014 145,2 Milliarden € um (VCI 2015, S. 33). Dabei werden ca. 66 % der Produkte in der Chemisch-Pharmazeutischen Industrie weiterverarbeitet (VCI 2015, S. 51). Außerdem versorgt sie die restlichen Industrien mit chemischen Produkten. Die Polymere bilden dabei, mit fast 20 Mio. t im Jahre 2014, mengenmäßig die größte Gruppe der gelieferten Produkte (PlasticsEurope Deutschland e.V. 2015, S. 13). Der Umsatz der Chemischen Industrie hat sich in den letzten 20 Jahren fast verdoppelt (VCI 2015, S. 31).

Die Chemische Industrie kann in die Grundstoffchemie einschließlich der Industriechemikalien, die Feinchemikalien und die Spezialitäten eingeteilt werden. Der Anteil

der Grundstoffchemie am Produktionswert der gesamten Chemischen Industrie (einschließlich der Pharmazeutischen Industrie) liegt bei ca. 50 % (VCI 2015, S. 35).

Die Chemische Industrie beschäftigte 2014 rund 330.000 Mitarbeiter (VCI 2015, S. 53). Die Exporte an chemischen Erzeugnissen lagen 2014 bei 107,2 Milliarden € und die Importe bei 74,8 Milliarden €. Die Exportquote liegt damit bei 73,8 % (VCI 2015, S. 82–84). Dabei dominiert mit über 55 % der Handel mit anderen EU-Staaten (Cefic 2014).

5.4.2 Bedeutung für den Klimaschutz, THG-Emissionen und Energieeinsatz

Die Chemische Industrie ist eine der energieintensivsten Industrien mit einem Energieverbrauch von 626 PJ im Jahre 2013¹⁸, das entspricht ca. 23,4 % des Energieverbrauchs des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland (VCI 2015, S. 77). Der Stromverbrauch lag im selben Jahr bei knapp 179 TJ, das entspricht 21,6 % des Verarbeitenden Gewerbes (VCI 2015, S. 73). Sie ist damit nach der Eisenproduzierenden Industrie zweitgrößter industrieller Energieverbraucher. Die Branche ist zudem der mit Abstand bedeutendste Stromverbraucher und der größte industrielle Erdgasnutzer.

Die Grundstoffindustrie hat dabei für das Jahr 2011 einen Anteil von 19,3 % am Primärenergiebedarf und 8,4 % am Stromverbrauch (AGEB 2013; Fraunhofer ISI 2013). Dabei liegt der Energieverbrauch der Grundstoffchemie bei ca. 84 % der gesamten Chemischen Industrie (AGEB 2016).

Hinzu kommt, dass bei der Produktion in der Chemischen Industrie weitere Treibhausgase entstehen, wie z.B. das Lachgas (N_2O) aus der Produktion von Salpetersäure und Adipinsäure. Strengere Umweltgesetze und freiwillig von den Unternehmen ergriffene Maßnahmen führten in den letzten Jahren zu einer bedeutenden Reduktion. Außerdem wird Prozess- CO_2 in einigen Prozessen, wie bei der Herstellung von Ammoniak und Ethylenoxid, emittiert (siehe unten).

Für 2013 gibt der VCI an, dass die gesamte Chemische Industrie 44,1 Mio. t CO_2 äq. emittiert hat (VCI 2016). Davon sind wiederum 87 % der Grundstoffchemie zuzurechnen (McKinsey 2006, S. 57), dies entspricht Gesamtemissionen von 38,4 Mio. t CO_2 äq. Im Nationalen Inventarbericht (UBA 2016b) werden die Emissionen der Chemieindustrie und der Grundstoffchemie nicht separat ausgewiesen.

Brennstoffe werden in der Chemischen Industrie für die Bereitstellung von Prozesswärme, zur thermischen Aufbereitung und für die Erzeugung von Dampf benutzt. Beim Strom werden etwa 70 % für motorische Antriebe und 20 % für elektrochemische Prozesse eingesetzt (Saygin et al. 2008). Eine Zusammenfassung des Produktionswertes und des Energieverbrauchs zeigt

Tabelle 20.

Tabelle 20: Bruttoproduktionswert und Endenergieverbrauch (ohne nicht-energetischer Verbrauch) der Chemischen Industrie in Deutschland

¹⁸Gesamtendenergieverbrauch

Branche	Bruttoproduktionswert (Mrd. Euro/a)	Strom (PJ/a)	Gesamte Endenergie in (PJ/a)
Chemische Industrie	145,2 (2014)	178,9 (2013)	626,4 (2013)
Grundstoffchemie	Ca. 50% der Chemischen Industrie	158 (2011)	508,8 (2011)

Quelle: AGEB 2013, S. 27

5.4.3 Produktions- und nachfrageseitige Handlungsoptionen zur THG-Reduktion

Konkrete, auf einzelne Produktionsprozesse bzw. Produkte der Grundstoffchemie bezogene Handlungsoptionen werden in den folgenden Einzelanalysen für bestimmte Produkte beschrieben. Für die Grundstoffchemie als Ganzes ist die Beschreibung von konkreten produktionsseitigen Handlungsoptionen aufgrund der schiereren Vielzahl der Produktionsprozesse im Rahmen dieser Studie nicht möglich. An dieser Stelle werden daher einige übergreifende Punkte aufgegriffen und dargestellt, mit denen die Grundstoffchemie als Ganzes adressiert werden kann. Dies sind einige grundlegende politische Handlungsoptionen sowie einige nachfrageseitige Handlungsoptionen, die letztlich die Endverbraucher von Endprodukten der Wertschöpfungskette betreffen.

Grundsätzliche Handlungsoptionen der Politik

Um die Klimaziele für 2050 zu erreichen, müssten Maßnahmen zur schnelleren und vertieften Diffusion der technischen Handlungsoptionen (siehe dazu auch das folgende Unterkapitel 5.4.5) ergriffen werden. Einige grundsätzliche Möglichkeiten sind:

Ordnungspolitik

- Die vorhandenen energiepolitischen Steuerungsinstrumente sollten langfristig und nach ökologischer und ökonomischer Effizienz ausgerichtet werden. Dies betrifft beispielsweise die verschiedenen Regelungen zur Entlastung von Unternehmen des Produzierenden Gewerbes bei der Energiesteuer.
- Es sollten einheitliche Standards für die Energieeffizienz auf europäischer Ebene, wie z.B. für elektrische Maschinen, geschaffen werden. Eine Erweiterung der Ökodesign-Richtlinie für (unabhängig von den jeweiligen Bedingungen des Standortes) standardisierbare Teilprozesse oder eine separate Regulierung, die sich an der Ökodesign-Richtlinie orientiert, könnte ein zielführender Ansatz sein, der geprüft werden sollte.

Förderung

- Forschung und Entwicklung mit spezifischem Bezug zur Ressourcen- und Energiethematik der Chemieindustrie sollte durch verstärkte staatliche Förderung gesteigert werden. Beispiele wären eine Förderung der F&E:
 - zur Nutzung des Prozess-CO₂ (CCU),
 - zur Herstellung von Chemiegrundstoffen aus Biomasse,
 - zur Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativen Quellen,

- zur effizienten Kälteerzeugung,
 - zu energieeffizienten Katalysatoren,
 - zur energetischen Optimierung von Trennapparaten.
- Für die Grundstoffchemie relevante Förderprogramme sollten besser bekannt gemacht werden.

CCU (Carbon Dioxide Capture and Utilisation): Eine Nutzung von CO₂ als Edukt im industriellen Maßstab würde das in den Verbrennungs- und chemischen Prozessen entstehende CO₂ verringern können. Jedoch weist das CO₂-Molekül eine hohe thermodynamische Stabilität auf und ist damit sehr reaktionsträge. Dies stellt hohe Anforderungen an Katalysatoren und Reaktionsbedingungen der Synthesen. Trotzdem laufen seit einigen Jahren Bemühungen, aus CO₂ Chemieprodukte herzustellen. Mögliche Produkte sind Carbamate, Carboxylate, Carbonate und verschiedene Polymere.

Außerdem kann CO₂ mit Hilfe von Wasserstoff aus regenerativen Energien reduziert werden (Power to Gas). Dabei können Methanol, Ameisensäure usw. hergestellt werden, aus denen dann Olefine, Treibstoffe und andere Chemikalien produziert werden können. Die Power to Gas Technologie ist noch in der Phase der Forschung und Entwicklung bzw. in der Pilotphase. Damit ein Prozess effektiv die CO₂-Emissionen reduzieren kann, muss er eine Netto-CO₂-Senke darstellen und mit den konventionellen Prozessen wirtschaftlich konkurrieren können. Das bei der Herstellung von Ammoniak anfallende CO₂ ist wegen seiner Menge und Reinheit am besten für CCU-Prozesse geeignet.

Finanzielle Anreize

Die (vorzeitige) Substitution älterer Anlagen könnte steuerlich begünstigt werden, wenn dadurch eine wesentliche Reduktion der THG-Emissionen erzielt wird, was, wie in Kapitel 5.4.5 dargelegt (z.B. bei der Ethylenproduktion) durchaus der Fall sein kann.

- Es könnten Instrumente eingeführt werden, um besonders ressourcen- und energieeffiziente Technologien finanziell zu unterstützen, wenn diese zurzeit noch nicht wirtschaftlich sind. Dies kann in Form von Steueranreizen geschehen. Beispiele hierzu sind Technologien auf der Grundlage von Biomasse und regenerativem Wasserstoff mit dem Ziel Chemierohstoffe und chemische Produkte herzustellen.
- Stromeigenerzeugung (nicht nur der Chemischen Industrie) durch KWK bzw. aus Erneuerbaren Energien sollte rentabel sein und dies durch das KWKG und das EEG gewährleistet sein/bleiben. Eine EEG-Umlage auf eigenerzeugten Strom erscheint den Autoren in diesem Zusammenhang kontraproduktiv. Für die Strom(eigen)erzeugung aus Abwärme könnten zusätzliche finanzielle Anreize geschaffen werden.
- Für die Ressourcen- und Energieeffizienz kontraproduktive Subventionen sollten abgebaut werden. Das heißt, insbesondere auch Maßnahmen, welche die Rentabilität entsprechender Investitionen mindern, wie beispielsweise Energiesteuerentlastungen, sollten kritisch überprüft werden.

Verringerte Endnachfrage nach den Enderzeugnissen der Wertschöpfungsketten

Charakteristisch für die Grundstoffindustrie ist, dass die Produkte kaum an Endverbraucher geliefert werden, sondern in der Regel in der Chemischen Industrie und anderen Industrien weiterverarbeitet werden. Zu den verarbeitenden Sparten der Chemischen Industrie gehören beispielsweise die Kosmetikindustrie, Farben und Lacke, pharmazeutische Produkte usw.

Eine Nachfragebeeinflussung der nachgeschalteten Industrien kann durch eine Anzahl von Maßnahmen erfolgen:

- Umweltfreundliches Produktdesign hinsichtlich Langlebigkeit, Wiederverwendbarkeit, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit durch:
- Schaffung einer fundierten Datengrundlage zur Beurteilung von Obsoleszenz (Prakash et al. 2015),
- Entwicklung eines Umweltbewusstseins bei den Verbrauchern,
- Stärkung der Rechte der Konsumenten bezüglich der Garantieansprüche,
- Verpflichtung der Hersteller von konsumnahen Produkten zur Ermöglichung der Recyclingfähigkeit ihrer Produkte, wie z.B. Autos, elektrischen Geräten, Kunststoffteile im Bausektor usw.,
- Verringerung der Menge der Verpackungen durch ihre Besteuerung,
- Verbot von Überdüngung in der Landwirtschaft,
- Ausbau des öffentlichen Verkehrssystems mit Hilfe von öffentlichen Zuschüssen, um den Individualverkehr zu verringern,
- Steigerung des Anteils abbaubarer Kunststoffe auf Basis von Biomasse durch verstärkte Nachfrage seitens der Endverbraucher. Der Anteil abbaubarer Kunststoffe kann durch folgende Maßnahmen gesteigert werden:
 - Bewusstes Kaufen von abbaubaren Kunststoffen, z.B. im Verpackungssektor sowie für die Landwirtschaft und den Gartenanbau,
 - Gesetzliche Regelungen für die Substitution von konventionellen Kunststoffen durch abbaubare Kunststoffe bei bestimmten Anwendungen,
 - Förderung der Forschung und Entwicklung.

Die erste und zweite Maßnahme würden die Nachfrage steigern und damit die Kosten reduzieren. Dadurch erhöht sich die Konkurrenzfähigkeit.

5.4.4 Mögliche Entwicklung von Produktion und Nachfrage

Zukünftige Entwicklung des Weltmarktes

Während der weltweite Umsatz der Chemischen Industrie im Jahre 2003 noch 1.236 Milliarden € betrug, ist er im Jahre 2013 auf 3.156 Milliarden € gestiegen (Cefic 2014). Der internationale Bedarf an Chemieprodukten wird bis 2050 weiter wachsen. Setzt man eine lineare Extrapolation aus den letzten 20 Jahren an, erhöht sich der Bedarf um ein Vielfaches. Dies gilt sowohl für Chemiegrundstoffe als auch für die Spezialitätenchemie (Prognos und VCI 2012, S. 10).

Dabei beobachtet man zwei Trends, einmal bzgl. der Märkte und zum anderen bzgl. der Rohstoffquellen. Den ersten Trend kann man sehr gut anhand von China aufzeigen. China steht heute an erster Stelle in der Chemieproduktion, vor den USA, nachdem es bis in die 80er Jahre hinein nur eine relativ kleine und veraltete Chemische Industrie besaß. Im Zeitraum von 2003–2013 ist die Produktion von 116 Milliarden € auf 1.047 Milliarden € angewachsen, jedoch wird der chinesische Markt in den nächsten 15 Jahren eine Sättigung erreichen. Dafür werden andere aufstrebende Wirtschaftsregionen, wie z.B. Indien, Afrika und Lateinamerika, nachziehen.

Der zweite Trend ist seit den 90er Jahren in den erdölproduzierenden Ländern zu beobachten. Am Persischen Golf werden große Kapazitäten für Chemiegrundstoffe aufgebaut; die Produkte gehen hauptsächlich in die aufstrebenden Märkte in Südostasien. Man strebt aber auch den Aufbau einer eigenen integrierten Chemischen Industrie an.

Außerdem kann man annehmen, dass der internationale Handel durch den Abbau von Handelsbarrieren intensiviert wird. Dies führt ebenfalls zu einer Steigerung des weltweiten Bedarfs an Chemieprodukten.

Getrieben wird diese Entwicklung durch die Verdrängung klassischer Werkstoffe, von Naturstoffen und Metallen durch Kunststoffe. In vielen Fällen wird es Composite aus traditionellen Werkstoffen und Kunststoffen geben. In der Landwirtschaft wird die Intensität der Düngung wegen Umweltüberlegungen zwar zurückgehen, aber die intensive und innovative Landwirtschaft wird sich immer mehr durchsetzen. Beispiele für intensive Landwirtschaft sind intensive Düngung, intensive Verwendung von Pflanzenschutzmitteln, Massenproduktion, Intensivtierhaltung und Verwendung moderner Methoden zur Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion. Dies alles verlangt einen höheren Einsatz an Chemieprodukten.

Zur innovativen Landwirtschaft zählen Verwendung von leistungsfähigen und selektiven Pflanzenschutzmitteln, zielgerichtete Düngung und Verwendung von innovativen Konzepten für die Landwirtschaft.

Wann eine Sättigung der aufstrebenden Märkte erreicht wird, ist schwer zu sagen, da man die Entwicklungsgeschwindigkeit nicht voraussagen kann. Eine Studie von Prognos geht von einem jährlichen Wachstum der weltweiten Chemischen Industrie bis 2030 von 4 % aus (Prognos und VCI 2012, S. 10)

Zu erwartende Entwicklungen bei wichtigen Treibern der Nachfrage

In den nächsten 35 Jahren wird in vielen Abnehmersektoren der Chemischen Industrie ein Produktwechsel bzw. eine Änderung der Produktverwendung stattfinden. Dies wirkt dann als Treiber für den Produkt- und Technologiewechsel bei den Chemiegrundstoffen. Die im Folgenden genannten Beispiele zeigen, dass sich insbesondere die Nachfrage nach Kunststoffen und damit auch nach deren Bausteinen, die in der Grundstoffchemie gewonnen werden (z.B. die hier in Speziellen untersuchten Grundstoffe Ethylen, Propylen, Methanol, Chlor und Ammoniak), positiv entwickeln wird:

- **Automobilindustrie:** In der Automobilindustrie werden Kunststoffe Metalle in vielen Anwendungen verdrängen (GKV 2016)¹⁹. Dazu gehören auch Composite-Werkstoffe für den Karosseriebau. Auf der anderen Seite wird sich die Antriebstechnik ändern. Das Elektroauto wird bis 2025 konkurrenzfähig sein. Man erwartet, dass ab 2035 die Brennstoffzelle einen bedeutenden Anteil am Markt erobern wird. Für beide Antriebstechniken ist die Chemische Industrie ein bedeutender Lieferant, z.B. von Akkumulatoren, Kunststoffen, Membranen, Katalysatoren usw.
- **Bausektor:** Im Bausektor werden heute ca. 23 % der Kunststoffe verwendet (GKV 2016). Dieser Anteil wird ebenfalls zunehmen. Dabei werden klassische Werkstoffe, wie Holz und Metalle, ersetzt.
- **Verpackungssektor:** Der Verpackungssektor beansprucht ca. 35 % des Kunststoffverbrauchs in Deutschland (GKV 2016). Im Lebensmittelbereich wirkt der Anstieg des Anteils des „Convenience Food“ fördernd für die Kunststoffverpackungen. Auf der anderen Seite versucht der Gesetzgeber die Flut an Verpackungen im Müll einzudämmen. Es kann sich auch ein Bewusstsein zur Reduktion der Verpackungsabfälle entwickeln. Es ist daher schwierig, eine Aussage über die Zukunft der Kunststoffverpackungen zu machen.
- **Elektrotechnik und Elektronik:** Auch der Anteil der Kunststoffe in der Elektrotechnik und Elektronik wird zunehmen (GKV 2016). Man sucht in der organischen Elektronik eine Alternative zur Halbleiterelektronik. Neben organischen Solarzellen und organischen Leuchtdioden gibt es bereits Produkte der organischen Elektronik für spezielle Anwendungen. Man erwartet, dass dieser Anteil der Kunststoffe und anderer Chemieprodukte zunehmen wird.

Darüber hinaus wird der Bedarf an Chemieprodukten, insbesondere in den aufstrebenden Märkten der Schwellenländer durch folgende sozio-ökonomische Treiber getrieben:

- **Zunahme der Bevölkerung:** Bis 2050 wird wahrscheinlich die 10-Milliarden-Marke erreicht sein (UN 2015b, S. 1).
- **Anstieg des Lebensstandards großer Teile der Bevölkerung:** In vielen Teilen der aufstrebenden Märkte beobachtet man die Entstehung einer finanzkräftigen Mittelschicht, die den Konsum vorantreibt.
- **Zunahme des Welthandels:** Der Welthandel ist in den letzten 20 Jahren um fast 6 % jährlich angestiegen (Biermann 2013, S. 351–352). Dieses Wachstum kann anhalten oder sogar zunehmen, wenn es gelingt, die Handelsbarrieren abzubauen.

Bezogen auf die Chemische Industrie bedeuten die geschilderten wahrscheinlichen Entwicklungen auf den Weltmärkten, dass Deutschland eventuell mehr Chemiegrundstoffe importieren muss und dafür Spezialitäten exportieren kann. In den erdöl- und erdgasproduzierenden Ländern, wie z.B. im Nahen Osten und Russland, wurde und wird eine bedeutende Chemiegrundstoffindustrie aufgebaut. Die Herstellkosten sind aufgrund der niedrigen Rohstoffpreise dort wesentlich geringer als in Deutschland. Mittel- und langfristig sind Exporte nach Europa wahrscheinlich. Mindestens veraltete An-

¹⁹ heutiger Anteil 10%

lagen auf ungünstigen Standorten in Europa sind dann nicht mehr konkurrenzfähig. Dagegen spielen die Rohstoffkosten bei den Spezialitäten eine untergeordnete Rolle. Hier stellen eher das Know-how, die Forschung und Entwicklung und die Nähe zu den Kunden wichtige Wettbewerbsfaktoren. Dadurch würden diese Spezialitäten, aber auch die Biotechnologie, in den Vordergrund der deutschen Chemieproduktion rücken. Der Energiebedarf und die damit verbundenen THG-Emissionen Deutschlands würden als Konsequenz dieser erwarteten Entwicklung aus folgenden Gründen weiter zurückgehen:

- Die Produktion von Chemiegrundstoffen macht über 80 % der Emissionen der Chemieindustrie aus. Ein Zurückfahren der Produktion sowie die Steigerung der Importe bei den Chemiegrundstoffen würden den Energieverbrauch und die Emissionen verringern, d.h. diese werden in andere Wirtschaftsregionen verlagert.
- Gleichzeitig wird die Stoff- und Energieeffizienz steigen bzw. es werden Maßnahmen getroffen, um die Emissionen zu reduzieren.
- Grundstoffe und Energien auf regenerativer Basis werden zur Verringerung der THG-Emissionen beitragen. Das Ausmaß der Verringerung hängt von der Entwicklungsgeschwindigkeit ab.
- Innerhalb der EU wird die Konkurrenz zwischen den Chemiestandorten zunehmen. Begünstigt werden große integrierte Standorte am Meer oder an Wasserstraßen, die über eine höhere Gesamteffizienz verfügen.

5.4.5 Analyse ausgewählter Produkte der Grundstoffchemie

Im Folgenden werden einige für die Emission von Treibhausgasen besonders relevante Produkte exemplarisch näher beleuchtet:

- Ammoniak
- Ethylen/ Propylen
- Methanol
- Chlor
- Sauerstoff

5.4.5.1 Ammoniak

Bedeutung in der Wertschöpfungskette

Ammoniak (NH_3), einer der wichtigsten anorganischen Grundstoffe, wird in Deutschland zu ca. 80 % für die Herstellung von Düngemitteln verwendet (IPTS 2007, S. 35). Direkte Folgeprodukte aus dem Düngemittelsektor sind Harnstoff und verschiedene Nitrate. Außerdem wird das Folgeprodukt Salpetersäure für die Herstellung von Stickstoffdüngern und für den Aufschluss von Rohphosphaten eingesetzt. Damit ist die Entwicklung des Ammoniakbedarfs stark von der Entwicklung des Düngemittelmarktes abhängig. Da die Bodendüngung immer effektiver wird und man aus Umweltschutzüberlegungen Düngemittel sparsamer einsetzt, stagniert der Bedarf an Dünger bzw. geht seit einigen Jahren trotz steigender landwirtschaftlicher Produktion zurück. So

wurden im Jahre 2013/14 1,675 Mio. t N-Dünger (bezogen auf Stickstoff) gegenüber 1,848 Mio. t N im Jahre 2000/01 abgesetzt (IVA 2014). Zu den technischen Folgeprodukten gehören Melamin, Kunststoffe, Chemiefasern, Hydrazin, Amide, Amine usw. Kunststoffe und Chemiefasern stellen den größten Anteil der technischen Folgeprodukte des Ammoniaks dar.

Betrachtet man die letzten 20 Jahre, beobachtet man einen leichten Anstieg der Produktion von 2,170 Mio. t (bezogen auf den Stickstoff-Gehalt) im Jahre 1994 auf 2,540 Mio. t im Jahre 2014 (VCI 2015, S. 16), wobei die Produktion seit 2007 annähernd stagniert. Der Anstieg ist hauptsächlich auf die zunehmende Salpetersäureproduktion zurückzuführen. Ammoniak wird in Deutschland derzeit an fünf Standorten produziert. Während des oben genannten Zeitraumes ist die Ammoniakproduktion weltweit um das 2,5-fache gestiegen (UBA 2014b). Die Ammoniakimporte haben sich während dieses Zeitraumes auf 0,417 Mio. t N fast verdreifacht, während die Exporte fast gleich geblieben sind (im Jahre 2013 0,322 Mio. t N) (IVA 2014, S. 16).

Grundzüge des Herstellungsprozesses und damit verbundene THG-Emissionen (und Energieverbräuche)

Die Herstellung von Ammoniak besteht traditionell aus zwei integrierten Prozessstufen: dem Synthesegasprozess²⁰ und der Ammoniaksynthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren.

Zwei Verfahren werden dabei für die Herstellung des Synthesegases eingesetzt: das Steam Reforming und die partielle Oxidation.

Für das Steam Reforming muss Wärme von außen, im Regelfall durch Verbrennung von Erdgas, zugeführt werden. Die überschüssige Wärme dient der Produktion von Hochdruckdampf zur prozessinternen Verwendung. Überschüssiger Dampf wird an andere Anlagen am Standort geliefert (IPTS 2007).

Bei der partiellen Oxidation herrscht ein geringerer Grad der Energieintegration als beim Steam Reforming. Die Kompressoren für die Zerlegung der Luft werden elektrisch oder mit Dampf angetrieben.

In der zweiten Hauptprozessstufe, dem Haber-Bosch-Verfahren, wird das Gasgemisch aus der Synthesegasstufe mit einem Molverhältnis von 3:1 Wasserstoff zu Stickstoff in Ammoniak umgesetzt.

In Summe liegen die resultierenden direkten THG-Emissionen aus der Herstellung von Ammoniak derzeit bei rund 5,8 Mio. t CO₂ (davon 1,9 Mio. t CO₂ energiebedingt, 3,9 Mio. t CO₂ prozessbedingt), hinzu kommen indirekte THG-Emissionen durch den Stromverbrauch von ca. 0,2 Mio. t CO₂. Insgesamt, über beide hier beschriebenen Verfahren hinweg, werden derzeit (2014) ca. 4,8 Mio. t CO₂ äq. an Prozessemissionen erzeugt (UBA 2016b). Es werden ca. 0,9 Mio. t CO₂ äq. für die Herstellung von Harnstoff verbraucht, so dass prozessbedingte Emissionen in Höhe von 3,9 Mio. t CO₂ äq. in die Atmosphäre abgegeben werden. Weitere, kleinere Mengen des Prozess-CO₂ werden gereinigt und in der Getränkeindustrie, als Trockeneis, technisches Gas, Kälte- und

²⁰ Synthesegas ist ein Gasgemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Es wird aus Kohlenwasserstoffen bzw. Kohle hergestellt. Im Falle der Ammoniak-Herstellung wird das Kohlenmonoxid in Kohlendioxid konvertiert und abgetrennt.

Kühlmittel, Extraktionsmittel usw. eingesetzt. Hierzu sind keine genauen Daten verfügbar. Tabelle 21 fasst diese Werte zusammen.

Tabelle 21: Zusammenfassende Darstellung der derzeitigen THG-Emissionen der Ammoniakproduktion (energiebedingte Emissionen: 2013; Prozessemissionen: 2014)

Verfahren	CO ₂ äq. [Mio. t], brennstoffbedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], strombedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], pro- zessbedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], Summe
Steam Reforming	0,8	0,13	-	0,93
Part. Oxidation	1,1	0,1	-	1,2
Über beide Verfahren hinweg	-	-	3,9	6,03

Im Folgenden werden die in Tabelle 21 genannten Werte etwas genauer ausdifferenziert.

Der spezifische Energieverbrauch beträgt für das Steam Reforming 8,7 GJ pro Tonne Ammoniak. Darüber hinaus werden pro Tonne Ammoniak knapp 0,5 GJ Strom aufgewendet. Außerdem entstehen beim Steam Reforming durch die Umsetzung von Kohlenwasserstoffen mit Hilfe von Wasserdampf spezifische Prozessemissionen von ca. 1,15 – 1,4 Tonnen CO₂ pro Tonne Ammoniak²¹. Die direkten energiebedingten THG-Emissionen des Steam Reforming summieren sich bei der derzeitigen Produktion auf rund 0,8 Mio. t CO₂ pro Jahr. Hinzu kommen noch rund 0,13 Mio. t CO₂ pro Jahr an indirekten Emissionen durch den Strombedarf.

Für Brennstoffe und Dampf fällt bei der partiellen Oxidation ein Energieaufwand von 16,5 GJ pro Tonne Ammoniak an (es werden im Wesentlichen schweres Heizöl sowie Destillationsrückstände eingesetzt), hinzu kommen noch knapp 0,5 GJ Strom (Saygin et al. 2008). Darüber hinaus fallen ca. 2 – 2,6 Tonnen CO₂ pro Tonne Ammoniak als Prozessemissionen an²². Der spezifische Energieaufwand (und dementsprechend die spezifischen energiebedingten Emissionen) als auch die entstehenden spezifischen Prozessemissionen sind hier also wesentlich höher als beim Steam Reforming.

Die direkten energiebedingten THG-Emissionen bei der partiellen Oxidation summieren sich bei der derzeitigen Produktion auf knapp 1,1 Mio. t CO₂ pro Jahr. Hinzu kommen

²¹ Es handelt sich hierbei jedoch um auch auf Schätzungen beruhende Mittelwerte, die daher Ungenauigkeiten enthalten können. In der gezeigten Tabelle wird daher nur der Gesamtwert der Prozessemissionen angegeben, wie er im Nationalen Inventarbericht des UBA für die Ammoniakproduktion wiedergegeben ist.

²² Es handelt sich hierbei jedoch um auch auf Schätzungen beruhende Mittelwerte, die daher Ungenauigkeiten enthalten können. In der gezeigten Tabelle wird daher nur der Gesamtwert der Prozessemissionen angegeben, wie er im Nationalen Inventarbericht des UBA für die Ammoniakproduktion wiedergegeben ist.

noch knapp 0,1 Mio. t CO₂ pro Jahr an indirekten Emissionen durch den Strombedarf. Die Prozessemissionen liegen hier in Summe bei 1,2 Mio. t CO₂ pro Jahr.

Zukünftige Entwicklung der Produktion

Wegen des erwähnten Rückgangs des Verbrauchs an Düngemitteln und der möglichen Importe ist eine Steigerung der Ammoniakproduktion in Deutschland kaum zu erwarten. Eher ist anzunehmen, dass sie bestenfalls stagnieren wird. Bei technischen Anwendungen ist ein Wachstum ähnlich dem des Wirtschaftswachstums zu erwarten. Die Höhe der Produktion in den nächsten 35 Jahren wird dabei von vielen Faktoren abhängen, wie z.B. den Rohstoffpreisen, der internationalen Handelspolitik und der Entwicklung der Ammoniakproduktion in den anderen EU-Ländern.

Eine Substitution des Ammoniaks für die Düngemittelherstellung ist nicht zu erwarten, da Ammoniak heute und in absehbarer Zeit der einzige wirtschaftliche Stickstofflieferant ist. Die technischen Anwendungen können teilweise durch andere Kunststoffe bzw. Chemikalien substituiert werden, die allerdings selten technisch und wirtschaftlich überlegen sind.

Möglichkeiten zur nachfrageseitigen Reduktion des Ammoniakverbrauchs finden sich vor allem in der Landwirtschaft. Dieser kann auf der einen Seite durch eine ökologische Optimierung der Landwirtschaft, auf der anderen Seite durch die Verringerung der landwirtschaftlichen Produktion reduziert werden. Folgende Handlungsbereiche/Optionen sind denkbar:

- Änderung der Essgewohnheiten der Bevölkerung, z.B. weniger Fleischverzehr,
- wirtschaftlicher Umgang mit Essensresten,
- Verringerung der Anbaufläche für die Produktion von Biomasse zur Herstellung von Treibstoffen,
- Anpassung der Subventionierung der Landwirtschaft unter ökologischen Gesichtspunkten.

Mögliche Produktionsalternativen

Die beiden zur Herstellung von Synthesegas dominierenden Prozesse des Steam Reforming und der partiellen Oxidation gelten als Stand der Technik. Eine Prozessalternative ist momentan nicht in Sicht und eine Prozesssubstitution daher nicht zu erwarten. Das Gleiche gilt auch für das Haber-Bosch-Verfahren.

Als Weiterentwicklung gilt die autotherme, katalytische partielle Oxidation. Im Vergleich zu den anderen Synthesegasverfahren läuft sie unter einem höheren Druck ab und weist einen geringeren Energieverbrauch auf. Dieses Verfahrensprinzip wird beispielsweise in der MegaAmmonia von Lurgi (jetzt Air Liquid) eingesetzt, die aber nur für Anlagen mit einer Kapazität größer als 3.000 t pro Tag geeignet ist (Winnacker und Küchler 2005, S. 258).

Eine Rohstoffsubstitution ist dagegen bei der Errichtung von neuen Anlagen denkbar. Erdgas weist zwar einen günstigen Energieverbrauch auf und emittiert weniger THG-Emissionen als die anderen gängigen Rohstoffe, ist aber bezogen auf den Heizwert teurer. Allerdings stehen schwere Rückstände aus der Erdölraffination oft zu günstigeren Preisen zur Verfügung, die zur Herstellung von Synthesegas durch partielle Oxidation eingesetzt werden können. Wasserstoff wird ebenfalls aus Destillationsrückstand

gewonnen. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass bei einer Gesamtbetrachtung das Problem der Reststoffe aus der Erdölraffination berücksichtigt werden sollte (IPTS 2007, 49ff). Diese stehen als billige aber emissionsintensive sonst nicht weiter zu verwertende Abfallstoffe zur Verfügung. Solange der Wirtschaftlichkeit der Nutzung dieser Reststoffe nicht durch entsprechende Maßnahmen (höherer Preis für CO₂-Emissionen, Verbote) entgegengetreten wird, stellt dies ein deutliches Dekarbonisierungshemmnis dar.

Die Vergasung von Biomasse für die Herstellung von Synthesegas wird ebenfalls diskutiert. In Analogie zur Erdölraffination wird bei der Bioraffination die Biomasse in ihre Komponenten zerlegt bzw. diese werden in wertvolle Produkte umgewandelt. Diese Technologie ist überwiegend noch in der Phase der Forschung und Entwicklung bzw. der Pilotphase. Beispiele hierzu sind die Herstellung von Milchsäure aus Glukose und die Gewinnung von Lignin aus Lignocellulose. Nur wenige Produkte der Bioraffination sind zurzeit wirtschaftlich wettbewerbsfähig. Für die Herstellung von Synthesegas sind die Investitionskosten höher als bei der Verwendung der Rohstoffe Erdgas bzw. Destillationsrückstand. Auch die Rohstoffkosten liegen höher. Der Transport der Biomasse zu den Vergasungsanlagen belastet zusätzlich die Herstellkosten. Bis heute ist die Wirtschaftlichkeit nicht gegeben. Es wurden verschiedene Lösungsmodelle vorgeschlagen, wie z.B. eine Vorbehandlung der Biomasse am Entstehungsort. Eine weitere Optimierung dieser Verfahren und die Verwendung von Abfällen aus der Land- und Fortwirtschaft könnten zu einem wirtschaftlichen Durchbruch führen. Im Falle des Einsatzes von Biomasse muss man eine ökologische Bewertung durchführen, in der auch die bei der Erzeugung von Biomasse entstehenden CO₂-Emissionen berücksichtigt werden.

Eine weitere auf erneuerbarer Energie basierende Technologie zur Herstellung von Wasserstoff (und damit von Ammoniak) ist die Photokatalyse mittels solarer Strahlung, aus welchem dann Ammoniak hergestellt wird. Allerdings ist die Photokatalyse noch im Stadium der Grundlagenforschung, sodass der Zeitpunkt eines Durchbruchs noch nicht absehbar ist. Haupthemmnis ist die geringe Effizienz der Prozesse.

Die Power-to-Gas-Technologie wird wahrscheinlich früher zur Verfügung stehen als die Photokatalyse. Unter der Power to Gas-Technologie versteht man die Erzeugung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse unter Einsatz von regenerativer elektrischer Energie.

Hierbei kann Überschussstrom aus erneuerbaren Quellen zur Herstellung von Wasserstoff mittels Wasserelektrolyse verwendet werden. Mehrere kleine Anlagen wurden bereits errichtet. Da der Wirkungsgrad der Wasserelektrolyse relativ niedrig ist, stellt sich die Frage der Konkurrenzfähigkeit des Prozesses. Es ist dennoch anzunehmen, dass die Marktreife des Prozesses in den nächsten Jahren erreicht wird.

Die Kohlevergasung zur Gewinnung von Synthesegas wird auch immer wieder vorgeschlagen (Gutte et al. 2014). Jedoch muss man dabei berücksichtigen, dass der spezifische Energieverbrauch und damit die CO₂-Emissionen wesentlich höher sind als bei den anderen Rohstoffen, sie kommt daher als klimaschonende Alternative nicht in Betracht.

Grundsätzlich stellt die Ammoniakproduktion einen möglichen Ansatzpunkt für weitere CCU-Anwendungen im industriellen Maßstab dar, denn das bei der Herstellung von Ammoniak anfallende CO₂ ist wegen seiner Menge und Reinheit am besten für CCU-Prozesse geeignet. Beispielsweise könnte auf diese Weise mit Hilfe von CCU aus dem bei der Ammoniakproduktion anfallenden CO₂ Methanol hergestellt werden.

Best verfügbare Technik (BVT), Energieeinsparoptionen und –potenziale

In ihren modernen Varianten stellen sowohl das Steam Reforming als auch die partielle Oxidation für die Herstellung von Synthesegas aus dem jeweiligen Rohstoff und das Haber-Bosch-Verfahren für die Ammoniak-Herstellung die BVT dar.

Die meisten Ammoniakanlagen in Deutschland wurden in den 70er und 80er Jahren errichtet. Ihr durchschnittliches Alter liegt heute bei ca. 40 Jahren (Fleiter et al. 2013). Die Lebensdauer von Ammoniakanlagen wird allerdings auf 50–70 Jahren geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung. Jedoch können diese mit zunehmendem Alter nicht mehr mit neuen modernen Anlagen konkurrieren und müssen dann aus wirtschaftlichen Gründen stillgelegt werden.

Der Energieverbrauch für BVT-Anlagen nach dem Steam Reforming Prozess liegt in der EU bei 27,6–31,8 GJ/t Ammoniak, der Durchschnittswert der bestehenden Anlagen bei 35,7 GJ/t Ammoniak (Ecofys 2009, S. 36). Für den Ressourcenverbrauch wird als international bester Wert 28 GJ/t Ammoniak angegeben (Worrell et al. 2007, S. 38).

Wesentliche Energieeinsparpotenziale und damit Emissionsminderungspotenziale bestehen im Ersatz von älteren Anlagen durch neue auf Basis von Erdgas bzw. regenerativem Wasserstoff. Der Energieverbrauch bei der integrierten Ammoniakanlage auf Erdgasbasis beträgt dann 4 GJ/ t Ammoniak und im Durchschnitt 6 GJ/ t Ammoniak (IPTS 2007, S. 50). Nimmt man an, dass eine Anlage mit einer Kapazität von 800.000 t/a und einem Energieverbrauch von 5 GJ/t Ammoniak ältere Anlagen ersetzt, kann man (bei gleichbleibender Produktionsmenge) 2,96 PJ/a einsparen. Eine Einsparung von 2,96 PJ/a würde 166.000 t CO₂/a entsprechen.

5.4.5.2 Ethylen/Propylen

Bedeutung in der Wertschöpfungskette

Ethylen (C₂H₄), auch Ethen genannt, ist der meistproduzierte organische Grundstoff und wird zur Herstellung zahlreicher chemischer Folgeprodukte verwendet. Über 54 % des Ethylens wird für die Herstellung von Polyethylen eingesetzt (VCI 2015, S. 79). Der Rest wird zu anderen Kunststoffen, wie PVC und PET, Zwischenprodukten, Spezialitäten und Feinchemikalien weiterverarbeitet.

Propylen (C₃H₆) oder Propen ist der zweitwichtigste organische Grundstoff. Propylen wird zu ca. 43 % zu Polypropylen, der Rest zu verschiedenen Kunststoffen, wie Acrylnitril und Polyacrylaten, sowie zu anderen Folgeprodukten weiterverarbeitet (VCI 2015, S. 79).

Im Jahre 2014 wurden knapp 5,1 Mio. t Ethylen und 4 Mio. t Propylen in Deutschland erzeugt (VCI 2015, S. 15). Nach einem Anstieg in den 90er Jahren stagnierte die Ethylen-Produktion in den letzten 15 Jahren, während die Propylen-Produktion um ca. 10 % anstieg (VCI 2015, S. 13).

Die weltweite Kapazität von Ethylen belief sich 2012 auf etwa 140 Mio. t, im Jahre 2000 lag sie noch bei ca. 100 Mio. t (True 2012). Ähnliches gilt für Propylen mit einer weltweiten Kapazität von 100 Mio. t in 2012 im Vergleich zu ca. 50 Mio. t im Jahre 2000 (Kempf 2011). Dies ist auf den Aufbau neuer Kapazitäten in China und dem Nahen Osten zurückzuführen.

Innerhalb der EU existiert ein dichtes Pipeline-Netzwerk für Ethylen und Propylen.

Grundlegender Herstellungsprozess und damit verbundene THG-Emissionen (und Energieverbräuche)

Ethylen wird fast ausschließlich durch Steam Cracking produziert, wobei es sich um einen petrochemischen Prozess handelt, bei dem unter Zugabe von Wasserdampf gesättigte Kohlenwasserstoffe überwiegend in Olefine umgewandelt werden. Propylen wird nur zu 70 % nach diesem Prozess gewonnen. Den Rest gewinnt man durch thermisches bzw. thermisch-katalytisches Cracken von schweren Erdölfraktionen. Die Produkte der Steam Cracker bilden die Hauptbausteine der modernen Chemischen Industrie. Beim Steam Cracking werden verschiedene gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffe aus Erdöl und Erdgas als Rohstoffe verwendet. Die Crack-Reaktionen sind stark endotherm – mit einem Gesamtenergiebedarf von 15 bis 50 GJ/t Ethylen – und werden bei Temperaturen von über 800 °C durchgeführt. Im Gegensatz dazu findet im Rahmen der anschließenden Rückgewinnung und Reinigung der Olefine eine Tieftemperaturabscheidung bei Temperaturen von bis zu -150 °C und Drücken von 35 bar statt. Diese beiden Tatsachen erklären den hohen Bedarf an Energie.

Bei der Produktion entstehen ausschließlich direkte und indirekte energiebedingte THG-Emissionen. Derzeit (2014) verursacht die Produktion von Ethylen und Propylen (sowie der dabei entstehenden Nebenprodukte) direkte THG-Emissionen von insgesamt rund 13,5 Mio. t CO₂. Die weiterhin anfallenden indirekten Emissionen durch den Strombezug sind relativ gering und können hier nicht angegeben werden. Für den eigentlichen Steam Cracking Prozess werden nur Brennstoffe benötigt. Die genannten Emissionen verteilen sich wie folgt auf die gängigen Rohstoffe: Naphta 10,85 Mio. t, Gasöl 2,12 Mio. t und gasförmige Kohlenwasserstoffe 0,56 Mio. t CO₂.

Tabelle 22: Zusammenfassende Darstellung der derzeitigen THG-Emissionen der Ethylen- und Propylenproduktion (2014)

Cracking Rohstoff	CO₂ äq. [Mio. t], brennstoffbedingt	CO₂ äq. [Mio. t], strombedingt	CO₂ äq. [Mio. t], prozessbedingt	CO₂ äq. [Mio. t], Summe
Naphta	10,85	-	-	10,85
Gasöl	2,12	-	-	2,12
Gase	0,56	-	-	0,56
SUMME	13,53	-	-	13,53

Quelle:

Die Angabe von spezifischen Energieverbräuchen und in dessen Folge spezifischer THG-Emissionen ist aufgrund variierender Konventionen für den Bezug des Energieverbrauchs auf die Endprodukte des Steam Crackings komplex:

Da Ethylen das Hauptprodukt des Steam Cracking ist, wird der Energieverbrauch meistens darauf bezogen. Jedoch variiert der Ethylen-Anteil im Produkt abhängig vom Rohstoff stark. Beispielsweise liegt er beim Rohstoff Ethan bei über 60 % und beim Naphtha nur bei 30–35 %. Restliche Produkte sind Propylen, Butadien und Aromaten. Daher werden in einigen Quellen differenzierte Angaben nach Rohstoffen gemacht (IPTC 2003). Andere Quellen beziehen den Energieverbrauch auf die höherwertigen Produkte (sogenannte HVC, „high value chemicals“) (Worrell et al. 2007, S. 40).

Bei bestehenden Anlagen hängen der Energieverbrauch und damit die Treibhausgasemissionen von folgenden Faktoren ab:

- Zusammensetzung des Rohstoffes,
- Alter der Anlage,
- konstruktive Einzelheiten,
- mögliche Modernisierungen,
- Wärmeintegrationsgrad der Anlage und am Standort,
- gewünschte Reinheit des Ethylens und der Nebenprodukte usw.

CEFIC gibt aus Benchmarkingstudien folgende Energieverbräuche für europäische Steam Cracker an: auf Ethan-Basis 15–18 GJ/t Ethylen, auf Naphtha-Basis 25–40 GJ/t Ethylen und auf Gasöl-Basis 40–50 GJ/t Ethylen. Wird der Energieverbrauch dagegen auf die höherwertigen Chemieprodukte bezogen, liegen die Verbrauchswerte mit 12,5–21, 14–22 und 18–23 GJ/t HVC nicht weit auseinander (Enviros Consulting 2006, S. 20). Neue Anlagen weisen noch bessere Werte auf. Für Naphtha werden durch Chemieanlagenbauunternehmen Verbrauchswerte zwischen 18 und 25,5 GJ/t Ethylen genannt (Ren et al. 2006). Dabei verbraucht der Pyrolyseabschnitt ca. 65 % der Energie. Der restliche Energieverbrauch findet in den anderen beiden Abschnitten statt (Ren et al. 2006).

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Die moderne Chemische Industrie basiert hauptsächlich auf kurzkettigen Olefinen, vor allem auf Ethylen und Propylen. Eine Umstellung auf andere Chemiegrundstoffe setzt voraus, dass diese und die dazugehörigen Prozesse ausreichend und zu günstigen Preisen verfügbar sind. Es ist denkbar, dass bis 2050 die Olefinchemie teilweise durch die C₁-Chemie, basierend auf Wasserstoff und Kohlenmonoxid-Synthesegas, ersetzt wird. Die Basis dafür würden entweder regenerativer Wasserstoff, Biomasse oder Erdgas bilden. Dabei ist eine Verbindung der C₁-Chemie mit der Chemie auf Basis von kurzkettigen Olefinen möglich, indem in einem ersten Schritt Methanol aus Synthesegas hergestellt wird, das dann in Olefine umgewandelt wird. Durch den Einsatz regenerativer Energien zur Erzeugung von z.B. Wasserstoff könnten die mit der konventionellen Produktion von Ethylen und Propylen einhergehenden THG-Emissionen in erheblichem Umfang gesenkt werden; genauere Angaben können an dieser Stelle allerdings nicht gemacht werden. Bezüglich der Zukunft des Steam Cracking in Deutschland bestehen einige Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung des internationalen Marktes

für die Folgeprodukte und die Errichtung von neuen Anlagen in anderen Wirtschaftsregionen. Neben den in den letzten Jahren im Nahen Osten errichteten Kapazitäten für Ethylen und Propylen stellen die Chemieanlagen in den USA auf Basis von unkonventionellem Erdgas (durch Fracking gewonnen) eine starke Konkurrenz für die europäischen Standorte dar. Wahrscheinlich werden die deutschen Exporte von Chemiegrundstoffen und vielen ihrer direkten Folgeprodukte in Länder außerhalb von Westeuropa abnehmen und Importe zunehmen. Für die nächsten zehn Jahre ist auf jeden Fall wenig Änderung zu erwarten, da keine neuen Cracker bzw. Schließungen angekündigt wurden. Spielraum für eine Vollausslastung ist ebenso noch vorhanden, sodass neue Kapazitäten nicht unbedingt notwendig sind. Außerdem kann man noch durch Beseitigung von Engpässen in bestehenden Anlagen die Kapazität leicht erweitern.

Ethylen und Propylen sind Basis für eine Vielzahl von Kunststoffen. Seit der Erfindung der Kunststoffe beobachtet man eine Substitution der klassischen Werkstoffe durch diese. Dieser Prozess wird sich mit wenigen Ausnahmen fortsetzen. Die Kunststoffe aus dem Verpackungssektor, mit einem Anteil von 35% am Gesamtverbrauch, haben eine relativ kurze Lebensdauer. Sie werden dann zu ca. 33% werkstofflich bzw. rohstofflich recycelt. Der Rest wird verbrannt (PlasticsEurope 2016; Consultic und Plastics 2014). Im ersten Fall muss man die CO₂-Emissionen des Recyclingprozesses berücksichtigen. Bei der Verbrennung entstehen CO₂-Emissionen.

Kunststoffe stehen in Konkurrenz zu Naturstoffen. Vergleichsweise werden sie von diesen verdrängt. Beispiele für mögliche Substitutionen sind:

- Dämmung: Substitution von Kunststoffen (Polystyrol, Polyurethane, Polyethylen usw.) durch Naturstoffe, wie z.B. mineralische Fasern (Steinwolle, Glaswolle usw.), mineralische Schäume (Bimsstein, Blähton usw.), Holzprodukte (Holzfasern Holzwolle), usw.
- Bauelemente (Türen, Fenster, Treppen usw.): Substitution von Kunststoffen (Polyethylen, Polypropylen usw.) durch Holz
- Verpackungsmaterial: Substitution von Kunststoffen durch Papier, Holz und Metalle

Mögliche Produktionsalternativen

Steam Cracking ist noch immer Stand der Technik. Beim Steam Cracking nehmen der Energieverbrauch und die dadurch bedingten THG-Emissionen in folgender Reihenfolge der Rohstoffe ab: Gasöl, Naphtha, Flüssiggas und Ethan. Die Rohstoffe sind aber nicht beliebig substituierbar, da je nach Rohstoff eine andere Produktpalette entsteht. Die Entscheidung für einen bestimmten Rohstoff ist somit von den Zielprodukten und der Rohstoffverfügbarkeit abhängig. Dadurch ist es nicht möglich, einen Rohstoff im Sinne einer BVT zu nennen (IPTS 2003). In Deutschland hat sich Naphtha als gängigster Rohstoff auch wegen der gewünschten Nebenprodukte etabliert. Moderne Anlagen sind bis zu einem gewissen Maße flexibel hinsichtlich des Rohstoffeinsatzes.

Eine alternative Technologie, die das Steam Cracking vollständig ersetzt, ist trotz der intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nicht in Sicht. Katalytisches Steam Cracking kann sich noch nicht durchsetzen. Ein großer Nachteil der konventionellen Alternativtechnologien zu Steam Cracking ist, dass sie nicht in der Lage sind, die gewünschte Produktpalette zu liefern. Hinzu kommt, dass die Herstellkosten höher als bei Steam Cracking sind. „On the purpose“ Prozesse, wie z.B. Gas to Olefins (GTO), Ole-

fin-Metathese oder Propan-Dehydrierung, sind nur bei Verfügbarkeit von preiswerten Rohstoffen konkurrenzfähig. Dies trifft aber nur in Ausnahmefällen für Westeuropa zu. Eine grundsätzlich vielversprechende alternative Technologie ist die oxidative Koppelung von Methan zur direkten Umsetzung von Methan in Ethan, die noch im Stadium der Forschung ist. Eine Alternative zu den „On the purpose“ Prozessen, um Propylen herzustellen, ist die Steigerung der Propylen-Produktion in den Raffinerien. Ein Hemmnis liegt hier aber in der Struktur der Raffinerie. Außerdem nimmt die Raffinerieproduktion in Deutschland seit Jahren ab, und es ist zu erwarten, dass diese Entwicklung sich fortsetzt. Eine Zusammenfassung neuerer Entwicklungen findet man z.B. in (Enviros Consulting 2006, S. 13; Jones 2009).

Kurzkettige Olefine (Ethylen und Propylen) können auch mit Hilfe der C1-Chemie auf Basis von Biomasse und Wasserstoff aus regenerativer Energie hergestellt werden. Die Produktion des Synthesegases wurde unter „Ammoniak“ und „Methanol“ behandelt. Aus dem Synthesegas kann man mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese kurzkettige Olefine herstellen. Eine andere Route ist die Herstellung von Methanol, das in einem weiteren Syntheseschritt mit Hilfe von Zeolit-Katalysatoren in Olefine umgewandelt wird (Methanol to Olefins).

Heute werden die meisten chemischen Produkte aus kurzkettigen Olefinen hergestellt. Die Bioraffination auf Biomassebasis ist als Lieferant von Chemiegrundstoffen für die Chemische Industrie noch in den Anfängen ihrer Entwicklung. Diese Technologie könnte einen Teil des Bedarfs an Folgeprodukten des Ethylens und Propylens decken und somit einen Teil der Produktion substituieren. Heute steht nicht genug Biomasse zur Verfügung. Die Situation kann sich positiv verändern, wenn es gelingt Lignocellulose kostengünstig aufzuschließen.

Bei einer Substitution mit aus regenerativen Quellen erzeugtem Methanol wären erhebliche Treibhausgasminderungen zu erwarten; im Fall der Biomasse müsste genau bilanziert werden, ob und wenn ja welche realen Ersparnisse sich ergeben. Denn auch bei der Bioraffination müssten erhebliche Mengen an Energie für den Vorgang der Raffination aufgewandt werden. Prozessbedingte Emissionen, die substituiert werden können, sind bei der Ethylen/Propylen Herstellung nicht vorhanden.

Best verfügbare Technik (BVT), Energieeinsparoptionen und –potenziale

Zur Reduktion des Energieverbrauches gilt die Wärmerückgewinnung als die kostengünstigste Maßnahme mit einem relativ hohen Energieeinsparpotenzial. Sie wird regelmäßig als erstes in Angriff genommen. Die Wärmeintegration erfordert eine wesentlich höhere Investition, die Energieeinsparpotenziale sind aber auch wesentlich höher. Moderne Prozessleitsysteme stehen hinsichtlich Kosten und Energieeinsparpotenzialen an dritter Stelle. Die Integration einer Gasturbine in den Steam Cracker ermöglicht die Erzeugung von Strom und Dampf, wobei die Abgase für die Aufwärmung der Einsatzstoffe eingesetzt werden können. Diese Maßnahme hat die höchsten Kosten und das höchste Energieeinsparpotenzial unter den genannten Maßnahmen (Currás 2010). Arroyo Currás gibt konkrete Zahlen für die Kosten und die Einsparpotenziale an. Danach kann man 0,1–0,3 GJ/t Ethylen durch Wärmerückgewinnung, 0,15 GJ/t Ethylen durch Wärmeintegration der Rektifizierkolonnen und 3–4 GJ/t Ethylen durch die Integration einer Gasturbine einsparen (Currás 2010, S. 38). Diese Angaben sind als grobe

Schätzung zu betrachten, da sie nicht die Rahmenbedingungen für die Anlage und den Standort berücksichtigen.

In der Fachliteratur wird über die weltweit besten Werte für den Energieverbrauch berichtet. Danach lag bei Naphtha-Crackern der Verbrauch an Brennstoff und Dampf im Jahre 1999 bei 33,3 GJ/t Ethylen und bei Ethan-Crackern bei 13,0 GJ/t Ethylen (Worrell et al. 2007, S. 41). Diese Werte lagen damals sehr dicht bei den BVT-Werten, da sie von neu errichteten Anlagen stammen dürften. Sie liegen heute wegen der Weiterentwicklung der Technologie niedriger. In anderen Quellen werden noch niedrigere Werte genannt, so z.B. 18–25 GJ/t Ethylen für neue Cracker-Anlagen auf Naphtha-Basis (Ren et al. 2006, S. 9).

Da die großen Chemiestandorte in Europa durch ein Pipelinenetzwerk miteinander verbunden sind, bietet sich an, bei einem notwendigen Ersatz eines Steam Crackers eine Großanlage mit höchstmöglicher Ressourceneffizienz an einem Standort zu errichten und die überschüssigen Produkte durch das Pipelinenetz zu anderen Standorten zu transportieren. Die Frage des Ersatzes für einen bestehenden Steam Cracker stellt sich dann, wenn die Anlage altersbedingt nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden kann. Steigende Preise für die Emissionshandelszertifikate können diesen Prozess beschleunigen.

Die meisten in Deutschland derzeit betriebenen Anlagen wurden in den 70er und 80er Jahren errichtet. Einige von ihnen sind bereits über 50 Jahre alt. Die Anlagenlebensdauer von Steam Crackern wird auf 50–70 Jahre geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung. Der letzte Steam Cracker wurde in Leuna vor ca. 20 Jahren errichtet.

Die Energieeffizienz bestehender Anlagen ist durch kontinuierliche Modernisierungen gegenüber dem ursprünglichen Zustand wesentlich gestiegen (wobei dies in der Regel nur ein willkommener Nebeneffekt und nicht das Hauptziel der Modernisierungen war). Man schätzt, dass modernisierte Anlagen einen bis zu 30 % besseren Wirkungsgrad aufweisen als 30 Jahre alte Anlagen. Neue, moderne Anlagen haben jedoch einen noch besseren Wirkungsgrad, der um 50 % höher liegen dürfte als der von nicht modernisierten Anlagen aus den 70er Jahren (Bowen 2007). Ältere noch nicht intensiv modernisierte Anlagen sowie Anlagen an Standorten mit geringer Wärmeintegration besitzen dabei bedeutende Energieeinsparpotenziale.

Analysten vermuten, dass einige der Steam Cracker in Europa in den nächsten Jahren stillgelegt werden, vor allem ältere Anlagen an ungünstigen Standorten und mit kleiner Kapazität. Wie sich das auf den Standort Deutschland auswirkt, ist offen, da man nicht weiß, welche Anlagen zuerst schließen werden.

5.4.5.3 Methanol

Bedeutung in der Wertschöpfungskette

Methanol (CH_3OH), ein einwertiger Alkohol, wird überwiegend zu Formaldehyd, MTBE (ein Oktanzahlverbesserer, d.h. ein Zusatzstoff für Benzin), Essigsäure und verschiedenen Kunststoffen weiterverarbeitet. Formaldehyd mit einem stabilen Bedarf und mit

fast einem Drittel des Verbrauchs an Methanol ist das Hauptfolgeprodukt. MTBE wird mit steigender Produktion des Ethanols auf Biomassebasis durch ETBE ersetzt.

Im Jahre 2014 lag die Methanolproduktion in Deutschland bei 1 Mio. t, im Vergleich zu 2 Mio. t im Jahre 2007 (VCI 2015, S. 15). Der Rückgang ist hauptsächlich durch den Rückgang des MTBE in den letzten Jahren bedingt.

Weltweit existiert ein entwickelter Handel mit Methanol. Die Weltproduktion lag im Jahre 2014 bei ca. 50 Mio. t. Produzenten sind hauptsächlich die erdgasproduzierenden Länder, Importeure die USA, Westeuropa, Japan und Südkorea.

Grundlegender Herstellungsprozess sowie damit verbundene THG-Emissionen (und Energieverbräuche)

Analog zur Ammoniakherstellung wird Methanol in integrierten Anlagen, bestehend aus dem Synthesegasprozess und der Methanolsynthese, hergestellt. Man benötigt dabei eine andere Zusammensetzung des Synthesegases als beim Ammoniak. Das Synthesegas kann durch Steam Reforming oder partielle Oxidation erzeugt werden (vgl. Prozessbeschreibung der Ammoniakherstellung). Das erzeugte Methanol wird anschließend je nach Verwendung durch Rektifikation (kontinuierliche Destillation) vom Wasser und anderen Verunreinigungen abgetrennt.

In Deutschland basiert die Methanolkapazität zu 73 % auf erdölbasierten Kohlenwasserstoffen als Rohstoff, gefolgt von Erdgas mit 22 % und Klärschlamm und anderen Abfällen mit 5 %. Wenn Methanol aus Destillationsrückstand bzw. schwerem Heizöl hergestellt wird, stehen die Anlagen meistens an Raffineriestandorten. Das Methanol wird dann oft gleich zu MTBE weiterverarbeitet.

Analog zur Herstellung von Ammoniak wird der Wärmeüberschuss bei der exothermen Methanolsynthese zur Erzeugung von Dampf verwendet. Die Rektifikation des Rohmethanols ist ein energieintensiver Prozess. Der Energieverbrauch wird durch die Reinheit des Methanols bestimmt.

In Summe entstehen bei derzeitiger Produktion direkte THG-Emissionen in Höhe von rund 1,1 Mio. t CO₂. Dabei sind knapp 1 Mio. t CO₂ auf die partielle Oxidation und knapp 0,1 Mio. t CO₂ auf das Steam Reforming sowie 0,07 Mio. t CO₂ auf das Vergasen von Klärschlamm zurückzuführen. Hinzu kommen noch 0,07 Mio. t CO₂ indirekte Emissionen durch den Stromverbrauch bei der partiellen Oxidation.

Tabelle 23: Zusammenfassende Darstellung der derzeitigen THG-Emissionen der Methanolproduktion (2014)

Verfahren	CO ₂ äq. [Mio. t], brennstoffbedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], strombedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], pro- zessbedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], Summe
Steam Reforming	0,09	-	-	0,09
Part. Oxidation	0,97	0,07	-	1,04
Vergasen v. Klärschlamm	0,07	-	-	0,07

SUMME	1,13	0,07	-	1,2
-------	------	------	---	-----

Quelle:

Der spezifische Energieverbrauch beim Steam Reforming (mit Erdgas) beträgt knapp 7 GJ/t Methanol, bei der partiellen Oxidation (mit Destillationsrückstand) sind es knapp 17,9 GJ/t Methanol (Saygin et al. 2008). Hier sind also erhebliche Unterschiede zu erkennen.

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Der Bedarf für die Folgeprodukte des Methanols wird, abgesehen von MTBE, wahrscheinlich im selben Maße wie die wirtschaftliche Entwicklung wachsen bzw. stagnieren. Das Folgeprodukt MTBE geht wegen der Substitution durch ETBE zurück, während die anderen Folgeprodukte mit der wirtschaftlichen Entwicklung Schritt halten. Insgesamt wird also der Bedarf an den Folgeprodukten nach Stabilisierung des MTBE-Bedarfs konstant bleiben bzw. bei einer positiven Entwicklung der Chemischen Industrie wieder leicht ansteigen.

Diese Prognose kann sich jedoch ändern, wenn, wie vielfach vorgeschlagen wurde, Methanol als Rohstoff und Energieträger verwendet wird (Olah et al. 2009). Nach diesem Modell würde Methanol Erdöl und Erdgas als Energie- und Rohstofflieferant ersetzen. Für die Herstellung von Methanol benötigt man Synthesegas (ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid). Damit sind Rohstoffe und Verfahren analog zur Herstellung von Ammoniak.

Das Methanol würde man aus regenerativer Energie über Wasserstoff gewinnen, der mit CO₂ umgesetzt wird. Aus Methanol kann man kurzkettenige Olefine (Gas to Olefins: GTO), Treibstoffe (Gas To Liquids: GTL bzw. Methanol To Gasoline, MTG) und Dimethylether herstellen. Das Letztere eignet sich gut als Treibstoff für Gasturbinen bzw. für Dieselmotoren. Außerdem kann Methanol als Treibstoff in Brennstoffzellen direkt oder nach Umwandlung in einem Steam Reformer in Wasserstoff eingesetzt werden. Viele Prozesse sind heute bereits verfügbar. Der große Vorteil des Methanols gegenüber Wasserstoff ist die einfache Lagerbarkeit und Transportierbarkeit. Versuche, Methanol dem Benzin beizumischen, sind ohne großen Erfolg geblieben.

Jedoch ist die internationale Konkurrenz bei der Methanolherstellung sehr stark. Methanol wird an erdgasreichen Standorten in größeren Mengen hergestellt. Es kann in Spezialtankern auch über größere Distanzen preiswert transportiert werden. Dies führt zu Unsicherheit über die Zukunft der Methanolindustrie in Deutschland. Für die deutschen Standorte spricht generell die hohe Prozess- und Standortwärmeintegration.

Mögliche Produktionsalternativen

Die Herstellungsprozesse für Methanol sind etabliert. Die Synthesegasherstellung wurde bereits im Zusammenhang mit Ammoniak besprochen (vgl. Kapitel 5.4.5.1).

Als innovatives Verfahren gilt die von Fa. Lurgi (heute Air Liquid) entwickelte MegaMethanol-Technologie mit autothermem Reforming (ohne Zufuhr von Wärme) und hoher

Wärmeintegration. Dabei muss Wärme nicht von außen zugeführt werden. Sie ist im Ressourcenverbrauch eindeutig überlegen, jedoch nur für große Kapazitäten > 5.000 t pro Tag wirtschaftlich (Lurgi 2006). Langfristig könnten kleinere, ältere Anlagen geschlossen und durch eine größere mit effizienterer Technologie ersetzt werden. Durch höhere Zertifikatpreise im Emissionshandel könnte hierfür ein zusätzlicher Anreiz entstehen.

Außerdem wurde Biomasse als Rohstoff vorgeschlagen. Sie kann aber mit Erdgas und Raffinerierückstand noch nicht wirtschaftlich konkurrieren. Dabei gelten, wie auch für andere Prozesse auf Wasserstoffbasis, ähnliche Überlegungen wie bei der Herstellung von Ammoniak.

BVT, Energieeinsparoptionen und –potenziale

Das Steam Reforming und die partielle Oxidation zur Herstellung von Synthesegas sind analog zum Ammoniakprozess. Der Hauptunterschied liegt in der unterschiedlichen Zusammensetzung des Zielgases.

Bei der Methanolsynthese gelten heute die Niederdruck- und Mitteldrucksynthesen mit folgenden Energieeffizienzsteigerungsmaßnahmen als BVT:

- Einsatz verbesserter Katalysatoren
- Höhere Wärmeintegration
- Einsatz von dampfgetriebenen Kompressoren

Der BVT-Gesamtenergieverbrauch auf Erdgasbasis (energetischer und nicht-energetischer Verbrauch) liegt bei 28,5 GJ/t Methanol (IEA 2007). In der Praxis variiert der Verbrauch stark in Abhängigkeit von der verwendeten Technologie, der gewünschten Wasserkonzentration im Produkt und dem Alter der Anlage.

Es ist aber zurzeit wegen der oben beschriebenen Unsicherheiten ungewiss, wann und ob eine Methanolanlage in Deutschland errichtet wird. Die meisten Methanolanlagen in Deutschland sind älter als 35 Jahre. Sie wurden jedoch immer wieder modernisiert und weisen bereits einen hohen Wärmeintegrationsgrad auf. Außerdem sind sie oft am Standort integriert. Man kann erwarten, dass die bestehenden Anlagen, soweit es technisch möglich ist, weiter modernisiert werden. Dabei wird die Lebensdauer von Methanolanlagen auf 40–70 Jahre geschätzt, abhängig von den Modernisierungsmaßnahmen und der Intensität der Instandhaltung. Die einzige deutsche Methanolanlage auf Basis von Klärschlamm wurde erst vor ca. 20 Jahren errichtet und gilt nach wie vor als modern.

5.4.5.4 Chlor

Bedeutung in der Wertschöpfungskette

Chlor (Cl_2), eine der wichtigsten anorganischen Grundchemikalien, wird direkt oder indirekt zur Herstellung von fast 60 % aller chemischen Produkte verwendet. Die bedeutendsten Folgeprodukte sind PVC, chlorierte Lösemittel, Propylenoxid und anorganische Produkte, die zusammen über 80 % des Verbrauchs ausmachen. Dabei wird

das Chlor häufig im Verlauf eines Herstellungsprozesses wieder abgespalten, um chlorfreie Endprodukte zu erhalten.

41 % der in der EU und anderen westeuropäischen Staaten installierten Kapazität befindet sich in Deutschland (Brinkmann et al. 2014, S. 3). Im Jahre 2014 lag die Chlorproduktion in Deutschland bei rund 3,7 Mio. t. Damit ist sie seit 2007, als sie ein Maximum von knapp 5,6 Mio. t erreichte, rückläufig. (VCI 2015, S. 13). Dagegen stieg sie in den zehn Jahren vor 2007 um mehr als 40 % (VCI 2008, S. 14) an.

Das bei der Herstellung von Chlor anfallende Nebenprodukt Natronlauge ist eines der wichtigsten anorganischen Produkte mit zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten. Die Entscheidung über die Errichtung einer Chloralkalielektrolyseanlage hängt daher auch von der Verwendung der Natronlauge ab. Während die Natronlauge als Lösung, Schuppen oder Perlen auch über weite Strecken transportiert werden kann, muss das Chlor möglichst am Standort verbraucht werden. Das zweite Nebenprodukt, der Wasserstoff, fällt mit 28 kg pro t Chlor an (IPTS 2001, S. 7).

Grundlegender Herstellungsprozess und damit verbundene THG-Emissionen (und Energieverbräuche)

Chlor wird mit Hilfe der Chloralkalielektrolyse aus Kochsalz (NaCl_2) hergestellt. In der Chloralkalielektrolyse wird eine wässrige, hoch konzentrierte Salzlösung mit Hilfe von elektrischer Energie zersetzt.

Drei Verfahren sind gebräuchlich: Amalgamverfahren, Diaphragmaverfahren und Membranverfahren.

Beim Amalgamverfahren besteht die Elektrolyse aus zwei Teilelektrolyseschritten in zwei verschiedenen Elektrolysezellen. Der erste Schritt ist die Bildung von Chlorgas an der Graphit-Anode in der ersten Zelle, während sich an der Kathode, welche aus reinem Quecksilber besteht und sich in der zweiten Elektrolysezelle befindet, Natrium abscheidet und mit der Kathode Natriumamalgam bildet. Das Amalgam wird zur Zersetzung aus der Elektrolysezelle in den Amalgamzersetzer befördert. Hierbei entstehen Wasserstoff und Natronlauge.

Dagegen besteht das Diaphragmaverfahren aus einer einzigen Zelle, bei welcher der Kathodenraum vom Anodenraum durch ein Diaphragma aus Asbest bzw. aus PTFE getrennt wird, das für alle Ionen durchlässig ist. Chlor entsteht an der Anode, während Wasserstoff und Hydroxid-Ionen an der Kathode gebildet werden. Um zu verhindern, dass Hydroxid in den Anodenraum gelangt, wird die Konzentration des Hydroxids relativ gering gehalten, sodass eine Natronlauge mit einer Konzentration von nur 12 – 15% entsteht. Die Kathode besteht aus Stahl oder aus mit Nickel beschichtetem Stahl und die Anode aus mit Ruthenium(IV)-oxid beschichtetem Titan.

Das Membranverfahren, ebenfalls aus einer Zelle bestehend, arbeitet mit einer Titananode und einer Nickelkathode. Der Kathodenraum wird vom Anodenraum durch eine Kationen-Tauschmembran aus PTFE getrennt, die für Anionen undurchlässig ist. Dagegen können die Kationen hindurch gelangen. Dadurch entsteht im Kathodenraum eine 30-35% -ige, reine Natronlauge.

In Deutschland dominierte über lange Zeit das Amalgamverfahren, das jedoch immer mehr durch das Membranverfahren verdrängt wurde. Nach Umrüstung vieler Amalgamanlagen auf Membrantechnologie steht die letztgenannte heute mit einem Anteil von mehr als 58 % an erster Stelle. Die Kapazität beträgt 2,9 Mio. t/a. Dadurch hat das Amalgamverfahren mit einer Kapazität von ca. 880.000 t/a heute nur noch einen Anteil von weniger als 18,2 %. Die Substitution der Amalgamanlagen hängt in erster Linie mit den Quecksilberemissionen zusammen. Die europäische Chlorindustrie hat sich daher freiwillig verpflichtet, bis 2020 alle Amalgamanlagen stillzulegen bzw. umzurüsten. Jedoch hat die Europäische Kommission ein Verbot für Amalgamanlagen nach 2017 erlassen. Diese müssen dann stillgelegt oder umgerüstet werden (Chemietechnik 2014). In Deutschland erwartet man, dass etliche Amalgamanlagen schon vor diesem Termin umgerüstet bzw. stillgelegt werden. Nach dem Diaphragmaverfahren werden zwei Anlagen mit einer Kapazität von etwas mehr als 1,160 Mio. t/a in Stade betrieben. Der Betreiber hat angekündigt, die Asbest-Diaphragmen durch asbestfreie Diaphragmen zu ersetzen (Studio2020 2014). Dabei hat die Europäische Kommission das asbestbasierte Diaphragmaverfahren als nicht BVT deklariert.

Chlor wird auch aus dem bei verschiedenen chemischen Prozessen entstehenden Chlorwasserstoff (HCl) durch Elektrolyse recycelt. Das zurückgewonnene Chlor wird dann in den Prozess zurückgeführt und man vermeidet so eine Entsorgung des HCl (Winnacker und Küchler 2005, S. 574).

Insgesamt, unter Berücksichtigung aller genannten Verfahren, entstehen derzeit pro Jahr 0,23 Mio. t CO₂ direkte und 6,33 Mio. t CO₂ indirekte THG-Emissionen.

Tabelle 24: Zusammenfassende Darstellung der derzeitigen THG-Emissionen der Chlorproduktion (2014)

Verfahren	CO ₂ äq. [Mio. t], brennstoffbedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], strombedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], pro- zessbedingt	CO ₂ äq. [Mio. t], Summe
Amalgam	-	1,38	-	1,38
Membran	0,23	3,46	-	3,69
Diaphragma	-	1,49	-	1,49
SUMME	0,23	6,33	-	6,56

Quelle:

Mit den derzeitigen Produktionsmengen von Chlor nach dem Amalgamverfahren gehen indirekte THG-Emissionen durch Stromverbrauch von rund 1,4 Mio. t CO₂ einher. Direkte Emissionen fallen hier nicht an. Der spezifische Endenergieverbrauch liegt bei rund 12,8 GJ pro Tonne Chlor (Saygin et al. 2008).

Die indirekten THG-Emissionen aufgrund der Produktion mit Membrantechnologie betragen knapp 3,5 Mio. t CO₂. Hier fallen zudem, als einziges Verfahren, relativ geringe direkte Emissionen in Höhe von rund 0,2 Mio. t CO₂ an. Der spezifische Endenergieverbrauch liegt bei insgesamt 11,9 GJ pro Tonne Chlor (Saygin et al. 2008).

Derzeit betragen die indirekten THG-Emissionen durch Strombezug, die bei der Produktion nach dem Diaphragmaverfahren anfallen, knapp 1,5 Mio. t CO₂. Es fallen keine direkten Emissionen an. Der spezifische Endenergieverbrauch beträgt 10,7 GJ pro Tonne Chlor (Saygin et al. 2008).

Der Energieverbrauch wird meistens auf das Chlor als Hauptprodukt bezogen. Dies ist auch bei den oben gemachten Angaben bei den einzelnen Verfahren der Fall. Entscheidend beim Vergleich des Energieverbrauchs der drei Verfahren ist der spezifische Energieverbrauch. Dieser setzt sich als Primärenergieverbrauch aus dem Strom- und Wärmeverbrauch, letzterer für die Aufbereitung der Natronlauge, zusammen. Während er beim Membranverfahren bei 27,4 GJ/t Chlor liegt, beträgt er beim Amalgamverfahren 32,4 GJ/t und beim Diaphragmaverfahren 35,1 GJ/t, vorausgesetzt dass die Natronlauge (wie allgemein üblich) auf 50 Gew.-% aufkonzentriert wird (Saygin et al. 2008, S. 72; Brinkmann et al. 2014, S. 103).

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Eine Analyse der Folgeprodukte des Chlors für den Betrachtungszeitraum bestätigt den Trend der letzten Jahre, dass die Chlorproduktion in Deutschland sich je nach Rahmenbedingungen konsolidieren bzw. unter sehr günstigen Rahmenbedingungen leicht ansteigen wird.

PVC wird wahrscheinlich leicht wachsen, chlorierte Lösemittel werden eher stagnieren. Für Propylenoxid wurden bereits neue chlorfreie Routen (Direktoxidation) entwickelt, die inzwischen großtechnisch erfolgreich realisiert wurden. Neuere Anlagen für die Herstellung von Propylenoxid werden in Zukunft höchstwahrscheinlich ausschließlich die chlorfreien Prozesse anwenden. Bestehende Anlagen können nicht umgebaut werden. Sie werden solange weiter betrieben, bis sie wirtschaftlich nicht mehr konkurrenzfähig sind.

Eine lang diskutierte Substitution der Chlorchemie durch chlorfreie Folgeprodukte bzw. chlorfreie Herstellungsprozesse konnte, abgesehen von der Substitution des Chlorhydrin-Prozesses zur Herstellung von Ethylenoxid und Propylenoxid, nicht realisiert werden.

Mögliche Produktionsalternativen

Das Membran-Verfahren ist aus heutiger Sicht die BVT und wird bei neu zu errichtenden Anlagen ausschließlich verwendet. Neben dem höheren Energieverbrauch bei Amalgam- und Diaphragmaverfahren sprechen die Quecksilberemissionen beim erstgenannten Verfahren und die Asbestemissionen beim zweitgenannten Verfahren gegen ihren Einsatz.

Eine Umrüstung der Amalgamanlagen auf Membrantechnologie könnte noch vor 2017 wirtschaftlich sinnvoll werden, wenn der Chlorbedarf am jeweiligen Standort für die Lebensdauer der geplanten Anlage feststeht und die durch den Anlagenersatz erzielte Energieersparnis die Differenz zwischen den kapitalabhängigen Kosten für die neue Anlage und den mit der Zeit zunehmenden Instandhaltungskosten überkompensiert.

Das asbestfreie Diaphragmaverfahren weist einen günstigeren Energieverbrauch als das asbestbasierte Diaphragmaverfahren auf, aber einen höheren als das Membranverfahren (IPTS 2001, S. 106).

Auch das Membranverfahren wird kontinuierlich weiterentwickelt, um den Energieverbrauch weiter zu reduzieren. Eine Umrüstung von älteren Membrananlagen auf die neueste Membrangeneration würde sich unter Umständen auch wirtschaftlich lohnen.

Als eine neue und innovative Technologie gilt die Sauerstoff-Verzehrkatoden-Technologie, die von Bayer entwickelt wurde. Der Stromverbrauch ist um 30 % niedriger im Vergleich zum konventionellen Membran-Verfahren und um 50 % gegenüber dem Amalgamverfahren. Allerdings wird der entstehende Wasserstoff dabei vollständig verbraucht. Dieser wird auf deutschen Standorten in der Regel stofflich verwertet und beeinflusst damit die Herstellkosten des Chlors. Außerdem benötigt man kleinere Mengen an Sauerstoff. Dieser reagiert mit dem produzierten Wasserstoff an der Kathode (Winnacker und Küchler 2005, S. 515).

Bei der Sauerstoff-Verzehrkatoden-Technologie wird an der Kathode kein Wasserstoff gebildet, sondern durch Reaktion mit Sauerstoff Hydroxid-Ionen. Dadurch kann der Strombedarf reduziert werden. Allerdings müssen beim Vergleich mit dem klassischen Membran-Verfahren der Verlust an Wasserstoff und der benötigte Sauerstoff in der Kostenrechnung berücksichtigt werden. Vor allem ist die Bewertung des Wasserstoffs von entscheidender Bedeutung. Hat man keine stoffliche Verwendung dafür und wird er nur verbrannt, wird er mit seinem Heizwert bewertet. Hat er aber eine stoffliche Verwendung, so muss er entsprechend höher bewertet werden. Zudem benötigt die Sauerstoff-Verzehrkatoden-Technologie eine um 50% höhere Investition. D.h., es stehen sich auf der einen Seite der niedrigere Stromverbrauch und auf der anderen Seite die höhere Investition sowie die Kosten für den Verlust des Wasserstoffs und die zusätzlichen Kosten für den Sauerstoff gegenüber. (Moussallem et al. 2009; Winnacker und Küchler 2005).

BVT, Energieeinsparoptionen und -potenziale

Das Membranverfahren der neuesten Generation gilt als BVT. Die Errichtung von neuen Anlagen ist wegen der oben beschriebenen Situation zurzeit unwahrscheinlich. Realistischer ist der Ersatz von bestehenden Anlagen bzw. ihre Umrüstung. Eine Umrüstung auf Membrantechnologie kann durch eine positive Entwicklung der Grundstoffindustrie im Allgemeinen und der Chlorindustrie im Speziellen beschleunigt werden. Neben einem Konsolidierungsprozess geht der Trend hin zu größeren Anlagen und zur Stilllegung der kleinen Anlagen. Jedoch versucht man soweit wie möglich, die Transporte von Flüssigchlor zu vermeiden. Sollten die Chlortransporte verboten werden, wie dies in den skandinavischen Ländern der Fall ist, müssten an kleinen Standorten mit geringem Verbrauch (10.000–20.000 t/a) kleinere Anlagen errichtet werden. Diese Entwicklung würde das Ersetzen der älteren Anlagen beschleunigen.

Der absehbar steigende Einsatz von regenerativem Strom für die Herstellung von Chlor führt zukünftig zu einer entsprechenden Reduktion der CO₂-Emissionen.

5.4.5.5 Sauerstoff

Bedeutung in der Wertschöpfungskette

Sauerstoff (O₂) wird durch Zerlegung der Luft gewonnen und vor allem dort eingesetzt, wo reiner Sauerstoff für eine Oxidation gebraucht wird. Zu diesen Prozessen gehören beispielsweise die Synthesegasherstellung nach der partiellen Oxidation, die direkte Oxidation des Ethylens zu Ethylenoxid usw. Dabei wird der Sauerstoff in der Regel am Standort verbraucht und daher kaum exportiert bzw. importiert. Bei der Luftzerlegung fällt Stickstoff als Nebenprodukt an. Dieser hat in der Chemischen Industrie begrenzte Verwendungsmöglichkeiten, z.B. als Inertgas und für die Reinigung des Synthesegases bei der Ammoniaksynthese. Der bei sehr tiefen Temperaturen verflüssigte Stickstoff hat aber in der Lebensmittelindustrie zahlreiche Einsatzgebiete, z.B. für das Gefriertrocknen von Lebensmitteln. Diese Mengen sind jedoch gering im Vergleich zum entstehenden Stickstoff.

Im Jahre 2014 wurden rund 6,6 Mio. m³ Sauerstoff in Deutschland produziert (VCI 2015, S. 13). Der Verbrauch hat sich in den letzten 15 Jahren kaum verändert. Dabei gehört die Sauerstoffherstellung zu den größten Stromverbrauchern der Chemischen Industrie.

Grundlegender Herstellungsprozess und damit verbundene THG-Emissionen (und Energieverbräuche)

Der Tieftemperaturzerlegungsprozess ist der dominierende Prozess in der Chemischen Industrie zur Herstellung von Sauerstoff und besteht aus folgenden Prozessschritten: Kompression und Kühlung, Reinigung der Luft sowie Rektifikation (ein thermisches Trennverfahren). Die Druckenergie der Luft aus der Rektifizierstufe wird für den Antrieb einer Turbine eingesetzt, mit der man elektrischen Strom gewinnen kann.

Die Tieftemperaturluftzerlegung ist ein energieintensiver Prozess, da die Luft auf fast minus 190 °C gekühlt und dabei verflüssigt wird. Für die Kompression der Luft wird überwiegend elektrische Energie eingesetzt. Der Energiebedarf hängt davon ab, ob die Gase in flüssiger oder gasförmiger Form benötigt werden.

Da nur Strom eingesetzt wird, entstehen nur indirekte CO₂-Emissionen, bei der derzeitigen Produktionsmenge sind es rund 1,4 Mio. t CO₂ pro Jahr. Der spezifische Energieverbrauch, nur bezogen auf Sauerstoff, beträgt dabei 0,95 GJ pro Tonne Sauerstoff (Saygin et al. 2008).

Zukünftige Entwicklung des Produktes

Der Bedarf für Sauerstoff wird im Zeitraum bis 2050 im gleichen Umfang wie das Wachstum der Chemischen Industrie zunehmen. Steigender Bedarf könnte entstehen, wenn Biomasse in großem Stil zu Synthesegas mit Hilfe von reinem Sauerstoff vergast wird. Ähnliches könnte für die Vergasung von Braunkohle gelten, die jedoch aus Klimaschutzgründen nicht in Betracht zu ziehen ist. Auch könnten Oxidationsprozesse mit reinem Sauerstoff bzw. mit Sauerstoff angereichertem Gasmisch anstelle von Luft den Bedarf positiv beeinflussen. Eventuell wird zusätzlich der Bedarf an reinem Sauerstoff für spezielle Prozesse steigen. Da Sauerstoff immer am jeweiligen Standort erzeugt wird, entspricht der Bedarf der Produktion.

Sollte die Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Quellen durch Wasserelektrolyse im großen Stil realisiert werden, stünden entsprechende Mengen an Sauerstoff

preisgünstig zur Verfügung. Dieser könnte dann für die Vergasung von Biomasse eingesetzt werden, was die Wirtschaftlichkeit bedeutend verbessern würde.

Prozess- und Rohstoffsubstitution

Die Tieftemperaturluftzerlegung ist der dominierende Prozess zur Gewinnung von Sauerstoff und Stickstoff für die Chemische Industrie (mit einem Anteil von über 90 % an der Produktion) und wird es wahrscheinlich für die nächste Zukunft bleiben (Häring 2007, 13ff.). Sie eignet sich für große Durchsätze und hohe Reinheit der Gase. Weitere Verfahren sind das Druckwechsel-Adsorptionsverfahren und das Membranverfahren. In der Entwicklung befindet sich noch das Keramikmembranverfahren, das hohe Temperaturen benötigt und sich daher für Prozesse eignet, bei denen preiswerte Wärme zur Verfügung steht, wie in Kraftwerken. **BVT, Energieeinsparoptionen und –potenziale**

Der Prozess der Tieftemperaturluftzerlegung ist ausgereift und gilt als BVT. Jedoch sind weitere Optimierungsmaßnahmen möglich, die den Energieverbrauch weiter senken werden.

Aufgrund der oben beschriebenen Situation ist vereinzelt mit der Errichtung von neuen Anlagen zu rechnen. Ältere Anlagen können eventuell ersetzt werden, wenn diese durch Instandhaltungskosten und Energiekosten bedingt gegenüber neuen Anlagen nicht mehr wirtschaftlich sind. Der Zeitpunkt ist aber nicht absehbar. Die Lebensdauer von Luftzerlegungsanlagen wird auf 40 Jahre geschätzt, abhängig von Art und Intensität der Modernisierungsmaßnahmen.

Der absehbar steigende Einsatz von regenerativem Strom für die Herstellung von Sauerstoff führt zukünftig zu einer entsprechenden Reduktion der CO₂-Emissionen.

5.5 Papierindustrie

5.5.1 Bedeutung für die deutsche Wirtschaft, Grundzüge der Papierherstellung

Wirtschaftliche Bedeutung

Der Sektor „Papierindustrie“ ist mit dem in der amtlichen Statistik abgegrenzten Wirtschaftszweig „Herstellung von Holz- und Zellstoff, Papier, Karton und Pappe“ gleichzusetzen. Rund 95 % des Umsatzes und der Beschäftigten entfallen auf die eigentliche „Papier- und Karton bzw. Pappe-Industrie“, nur 5 % des Umsatzes und der Beschäftigten sind der vorgelagerten Sparte „Holz- und Zellstoffproduktion“ zuzuschlagen.

Die Papier erzeugende Industrie in Deutschland steht weiterhin unangefochten an der Spitze der europäischen Papierindustrie mit einer Produktion von 22,4 Mio. Tonnen Papier, Karton und Pappe in 2013 (VDP 2015). Zwar gilt die deutsche Papierindustrie eher als kleine Branche, hat aber in einigen regionalen Wirtschaftsräumen durch die schiere Größe der einzelnen Unternehmen eine hohe Bedeutung (Dispan und Vassiliadis 2014).

Bundesweit dominieren Unternehmen, bei welchen zwischen 100 und 250 Beschäftigte tätig sind. Der Anteil an Unternehmen mit weniger als 50 Beschäftigten beläuft sich zwar auf etwa 16 %, beim Gesamtumsatz lag deren Anteil im Jahr 2012 jedoch nur bei 1 % (Dispan und Vassiliadis 2014). Etwa 60 % der Papierfabriken gehören bundesweit ausländischen Konzernen an (Muntzke 2005).

Die deutsche Papierindustrie ist seit etlichen Jahren von erheblichen Re- und Umstrukturierungen betroffen. So waren im Jahr 2014 insgesamt knapp 40.000 Erwerbstätige in knapp 180 Betrieben beschäftigt; dies stellt bezogen auf das Jahr 2000 einen deutlichen Rückgang um ca. 6 % dar.

Die Papierfabriken in Deutschland produzieren ein breites Spektrum von verschiedenen Papiersorten unterschiedlichster Qualität und Güte, wie z.B. graphisches Papier, Spezialpapier, Verpackungspapiere oder auch Hygienepapiere. Durch diese vielfältige Produktion wurde 2014 in Deutschland ein Umsatz von insgesamt 5,9 Milliarden € (Dispan und Vassiliadis 2014; Commerzbank 2015) erwirtschaftet. Dies stellt einen Zuwachs von knapp 10 % gegenüber dem Jahr 2000 dar. Etwas über die Hälfte des Umsatzes (58,3%, VDP 2015) wurde durch den Export ins Ausland erzielt.

An die Erzeugung von Papier, Pappe und Karton durch die Papierfabriken schließt sich meist eine weitere Verarbeitung der Produkte durch entsprechende Unternehmen der Papierindustrie (z.B. Verpackungsmittel, Schreibwaren und Bürobedarf, Tapeten, Wellpapier, Haushaltsartikel aus Papier und Zellstoff, etc.) an. Dieser Bereich der Papier-, Karton- und Pappe-Verarbeiter generierte im Jahr 2014 einen zusätzlichen Umsatz von 20 Mrd. € (Dispan 2013; Commerzbank 2015).

Grundzüge der Papierherstellung

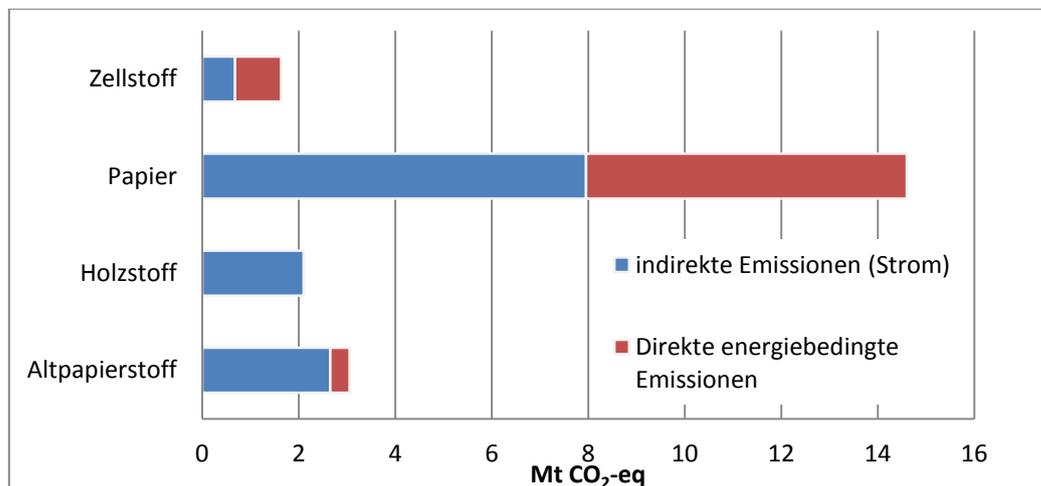
In der modernen Papierherstellung stellen Holz und Altpapier, aus welchen die benötigten Faserstoffe gewonnen werden, die wichtigsten Rohstoffe dar. Aus Holz wird in einem chemischen Verfahren Zellstoff hergestellt, mit Hilfe mechanischer Verfahren gewinnt man Holzstoff. Durch Aufbereitung von Altpapier wird der sogenannte Altpapierstoff gewonnen. Neben diesen drei Faserstoffarten fließt außerdem ein beträchtlicher Teil an Nichtfaserstoffen, sogenannte Füll- und Hilfsstoffe (Additive), in die Produktion ein. Holz stellt prinzipiell jedoch den wichtigsten Rohstoff der Papierherstellung dar. Durch Verwendung von Altpapier als Rohstoffquelle kann der Zufluss an frischen Cellulosefasern sowie der spezifische Energiebedarf der Papiererzeugung signifikant reduziert werden.

Die Papiererzeugung beinhaltet verschiedene vertikal verbundene Verfahren, die oftmals in einer betrieblichen Einheit durchgeführt werden. So haben Papierfabriken, die holzhaltige Papiersorten produzieren, in der Regel eine eigene Holzschliff- oder Holzstofferzeugung. Zellstoff wird im Gegensatz dazu meist auf dem internationalen Markt zugekauft oder aus einem der beiden deutschen Zellstoffwerke bezogen. Altpapier, der mengenmäßig bedeutendste Rohstoff für die Papiererzeugung, wird in sehr vielen Papierfabriken in Deutschland eingesetzt (Dispan und Vassiliadis 2014).

5.5.2 Bedeutung für den Klimaschutz, THG-Emissionen und Energieeinsatz

Im Jahr 2007 emittierte die deutsche Papierindustrie etwa 14,3 Mio. t CO₂, wobei es sich zum größten Teil um direkte energiebedingte Emissionen aufgrund des Brennstoffbedarfes handelt sowie im Weiteren um indirekte Emissionen durch den Strombezug (vgl. Abbildung 14) aus welcher für dieses Jahr die Aufteilung auf diverse (Zwischen-)Produkte hervorgeht). Im Jahr 2011 waren die energiebedingten CO₂-Emissionen (aus Brennstoffeinsatz, Strom- und Wärmebedarf) auf 17,8 Mio. t CO₂ angestiegen (+24,5 % gegenüber 2007) (VDP 2012). In 2014 betragen die spezifischen Emissionen der Papierindustrie in Deutschland 0,663 t CO₂ pro Tonne produzierter Tonne Papier, somit beliefen sich die absoluten (direkten und indirekten) Emissionen dieses Sektors auf insgesamt 14,9 Mio. t CO₂ (VDP 2015).

Zu beachten ist, dass prozessbedingte Emissionen bei der Papierherstellung grundsätzlich nicht anfallen.



Quelle: Fleiter et al. 2013

Abbildung 14: Treibhausgasemissionen der Papierherstellung im Jahr 2007

Mit einem Energiekostenanteil von über 10 % des Umsatzes (VDP 2015) gehört die Papierindustrie zu den energieintensiven Wirtschaftszweigen in Deutschland. Insbesondere die Trocknung der Papierbahn in der Papiermaschine benötigt viel Energie in Form von Wärme (vgl. Abbildung 15). Im Gegensatz dazu ist das Mahlen der Faserstoffe im sogenannten Refiner bei der vorgelagerten Holzstoff- bzw. Zellstofferzeugung besonders stromintensiv. Damit ist die Wirtschaftlichkeit der Papierherstellung in großem Maße von den Energiepreisen sowie dem effizienten Umgang mit Energie abhängig (Fleiter et al. 2013).

Der Energiebedarf der gesamten Papierindustrie belief sich laut AGEB im Jahr 2013 in Deutschland auf insgesamt knapp 230 PJ, wovon jeweils gut 30 % mittels Strom und Gasen verschiedenster Art gedeckt wurden. Die Verwendung von Biomasse und erneuerbaren Abfällen mit etwa 12 % des gesamten Energiebedarfes spielt auf der energetischen Seite ebenfalls eine wichtige Rolle. Aufgrund steigender Produktion von Verpackungspapieren wird der durchschnittliche spezifische Energiebedarf der Papierpro-

duktion deutlich absinken, denn der spezifische Energiebedarf bei der Produktion von Papier ist sowohl auf der Stromseite als auch auf der Wärmeseite von der Qualität, der Zusammensetzung und den gewünschten Eigenschaften der produzierten Papiersorte abhängig (siehe unten, vgl. Tabelle 25). Die Produktion von Verpackungspapieren aus Altpapier (ohne Deinking (Druckfarbenentfernung beim Papierrecycling)) weist mit einem Strombedarf von 300–700 kWh pro produzierter Tonne Papier den bei weitem geringsten Strombedarf auf, während die Produktion von Tissue (z.B. für Hygienepapiere) den größten Wärmebedarf hat.

Der Endenergiebedarf der Papierindustrie ging zwischen 1955 und 1985 deutlich um etwa 50 % zurück. Anschließend verlangsamte sich der Effizienzfortschritt in der Papierindustrie, sodass der Endenergiebedarf zwischen 1985 und 2012 insgesamt nur noch um gut 20 % zurückging.

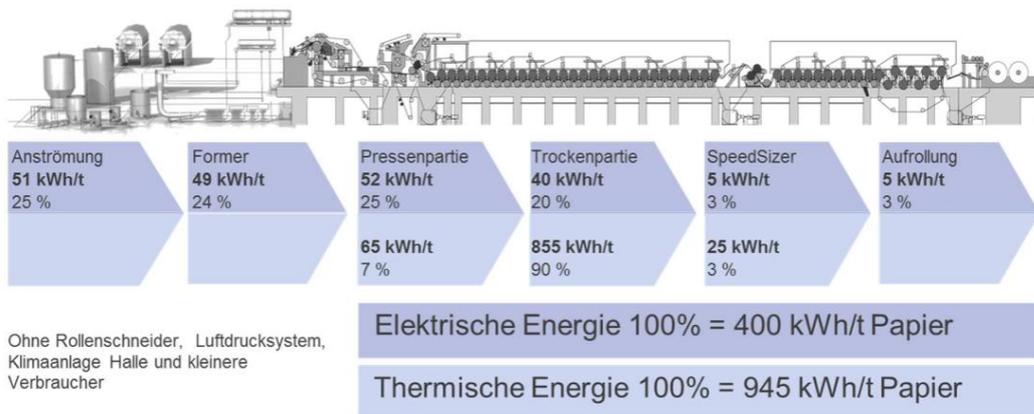
Tabelle 25: Darstellung des spezifischen Energiebedarfs (typische Bereiche) in Abhängigkeit von der Papiersorte

Sortenbereich		spezifischer Energiebedarf	Einheit
Holzhaltige Papier	Strom	1.200 - 2.100	kWh/t
	Wärme	1.000 - 1.800	
Gestrichene holzfreie Papiere	Strom	600 - 1.000	
	Wärme	1.200 - 2.100	
Holzstofffreie Spezialpapiere	Strom	600 - 3.000	
	Wärme	1.600 - 4.500	
Verpackungspapiere aus Altpapier (ohne Deinking)	Strom	300 - 700	
	Wärme	1.100 - 1.800	
Graphische Papiere aus Altpapier (mit Deinking)	Strom	900 - 1.400	
	Wärme	1.000 - 1.600	
Tissue	Strom	800 - 2.000	
	Wärme	1.900 - 2.800	

Deinking: Druckfarbenentfernung beim Papierrecycling

Quelle: Jung und Kappen 2013; Brinkmann et al. 2014

Der in Deutschland energetisch bedeutendste Prozess der Wertschöpfungs-Kette in dieser Branche ist die Papierherstellung, welche die Herstellung einer Papierbahn aus Faserstoffen, Zusatzstoffen, Energie und Wasser bezeichnet. Die Prozesse am Ende der Wertschöpfungskette (Druckereien etc.) weisen im Vergleich zur eigentlichen Papierproduktion einen relativ niedrigen Energieverbrauch auf.



Quelle: Jung und Kappen 2013

Abbildung 15: Schematische Abbildung und Aufteilung des Energiebedarfs bei der Papierherstellung

5.5.3 Produktions- und nachfrageseitige Handlungsoptionen zur THG-Reduktion

Produktionsseitige Handlungsoptionen

Die Bemühungen der Papier- und Zellstoffindustrie, ihre CO₂-Emissionen zu mindern, fokussieren häufig auf folgende Bereiche:

- Steigerung der Energieeffizienz,
- Entwicklung integrierter Verfahrenslösungen, wie beispielsweise Wärmerückgewinnung oder Energie- und Stoffkreisläufe,
- Einsatz Erneuerbarer Energien und
- Eigenstromerzeugung.

Die Gewinnung von Zellstoff und die Herstellung von Papier, Karton oder Pappe ist durch den ETS erfasst. Insgesamt stieg die Zahl der emissionshandelspflichtigen Anlagen auf 153 gegenüber 151 Anlagen im Jahr 2013. Fünf Anlagen sind der Zellstoffherstellung zugeordnet, 148 der Papierherstellung. Die betroffenen Anlagen der Papier- und Zellstoffindustrie emittierten im Jahr 2014 etwa 5,4 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente. Dies entspricht einer Abnahme gegenüber 2013 um knapp 2,4 Prozent (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt 2015). Die rund 1.900 emissionshandelspflichtigen stationären Anlagen aller Branchen in Deutschland emittierten im Jahr 2014 insgesamt etwa 461 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente. (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt 2015).

Die Anlagenbauer versuchen durch den Einsatz neuer Technik (z.B. über den Einsatz von Altpapier, die Schonung von Wasserressourcen bzw. Maßnahmen zur Energiereduktion bei der Papierherstellung) zu bewirken, dass Ressourcen geschont werden. Dazu gehört es, bei der Papierherstellung die Quote an eingesetztem Altpapier zu erhöhen sowie den Primärenergieverbrauch und den Frischwasserverbrauch zu reduzieren. Die Verbesserung der Energieeffizienz hat im Übrigen nicht nur eine Reduktion der Energiekosten zur Folge, sondern geht meist auch mit einer Produktionserhöhung einher. Treiber für Forschung und Entwicklung bei den Papier- und Zellstoffproduzenten sind derzeit nach Aussagen der Papierindustrie (Schleich et al. 2010) in erster Linie die Anforderungen seitens der Kunden und die Energiepreise. Danach folgen der Klimaschutz und der Wunsch, die Umwelt zu schonen. Auch bei den Technologielieferanten stellen die Wünsche seitens der Kunden, der Papierhersteller, heute noch die Treiber für die Forschung dar: „Ausschließlich die Kundenbedürfnisse sind die Treiber für Entwicklungen“, erklärte ein Technologielieferant, „Strategien und Entwicklung richten sich nicht nach Klimapolitik aus.“ (Schleich et al. 2010)

Um die Treibhausgas-Emissionen der Papierproduktion in Deutschland von heute 14,9 Mio. t CO₂ weiter zu reduzieren, muss grundsätzlich auf der energetischen Seite

angesetzt werden, da in diesem Sektor keinerlei prozessspezifischen THG-Emissionen anfallen. Es ist zu erwarten, dass die THG-Emissionen der Papierindustrie auf längere Sicht rückläufig sein werden, da der Anteil der erneuerbaren Energien zur Wärmebereitstellung derzeit erst knapp 12 % beträgt. Dieser Anteil sollte sich zukünftig durch inkrementelle und radikale Innovationen auf der Brennstoffnutzungsseite, z.B. auch durch eine verstärkte Nutzung der Schwarzlauge, auf ein deutlich höheres Niveau steigern lassen. Gleichzeitig dürften auch die indirekten THG-Emissionen des Strombezugs aufgrund der Änderungen beim bundesdeutschen Strom-Mix zukünftig weiter rückläufig sein.

Da Papiermaschinen eine Lebensdauer von etwa 20 Jahren aufweisen (Austropapier 2012), könnte die Politik versuchen, möglichst schnell die geeigneten Rahmenbedingungen für eine investitionsfreundliche Zukunft zu schaffen; insbesondere auch eine zuverlässige mittel- bis langfristige Planungssicherheit für die Unternehmen.

Bei den Papierfabriken fallen derzeit noch sehr große Mengen an Abwärme an, die ungenutzt in die Umgebung abgegeben werden, obwohl bereits heute in vielen Papierfabriken zu gewissen Graden Wärmerückgewinnung betrieben wird. (vgl. Abbildung 16). So fallen bei den Trockenhauben pro Tonne produzierten Papiers durchschnittlich 855-1.000 kWh an Abwärme an (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16). Die Abluft der Trockenpartie der Papiermaschine weist ein Temperaturniveau von 60-80 °C auf und die Abluft der Trockenpartie der Streichmaschine hat gar eine Temperatur von 100-140 °C. Bei einem solchen Abwärmefall könnte zukünftig eine verstärkte Wärmerückgewinnung (vgl. Tabelle 26) mittels Wärmepumpen betrieben oder die Niedertemperaturabwärme oberhalb von 90 bis 100 °C zur Eigenstromerzeugung mittels ORC-Anlagen genutzt werden. Durch die Nutzung der warmen Abluft zur Stromerzeugung kühlt diese ab, wodurch Kaltrauch entsteht. Dieser Kaltrauch lässt sich dann als weiterer Vorteil für die Papierindustrie besser filtern als heißere Abluft.

Tabelle 26: Effizienzpotenziale bei der Nutzung von Niedrigtemperatur-Abwärme

Wärmetausch	Relevanz	Art der Nutzung von Niedertemperaturabwärme	Wärme und CO ₂ -Einsparpotenzial	spez. Einsparpotenzial	spez. CO ₂ -Reduzierungspotenzial
Luft - Wasser	alle Papierfabriken	Wärme Trockenpartie zur Aufwärmung von Sieb-/Frischwasser	6-7 %	77-88 kWh/t	18-20 kg/t
Luft - Wasser	alle Papierfabriken	Wärme Pressenpartie zur Aufwärmung von Sieb-/Frischwasser	2-4 %	32-60 kWh/t	7-14 kg/t
Wasser - Wasser	alle Papierfabriken	Wärme Abwasser zur Aufwärmung des Frischwasser	ca. 10 %	ca. 131 kWh/t	ca. 34 kg/t
Wasser - Wasser	nur Papierfabriken mit Holzstofferzeugung	Wärme Schleiferei zur Aufwärmung von Sieb-/Frischwasser	ca. 2 %	ca. 26 kWh/t	ca. 6 kg/t
Wasser - Extern	alle Papierfabriken (bei vorh. Fernwärmenetz)	Wärme Abwasser zur Einspeisung ins Fernwärmenetz	ca. 7 %	ca. 100 kWh/t	ca. 23 kg/t

Quelle: Fleiter et al. 2013

Generell sind hohe Energieeffizienzpotenziale in der Papierindustrie dort vorhanden, wo ein besonders hoher Energiebedarf besteht. So würde auch in Zukunft sicherlich eine systematische Analyse der Papierproduktionsanlagen, die die einzelnen Prozesse umfassend und detailliert betrachtet, bei der Identifikation von Energieeffizienzoptionen helfen, da noch sehr große Potenziale in den konventionellen Technologien stecken (vgl. Tabelle 26). Durch die Beseitigung von Druckluftleckagen könnten beispielsweise enorme Effizienzpotenziale erzielt werden. Alleine durch die richtige Einstellung und den richtigen Betrieb ließen sich die Kompressoren in der Regel um etwa ein Drittel herunterfahren.

Daher sollten zukünftig Informations- und Aufklärungskampagnen ins Auge gefasst werden, die das Wissen über derartige Potenziale auf breiter Ebene kommunizieren und verbreiten. Nicht zu vernachlässigen ist dabei der Faktor Mensch und der Umgang des Menschen mit den entsprechenden technischen Anlagen bei Betrieb und Wartung.

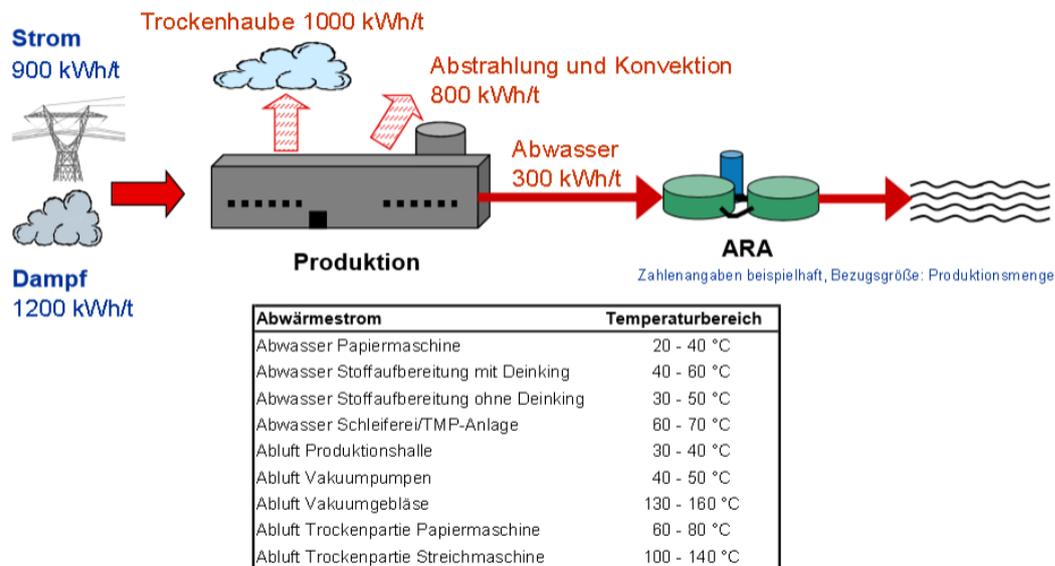
Bei Betrachtung von Abbildung 15 springt sofort die Trockenpartie mit einem dort angegebenen spezifischen Brennstoffbedarf von durchschnittlich 855 kWh pro Tonne produzierten Papiers ins Auge. Dieser Bedarf entspricht einem Anteil von 90 % des gesamten spezifischen Brennstoffbedarfs der Papierproduktion. Energieeffizienzmaßnahmen auf der Brennstoffseite sollten daher nach Möglichkeit zukünftig primär an der Trockenpartie ansetzen, zumal diese auch 20 % des gesamten Stroms benötigt. Einen besonders hohen Strombedarf weist heute noch generell die Mahlung im Refiner auf, welcher in der Regel zur Nachmahlung der Faserstoffe eingesetzt wird.

So könnten z.B. alternative Zerfaserungsprozesse zur Herstellung schwefelfreier Schwarzlauge (Mischung aus Lignin, Wasser und Chemikalien) bei der Zellstoffproduktion im Falle einer breiten Diffusion in Deutschland zu einer deutlich klimaschonenderen Erzeugung von Wärme bzw. Strom innerhalb der Zellstoff- bzw. Papierindustrie beitragen. Große Teile des benötigten Energiebedarfes, der heutzutage häufig noch mittels fossiler Brennstoffe (überwiegend Gas) gedeckt wird, könnten durch Verbrennung von schwefelfreier Schwarzlauge erzeugt werden. Auch könnte zukünftig der Einsatz von frischen Rohstoffen durch zunehmende Materialeffizienzmaßnahmen immer weiter vermieden werden. So ist es bereits heute möglich, im Vergleich zur Vergangenheit dünneres Papier herzustellen und somit den Einsatz von frischen Cellulosefasern pro Tonne produzierten Papiers deutlich zu reduzieren.

Bereits heute wird in der Papierindustrie in erheblichem Maße Stromeigenerzeugung mittels KWK-Anlagen betrieben. Aufgrund der Größe und Leistung der eingesetzten Kesselanlagen bietet sich in dieser Industriebranche der KWK-Einsatz geradezu an. Daher ist zu erwarten, dass die Diffusionsrate der KWK-Anlagen bei entsprechenden politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen noch deutlich ansteigen wird. Die gesteigerte kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme führt ebenfalls zu einem weiteren Rückgang der THG-Emissionen der Papierindustrie.

Um die Treibhausgasemissionen der deutschen Papierindustrie vollständig größtenteils bis 2050 zu vermeiden, muss auf der energetischen Bedarfsseite der Papierindustrie angesetzt werden. Es bedarf hier der Umstellung der Energieversorgung von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energieträger (Biomasse, Ligninnutzung, Reststoffe). Weiterhin sollte die Photovoltaik bzw. Solarthermienutzung überprüft und gegebenenfalls ausgebaut werden. Die Abwärmenutzung spielt außerdem eine wichtige Rolle.

Weitere Ansatzpunkte für die Dekarbonisierung werden innovative Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der deutschen Papierindustrie bieten.



Quelle: Jung und Kappen 2013

Abbildung 16: Abwärmeströme einer Papierfabrik

Von großer Bedeutung sollte für die Papierindustrie in Zukunft die Ausgestaltung der gesetzlichen Regelungen insbesondere zum Emissionshandel, zu den erneuerbaren Energien (EEG) oder zur KWK (KWKG) sein.

Letztendlich wäre auch der Aufbau eines Wissens-Netzwerkes bzw. einer Technologie-Plattform zur energie- und materialeffizienten Papierproduktion hilfreich, bei welcher alle wesentlichen Akteure entlang der Wertschöpfungskette der Papierherstellung teilnehmen sollten. Dazu zählen neben den eigentlichen Papierproduzenten auch die Technologielieferanten, die Zulieferer der Papierindustrie oder Forschungseinrichtungen sowie Akteure aus der entsprechenden Holzindustrie.

5.5.4 Mögliche Entwicklung von Produktion und Nachfrage

Für die Entwicklung der Nachfrage nach Papier der verschiedensten Sorten sind generell vier Faktoren essentiell:

- die demografische und ökonomische Entwicklung,
- die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland und der restlichen Welt, da jeder Einwohner für unterschiedliche Verwendungszwecke jeweils einen Bedarf an einer gewissen Menge von graphischem Papier, Hygienepapieren, Verpackungspapieren oder beispielsweise Spezialpapieren benötigt (Dispan, 2013).,
- die Substitution von Papier als Rohmaterial oder Produkt jeglicher Art durch alternative Materialien bzw. Produkte und
- die Entwicklung innovativer und neuartiger Produkte und Materialien basierend auf Papier.

Weltweit zeigte die Papierindustrie in 2014 aufgrund gestiegener Konsumausgaben vor allem in den Industrieländern eine leicht höhere Wachstumsrate als in den beiden Vorjahren. Für das Jahr 2015 ist eine ähnliche Tendenz zu erwarten, die allerdings hinter dem allgemeinen Industriewachstum zurückzubleiben scheint. Aus den Erfahrungen der letzten Jahre (2009-2014) kann geschlossen werden, dass der Papierkonsum generell sehr konjunkturabhängig ist.

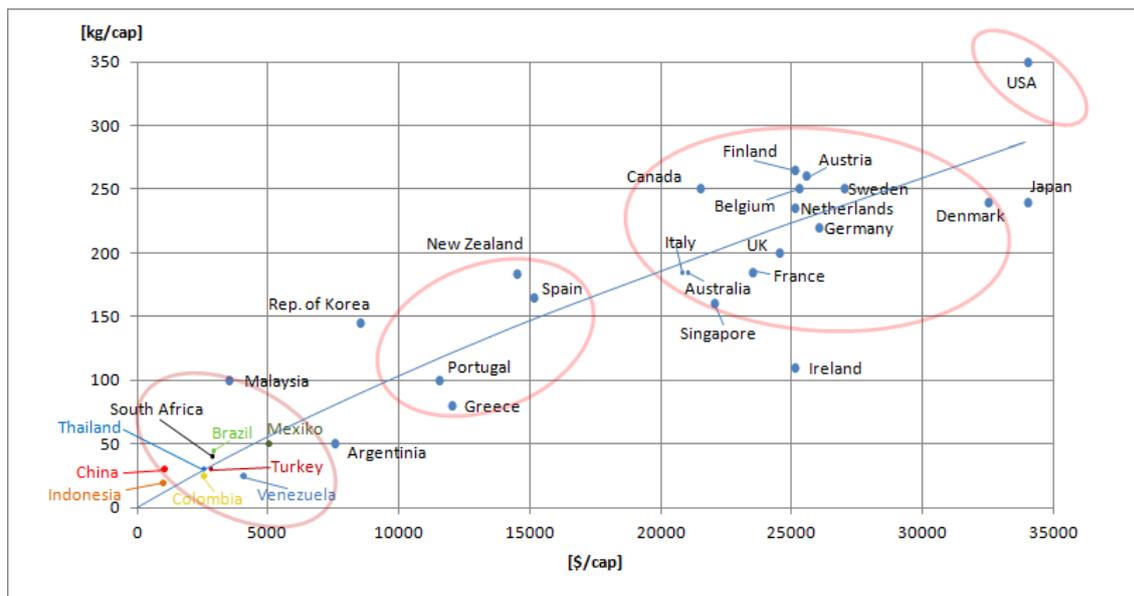
Die Nachfrage nach unterschiedlichen Papiersorten zeigt in den meisten Industrieländern Westeuropas und Nordamerikas in Zukunft eine stagnierende Tendenz auf, so dass u.a. Überkapazitäten im Bereich der graphischen Papiere in Deutschland erhalten bleiben. Hinzu kommt, dass im Bereich der Papierindustrie, auch global gesehen, ganz generell eine Verschiebung der Nachfrage bzw. Produktion in Richtung der Schwellenländer in Asien (z.B. China) oder Lateinamerika festzustellen ist (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 18, Dispan 2013; Steinmüller 2014); dies gilt somit auch für die damit verbundenen THG-Emissionen.

Somit steigt der internationale Wettbewerb weiter an und es erscheinen auch neue Player auf dem deutschen bzw. europäischen Papiermarkt, welche die Papierproduktion in Deutschland und Europa stark beeinflussen (Dispan 2013). Die Papierproduzenten in Deutschland werden sich zwangsläufig immer mehr auf einen verstärkten Importdruck einstellen müssen. Gleichzeitig wird der deutschen Papierindustrie der Export zunehmend erschwert werden, da bis 2050 gewaltige Produktionskapazitäten in den heutigen Schwellenländern aufgebaut werden dürften.

Sorte \ Region	West Europa	Ost Europa	Asien-Australien	Nord Amerika	Latein Amerika	Gesamt	Wachstumsraten
GESAMT							 < 0 %
Zeitungsdruck							 0 < 2 %
Ungestrichene Holzhaltige Papiere		8,1 %					 ≥ 2 %
Gestrichene Holzhaltige Papiere		39,7 %					
Ungestrichen Holzfrei							
Gestrichen Holzfrei		13,4 %					
Hygienepapier							
Sackpapier							
Wellenrohrpapier							
Faltschaltelkarton							

Quelle: Opletal 2009

Abbildung 17: Entwicklung des Papierverbrauchs bzw. der Papierproduktion bis zum Jahr 2025, unterschieden nach verschiedenen Regionen in der Welt sowie unterschiedlichen Papiersorten (Einheit: jährliche Wachstumsraten)



Quelle: nach Jungmeier et al. 2003

Abbildung 18: Papierverbrauch [kg/cap] in Abhängigkeit des Brutto-Nationalproduktes [\$/cap]

Der internationale Markt für die unterschiedlichen Papiersorten befindet sich im Wandel, insbesondere für Druckpapiere und Printmedien. Für die deutsche Papierindustrie sind insbesondere der Zugang zu Rohstoffen, die hohe Kostenflexibilität und Produktivität, die Nachfrage nach qualitativ hochwertigen Produkten und eine enge Kundenbindung wichtige Fragen in der Zukunft.

Der zukünftige Bedarf an unterschiedlichen Papiersorten in Deutschland wird außerdem von einer Reihe von „Megatrends“ beeinflusst. So wächst durch die zunehmende Substitution von Druckpapieren und Printmedien die Papierindustrie schwächer, wodurch weltweit eine Umstrukturierung der Papierindustrie beschleunigt wird. Der strukturelle Nachfragerückgang schlägt sich in erheblichen Kapazitätsstilllegungen und Überkapazitäten am Markt nieder, wobei der Kapazitätsabbau der Marktentwicklung nachhinkt.

Eine Reihe gesellschaftlicher Prozesse wird die Produktion bzw. die Nachfrage nach den unterschiedlichen Papiersorten bzw. Papier im Allgemeinen beeinflussen. Sie können sich positiv oder negativ auf die Nachfrage nach dem „Rohmaterial“ Papier oder entsprechenden Produkten auswirken und demzufolge auch die Papierproduktion positiv oder negativ beeinflussen.

Für die Papiernachfrage negative Einflussfaktoren

- Durch die Zunahme der Onlinemedien-Nutzung werden sich Veränderungen des Papierbedarfs v.a. bei Zeitungspapieren und für sonstige Printmedien ergeben. In Zukunft ist sowohl eine Kooperation (z.B. Werbung), als auch eine gegenseitige Konkurrenz zwischen Print- und Onlinemedien zu erwarten. Der Stärken beider Medien werden optimiert und damit in Wettbewerb bleiben.

- Heutzutage sind Printmedien zu mehr als 50 % durch Werbeeinnahmen finanziert. Werbeeinnahmen sind außerdem stark in elektronischen Medien verbreitet, was eine Substitution fördern könnte. Aus ökologischer Sicht wünschenswert wäre ein weitgehender Verzicht auf Werbung in Printmedien, zumindest der Verzicht auf in großer Auflage produzierte Werbebeilagen zu Tageszeitungen oder auf Wurfsendungen.
- In Deutschland wird die Nachfrage nach Druckpapieren (z.B. graphische Papiere oder Zeitungspapier) und Printmedien in den kommenden Jahren generell deutlich zurückgehen, da die klassischen Produkte und Anwendungen zunehmend durch digitale Medien (Internet, E-Books bzw. E-Zeitschriften) substituiert werden. Diese Entwicklung wird von der Verfügbarkeit neuer Medien und der weiteren Durchdringung von Smart-Geräten (E-Book-Readern, elektronisches Papier, etc.) bestimmt. Die Wechselwahrscheinlichkeit zu neuen Medien hängt von den erweiterten Funktionalitäten, den Lesegewohnheiten und der emotionalen Bindung der Nutzer an alte Medien bzw. Gewohnheiten ab. Weltweit wird sich zeigen, ob und wie weit sich die Substitution von Printmedien durch Onlinemedien durchsetzen kann.
- Mittelfristig haben die digitalen Medien bzw. Geräte einen besonders starken negativen Einfluss auf die Nachfrage nach graphischen Papieren und Printmedien.

Für die Papiernachfrage positive Einflussfaktoren

- Die Produktion von Verpackungspapieren wird vom zunehmenden nationalen und internationalen Online- bzw. Welthandel positiv beeinflusst. Die Nachfrage nach Transportverpackungen jeglicher Art bleibt zukünftig zunächst stabil steigend und entsprechende Kapazitäten werden auf- bzw. ausgebaut. Die Nachfrage nach Verpackungsmaterialien (z.B. Papier, Pappe, Karton, etc.) wird zunächst weiter kräftig ansteigen, sodass die sich im Aufbau befindenden Kapazitäten zur Produktion von Verpackungspapieren mittelfristig ausgelastet sein dürften (Dispan 2013).
- Fraglich ist, ob bis zum Jahr 2050 nicht eventuell ganz neue Verpackungskonzepte entwickelt werden, welche einen geringeren oder alternativen Materialbedarf aufweisen (z.B. einzig Verpackung der Ecken und Stoßkanten, Einsatz neuer Materialien, Berücksichtigung bionischer Aspekte bei der Verpackung, etc.).
- Laut Dispan steht zukünftig auch bei den Spezialpapierherstellern (z.B. für Dekorpapiere, Etikettenpapiere, Elektroisolierpapiere, Silikonpapiere, Thermopapiere, medizinische Papiere, etc.) ein Aufbau weiterer Produktionskapazitäten in Deutschland bevor, der auch durch die Umstrukturierungen bei den graphischen Papieren mit beeinflusst wird (Dispan 2013).
- Die Nachfrage nach Hygienepapierprodukten ist von Toilettenpapier dominiert, wobei in industrialisierten Ländern wie in West-Europa oder den USA auch weitere Tissue-Produkte zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die Nachfrage nach diesen Produkten ist an den zunehmenden Wohlstand gekoppelt. In industrialisierten Ländern stagniert der Bedarf an Toilettenpapieren, während das sonstige Tissue-Segment leicht steigen wird.

- Der Trend hin zur Leichtbauweise bei verschiedensten Produkten und Materialien wird zukünftig in zunehmendem Umfang zu einer stärkeren Papiernachfrage führen. Insbesondere durch das Zusammenspiel mit neuen Technologien (z.B. Nanotechnologie, Bionik, etc.) dürften sich in der Zukunft ganz neue Anwendungsgebiete für die Papierindustrie ergeben.

Weitere innovative Ansätze für Papieranwendungen sind für die Branche sehr wichtig, z. B. Anwendungen als Baumaterial für Häuser und Möbel, als Aktuator (Bauelement, das elektrische Signale in mechanische Bewegung oder in andere physikalische Größen umsetzt) für robotische Systeme oder als Leichtbaumaterial in der Automobil- und Flugzeugherstellung.

5.6 Eisen- und Stahlindustrie

5.6.1 Bedeutung für die deutsche Wirtschaft, Grundzüge der Eisen- und Stahlherstellung

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Rohstahlproduktion in Deutschland betrug im Jahr 2014 rund 42,9 Mio. t. Mit knapp 40 % konzentriert sich die Stahlerzeugung auf Nordrhein-Westfalen. Die Erzeugung in Deutschland entspricht gut einem Viertel der EU-Produktion von 169 Mio. t in 2014. Der EU-28-Wert wiederum lag 2014 bei gut 10 % der Welt-Rohstahlerzeugung von 1.668 Mio. t, zu der alleine China als weltweit größter Stahlproduzent mit 823 Mio. t fast die Hälfte bzw. fast das Zwanzigfache wie Deutschland beitrug.

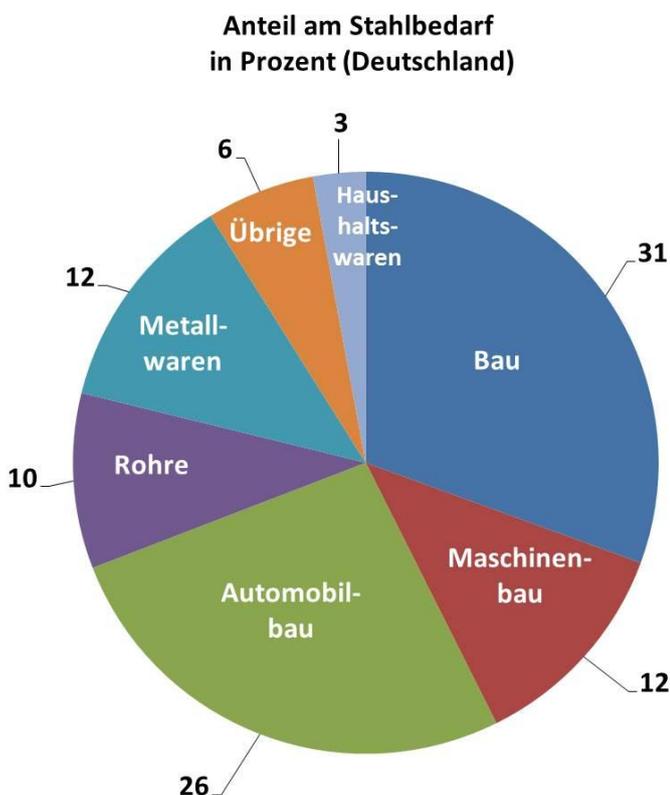
Mit 41,3 Mio. t (2014) entfällt der weitaus größte Teil der Rohstahlerzeugung auf Walzstahlprodukte einschließlich Halbzeug. Rund ein Fünftel der Produktion, nämlich 8,4 Mio. t, ist Edelstahl.

Das Niveau der Rohstahlproduktion in Deutschland ist seit 2010 relativ stabil, erreichte aber nach dem Krisenjahr 2009 nicht mehr die gegenüber heute um bis zu 10 % höheren Werte der Vorjahre (vgl. Tabelle 27). Gemäß den Erwartungen der Wirtschaftsvereinigung Stahl (Stand Dezember 2015) zeichnet sich auch für das Jahr 2015 ein Wert etwa in Höhe des Vorjahreswertes ab. Die Kapazitätsauslastung erreicht im bisherigen Jahresverlauf (ebenfalls Stand Dezember 2015) einen hohen Wert von 88 %, verglichen mit einem globalen Durchschnitt von 72 %.

Die Stahlnachfrage in Deutschland stammt zu knapp einem Drittel aus der Bauindustrie, gefolgt von der Automobilindustrie mit gut einem Viertel (vgl. Abbildung 19).

Die Branche betont, ein wichtiger Zulieferer für zahlreiche Abnehmerbranchen innerhalb der Industrie zu sein. Jeder Euro zusätzliche Wertschöpfung in der Stahlindustrie generiere rund zwei Euro Wertschöpfung in vorgelagerten Branchen, jeder Arbeitsplatz

in der Stahlindustrie sei mit fünf bis sechs weiteren Beschäftigten in Zulieferindustrien verbunden (WV Stahl 2015)²³.



Quelle: WV Stahl 2015

Abbildung 19: Stahlverwendung in Deutschland

Die Umsatzerlöse der Branche verdoppelten sich zwischen 2003 und 2008 (nach allenfalls leichtem Wachstum seit Mitte der 1990er Jahre mit Werten zwischen gut 21 und knapp 26 Mrd. €/a) und sanken dann im Zuge der Wirtschaftskrise 2009 deutlich ab. Nach der Krise erholte sich die Stahlindustrie rasch und erzielte mit knapp 50 Mrd. € in 2011 den insgesamt zweithöchsten Wert seit 2003. Seither sinken die Umsatzerlöse wieder deutlich (WV Stahl 2015).

Tabelle 27: Entwicklung der Rohstahlerzeugung und Umsatzerlöse der Stahlindustrie in Deutschland

Jahr	Rohstahlerzeugung in Mio. t	Umsatzerlöse in Mrd. €	Umsatzerlöse in Mrd. € pro Rohstahlerzeugung in Mio. t
2003	44,8	26,3	0,59
2010	43,8	40,7	0,93

²³ Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl, die nicht nachgeprüft werden konnten, den Autoren aber plausibel erscheinen.

2014	42,9	40,1	0,93
------	------	------	------

Quelle: WV Stahl 2015, eigene Berechnungen

Insgesamt tragen 14 Unternehmen zu 98 % der deutschen Rohstahlerzeugung bei. Die Erzeugung von Oxygenstahl entfällt auf sechs Unternehmen, zwei davon produzieren neben acht weiteren auch Elektrostahl.

Nach Angabe der WV Stahl wird derzeit rund 80 % des Außenhandelsgeschäfts innerhalb der EU abgewickelt. 2014 wurden rund 20 Mio. t Walzstahl (der weitaus größte Teil der Stahlproduktion ist Walzstahl; s.o.) exportiert, insgesamt ist der Außenhandelsaldo Deutschlands bei Walzstahl jedoch nahezu ausgeglichen. Beim Handel mit Drittländern außerhalb der EU werden hingegen traditionell Exportüberschüsse erzielt. Der deutsche Markt wurde 2014 zu rund 55 % aus heimischer Produktion versorgt. Der wesentliche Anteil der Importe stammte aus den übrigen EU-Ländern.

Die Stahlindustrie hat in den vergangenen Jahrzehnten enorme Rationalisierungserfolge erzielt. Im Jahr 1980 mit einer Rohstahlerzeugung von 43,8 Mio. t hatte die Branche 288 Tsd. Beschäftigte. Heute (2014) liegt die Rohstahlerzeugung mit 42,9 Mio. t auf vergleichbarem Niveau, die Anzahl der Beschäftigten ist aber um 70 % auf 87 Tsd. gesunken. Die Arbeitsproduktivität, ausgedrückt in Tonnen Rohstahl pro Beschäftigtem, hat sich weit mehr als verdreifacht. Dies lässt sich zumindest teilweise mit einem ausgeprägten Konzentrationsprozess in den vergangenen Jahrzehnten (insbesondere in den 80er und 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts) hin zu sehr großen, effizienten bzw. produktiven Anlagen erklären. Lag die Anzahl der Hochofenanlagen im Jahr 1980 noch bei 80, waren es im Jahr 2014 nur noch 17. Die Zahl der Oxygenstahlkonverter sank im gleichen Zeitraum von 47 auf 21. Die Zahl der Elektrolichtbogenöfen sank von 71 auf 27 im Jahr 2009; für die Folgejahre wurden hierfür keine Angaben veröffentlicht (WV Stahl 2015; VDEh und WV Stahl 2016).

Grundzüge der Eisen- und Stahlherstellung

Stahl wird in Deutschland heutzutage im Wesentlichen auf zwei Routen erzeugt²⁴:

- Durch Reduktion von Eisenerz mittels Kohlenstoffträgern (vorwiegend Koks sowie bis zu einer technischen Obergrenze auch Kohle und Öl oder kohlenstoffhaltige Abfälle) im Hochofen. Das entstehende Roheisen wird im anschließenden Prozessschritt des Frischens im Konverter zu Rohstahl verarbeitet. Dabei werden der unerwünschte Kohlenstoffgehalt des Roheisens sowie weitere Elemente, vor allem Phosphor und Schwefel, mit Sauerstoff oxidiert (daher die Bezeichnung „Oxygenstahl“). Zur Kühlung dieses exothermen Prozesses werden größere Mengen Stahlschrott beigegeben. Vorgelagerte Prozesse sind die Eisenerzaufbereitung in Sinter- und Pelletieranlagen sowie die Koksherstellung in der Kokerei.
- Durch Einschmelzen von Eisenschrott in Elektrolichtbogenöfen („Elektrostahl“). Da auf die energieintensive Eisenerzreduktion verzichtet werden kann, ist der spezifi-

²⁴ Eine übersichtliche und sehr gut verständliche Verfahrensbeschreibung findet sich auf der Internetpräsenz der Wirtschaftsvereinigung Stahl: <http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/stahlerzeugung/>

sche Energieverbrauch der Elektrostahlerzeugung erheblich niedriger als der der Primärstahlerzeugung über die Hochofen-/Konverterroute.

Es folgt die anschließende sekundärmetallurgische Weiterverarbeitung, das Vergießen und für die überwiegende Menge die Weiterverarbeitung zu Walzstuhlprodukten im Walzwerk.

Etwa zwei Drittel des in Deutschland erzeugten Rohstahls wird in integrierten Hüttenwerken (Hochofen, Stahl- und Walzwerk) als Oxygenstahl erschmolzen. Das verbleibende Drittel wird über die Elektrostahlroute hergestellt, wobei sich gegenüber 1990 der Elektrostahlanteil verdoppelt hat. Der Schrotteinsatz zur Rohstahlerzeugung insgesamt (in Elektrolichtbogenöfen und im Konverter) stieg im gleichen Zeitraum um knapp die Hälfte auf heute rund 45 bis 46 %.

Daneben wird an einem Standort in Hamburg noch das Direktreduktionsverfahren mit Erdgas als Reduktionsmittel eingesetzt. Das (Zwischen-)Produkt ist ein Eisenschwamm, welcher im Elektrolichtbogenofen zusammen mit Schrott eingesetzt und erschmolzen wird.

5.6.2 Bedeutung für den Klimaschutz, THG-Emissionen und Energieeinsatz

Eine Besonderheit der Treibhausgas-Emissionsberichterstattung für die Eisen und Stahlindustrie resultiert daraus, dass Kohlenstoff sowohl als Energieträger, als auch als Reduktionsmittel für Eisenerz im Hochofen eingesetzt wird. In beiden Fällen wird der Kohlenstoffträger zu CO_2 oxidiert, für die Aufteilung der Emissionen nach energiebedingt und prozessbedingt ist eine entsprechende Konvention der Emissionsberichterstattung erforderlich. Hervorzuheben ist die energetische Nutzung der Kuppelgase (Gichtgas aus der Roheisenerzeugung im Hochofen sowie Konvertergas aus dem anschließenden Prozessschritt der Stahlerzeugung), deren THG-Emissionen als prozessbedingt betrachtet werden, sofern diese brennbaren Gase im integrierten Stahlwerk genutzt werden. Größere Teilmengen dieser Kuppelgase werden aber auch in anderen Prozessfeuerungen der Stahlindustrie, in Kokereien sowie zur Verstromung eingesetzt. Die dort resultierenden THG-Emissionen werden den energiebedingten Emissionen hinzugerechnet. Insgesamt sind die THG-Emissionen der Primärstahlerzeugung zu etwa einem Drittel als prozessbedingt und zu zwei Dritteln als energiebedingt zu betrachten.

Die energiebedingten Treibhausgasemissionen der Erzeugung von Eisen und Stahl in Deutschland lagen im Jahr 2012 bei 33,24 Mio. t CO_2 äq. fast ausschließlich in Form von CO_2 . Lediglich knapp 0,2 Mio. t CO_2 äq. entfielen auf N_2O (knapp 0,13 Mio. t CO_2 äq.) und CH_4 (gut 0,06 Mio. t CO_2 äq.). Im Zeitverlauf blieben die Emissionen weitgehend konstant. Sie betragen im Jahr 2000 32,41 Mio. t CO_2 äq. und im Jahr 2005 30,16 Mio. t CO_2 äq. (vgl. UN FCCC 2015; Quellgruppe 1.AA.2.A). Unter Berücksichtigung der Produktionsentwicklung haben sich jedoch die spezifischen energetisch bedingten Treibhausgasemissionen (t CO_2 äq. pro t Rohstahl) zwischen 2005 und 2012 damit rechnerisch um knapp 7 % erhöht.

Die prozessbedingten Emissionen der Eisen und Stahlindustrie betragen gemäß den Angaben des Umweltbundesamtes in seinem Nationalen Inventarbericht (UBA 2014a) im Jahr 2012 16,40 Mio. t CO₂ äq. Gemäß (UNFCCC 2015) beträgt der Wert 15,91 Mio. t CO₂ äq. (Quellgruppe 2.C.1.1). Auch für die Jahre davor weist das UBA einen etwas höheren Wert aus. Dies erklärt sich vermutlich durch die Verwendung unterschiedlicher Berechnungsansätze für die Emissionen aus dem Reduktionsmitteleinsatz. Die Differenz der beiden Rechenergebnisse nimmt in den Jahren ab 2003 zu und lässt sich nach Angaben des UBA sachlich nicht erklären. Für die nationale Berichterstattung hat sich das Umweltbundesamt für die konservative - höhere - Abschätzung entschieden.

Im Gegensatz zu den energiebedingten Emissionen ist die Entwicklung der prozessbedingten THG-Emissionen rückläufig, sowohl absolut als auch spezifisch. Gemäß UNFCCC lagen sie in den Jahren Jahr 2000 und 2005 noch bei 20,27 bzw. 20,93 Mio. t CO₂ äq. Seit 2005 entspricht dies einer spezifischen Verringerung um über 20 %.

Neben den durch Reduktionsmitteleinsatz bedingten Emissionen, sind die aus Kalksteineinsatz in Sinteranlagen und im Hochofen resultierenden CO₂-Emissionen der Primärstahlerzeugung zuzurechnen. Der Beitrag zu den prozessbedingten Emissionen der Eisen- und Stahlerzeugung betrug im Jahr 2012 12,5 %.

Bei der Elektrostahlherstellung entstehen direkte CO₂-Emissionen durch den Abbrand der Graphitelektroden. Die emittierte Menge trug im Jahr 2012 jedoch nur zu 0,6 % zu den prozessbedingten Emissionen der Branche bei (UBA 2014a).

In der Summe (energiebedingt und prozessbedingt) betragen die Emissionen im Jahr 2012 49,16 Mio. t CO₂ äq. nachdem sie im Jahr 2000 noch bei 52,67 Mio. t CO₂ äq. und im Jahr 2005 bei 51,09 Mio. t CO₂ äq. gelegen hatten. Spezifisch hat sich der Emissionswert seit 2005 minimal um knapp 0,3 % erhöht, die Effekte bei den energetischen und bei den nichtenergetischen Emissionen haben sich also de facto kompensiert.

Energieverbrauch der Branche

Eine weitere Besonderheit der Eisen- und Stahlindustrie hinsichtlich ihrer Berücksichtigung in der Energiestatistik ist ihre von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen zugewiesene Zugehörigkeit zur energiestatistischen Gruppe der Endenergieverbrauchssektoren, jedoch mit ihren Hochöfen zum Umwandlungssektor. Auch der vorgelagerte Prozess der Kokserzeugung in Kokereien ist dem Umwandlungssektor hinzuzurechnen. Dies lässt die Relevanz der Stahlindustrie bei der Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen Deutschlands bei einer flüchtigen Betrachtung der Energiebilanzen nicht sofort erkennbar werden.

- Der **Umwandlungseinsatz der Kokereien** betrug 2013 insgesamt 349,0 PJ, davon entfiel der überwiegende Anteil mit 311,9 PJ auf Steinkohle. Hinzu kamen 31,7 PJ Petrolkoks, 5,1 PJ Braunkohle sowie geringe Mengen Flüssiggas. Der Ausstoß betrug insgesamt 311,2 PJ, davon 237,8 PJ Koks (Verwendung als Eisenerz-Reduktionsmittel), 68,6 PJ Kokereigas (energetisch nutzbar) sowie 4,9 PJ andere Braunkohleprodukte (AGEB 2015). Interessant ist ein Vergleich mit dem Jahr 2010. Damals hatte sich die Stahlindustrie von dem Einbruch im Vorjahr erholt und produ-

zierte mit 43,8 Mio. t Rohstahl rund 1,2 Mio. t mehr als 2013. Der Umwandlungseinsatz der Kokereien lag damals geringfügig höher und betrug 351,7 PJ, der Ausstoß war mit 317,0 PJ ebenfalls geringfügig höher. Die Relation zwischen Rohstahlproduktion und Aktivität der Kokereien hat sich also wenig verändert.

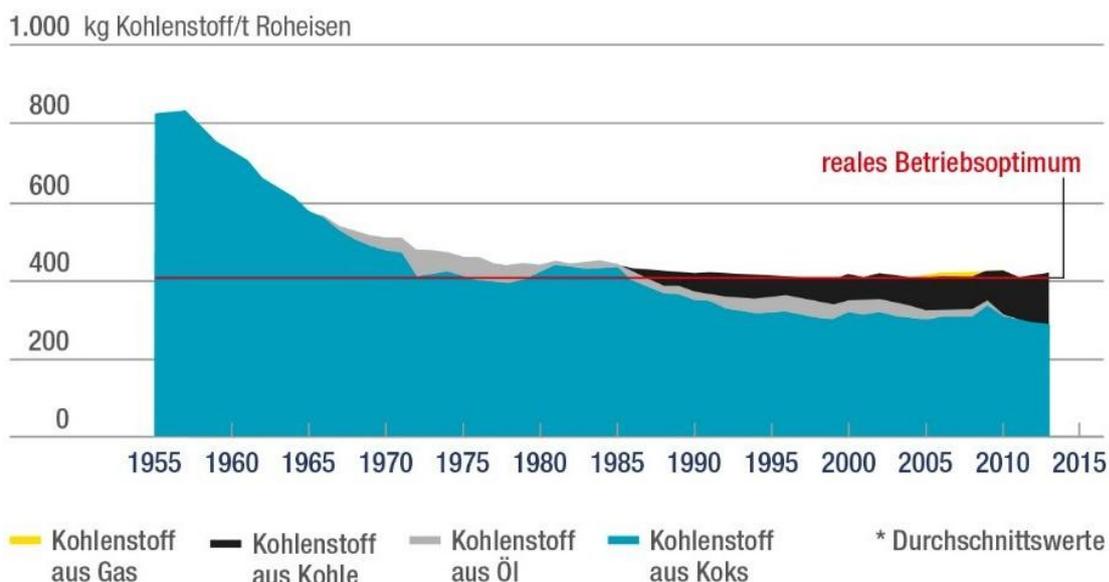
- Im Jahr 2013 betrug der **Umwandlungseinsatz der deutschen Hochöfen** rund 165,0 PJ in Form von Koks. Dem steht ein Umwandlungsaustoß in Form von Gichtgas (und Konvertergas) in Höhe von 177,7 PJ gegenüber. Dieser vermeintliche Widerspruch (dies würde einen Umwandlungswirkungsgrad >1 bedeuten) ist auf energiestatistische Unzulänglichkeiten zurückzuführen (Buttermann 2016) und erschwert die quantitative Analyse der energetisch bedingten Treibhausgasemissionen. Der gasförmige Umwandlungsaustoß lag im Vergleichsjahr 2010 bei rund 183,3 PJ, was annähernd der um rund 3 % höheren Rohstahlerzeugung in diesem Jahr entspricht. Dass im Jahr 2010 der Umwandlungseinsatz der Hochöfen in Form von Koks jedoch nur 144,5 PJ betrug und damit um über 12 % unter dem des Jahres 2013 lag, deutet auf einen zeitweilig reduzierten Kokeinsatz in der Roheisenerzeugung hin. Der **Endenergieverbrauch der Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen** betrug im Jahr 2013 535,7 PJ. Davon entfielen 185,4 PJ auf Steinkohle, 102 PJ auf Koks, 64 PJ auf Erdgas, 95,3 PJ auf Kokerei, Gicht- und Konvertergas (Umwandlungsprodukte; s. o.) sowie 72,8 PJ auf Strom.

5.6.3 Produktions- und nachfrageseitige Handlungsoptionen zur THG-Reduktion sowie Entwicklung von Produktion und Nachfrage

Produktionsseitige Handlungsoptionen

Die energie- und rohstoffintensive Eisen- und Stahlerzeugung ist seit jeher Gegenstand intensiver Verfahrensentwicklungen. Alternative Reduktionsverfahren, wie zum Beispiel das gasbasierte Direktreduktionsverfahren am Standort Hamburg, sind jedoch nicht nur in Deutschland eher Ausnahmen und eine Änderung dieser Situation ist in näherer Zukunft nach Einschätzung der Autoren nicht abzusehen.

Die Hochöfen in Deutschland wurden in den vergangenen Jahrzehnten erheblich verbessert und arbeiten nun nach Aussage des Hochofenausschusses des Stahlinstituts VDEh (WV Stahl 2015) sehr nahe am Betriebsoptimum (vgl. Abbildung 20), also so nahe am physikalischen Minimum, wie in großtechnischem Maßstab ohne grundsätzliche Verfahrenssubstitutionen möglich. Auch wurde in gewissem Umfang Koks durch Kohle substituiert, womit Energieverbrauch und Umweltbelastung in der vorgelagerten Kokserzeugung reduziert wurden.



Quelle: Hochofenausschuss des Stahlinstituts VDEh in WV Stahl 2015

Abbildung 20: Entwicklung des Kohlenstoffeinsatzes zur Roheisenerzeugung

Verbesserungen der Energieeffizienz der Stahlerzeugung sind durch weitergehende Diffusion von seit längerem bekannten und auch teilweise implementierten Technologien denkbar, z. B. Konvertergasnutzung, Gichtgasentspannungsturbine, Kokstroekenkühlung und Kohlestaubeinblasung (Arens und Worell 2014). Der VDEh und die WV Stahl betonen in einer Stellungnahme (2013) zu einer Studie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI; Fleiter et al. 2013) jedoch die Unwirtschaftlichkeit der Kokstroekenkühlung und die Überschätzung der in der Studie dargestellten Abwärmenutzungspotenziale.

Die Stahlindustrie verweist ihrerseits auf die von der Boston Consulting Group in Kooperation mit dem Stahlinstitut VDEh erstellte Studie „Steel’s contribution to a low carbon Europe 2050“ (BCG und VDEh 2013). Darin wird eine zunehmende Produktion als Folge des erwarteten Wirtschaftswachstums in der EU unterstellt, welche die Erfolge durch Effizienzsteigerungen teilweise wieder aufzehrt. Bis zum Jahr 2050 wird eine absolute CO₂-Emissionsminderung von maximal 38 % für möglich gehalten, was jedoch mit radikalen Umstrukturierungsprozessen der Produktion verbunden wäre und niedrige Strom- und Gaspreise erfordern würde. Unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten wird lediglich eine Emissionsminderung um 10 % erwartet, wozu neben prozesstechnischen Verbesserungen auch eine weitere Verschiebung von der Primärstahl- zur Elektrostahlerzeugung beiträgt (EU-weit Steigerung von 41 % auf 44 %). Spezifisch liegen die zu erwartenden Verbesserungen je nach Szenario zwischen 14 % und 48 % gegenüber dem Ausgangsniveau von 1990. Durch zusätzlichen Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) wird eine Minderung sowohl der absoluten als auch der spezifischen CO₂-Emissionen gegenüber 1990 um 60 % für möglich gehalten, wobei Vorbehalte aufgrund ökonomischer Überlegungen und fraglicher öffentlicher Akzeptanz der Lagerung des abgeschiedenen Kohlendioxids geäußert werden.

Eine wichtige Initiative der Stahlindustrie zur Minderung ihrer Treibhausgasemissionen ist „ULCOS“. Dies steht für „Ultra-Low CO₂ Steelmaking“ und ist ein von der Europäischen Kommission geförderter Zusammenschluss von 48 Unternehmen und Organisationen aus 15 europäischen Ländern, darunter Deutschland, mit dem Ziel einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes um mindestens 50 % gegenüber den gegenwärtig effektivsten Technologien (ULCOS 2015). Verfolgt werden folgende technischen Ansätze:

- Rückführung nutzbarer Bestandteile des Gichtgases in den Hochofen zur Nutzung als Reduktionsmittel und Kokersatz mit Erleichterung der Bedingungen für CCS,
- „Hlsarna“, eine Technologie auf Schmelzbadbasis mit deutlich verringertem Kohlebedarf und der Möglichkeit, Biomasse, Erdgas oder sogar Wasserstoff einzusetzen; auch die Kombination mit CCS wird untersucht,
- „ULCORED“, ein Direktreduktionsverfahren auf Erdgasbasis, ebenfalls mit der Möglichkeit zur Kombination mit CCS sowie
- „ULCOWIN“, ein elektrolytisches Verfahren und die am wenigsten fortgeschrittene Prozessroute, die gegenwärtig im Rahmen von ULCOS untersucht wird und bei der praktisch kein CO₂ (mit Ausnahme indirekter Emissionen der Stromerzeugung) anfällt.

Im Rahmen des im Juni 2016 vorgestellten Projekts „Carbon2Chem“ entwickeln acht Industrieunternehmen gemeinsam mit Max-Planck- und Fraunhofer-Gesellschaft sowie Universitäten eine weltweit einsetzbare Lösung, um die Abgase der Hochöfen in Vorprodukte für Kraftstoffe, Kunststoffe oder Dünger umzuwandeln. Der dafür benötigte Wasserstoff soll mit Überschussstrom aus erneuerbaren Energien produziert werden. Mit dem „Carbon2Chem“-Ansatz – ein Beispiel für Carbon Capture and Use (CCU) - sollen künftig 20 Millionen Tonnen des jährlichen deutschen CO₂-Ausstoßes der Stahlbranche wirtschaftlich nutzbar gemacht werden. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert das Projekt mit mehr als 60 Millionen Euro. Die beteiligten Partner planen Investitionen von mehr als 100 Millionen Euro bis 2025. Für die kommerzielle Realisierung haben sie mehr als eine Milliarde Euro vorgesehen (BMBF 27.06.2016).

Weitere Ansätze liefert das Umweltbundesamt, das in der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland 2050“ (UBA 2014b) Wege zur weitgehenden Klimagasneutralität Deutschlands aufgezeigt hat.

Die Autoren der UBA-Studie gehen davon aus, dass in Deutschland langfristig weiterhin Eisenerzeugung aus primären Rohstoffen betrieben werden muss, da keine ausreichenden Mengen an Stahlschrott zur Verfügung stehen, um den Bedarf an Neustahl zu decken. Sie skizzieren jedoch in ihrem Szenario, dass es im Jahr 2050 keine Primärstahlerzeugung über die Hochofen-Oxygenstahl-Route mehr gibt, sondern die Direktreduktion diese Rolle übernimmt. Dafür wird die Elektrostahlerzeugung mittels Eisenschwamm und weiterhin auch auf Basis von Schrott massiv ausgebaut. Für die Direktreduktion wird dann ausschließlich regenerativ erzeugtes Methangas eingesetzt und für die Elektrolichtbogenöfen sowie für die Walzwerksöfen ausschließlich regenerativer Strom.

Im Prozess der Eisenerzreduktion entsteht notwendigerweise CO₂, wenn als Reduktionsmittel Kohlenstoff verwendet wird. So lange noch keine vollständige Substitution fossiler Kohlenstoffträger durch regenerativ erzeugtes Methan gas erfolgt ist, werden die spezifischen CO₂-Emissionen der Stahlproduktion auch weiterhin im Wesentlichen durch die Anteile von Primär- und Sekundärstahlerzeugung determiniert.

Zur synthetischen Erzeugung von Methan werden die Gase H₂ und CO₂ benötigt. Letzteres ließe sich aus industriellen Prozessen zurückgewinnen, z. B. aus der Zementklinkererzeugung oder aus dem Kalkbrennen, wo es bei der Entsäuerung des Kalksteins freigesetzt wird (letztlich also auch fossilen Ursprungs ist) oder aus energetischen Prozessen. Ein prozessinterner Ansatzpunkt bei der Stahlproduktion (auch im Rahmen von ULCOS verfolgt) besteht in der Abtrennung von Kohlenmonoxid aus dem Gichtgas (Prozessgas) und dessen Rückführung als Reduktionsmittel in den Hochofen (UBA 2014b).

Durch solche technischen Verfahren könnten Zwischenkreisläufe geschlossen und die Treibhausgasemissionen, wenn auch nicht vollständig, reduziert werden. CCS stellt für das UBA im Gegensatz zu den von der Stahlindustrie, z. B. im Rahmen der ULCOS-Kooperation, verfolgten Ansätzen keine Option dar. Auch die Autoren des IREES stehen CCS aufgrund der unabsehbaren ökologischen Risiken (siehe die Ausführungen in Kapitel 3.1.5) einer langfristigen Lagerung in geologischen Lagerstätten skeptisch gegenüber und sehen allenfalls die Nutzung abgeschiedenen Kohlendioxids in anderen Herstellprozessen als verfolgenswerte Option.

Schließlich nennt das UBA ebenfalls die elektrolytische Verfahrensrout e und verweist wie das ULCOS-Konsortium darauf, dass diese sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstand befinde und noch intensiver Forschungsarbeiten bedürfe, um im industriellen Maßstab eingesetzt werden zu können (UBA 2014b).

Inwieweit die oben skizzierten Optionen und Szenarien, die im verbleibenden 35-Jahres-Zeitraum bis 2050 zu einer sehr weitgehenden oder gar (fast) vollständigen Verminderung der Treibhausgasemissionen der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland führen, realistisch bzw. realisierbar sind, kann nach Meinung des IREES noch nicht beantwortet werden.

Das Wuppertal-Institut und die Universität Wuppertal haben in einer nach eigenem Bekunden „purely theoretical analysis“ (Fishedick et al. 2014) erste modellbasierte Szenarioberechnungen für ähnliche Technologiepfade betrachtet. Demnach kann erwartet werden, dass mit steigenden Preisen für Kohle und CO₂-Zertifikate die konventionelle Hochofenlinie sowie Carbon Capture and Storage (CCS) am Hochofen in der Mitte des 21. Jahrhunderts unwirtschaftlich würden. Die Direktreduktion mit Wasserstoff (H-DR; nicht mit synthetischem Methan) sowie die Eisenerzelektrolyse könnten in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wirtschaftlich werden. In einem ambitionierten Szenario sei die Realisierung eines 80 %-Emissionsminderungsszenarios für die Eisen- und Stahlindustrie bis 2050 möglich, die Höhe der Investitionen und die Abhängigkeit vom Energiepreis erfordere aber bis 2030/2040 noch Subventionen.

Integrierte Stahlwerke repräsentieren ein enorm hohes Kapital mit sehr langlebigen Einzelanlagen (Hochöfen, Stahlwerke etc.), die untereinander in einem komplexen, funktional zusammenhängenden Anlagenverbund stehen. Entsprechend betragen die

Re-Investitionszyklen Jahrzehnte. Heute getroffene Investitionsentscheidungen werden in vielen Fällen auch im Jahr 2050 noch den Anlagenstock bestimmen. Die meisten der oben skizzierten technischen Optionen, die zu einer weitgehenden oder gar vollständigen CO₂-Emissionsminderung führen, lassen sich nicht losgelöst als Einzelmaßnahme umsetzen, sondern setzen eine radikale Veränderung der Produktionsabläufe an den jeweiligen Standorten und auch standortübergreifend (in den vorgelagerten Industrien, z.B. Kalkindustrie oder Stromerzeugungssektor) voraus. Auch ohne dass detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen vorliegen, ist leicht erkennbar, dass dies nur mit einer enormen und kapitalintensiven Umstrukturierung des Anlagenbestands der Eisen- und Stahlindustrie selbst möglich wäre und auch spürbare Auswirkungen auf die vor- und nachgelagerten Wirtschaftszweige hätte.

Die deutsche Stahlindustrie steht in internationalem Wettbewerb. Mit einem Anteil von lediglich rund 2,5 % an der weltweiten Rohstahlerzeugung wird die Branche diesen Umstrukturierungsprozess sicher nicht in einem nationalen Alleingang bewältigen können. Aufbauend auf den in europaweiter Kooperation von den Unternehmen ergriffenen Initiativen und Anstrengungen wird die Wirtschafts- und Umweltpolitik, im Optimalfall gemeinsam mit der Industrie, gangbare Wege zur notwendigen Umstrukturierung finden müssen.

Nachfrageseitige Handlungsoptionen, sowie mögliche zukünftige Entwicklung von Produktion und Nachfrage

Wie bereits erwähnt, wird die künftige Entwicklung der Stahlproduktion in Europa voraussichtlich an die allgemeine wirtschaftliche Entwicklung gekoppelt sein (BCG und VDEh 2013). Der deutsche Stahlmarkt wird von der Nachfrage insbesondere aus der Bauindustrie (derzeit 31 %) und aus dem Automobilbau (26 %) geprägt, gefolgt vom Maschinenbau, den Metallwaren und der Nachfrage nach Rohren (vgl. Abbildung 19).

Denkbar ist jedoch bis zu einem gewissen Grad die Entkopplung vom Wirtschaftswachstum, also eine Treibhausgas-Emissionsminderung, die mit einer verminderten Stahlnachfrage aus den genannten Bereichen einhergeht. Dabei muss eine verminderte Tonnage nicht zwangsläufig eine wertmäßige Produktionsminderung darstellen (höherwertige Qualitäten). Auch sei darauf hingewiesen, dass wegen der internationalen, insbesondere europäischen, Import-/Exportverflechtungen derartige (negative) Nachfrageimpulse nicht zwangsläufig direkte Auswirkung auf die Produktion am Standort Deutschland hätten.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier erwähnt:

- Konstruktive Innovationen, die zu einem spezifischen Material-Minderverbrauch im Hoch- und Tiefbau führen (Stahlbeton),
- Leichtbauoptionen im Automobil- und Maschinenbau, die bereits seit langem erfolgreich eingesetzt werden und konsequent weiter zu entwickeln wären,
- Substitution des Werkstoffs Stahl durch zum Beispiel Carbonfasern; eine Option, an deren Verfolgung die Branche vermutlich nur bedingtes Interesse hätte, oder

- Lebensdauererlängerung und Nutzungsintensivierung von Fahrzeugen und Investitionsgütern, die letztlich den Materialdurchsatz der Wirtschaft optimieren, d.h. reduzieren.

Die Potenziale derartiger Materialeinsparungen zur Minderung der THG-Emissionen konnten im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung nicht abgeschätzt werden und müssten Gegenstand weitergehender, vermutlich modellgestützter Untersuchungen sein, die die Vernetzung der Wirtschaftssektoren angemessen berücksichtigen.

6 Fazit und Empfehlungen

6.1 Zusammenfassendes Fazit

Die vorliegende Untersuchung macht deutlich,

- dass zum Erreichen des nationalen Klimaschutzziels 2050 erhebliche Mehranstrengungen des Industriesektors gegenüber dem bisherigen Minderungspfad erforderlich sein werden (vgl. Kapitel 2);
- dass es eine Vielzahl von technischen Minderungsoptionen gibt, die bisher nicht hinreichend genutzt werden, und dass auch die Nachfrage für die Emissionen der Industrie eine erhebliche Rolle spielt (vgl. Kapitel 3);
- dass zugleich erhebliche Wissenslücken hinsichtlich der THG-Minderungspotenziale dieser Minderungsoptionen sowie ihres Forschungs- und Entwicklungsbedarfs bestehen (Kapitel 3);
- dass die Entwicklung der Weltmärkte und des Außenhandels beachtet werden muss, wenn sich die Frage stellt, ob und wie die deutsche Industrie auch ökonomisch von der notwendigen (auch internationalen) Transformation profitieren kann (vgl. Kapitel 4);
- dass der Strukturwandel innerhalb der deutschen Industrie auch zukünftig eine erhebliche Rolle für die Minderung der THG-Emissionen spielen kann (vgl. Kapitel 4);

Das Ausmaß der notwendigen Minderungsanstrengungen der Industrie und grundlegende Handlungsansätze

Die in Kapitel 2 untersuchten modellgestützten Zielszenarien führen zu der Erkenntnis, dass der Industriesektor nicht darauf bauen kann, dass andere Wirtschaftssektoren überproportionale Minderungsverpflichtung übernehmen können. Unter Berücksichtigung der aktuellen Energie- und Klimapolitik (allerdings ohne Aktionsprogramm Klimaschutz und NAPE) gehen die „Klimaschutzszenarien 2050“ von einer Business-as-usual Reduktion um 63 % in 2050 gegenüber 1990 aus. Um in den Zielraum einer Minderung von 80 bis 95 % zu gelangen, und somit die eigenen, direkten Treibhausgasemissionen auf maximal 55 Mio. t CO₂ äq. zu beschränken, müssen daher sowohl die energiebedingten als auch die prozessbedingten Treibhausgasemissionen deutlich schneller gemindert werden als bislang. Gegenüber dem Stand heute (2014) mit direkten Emissionen von 183 Mio. t CO₂ äq. bedeutet dies eine Minderung um mindestens 70 %, d.h. um 3,7 % pro Jahr gegenüber dem Vorjahr. Eine Minderung um insgesamt 95% gegenüber 1990 entspräche einer absoluten Minderung um rund 92% gegenüber heute und einer jährlichen Minderung ab 2015 um 7,1% pro Jahr. Zwischen 1990 und 2013 betrug die Minderungsrate im Durchschnitt hingegen nur 1,6 % pro Jahr (einschließlich der Effekte des Zusammenbruchs der Industrie der ehemaligen DDR), in den vergangenen 15 Jahren stagnierten die Emissionen nahezu. Dies verdeutlicht die Dimension der Herausforderung.

Um diese erhebliche Steigerung der durchschnittlichen Minderungsrate in den kommenden 35 Jahren zu schaffen, wird das Innovationsvermögen der deutschen Industrie

voll gefordert sein. Die Politik müsste durch passende Maßnahmen die richtigen Rahmenbedingungen hierfür setzen. Die Besonderheiten des Industriesektors wären dabei zu berücksichtigen. So haben die Produktionsanlagen der Industrie in der Regel lange Lebensdauern von mehreren Jahrzehnten und damit auch lange Re-Investitionszyklen. Dies gilt insbesondere für die Grundstoffindustrie. Dies hat weitreichende Konsequenzen: die Anlagen, die in den kommenden Jahren gebaut werden, sind damit absehbar 2050 noch im Betrieb. Damit werden Emissionsmengen und Emissionspfade der Zukunft bereits in den kommenden Jahren mit festgelegt. Um derartige Lock-ins aufzubrechen, wären Maßnahmen zur Einschränkung des Betriebs dieser Anlagen notwendig; dies würde ein Eingreifen in den Kapitalstock der betroffenen Unternehmen bedeuten, was zwangsläufig mit einer Kapitalvernichtung (in großem Ausmaß) einherginge.

Um diese Lock-in-Effekte bzgl. der Emissionen soweit technisch möglich zu vermeiden, müsste ab sofort bei Neu- oder Re-Investitionen solcher Anlagen konsequent die beste verfügbare Technik (BVT) eingesetzt werden. Zudem wäre in der Investitionsplanung zu prüfen, ob die Anlagen mit Abwärmenutzung oder erneuerbaren Energien gefahren werden könnten oder eine CCU-Technik als Option vorgesehen werden könnte.

Die Autoren dieser Studie sehen fünf ganz grundlegende Handlungsansätze, um den Transformationsprozess in der Industrie voranzubringen. Diese grundlegenden Ansätze weiten sich dann in eine große Vielzahl konkreter technisch/ökonomisch/politischer Handlungsoptionen auf. Die fünf Ansätze sind:

- Nutzung der vielfältigen Möglichkeiten der Material- und Energieeffizienz, ebenso die fortwährende Erschließung neuer Effizienzpotenziale durch innovative Produktions- und Verfahrenstechnik.
- Die mittelfristige Adressierung der industriellen Prozessemissionen, die heute oftmals als unvermeidbar betrachtet werden und ein Drittel der Industriemissionen ausmachen. Hierzu wären ab sofort erhebliche Investitionen in Forschung und Entwicklung neuer Prozesse und Verfahren erforderlich.
- Eine erhebliche Substitution der eingesetzten fossilen Energieträger durch erneuerbare Energieträger (auch erneuerbare Sekundärenergieträger wie Wasserstoff und/oder Methanol auf Basis erneuerbaren Stroms).
- Eine Förderung des bereits stattfindenden Strukturwandels hin zu energieextensiven Branchen und (auch produktbegleitenden) Dienstleistungen.
- Eine Förderung nachhaltiger Lebensstile und nachhaltiger Konsummuster bei den Endverbrauchern, auch durch nachhaltige Produktgestaltung.

Eine exemplarische Auswahl wichtiger Handlungsoptionen zur THG-Reduktion

Für den notwendigen grundlegenden Wandel der Produktion gibt es eine Fülle von Handlungsoptionen, die sich entweder auf die Material- und Energieeffizienz sowie die eingesetzten Energieträger und die Produktionstechnik beziehen (siehe insbesondere Kapitel 3.1). Hingegen sind Handlungsoptionen, die auf den Strukturwandel, auch im Zusammenhang mit der Verflechtung der deutschen Industrie mit den Weltmärkten, abzielen, bislang nur in ersten Ansätzen zu erkennen (siehe Kapitel 4).

Von der Vielzahl der produktionsseitig vorhandenen Handlungsoptionen sei hier eine zusammenfassende Auswahl wiedergegeben:

- Die deutliche Reduktion der Nachfrage nach energieintensiven Grundstoffen sowie eine konsequente Nutzung der Möglichkeiten zur Material- und Rohstoffsubstitution bietet entlang der gesamten Wertschöpfungskette der industriellen Produktion die Möglichkeit, den Bedarf an energieintensiv produzierten Grundstoffen und somit die mit deren Produktion verbundenen Treibhausgasemissionen deutlich zu reduzieren. Politisches Ziel müsste es daher sein, eine Kreislaufwirtschaft aufzubauen, die zwischen 2030 und 2050 eine weitgehend vollständige Kreislaufführung aller in der Industrie eingesetzter Materialien und Rohstoffen erreicht. Darüber hinaus bietet ein optimiertes Konstruktionsdesign viele Möglichkeiten zur Reduktion des Materialbedarfs.
- Ein weiteres Feld von Handlungsoptionen stellt die Substitution von Prozessen und Verfahren dar. Ein Beispiel ist die Membrantechnik, die sowohl in der Nahrungsmittelindustrie als auch in der Chemieindustrie (siehe die Analyse zur Grundstoffchemie in Kapitel 5.4.5.4; hier wird die Membrantechnik bei der Chlorherstellung angesprochen) zu deutlichen Emissionsminderungen gegenüber den bisher gängigen Verfahren führen kann. Die Entwicklung und Markteinführung neuer Prozess- und Verfahrenstechniken, insbesondere in den Grundstoffindustrien, müsste nach Ansicht der Autoren intensiv mit politischen Maßnahmen begleitet werden, wenn das hier möglicherweise vorhandene große Potenzial zur Minderung von Treibhausgasemissionen bis 2050 auch tatsächlich gehoben werden soll.
- Im Zusammenhang mit der Verminderung insbesondere der Prozessemissionen werden derzeit oftmals auch Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Usage (CCU) diskutiert. Während bei CCU tatsächlich ein gewisses Potenzial zu erkennen ist, insbesondere zur Kreislaufführung in der Chemieindustrie, aber auch zur Umsetzung mit Wasserstoff zu Methanol (im Zuge von „Power-to-X“ Technologien (siehe Kapitel 3.1.5) oder als Ergebnis des branchenübergreifenden Carbon2Chem-Projekts, ist CCS eher als eine Verdrängungs-, denn als eine Vermeidungsoption zu bezeichnen. Die Speicherung von CO₂ ist mit einer Reihe von Risiken verbunden; viele der Prozesse, die nach einer Speicherung z.B. im Wasser der aquiferen Schichten ablaufen sind noch nicht verstanden. Sollte CCS in industriellem Maßstab eingesetzt werden besteht nach Auffassung der Autoren das Risiko, dass aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen aufgrund der notwendigen Investitionen die vorhandenen Speichermöglichkeiten auch vollständig ausgeschöpft würden. Dies würde dazu führen, dass man Milliarden von Tonnen eines für die Stabilität des Weltklimas schädlichen Stoffes nicht auf der Erzeugungsseite vermeidet, sondern lagert, ohne eine absolute Gewissheit dafür zu haben, dass dieser Stoff nicht doch eines Tages wieder in die Atmosphäre oder die Weltmeere gelangt. CCS kann daher maximal eine Übergangstechnologie in sehr eng umrissenen Anwendungsfeldern darstellen.
- Auf der Versorgungsseite bietet die Flexibilisierung der Stromnachfrage und die Stromeigenerzeugung eine Reihe von Möglichkeiten zu Emissionsminderung. Das Lastmanagement auf Seiten der Industrie kann darüber hinaus einen Beitrag zur Stabilisierung des Energiesystems leisten. Die Eigenerzeugung, im Wesentlichen

mit KWK-Anlagen, ist bereits heute einigermaßen etabliert und sollte weiter forciert werden. Hierbei ist in Zukunft jedoch darauf zu achten, das verstärkt mit erneuerbaren Energien, und übergangsweise mit Gas, befeuerte KWK-Anlagen in Betrieb genommen werden, um Lock-In Effekte durch neue fossile KWK-Anlagen zu vermeiden.

Die Endnachfrage durch den privaten Konsum spielt eine erhebliche Rolle für die Entwicklung der (globalen wie nationalen) Treibhausgasemissionen, die Industrie ist über teilweise sehr lange und vielschichtige Wertschöpfungsketten mit der Endnachfrage verknüpft. Letztlich bedingen Nachfrage und Produktion von Waren und Dienstleistungen einander – eine rein nationale Betrachtung dieser Zusammenhänge ist jedoch aufgrund der vielfältigen Verflechtungen der Weltwirtschaft immer zu kurz gegriffen. In Kapitel 3.2.1 wird dennoch der Versuch unternommen, die Bedeutung des privaten Konsums für die deutsche Industrie zu verdeutlichen. Das Verhältnis von Konsum- und Investitionsausgaben sowie die Entwicklung der Sparquote der deutschen Haushalte in den vergangenen Jahrzehnten weisen auf die gewachsene Bedeutung des Konsums hin. Weitere Analysen sollten nach Meinung der Autoren hier anschließen. Mögliche Handlungsoptionen lassen sich den beiden Handlungsfeldern Verringerung der Nachfrage (bezogen auf die Neuproduktion) und Verschiebung der Nachfrage hin zu nachhaltiger produzierten Produkten zuordnen. Die konkreten Handlungsoptionen sind sehr vielfältig.

Auf die Chancen und Herausforderungen der deutschen Exportwirtschaft, insbesondere auch für Klimaschutzgüter, auf den zukünftigen Weltmärkten geht Kapitel 4 ausführlich ein. Dort wird ebenfalls die mögliche weitere Entwicklung des Strukturwandels der deutschen Industrie und die damit verbundenen Auswirkungen auf deren Emissionen besprochen.

Wissenslücken bei der Einschätzung der Minderungspotenziale von Handlungsoptionen

Der im Rahmen dieser Untersuchung unternommene Versuch, eine erste Priorisierung von Handlungsoptionen hinsichtlich deren möglicher Beiträge zur mittel- bis langfristigen THG-Minderung zu entwickeln (siehe Kapitel 3.1.6), zeigt, dass es hier erhebliche Wissenslücken gibt. Oftmals konnten im Rahmen dieser Studie keine frei verfügbaren Analysen gefunden werden, die konkrete technische Handlungsoptionen auf ihr mittel- bis langfristiges THG-Minderungspotenzial hin untersuchen. In vielen Fällen weisen die gefundenen Angaben, zu Treibhausgasmengen oder auch Energiebedarfen, erhebliche Bandbreiten auf und unterscheiden sich innerhalb einer Quelle oder zwischen verschiedenen Quellen um Größenordnungen. So gibt es beispielsweise sehr unterschiedliche Angaben in der Literatur zu möglichen Speicherkapazitäten hinsichtlich einer evtl. CCS-Nutzung.

Insbesondere ist zu erwähnen, das nahezu keine Angaben zu notwendigen F&E-Aufwendungen oder der möglichen Diffusionsdauer bzw. dem möglichen Markteintrittszeitpunkt innovativer technischer Lösungen zu finden waren. Hier besteht also offensichtlich ein erheblicher Analysebedarf.

Zur Bedeutung von Außenhandel und Strukturwandel

Die Dynamik des Welthandels wird diejenige der Binnenkonjunktur, bezogen auf Deutschland und die EU-Staaten, sehr wahrscheinlich auch in Zukunft übertreffen, wenn auch nicht mehr so stark wie in den zurückliegenden Jahren.

Über Einkommen und Beschäftigung in Deutschland wird daher weiterhin, und zwar zunehmend, auf den internationalen Märkten insbesondere für die Investitions- und Gebrauchsgüter entschieden. Heute geht ein Großteil der deutschen Exporte in andere Industriestaaten, im Speziellen in die anderen EU-Staaten. Diese regional geprägte Struktur der deutschen Exporte ist für sich genommen ungünstig, da der Weltmarktanteil dieser Länder erheblich schrumpfen wird. Dagegen sind die Lieferanteile in hochdynamische Wachstumsstaaten, wie z.B. den BRICS-Staaten, durchaus steigerungsfähig. Dies stellt zum einen eine Chance für die deutsche Exportwirtschaft dar, wenn diese konsequent auf ihre Stärken setzt, wie beispielsweise als innovativer „Universalanbieter“ im (Hoch-)Technologiebereich. Bei unzureichender Innovationskraft besteht allerdings andererseits die Gefahr, dass immer mehr hochwertige Investitions- und Gebrauchsgüter von den potentiellen Zielländern selbst produziert werden.

Es gibt eine Reihe von Risikofaktoren für die bisher erfolgreichen Exportbranchen. Herausgegriffen sei hier die sehr hohe Exportabhängigkeit des Kraftfahrzeugbaus als prominentes Beispiel. Dieser nimmt eine Spitzenposition bei den Exporten in alle Weltregionen ein; weltweit ist nur Südkorea bei seinen Exporten so stark von einer Branche abhängig, wie dies für Deutschland beim Kraftfahrzeugbau zutrifft. Zentrale Innovationen der letzten zehn bis fünfzehn Jahre, wie das erste serienmäßige Brennstoffzellenauto (Toyota), das serienmäßige Elektroauto (Tesla) und das Hybridauto (Toyota), gehen nicht auf die deutsche Produktion zurück, was die Wettbewerbsposition der deutschen Hersteller in diesen Segmenten schwächen könnte.

Die Rolle von „Klimaschutzgütern“ im Hinblick auf Export, Strukturwandel und THG-Emissionen

Eine Stärkung der Branchen, die Güter herstellen, die zum Klimaschutz beitragen („Klimaschutzgüter“ oder „Klimaschutzindustrie“), stellt unter vielerlei Gesichtspunkten eine vielversprechende Strategie für die deutsche Exportwirtschaft dar: der Export von hocheffizienten Maschinen, Anlagen und Produkten kann global zur Senkung von Treibhausgasemissionen beitragen; die Herstellerbranchen in Deutschland sind selbst energie- und damit auch emissionsextensiv; Beschäftigung im Inland könnte gesichert und ausgebaut werden. Denn die „Klima- und Umweltschutzindustrie“ entspricht sehr gut dem Anforderungsprofil an die deutsche Industrie im internationalen Wettbewerb, das sich sowohl aus den spezifischen Standortvorteilen Deutschlands, als auch aus den absehbaren Entwicklungen der Weltmärkte und den sich daraus ergebenden Chancen für etablierte Industrienationen ergibt: sie ist weitgehend in forschungsintensiven Branchen verankert (Maschinenbau, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Elektrotechnik, (Spezialitäten-)Chemie und Kunststoffe) und baut auf hochqualifiziertes Fachpersonal.

Allerdings zeigt das Beispiel der Photovoltaik in den letzten 10 Jahren (und in Zukunft möglicherweise auch das der Windenergie und der Elektroautos), dass bei vielen kli-

umweltafreundlichen Komponenten und Produkten die Herstellung technologisch relativ einfach ist, so dass hier die Wettbewerbsvorteile hoch industrialisierter Staaten, insbesondere ihre Innovationskraft, sehr schnell von den geringeren Produktionskosten in anderen Ländern (z.B. China) aufgewogen werden könnten.

Zu bedenken sind hier auch die vielfach noch nationalstaatlich gegliederten Regelungskompetenzen und eine damit einhergehende Segmentierung der Märkte. Für ein stark wachsendes Welthandelsvolumen wären daher weitere Vereinheitlichungen bei Umwelt- und Effizienzstandards notwendig.

Klimaschutzgüter haben – je nach Quelle und abhängig von Unterschieden in der Definition der dazugehörigen Produktionen bzw. Güter – derzeit ein Exportvolumen zwischen 20 und 30 Mrd. € oder 2 bis 3 % der Gesamtexporte der deutschen Industrie. Bezieht man die Exportzahlen der Klimaschutzgüter auf die Exporte des Maschinenbau und der Datenverarbeitung, elektronische und optische Messgeräte mit einem Exportvolumen von 255 Mrd. €, dann haben die Klimaschutzgüter schon signifikante Anteile von knapp 8 % bis knapp 12 %. Da die Energieintensität dieser Branchen sehr gering ist, würde ein überproportionales Produktionswachstum für Klimaschutzgüter infolge einer bewussten Klimapolitik, wie man sie nach den Pariser Beschlüssen vom 12.12.2015 erwarten müsste, auch den Strukturwandel zu wenig energieintensiven Industriestrukturen unterstützen.

Schließlich lässt sich festhalten: die Transformation der deutschen Industrie hin zu einem dauerhaft nachhaltigen und klimaverträglichen Wirtschaften ist eine Notwendigkeit auch aus industriepolitischer Sicht. Denn nur durch ihre Innovationskraft wird die deutsche Industrie in der Lage sein, ihre hohen Exportanteile zu erhalten und damit auch die hohen Einkommen und die hohe Beschäftigung in diesem Wirtschaftssektor. Diese Studie kann nur in ersten Ansätzen aufzeigen, dass dieser Prozess zum einen die deutsche Industrie (aber auch die deutsche Wirtschafts- und Klimapolitik) vor immense Herausforderungen stellt, zum anderen aber auch die Chance bietet, Deutschland auf Dauer als „Land der Ideen“ mit Innovationen, einer hohen Produktqualität und qualitativ hochwertiger, produktiver Arbeit auf den Weltmärkten zu etablieren.

Eine ganz zentrale Frage wird es sein, ob es den Akteuren gelingen wird, vorausschauend zu denken und vor allem zu handeln. Denn während die Früchte der Transformation wohlmöglichst erst in einigen Jahrzehnten geerntet werden können, müssen die vielfältigen Herausforderungen schon heute umfassend angegangen werden.

6.2 Empfehlungen

Aus der vorliegenden Analyse folgen einige erste Empfehlungen für die Bundespolitik. Der Charakter dieser Empfehlungen reicht von recht allgemeinen Aussagen, z.B. hinsichtlich einer stärkeren Berücksichtigung bestimmter Emissionsquellen oder Akteure bei der zukünftigen Politikgestaltung, bis hin zu konkreten, teilweise einzelne Technologiefelder betreffenden Politikmaßnahmen. Dies ist dem bei dieser Untersuchung verfolgten breiten Ansatz geschuldet, dessen Ziel es ist, eine umfassende und breite Darstellung der Problematik vorzulegen. In vielen Fällen ist daher weiterer Analyse- und Forschungsbedarf notwendig, um von allgemeinen Aussagen zu konkreten Empfehlungen für Politikmaßnahmen und neuen, emissionsarmen Produktionsweisen zu kom-

men. Auf diesen weiteren Analysebedarf wird bei den Empfehlungen auch jeweils hingewiesen.

Übergreifende Empfehlungen für den Industriesektor

Etablierung eines verbindlichen sektoralen Emissionsziels für die Industrie ab 2020

Wie in Kapitel 2 gezeigt, ist der derzeitige Emissionspfad der deutschen Industrie sehr weit davon entfernt, auch nur annähernd eine Zielerreichung in 2050 zu ermöglichen. Es wurde außerdem darauf hingewiesen, dass aufgrund der teilweise sehr langen Re-Investitionszyklen in der Industrie mit Anlagenlebensdauern von mehreren Jahrzehnten das Umsteuern hier keinen Aufschub mehr duldet, um einen „Lock In“ von Emissionsverläufen zu verhindern. Der Politik wäre daher zu empfehlen, der Industrie mehr Verantwortung hinsichtlich ihrer eigenen Emissionen zuweisen um das Erreichen der Klimaschutzziele zu ermöglichen. Dies könnte auch ein rechtlich verbindliches, sanktionierbares sektorspezifisches Emissionsziel für das Verarbeitende Gewerbe beinhalten. Die Definition eines solchen sektoralen Emissionsziels ist eine fachliche Herausforderung. Es stellt sich beispielsweise die Frage, ob auch branchenspezifische oder produktspezifische Subziele definiert werden sollten, auf welchen Datengrundlagen das Monitoring aufsetzt und welche institutionalisierten Steuerungsmechanismen ein solches Ziel erfordern würde. Darüber hinaus wird sich die Frage stellen, wie sich ein solches Ziel zu dem auf europäischer Ebene durch den ETS vorgegebenen Emissionspfad der betroffenen Branchen verhalten würde. Auch die typischen Re-Investitionszeiten der für die Emissionsentwicklung wesentlichen Branchen müssten berücksichtigt werden.

Die Entwicklung der Industrieemissionen (stagnierend, aber nicht wachsend) in den vergangenen fünfzehn Jahren zeigt, dass der bisherige Politikansatz in Deutschland, der im Wesentlichen auf Freiwilligkeit, Informationsvermittlung und finanzielle Anreize setzt, durchaus erfolgreich ist – aber eben *bei weitem* nicht erfolgreich genug, um die derzeit stagnierende Emissionsentwicklung der Industrie auf einen zielkonformen Pfad zu bringen. Eine verlässliche Ausgestaltung des Sektorziels könnte die Planbarkeit der deutschen Klima- und Energiepolitik für die Unternehmen verbessern. Die Autoren empfehlen daher, ein solches Sektorziel –unter Berücksichtigung der genannten und sicherlich noch weiterer Faktoren- zu prüfen.

Harmonisierung der Steuer- und Umlageentlastungen sowie klimapolitisch wirksame Gegenleistungen

Viele Unternehmen sind derzeit teilweise oder (nahezu) vollständig von der Zahlung von Energie- und Stromsteuern sowie verschiedener Umlagen auf den Strombezug (insbesondere EEG-Umlage) befreit. Dies wird mit der Wahrung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Unternehmen begründet.

Diese Entlastungen sind nicht nur zahlreich, sondern auch sehr umfangreich. Die unterschiedlichen Regelungen haben ganz unterschiedliche Anspruchsvoraussetzungen, wie beispielsweise das Erreichen einer bestimmten Stromkostenintensität bei der Besonderer Ausgleichsregelung des EEG. Dies führt bei den anspruchsberechtigten Unternehmen zu einem erheblichen Aufwand. Darüber hinaus ist zu überprüfen, ob die anspruchsberechtigten Unternehmen oder auch Branchen tatsächlich sowohl energie-

intensiv sind als auch im internationalen Wettbewerb stehen. Grundsätzlich sollten nur diejenigen Unternehmen überhaupt anspruchsberechtigt sein, die beide Kriterien erfüllen. Beispielsweise ist es sehr fraglich, inwieweit die zweifelsohne energieintensive Zementindustrie in einem internationalen Wettbewerb steht, denn der Zementmarkt ist im Wesentlichen ein Regionalmarkt (siehe Kapitel 2).

Die Entlastung von staatlichen Preiskomponenten für Energie stellt zunächst für sich genommen einen klimapolitischen Fehlanreiz dar. Ökonomischer Druck zu effizienter Produktion sowie die Rentabilität von Energieeffizienzmaßnahmen in den betroffenen Unternehmen werden gemindert. Um dies mindestens auszugleichen, sind klimapolitisch wirksame Gegenleistungen der Unternehmen, d.h. im Wesentlichen eine Steigerung der Energieeffizienz, erforderlich. Bislang beschränkt sich dies bei den heute geltenden Entlastungsregelungen auf die Einführung von Energiemanagementsystemen, die rein formal ohne Maßnahmenumsetzung gehandhabt werden kann, und im Falle des sogenannten Spitzenausgleichs zusätzlich auf ein absehbar unwirksames Ziel zur Senkung der Energieintensität des gesamten Produzierenden Gewerbes. Eine Reihe von Entlastungstatbeständen, wie die allgemeine Reduktion der Energiesteuer um 25 % für Unternehmen des Produzierenden Gewerbes sowie die Nicht-Erhebung von Energiesteuern auf eine Reihe besonders energieintensiver Prozesse, wird bislang ohne jegliche Gegenleistung gewährt.

Daher sollten alle bestehenden Entlastungstatbestände hinsichtlich der folgenden Punkte auf den Prüfstand:

- Harmonisierung der Anspruchsvoraussetzungen
- Beschränkung der grundsätzlich anspruchsberechtigten Unternehmen auf Branchen, die sowohl energieintensiv als auch handelsintensiv sind
- Einführung klimapolitisch wirksamer, wirtschaftlich rentabler Gegenleistungen

Die Prüfung und Novellierung der Entlastungstatbestände sollte, um deren Bedeutung sowohl für die Unternehmen als auch für die Klimapolitik für den Sektor Industrie Rechnung zu tragen, Ergebnis einer planvollen und wissenschaftlichen Herangehensweise sein und darüber hinaus alle Betroffenen mit einbeziehen. Die Prüfung und Novellierung muss darüber hinaus konsistent mit anderen möglichen Maßnahmen (wie z.B. der oben genannten Einführung eines Sektorziels für die Emissionen der Industrie) ausgestaltet werden. Wenn unmittelbar mit der Maßnahme begonnen würde, könnten die novellierten Regelungen daher aus Sicht der Autoren mit Beginn des Jahres 2020 in Kraft treten. Dies würde den betroffenen Unternehmen zudem eine angemessene Übergangsfrist von drei Jahren einräumen.

Unterstützung eines klimapolitisch sinnvollen Strukturwandel

Ein Strukturwandel hin zu nicht energie- und materialintensiven Industrie- und Konsumstrukturen kann durch staatliche wie auch private Akteure unterstützt werden. Hierzu werden insbesondere folgende Maßnahmen und Aktivitäten empfohlen:

- Auf Seiten der Nachfrage nach energie-intensiven Grundstoffen kann durch die verschiedenen Formen von Materialeffizienz (bessere Eigenschaften, materialsparendes Design), Vermeidung von Schrotten und Fehlchargen, verstärktes Recycling und Material-Substitution (einschliesslich Materialien aus Biomasse als Roh-

stoff oder Werkstoff) die Produktion dieser Grundstoffe und die damit einhergehenden THG-Emissionen vermindert werden.

- Auf Seiten der Investitions- und Gebrauchsgüter-Hersteller kann es zu vielen Produktbegleitenden Dienstleistungen kommen (z.B. Finanzierung, Beratung, Wartung, Instandhaltung, aber auch Mobilitätsleistungen anstelle von Fahrzeugverkauf). Derartige Entwicklungen lassen den physischen Produktionsbedarf entweder langsamer wachsen oder gar stagnieren, wenngleich die Wertschöpfung in der betroffenen Branche zunimmt. Bei diesen Prozessen sind auch die betroffenen Wirtschaftsverbände, die IHKs oder die Wirtschaftsförderer auf regionaler und lokaler Ebene. Akteursübergreifende Information und Fortbildung wären hier von Bedeutung.

Analyse der kommenden Re-Investitionen in den für die Emissionsentwicklung zentralen Branchen

Die Re-Investitionszyklen spielen bei der Modernisierung der Produktionsanlagen und damit auch bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in den Unternehmen eine besonders bedeutende Rolle. Dies gilt insbesondere für diejenigen emissionsintensiven Branchen der Grundstoffindustrie, die zusammengekommen für einen Großteil der gesamten Industrieemissionen verantwortlich sind. Die Anlagenlebensdauern betragen oftmals einige Jahrzehnte (Marceau et al. 2006; Pauliuk et al. 2012; Arens et al. 2016; Fleiter et al. 2013). Für die Minderung der THG-Emissionen der deutschen Industrie bis 2050 wird es also entscheidend sein zu wissen, welche Anlagen in welchem Umfang in welchen Branchen in den kommenden dreieinhalb Jahrzehnten absehbar stillgelegt und/oder re-investiert werden. Aufbauend auf diesen Informationen könnte die Politik Maßnahmen treffen, um eine aus klimapolitischer Sicht optimale Entscheidungsfindung der Unternehmen zu beeinflussen. Dies könnten beispielsweise, bei geplanten Re-Investitionsmaßnahmen, Investitionszuschüsse für die Nutzung von best verfügbarer Technik (BVT) oder auch Maßnahmen ordnungspolitischer Art sein. Eine genauere Analyse der möglichen und wahrscheinlichen Stilllegungen und Re-Investitionen könnte auch eine frühzeitige fachlich fundierte Abwägung der Interessen der Industriepolitik (Bewahrung von inländischer Produktion) mit denjenigen der Klimapolitik (Nationale und globale Senkung der Emissionen) ermöglichen. Wir empfehlen daher, in Zusammenarbeit mit den betroffenen Industrieverbänden und unabhängiger wissenschaftlicher Unterstützung, eine solche Analyse in den kommenden Jahren durchzuführen.

Stärkung der nachfrageorientierten Klimapolitik und des nachhaltigen Konsums

Bislang steht vor allem die Produktion im Fokus wenn es um die Minderung von Treibhausgasemissionen der Industrie geht; dabei ist die Nachfrage, und insbesondere diejenige der privaten Endverbraucher, letztlich einer der wichtigsten Treiber der Produktion und deren Treibhausgasemissionen. Mit dem „Nationalen Programm für nachhaltigen Konsum“ gibt es jetzt erstmals einen Ansatzpunkt für eine kohärente Adressierung des nachhaltigen Konsums. Dieser Ansatz sollte verstetigt und ausgebaut werden, die Maßnahmen des Programms sollten künftig konkreter und klarer definiert bzw. beschrieben werden.

Insbesondere die Erhöhung der Lebensdauer von Gebrauchsgütern könnte ein Ziel und ein Ansatzpunkt für die nationale, aber auch die europäische Klimaschutzpolitik sein. Sowohl ordnungsrechtliche Maßnahmen zur Einhaltung bestimmter Mindest-

Standards hinsichtlich der Lebensdauer von spezifischen Produktgruppen (evtl. angelehnt an die Ökodesign-Richtlinie) als auch Maßnahmen zur Verbesserung der Transparenz (Kennzeichnungspflichten oder Unterstützung freiwilliger Kennzeichnungs-Initiativen) sollten geprüft werden. Die Politik kann bei Gebrauchsgütern mit verbindlichen Effizienzstandards und begleitenden Informations- und Transparenzmaßnahmen für die Verbraucher zur Förderung eines Lebenszyklus orientierten „Top-Runner-Konsums“ beitragen.

Weiterhin wäre natürlich die Information über nachhaltige Konsummuster von Bedeutung. Dies kann sowohl über die Schulen als auch über Informationskampagnen des Bundes, der Länder oder auf regionaler Ebene erfolgen. Für die letztere Ebene könnte die Bundesregierung Pilot-Projekte über die NKI-Förderung generieren.

Branchen- und Technologiespezifische Empfehlungen

Verminderung der Nutzenergie-Verluste

Die Verminderung der Nutzenergieverluste sollte insbesondere unter den folgenden Gesichtspunkten gesehen werden:

- Dort, wo es marktfähige neue Produktionsprozesse gibt, sollten diese durch Information, Demonstration, Fortbildung und eventuell finanzielle Förderung beschleunigt realisiert werden. Dies gilt insbesondere für solche Prozesse, deren Anlagenlebensdauern mehr als 15 bis 20 Jahre betragen (meist in der Grundstoff-Industrie).
- Neue Technologien mit deutlich vermindertem Nutzenergiebedarf, die erst konzeptionell vorliegen oder in Laboranlagen realisiert sind, sollten durch angewandte Forschung und Pilot-Projekte soweit vorangetrieben werden, dass sie möglichst bald marktfähig sind.

Umfassende Abwärmenutzung

Die Nutzung von Abwärme – sei es betriebsintern oder -extern – ist aus verschiedenen Gründen (z.B. kein Kerngeschäft, Festlegung von Verbundproduktionen mit gewissen Risiken, unbekannte Veränderung von Prozesstemperaturen auf Seiten der Wärmequelle oder -senke, relativ lange Amortisationszeiten) bislang relativ gesehen zu den Potenzialen nur wenig realisiert. Abwärmequellen können Produktionsmaschinen oder -Anlagen sein, die Verlustwärme an die Umgebung abstrahlen, Öfen, Abwässer aus Wasch-, Färbe- oder Kühlungsprozessen, aber auch Kühlanlagen, Motoren oder die in Produktionshallen anfallende Abluft (Jochem et al. 2010).

Schwer greifbare und damit derzeit noch schlecht verwertbare Abwärmern sind:

- Strahlungswärme von Hochtemperatur-Öfen über 800 °C
- Latente Wärme in den Produkten, die in der Regel ihre Wärme an die Umgebung abgeben.

Hier empfehlen die Autoren - neben dem seit Mai dieses Jahres angebotenen Förderprogramm der KfW für Abwärmenutzung - :

- eine breite Informationskampagne, spezielle Tagungen und Fortbildungen für solche Branchen, in denen eine Abwärmenutzung (intern oder extern) mit hoher Wahr-

scheinlichkeit heute rentabel ist (entweder für Produktionsprozesse im Betrieb oder zur Strom- oder Kälteerzeugung).

- eine risiko-abdeckende Versicherungslösung (eventuell auch mit Bürgschaften) für Abwärmenutzung in Nachbarbetrieben und Wärmeauskopplung in Nah- und Fernwärmenetze.
- Die Entwicklung von technischen Lösungen für die Niedertemperatur-Abwärmenutzung (z.B. aus fertiggestellten Produkten in Giessereien, Pulverlackierereien oder der Lebensmittel-Industrie), die es heute noch weitgehend nicht gibt, aber von manchen Betrieben bereits gefordert wird, um im Sommer die Arbeitsbedingungen erträglich zu erhalten und Lagerflächenkosten für die Abkühlphase zu sparen.

Paket aus branchenspezifischen Forschungsprogrammen bzgl. der Minderung industrieller Prozessemissionen

Industrielle nicht-energiebedingte Prozessemissionen machen mit derzeit ca. 60 Mio. t CO₂ äq. ein Drittel der gesamten Industrieemissionen aus. Bislang wurden diese Prozessemissionen, relativ zu den energiebedingten Emissionen, nur wenig beachtet und oftmals als unvermeidlich hingenommen. Sofern eine Emissionsminderung am oberen Rand des 2050-Ziels von 95 % gegenüber 1990 erreicht werden soll, ist eine deutliche Reduktion auch der Prozessemissionen jedoch unvermeidbar (siehe Kapitel 2.1).

Um möglichst schnell alternative Prozesse und Verfahren für die insbesondere betroffene Grundstoffindustrie zu entwickeln und zur Anwendung zu bringen, wäre aus Sicht der Autoren ein auf Kontinuität angelegtes, neues Forschungs- und Entwicklungsprogramm notwendig, das jeweils branchenspezifisch mit den betroffenen Industrien erarbeitet und durchgeführt werden sollte. Ziel der einzelnen branchenspezifischen Programmkomponenten wäre es, konkret die entscheidenden emissionsrelevanten Prozesse zu adressieren und nach Alternativen oder fundamentalen Verbesserungen zu suchen. Erfolgversprechende Ansätze sollten dann möglichst ohne Reibungsverluste in ein Markteinführungsprogramm übergehen. Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm und auch das anschließende Markteinführungsprogramm sollte in enger Kooperation von Politik, Industrie und Wissenschaft entwickelt und durchgeführt werden. Bestehende Ansätze auf nationaler oder europäischer Ebene sollten, wenn möglich und für das neue Programm förderlich, in dieses einbezogen werden.

Stärkung vorhandener und absehbarer Innovationen zur Minderung der THG-Emissionen der in dieser Studie untersuchten Branchen

Im Folgenden werden einige branchen- und technologiespezifische Aspekte angesprochen, die sich auf die in Kapitel 5 untersuchten Branchen beziehen:

- Für die Minderung der prozessbedingten Emissionen in der **Zementindustrie** wäre es wichtig, vorhandene Ansätze wie Celitement verstärkt zu unterstützen. Dabei sollte auch die Optimierung der Produktionsprozesse für die verschiedenen neuartigen Bindemittel/Zemente sowie die Übertragung von deren Produktionsverfahren vom experimentellen Labormaßstab zum großindustriellen Produktionsprozess berücksichtigt werden. Hier ist insbesondere mit erheblichen Markteintrittshemmnissen aufgrund der dominierenden Rolle der klassischen Zemente und der notwendigerweise sehr hohen Qualitätsanforderungen an Bindemittel zu rechnen. Dies sollte frühzeitig politisch adressiert werden. Bis zur Marktreife alternativer Bindemittel wie

Celitement, die deutlich geringere spezifische Prozessemissionen (im Falle von Celitement auch deutlich geringere energiebedingte Emissionen, siehe Kapitel 5.3) aufweisen als klassische Zemente, könnte es ausreichend sein, im Rahmen des genannten branchenspezifischen Forschungsprogramms finanzielle Anreize für Forschung und Entwicklung zu setzen. Es ist jedoch durchaus möglich, dass an der Schwelle zum Markteintritt drastischere, auch ordnungsrechtliche Maßnahmen erforderlich wären, wie beispielsweise ein rechtlich vorgeschriebener Minderungspfad für den Klinkerfaktor, was einem „Phase out“ klassischer Zemente gleichkäme. Voraussetzung hierfür ist selbstverständlich immer die technisch einwandfreie Funktionalität der neuen Bindemittel/Zemente. Die Industrie muss aufgrund der langen Lebensdauer der errichteten Gebäude und Infrastruktureinrichtungensehr langfristige Gewährleistungsverpflichtungen übernehmen. Bereits heute sollten daher Analysen und Experimente zur Simulation der langfristigen sicheren Funktionalität und Beständigkeit der alternativen Bindemittel/Zemente und der entsprechenden Bauwerke und Infrastruktureinrichtungen im praktischen Betrieb vorangetrieben und gefördert werden. Auch CCU könnte für die Zementindustrie eine Option sein, sofern es geeignete Abnehmer der entsprechenden Mengen an CO₂ gibt.

- Für die in Kapitel 5.4 untersuchten Produkte der **Grundstoffchemie** gibt es eine ganze Reihe von vorstellbaren Optimierungen oder Verfahrensinnovationen, welche die spezifischen Emissionen dieser Produktionen senken könnten, die auch politisch durch gezielte oder übergreifende Maßnahmen unterstützt werden können. Bei der Synthesegaserzeugung, die z.B. für die Produktion von Ammoniak und Methanol eingesetzt wird, könnte ein Wechsel der eingesetzten Energieträger weg von Destillationsrückständen und schwerem Heizöl hin zu Erdgas zu deutlich reduzierten spezifischen Emissionen führen. Allerdings ist Erdgas teurer als die gängigen Einsatzstoffe. Ein deutlich höherer Preis für Emissionsberechtigungen könnte den Switch hin zu Erdgas unterstützen. Auch die Vergasung von Biomasse als Rohstoff für die Synthesegasherstellung ist eine Option, die näher analysiert werden sollte. Wasserstoff, als Bestandteil des Synthesegases, könnte auch direkt mit Hilfe neuer Verfahren wie Photokatalyse direkt aus solarer Strahlung oder mittels Power-to-Gas aus überschüssigem erneuerbaren Strom hergestellt werden. Bei diesen beiden Technologien besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, den die Bundesregierung unterstützen könnte. Die Herstellung von Wasserstoff mittels dieser Technologien könnte über die Herstellung von Methanol auch die Olefinchemie (Produktion von kurzkettigen Kohlenwasserstoffen wie Ethylen und Propylen mittels Steam Cracking, siehe Kapitel 5.4.5.2) als Grundlage der modernen Chemieindustrie teilweise und langfristig vielleicht ganz ersetzen. Dies wäre ein erheblicher Transformationsprozess, der auch mit dem Ersatz kapitalintensiver Produktionsstrukturen einherginge. Sowohl das Potenzial zur Emissionsvermeidung als auch die damit verbundenen Kosten/Investitionen sollten näher untersucht werden. Bei der Herstellung von Chlor könnte der flächendeckende Einsatz der Sauerstoff-Verzehrkatode zu deutlichen Emissionsminderungen gegenüber heute führen.
- Auch für die **Papierindustrie** gibt es eine Reihe von Optimierungsmöglichkeiten. So sollten die Hemmnisse und Anreize hinsichtlich einer verstärkten Nutzung erneuerbarer Wärme (derzeit: 12 % des Bedarfs) im Hinblick auf eine deutliche Steigerung der Nutzung analysiert werden. Auch hinsichtlich spezifischer Querschnitts- und

Produktionstechnologien gibt es noch Analysebedarf, welche Potenziale und Hemmnisse bestehen; dies betrifft z.B. Druckluftleckagen und den Betrieb von Kompressoren. Der Effekt vorhandener Anreize sollte evaluiert werden. Auch wenn die Nutzung von Abwärme bereits ein Thema der Papierindustrie ist, fallen noch erhebliche Mengen an Abwärme an, die ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden. Dies betrifft insbesondere die Abluft der Trockenpartien. Bestehende Anreize, Hemmnisse und rechtliche Rahmenbedingungen der Abwärmenutzung in der Papierindustrie sollten analysiert und ggf. darauf aufbauend politisch adressiert werden. Die Potenziale sowie die mögliche weitere Entwicklung von Materialeffizienzmaßnahmen (z.B. dünneres Papier, Rohstoffsubstitution) sollten vertiefend analysiert werden und gegebenenfalls neue Anreize zur Steigerung der Materialeffizienz gesetzt werden.

- Für die **Eisen- und Stahlindustrie** wurden mit der ULCOS-Initiative („Ultra-Low CO₂ Steelmaking“) sowie mit dem auch andere Industriebranchen betreffenden Carbon2Chem-Projekt bereits Ansatzpunkte geschaffen, die intensiviert werden sollten. Mit den beteiligten Unternehmen ist zu diskutieren, welche Rolle die in Entwicklung befindlichen Verfahren und eventuelle weitere, noch zu definierende bzw. zu identifizierende Verfahrensentwicklungen im verbleibenden 35-Jahres-Zeitraum bis 2050 zur Verminderung der Treibhausgasemissionen der Eisen- und Stahlindustrie spielen können und wie deren Implementierung angesichts des hohen Werts und der Langlebigkeit des Kapitalstocks der Produktionsanlagen der Branche beschleunigt werden kann. Dies jeweils bezogen auf die Produktion in Deutschland und in Europa, verbunden mit einer Einschätzung der Auswirkungen auf den Außenhandel mit Stahl, die Exportchancen für innovative und emissionsarme Verfahrensentwicklungen in andere Weltregionen (bspw. China) und damit einer Einschätzung des denkbaren Beitrags auf die Emissionen der weltweiten Stahlerzeugung, an der Deutschland und Europa derzeit Anteile von lediglich 2,5 bzw. 10% halten.

7 Literaturverzeichnis

- AGEB (2013): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. Berlin.
- AGEB (2014): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2012. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. Online verfügbar unter <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2013.html>, zuletzt geprüft am 09.11.2015.
- AGEB (2015): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2013. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. Online verfügbar unter <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2013.html>, zuletzt geprüft am 30.05.2016.
- AGEB (2016): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2014. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. Online verfügbar unter <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html>, zuletzt geprüft am 20.05.2016.
- Albrecht, Stefan; Brandstetter, Peter; Fröhling, Magnus; Sedlbauer, Klaus; Schultmann, Frank; Trippe, Frederik (2013): Abschätzung der Ressourceneffizienz-Potenziale in der Fördermaßnahme r². Abschlussbericht zu den im Rahmen des Integrations- und Transferprojekt der BMBF-Fördermaßnahme "r² - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - rohstoffintensive Produktionsprozesse" durchgeführten Arbeiten. Karlsruhe, Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.r-zwei-innovation.de/_media/Arbeitspapier_Aggregierte_Potenziale_Cluster.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2016.
- Allwood, J. M.; Ashby, M. F.; Gutowski, T. G.; Worell, E. (2013): Material efficiency: providing material services with less material production. Hg. v. Phil. Trans. R. Soc. A 2013 371, 20120496.
- Arens, M.; Worell, E. (2014): Diffusion of energy efficient technologies in the German steel industry and their impact on energy consumption: Energy, (Volume 73, 14 August 2014, Pages 968–977).
- Arens, Marlene; Worrell, Ernst; Eichhammer, Wolfgang; Hasanbeigi, Ali; Zhang, Qi (2016): Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term – the case of Germany. In: *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.097.
- Ausfelder, F.; Bazzanella, A. (2008): Diskussionspapier Verwertung und Speicherung von CO₂. Hg. v. Dechema. Frankfurt.
- Austropapier (2012): Die 2050 Low-Carbon Bio-Economy Roadmap der europäischen Papierindustrie. Mit Technologiesprüngen vom „green dream“ zur „fibre intelligence“. Hg. v. Fachdialog Roadmap 2050 (24.9.12).
- BBS (2015): Daten und Informationen des Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden. Hg. v. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden. Online verfügbar unter <http://www.baustoffindustrie.de/cms/website.php>.
- BCG (2014): The Most Innovative Companies 2013. Lessons from Leaders. Unter Mitarbeit von Kim Wagner, Eugene Foo, Hadi Zablit und Andrew Taylor. Hg. v. Boston Consultant Group. Online verfügbar unter https://www.bcgperspectives.com/content/articles/innovation_growth_most_innovative_companies_2013_lessons_from_leaders/?chapter=, zuletzt geprüft am 30.05.2016.
- BCG (2015): The Most Innovative Companies 2014. Unter Mitarbeit von Kim Wagner, Eugene Foo, Hadi Zablit und Andrew Taylor. Hg. v. Boston Consultant Group. Online verfügbar unter https://www.bcgperspectives.com/content/articles/innovation_growth_digital_economy_innovation_in_2014/, zuletzt geprüft am 05.11.2015.
- BCG; VDEh (2013): The Boston Consulting Group, Steel Institute VDEh. Steel's contribution to a low carbon Europe 2050. Technical and economic analysis of the sector's CO₂ abatement potential.
- BDI (2016): EU ETS-Reformvorschlag der KOM vom 15.07.2015 - was ist aus Industriesicht zu ändern? Online verfügbar unter http://bdi.eu/media/themenfelder/energie_klima/downloads/01022016_AEnderungsbedarf_EU-ETS-Reform.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

BDI; BDA (2015): Startschuss für Verhandlungen zur Reform des Europäischen Emissionshandels (EU-ETS). Online verfügbar unter http://bdi.eu/media/presse/publikationen/europa-und-bruessel/Bruessel_Aktuell_Oktober_2015.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

Bender, M.; Braun, M.; Rally, P.; Scholz, O. (2016): Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen; erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen. Fraunhofer IAO. Online verfügbar unter www.produktionsmanagement.iao.fraunhofer.de/content/dam/produktionsmanagement/de/documents/LBR/Studie-Leichtbauroboter-Fraunhofer-IAO-2016.pdf.

Bertelsmann Stiftung (2015): Demographie konkret - Altersarmut in Deutschland. Regionale Verteilung und Erklärungsansätze. 1. Aufl.

Biermann, Franziska (2013): Entwicklungen und Perspektiven im Welthandel. In: *Wirtschaftsdienst* 93 (5), S. 351–352. DOI: 10.1007/s10273-013-1533-1.

BMBF (27.06.2016): Mit Abgas das Klima retten. Online verfügbar unter <https://www.bmbf.de/de/mit-abgas-das-klima-retten-3044.html>, zuletzt geprüft am 30.08.2016.

BMJV (2011): Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen. TEHG. BMJV.

BMW (2016a): Klimaschutz. EU-Klimaschutzpolitik. Online verfügbar unter <http://www.bmw.de/DE/Themen/Industrie/Industrie-und-Umwelt/klimaschutz,did=338374.html>, zuletzt aktualisiert am 2016, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

BMW (2016b): Rahmendaten für die Energiewirtschaft. Hg. v. BMW. Berlin.

BMW; BMUB (2010): Energiekonzept. für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. München.

Börsch-Supan, Axel; Wilke, Christina Benita (2007): Szenarien zur mittel- und langfristigen Entwicklung der Anzahl der Erwerbspersonen und der Erwerbstätigen in Deutschland. Hg. v. Mannheim Research Institute for the Economics of Aging (153-2007).

Bowen, C. P. (Hg.) (2007): Development Trends for Ethylene Crackers: Existing Technologies and R&D. Workshop „Feedstock Substitutes, Energy Efficient Technology and CO₂ Reduction for Petrochemical Products“, Paris. Paris.

Breitschopf, Barbara; Haller, Ina; Grupp, Hariolf (2005): Bedeutung von Innovationen für die Wettbewerbsfähigkeit. In: Sönke Albers und Oliver Gassmann (Hg.): *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement*. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 41–60.

Brinkmann, Thomas; Giner Santonja, Germán; Delgado Sancho, Luis; Schorcht, Frauke; Roudier, Serge (2014): Best available techniques (BAT) reference document for the production of chlor-alkali. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control). Luxembourg: Publications Office (EUR, Scientific and technical research series, 26844).

Bundespsychotherapeutenkammer (2013): Psychische Erkrankungen und gesundheitsbedingte Frühverrentung. BPtK-Studie zur Arbeits- und Erwerbsunfähigkeit. Hg. v. Bundespsychotherapeutenkammer. Berlin.

Bundesregierung (2016): Nationales Programm für nachhaltigen Konsum.

Bundestag (2013): Schlussbericht der Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität – Wege zu nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlichem Fortschritt in der Sozialen Marktwirtschaft“. Bundestag-Drucksache 17/13300. Berlin.

Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (2011): Neue Chancen mit Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie. effizient produzieren - nachhaltig wirtschaften. Online verfügbar unter http://www.bkww.de/fileadmin/users/bkww/industrie/Broschuere_KWK_in_der_Industrie.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2016.

Burke, Marshall; Hsiang, Solomon M.; Miguel, Edward (2015): Global non-linear effect of temperature on economic production. In: *Nature* (527), S. 235–239.

- Buttermann, Hans Georg (2016): Arbeitsgemeinschaften Energiebilanzen, 2016 an IREES.
- Carus, M.; Aeschelmann, F.; Essel, R.; Rascka, A. (2016): Market study on bio-based building blocks and polymers in the world -Capacities, production and applications: status quo and trends toward 2020 - Environmental aspects CO₂-based polymers. Hg. v. nova Institut GmbH. Online verfügbar unter www.oeffizienz-forum-wirtschaft.de/programm-ahlen-2016.htm#podium_2.
- Carus, Michael; Carrez, D.; Kaeb, H.; Venus, J. (2011): Level playing field for bio-based chemistry and materials. In: *Nova Institute*, S. 4–18.
- Cefic (2014): Facts and Figures. Online verfügbar unter www.cefic.org, zuletzt geprüft am 16.11.2015.
- Celitement (2015): Daten und Informationen der Celitement GmbH. Hg. v. Celitement GmbH. Online verfügbar unter www.Celitement.de, zuletzt geprüft am 16.11.2015.
- CEP (2015): Emissionshandelssystem ab 2021. Unter Mitarbeit von Nima Nader und Götz Reichert. Freiburg (cepAnalyse; 14/2015;). Online verfügbar unter http://www.cep.eu/Analysen/COM_2015_337_Emissionshandelssystem/cepAnalyse_COM_2015-337_Emissionshandelssystem.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2016.
- Château, Jean; Fontagné, Lionel; Fouré, Jean; Johansson, Åsa; Olaberría, Eduardo (2014): Trade patterns in the 2060 world economy. In: *OECD Economics Department Working Papers* (1142).
- Chemietechnik (2014): EU-Verbot für Amalgam-basierte Chloralkali-Elektrolyse führt zu Marktkonsolidierungen. Online verfügbar unter <http://www.chemietechnik.de/eu-verbot-fuer-amalgam-basierte-chloralkali-elektrolyse-fuehrt-zu-marktkonsolidierungen/>, zuletzt geprüft am 30.05.2016.
- Christensen, N. P.; Holloway, S. (2004): GESTCO - Geological Storage of CO₂ from Combustion of Fossil Fuel (Summary Report). Hg. v. European Commission. Brussels, Belgium.
- Commerzbank (2015): Papierindustrie. Branchenbericht – Corporate Sector Report. Online verfügbar unter https://www.commerzbank.at/portal/media/corporatebanking/hauptportal/loesungen-nachbedarf/pdfs/marktwissen_bb_papier.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2016.
- Consultic; Plastics (2014): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2013. Kurzfassung.
- Currás, Tabaré Arroyo (2010): Barriers to investment in energy saving technologies. In: *Case Study for the Energy Intensive Chemical Industry in the Netherlands (Master's thesis)*.
- DEHSt (2014): Zuteilung 2013-2020. Ergebnisse der kostenlosen Zuteilung von Emissionsberechtigungen an Bestandsanlagen für die 3. Handelsperiode 2013-2020. UBA. Berlin. Online verfügbar unter http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Zuteilungsbericht.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 23.09.2016.
- DEHSt (2015a): Emissionshandel in Zahlen. UBA. Berlin. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Broschuere_EH-in-Zahlen.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 23.09.2016.
- DEHSt (2015b): Treibhausgasemissionen 2014. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland. UBA. Berlin. Online verfügbar unter http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/VET-Bericht_2014.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 23.09.2016.
- DEHSt (2016): Versteigerungen in der dritten Handelsperiode (2013-2020). UBA. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/DE/Emissionshandel/Versteigerung/Versteigerungen_2013-2020/Versteigerung_2013-2020_node.html, zuletzt aktualisiert am 03.03.2016, zuletzt geprüft am 23.09.2016.
- Dena (2016): Potenzialatlas Power to Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Berlin. Online verfügbar unter http://www.powertogas.info/fileadmin/content/Downloads_PtG_neu/Potenzialatlas/dena_Potenzialatlas_PowerToGas_2016-07-01.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2016.

Destatis (2013): Wirtschaftsrechnungen. Einkommens- und Verbrauchsstichprobe Einnahmen und Ausgaben privater Haushalte. Fachserie 15 Heft 4. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

Destatis (2014): Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Fachserie 4 Reihe 4.3. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

Destatis (2015a): Außenhandel. Zusammenfassende Übersichten für den Außenhandel. Fachserie 7 Reihe 1. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

Destatis (2015b): Umwelt - Umsatz mit Umweltschutzgütern und Umweltschutzleistungen 2013. Fachserie 19 Reihe 3.3. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

Destatis (2015c): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Inlandsproduktberechnungen lange Reihe ab 1970. Fachserie 18 Reihe 1.5. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

Destatis (2016): Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Fachserie 4 Reihe 4.3. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

Deutsche Bank Research (2007): Klimawandel und Branchen - Manche mögen's heiß. Frankfurt.

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt (2015): Treibhausgasemissionen 2014 - Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland. Hg. v. Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt.

Dispan, Jürgen (2013): Papierindustrie in Deutschland. Branchenreport 2013. Stuttgart: IMU-Inst. (Informationsdienst des IMU-Institut, H. 2013,2).

Dispan, Jürgen; Vassiliadis, Michael (2014): Papiererzeugung in Deutschland. Eine Branchenanalyse. Hg. v. Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie. Hannover.

DIW; Edler, Dietmar; Blazejczak, Jürgen; ISI; Walz, Rainer; Ostertag, Katrin et al. (2007): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz. Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation. Hg. v. Umweltbundesamt. Berlin.

Ecofys (2009): Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Sector report for the lime industry. Unter Mitarbeit von Ecofys, Fraunhofer ISI und Öko-Institut. Hg. v. European Commission.

EFI (2015): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands. Gutachten 2015. Hg. v. Expertenkommission Forschung und Innovation. Online verfügbar unter http://www.e-fi.de/fileadmin/Gutachten_2015/EFI_Gutachten_2015.pdf, zuletzt geprüft am 20.05.2016.

EFI (2016): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands. Gutachten 2016. Hg. v. Expertenkommission Forschung und Innovation. Online verfügbar unter http://www.e-fi.de/fileadmin/Gutachten_2016/EFI_Gutachten_2016.pdf, zuletzt geprüft am 20.05.2016.

Eichhorst, W.; Spermann, A. (2015): Sharing Economy – Chancen, Risiken und Gestaltungsoptionen für den Arbeitsmarkt. IZA Research Report No. 69. Hg. v. IZA. IZA (39). Online verfügbar unter www.iza.org/en/webcontent/publications/reports/report_pdfs/iza_report_69.pdf.

England, R. W. (1998): Measurement of social well-being: alternatives to gross domestic product. Hg. v. Ecological economics.

Enviros Consulting (2006): EU ETS Phase II. New Entrants Supporting Documentation: Petrochemicals. Hg. v. Enviro Consulting Limited. London.

European Bioplastics (2016): Bioplastics market-data. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.european-bioplastics.org/market/>, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

EZB (2015): Aktuelle wirtschaftliche und monetäre Entwicklung. Monatsbericht 07/2015. Hg. v. Europäische Zentralbank. Frankfurt am Main.

Fehringer, Roland; Brandt, Benjamin; Daxbeck, Hans; Neumayer, Stefan; Buschmann, Heinz; Gassner, Andreas et al. (2014): Nachhaltig Wirtschaften - Schaffung von rechtlichen Potenzialen für Urban Mining im Abfallrecht. Abschlussbericht der Arbeitspakete AP6 und AP8. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien. Wien. Online verfügbar unter

http://www.fabrikderzukunft.at/e2050/e2050_pdf/reports/endbericht_201431c_urban_mining.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

Fehringer, Roland; Brandt, Benjamin; Frühwirt, Werner; Daxbeck, Hans; Neumayer, Stefan; Buschmann, Heinz; Gassner, Andreas (2013): Nachhaltig Wirtschaften - Schaffung von rechtlichen Potenzialen für Urban Mining im Abfallrecht. Abschlussbericht der Arbeitspakete AP2 und AP3. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien. Wien. Online verfügbar unter

http://www.fabrikderzukunft.at/e2050/e2050_pdf/reports/endbericht_201431a_urban_mining.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

Fishedick, M.; Marzinkowski, J.; Winzer, P.; Weigel, M. (2014): Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies: *Journal of Cleaner Production* (Volume 84, 1 December 2014, Pages 563–580).

Fleiter, Tobias; Schломann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien. Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Hg. v. Tobias Fleiter, Barbara Schломann und Wolfgang Eichhammer. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe.

Fouré, Jean; Bénassy-Quéré, Agnès; Fontagné, Lionel (2013): Modelling the world economy at the 2050 horizon. In: *Econ Transit* (21), S. 617–654. DOI: 10.1111/ecot.12023.

Fouré, Jean; Bénassy-Quéré, Agnès; Fontagné Lionel (2012): The Great Shift. Macroeconomic projections for the world economy at the 2050 horizon (03).

Fraunhofer ISI (2013): Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2012 für das verarbeitende Gewerbe mit Aktualisierungen für die Jahre 2009-2011. Karlsruhe.

Gehrke, Birgit; Schasse, Ulrich (2013): Position Deutschlands im Außenhandel mit Gütern zur Nutzung erneuerbarer Energien und zur Steigerung der Energieeffizienz. Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung. Hannover.

Gehrke, Birgit; Schasse, Ulrich (2015): Die Umweltschutzwirtschaft in Deutschland. Produktion, Umsatz und Außenhandel. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Gehrke, Birgit; Schasse, Ulrich; Ostertag, Katrin; Marscheider-Weidmann, Frank (2015): Innovationsmotor Umweltschutz. Forschung und Patente in Deutschland und im internationalen Vergleich. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Gehrke, B., Grupp, H. (1994): Innovationspotenzial und Hochtechnologie: Technologische Position Deutschlands im Internationalen Wettbewerb. 2. Vollst. bearb. u. erweit. Auflage. 267 S. Hg. v. Heidelberg: Physika Verlag (ISBN: 3-7908-0804-0).

Gerke, B., Legler, H. (1997): Internationale Wettbewerbsfähigkeit forschungsintensiver Industrien am Standort Deutschland. Hg. v. Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung. Hannover (Discussion-Paper 97-02).

GKV (2016): Überblick Kunststoffverarbeitung. Hg. v. Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V. Online verfügbar unter <http://www.gkv.de/de/branchen/ueberblick.html>, zuletzt geprüft am 24.05.2016.

Global CCS Institute (2016): The Global Status of CCS. Special Report: Introducing Industrial Carbon Capture and Storage. Melbourne, Australia.

Gsell, M.; Dehoust, G.; Hülsmann, F.; Brommer, E.; Cheung, E.; Förster, H. et al. (2015): Nutzen statt Besitzen: Neue Ansätze für eine Collaborative Economy. Umwelt, Innovation, Beschäftigung 03/2015. Hg. v. Öko-Institut e.V. und INFRAS Forschung und Beratung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Online verfügbar unter www.rohkraft.net/wp-content/uploads/2015/10/2015.10.28_uib_03_2015_nutzen_statt_besitzen_0.pdf.

Gutte, Heiner; Schiffer, Lutz; Meyer, Bernd (2014): Ausgewählte Aspekte der Rohstoffgewinnung - Ein Vergleich zwischen Braunkohle und nachwachsenden Rohstoffen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 86 (10), S. 1690–1695. DOI: 10.1002/cite.201300187.

Häring, Heinz-Wolfgang (Hg.) (2007): Industrial Gases Processing. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Hermann, Barbara Geneviève (2010): Opportunities for biomaterials. Economic, environmental and policy aspects along their life cycle. [S.l.: s.n.].

Hirzel, Simon; Sontag, Benjamin; Rohde, Clemens (2013): Industrielle Abwärmenutzung. Kurzstudie. Fraunhofer ISI.

Hreinsson, Egill Benedikt (2008): Renewable Energy Resources in Iceland. Environmental Policy and Economic Value. Nordic Conference on Production and Use of renewable Energy.

IEA (2007): Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions. Hg. v. International Energy Agency und OECD. Paris.

IEA (2009): Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050. Hg. v. International Energy Agency und World Business Council for Sustainable.

IG BAU (2013): Nachhaltigkeit und Zementindustrie. Dokumentation von Beiträgen und Handlungsoptionen. Unter Mitarbeit von Sustain Consult Beratungsgesellschaft für nachhaltige Wirtschaftsentwicklung mbH. Hg. v. Industriegewerkschaft Bauen Agrar Umwelt. Dortmund.

IMF (2014): World Economic Outlook Database. Hg. v. International Monetary Fund. Online verfügbar unter <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2014/01/weodata/index.aspx>, zuletzt geprüft am 20.05.2016.

IPTS (2001): Reference Document on Best Available Techniques in the Chlor-Alkali Manufacturing Industry. Hg. v. EU Kommission. Joint Research Centre; Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla.

IPTS (2003): Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Organic Chemical Industry. Hg. v. EU Kommission. Joint Research Centre; Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla.

IPTS (2007): Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals: Ammonia, Acids and Fertilisers. Hg. v. EU Kommission. Joint Research Centre; Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla.

IREES (2016): Klimaschutzkonzept. Berechnungen des IREES im Rahmen des Projektes Klimaschutz durch Energieeffizienz II. Hg. v. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES). Berlin, Karlsruhe.

IREES; ISI (2015): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie; Analyse im Rahmen des Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung "Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050".

ISI (2010): Energietechnologien 2050. Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung - Politikbericht. Stuttgart (ISI-Schriftreihe "Innovationspotenziale"). Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/politikbericht-energietechnologien-2050,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt geprüft am 21.09.2016.

ISI (2011): Materialeffizienz in der Produktion: Einsparpotenziale und Verbreitung von Konzepten zur Materialeinsparung im Verarbeitenden Gewerbe. Endberichterstattung an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Karlsruhe. Online verfügbar unter http://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/frauenhofer_materialeffizienz_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

ISI; IREES; Öko-Institut; IFEU; Wuppertal Institute (2016): Maßnahmenset 2.1. Diskussionsgrundlage für die zweite Dialogrunde des Beteiligungsprozesses zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung. Online verfügbar unter http://www.klimaschutzplan2050.de/wp-content/uploads/2015/10/Massnahmenset-2-1_Input-2-Dialogphase-aktualisiert.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2016.

IVA (2014): Wichtige Zahlen. Düngemittel, Produktion, Markt, Landwirtschaft. 2013 - 2014. Hg. v. Industrieverband Agrar e.V. Frankfurt am Main.

IW Consult (2015): Strukturbericht für die M+E-Industrie in Deutschland. Köln. Online verfügbar unter https://www.gesamtmetall.de/sites/default/files/downloads/me-strukturbericht_2015.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

Jochem, Eberhard (2005): Energiebezogene Technologien — Chancen Par Excellence für Innovationen. In: Stefan Mappus (Hg.): Erde 2.0 — Technologische Innovationen als Chance für eine Nachhaltige Entwicklung? Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, S. 192–212.

Jochem, Eberhard; Herbst, Andrea; Mai, Michael; Reitze, Felix; Toro, Felipe (2011): Untersuchung des Energieeinsparpotenzials für ein Nachfolge- Modell ab dem Jahr 2013ff zu Steuerbegünstigungen für Unternehmen des Produzierenden Gewerbes sowie der Land- und Forstwirtschaft bei der Energie- und Stromsteuer. Unter Mitarbeit von Eberhard Jochem, Andrea Herbst, Michael Mai, Felix Reitze und Felipe Toro. Hg. v. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES). Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES). Karlsruhe.

Jochem, Eberhard; Idrissova, Farikha; Arens, Marlene; Pehnt, Martin; Bödeker, Jan (2010): Die Nutzung industrieller Abwärmetechnisch - wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. Heidelberg, Karlsruhe.

Jochem, Eberhard; Reitze, Felix (2014): Material Efficiency and Energy Use. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences.

Jochem, Eberhard; Reitze, Felix; Schön, Michael; Toro, Felipe; Schломann, Barbara; Wohlfahrt, K. (2016): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie. 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung "Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050". Karlsruhe.

Jochem, Eberhard; Andersson, Göran; Favrat, Daniel; Gutscher, Heinz; Hungerbühler, Konrad; von Rohr, Philipp Rudolf et al. (2004): Steps towards a sustainable development. A White Book for R&D of energy-efficient technologies. Altstätten CH.

Jones, Mark (Hg.) (2009): Alternatives to Steam Cracking: Will the Steam Cracker Go the Way of the Dodo? 21. Unter Mitarbeit von Mark Jones. Ethylene Producers Conference. Tampa, Florida.

Jung, Holger; Kappen, Johannes (2013): Effiziente Energienutzung in der Papierindustrie. Colloquium "Effiziente Energienutzung" im Rahmen der Graduierten- und Forschungsschule Effiziente Energienutzung Stuttgart (GREES). Papiertechnische Stiftung. Stuttgart, 2013. Online verfügbar unter http://www.grees.uni-stuttgart.de/kolloquium/Kolloquium_2013/GREES-Kolloquium_10.07.13_Jung.pdf, zuletzt geprüft am 16.11.2015.

Jungmeier, Gerfried; Schwaiger, Hannes; Windsperger, Andreas; Steinlechner, Stefan; Hintermeier, Gerhard; Stark, helmut (2003): Nachhaltig Wirtschaften - Die Papierfabrik im Jahr 2030. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 18/2005. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Graz.

Kaspar, Radko (2002): Direktwalzen von Dünnbrammen aus Stahl. Max-Planck Hot Forming 5.12.2002. Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, 2002.

Kempf, R. (2011): Middle East Chemical Week Conference (11.10.2011). UOP LLC, 2011.

Kirchner, A.; Matthes, F.; Ziesing, H. J. (2009): Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. In: *Institute for Applied Ecology: Berlin, Germany*.

Klenk, Volker (2009): Corporate Transparency: Wege aus der Vertrauenskrise.

Knauf, Rüdiger; Meyer-Blumenroth, Ulrich; Semel, Joachim (1998): Einsatz von Membrantrennverfahren in der chemischen Industrie. In: *Chemie Ing. Techn.* 70 (10), S. 1265–1270. DOI: 10.1002/cite.330701005.

Krenn, Christina; Fresner, Johannes; Meixner, erich (Hg.) (2008): Energieeffizienzsteigerung in Unternehmen der stahlverarbeitenden Industrie durch Abwärmenutzung im Niedertemperaturbereich. The 10. Symposium Energieinnovation. Graz.

Kristof, K.; Hennicke, P. (2010): Endbericht des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Kernergebnisse des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Ressourceneffizienzpaper 0.2. Wuppertalinstitut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (ISSN 1867-0237).

Krüger, Oliver; Adam, Christian (2014): Monitoring von Klärschlammmonverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotenziale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Le Quére, C.; Moriarty, R.; Andrew, R.; Peters, G.; Ciais, P.; Friedlingstein, P. et al. (2014): Global carbon budget 2014. In: *Earth System Science Data Discussions* 7 (2), S. 521–610.

Legler, H.; Beise, M.; Gehrke, B.; Schmoch, U.; Schumacher, D. (2000): Innovationsstandort Deutschland. Chancen und Herausforderungen im internationalen Wettbewerb. Landsberg/Lech: mi, Verl. Moderne Industrie.

Legler, Harald; Gehrke, Birgit; Krawczyk, Olaf; Schasse, Ulrich; Rammer, Christian; Leheyda, Nina; Sofka, Wolfgang (2009): Die Bedeutung der Automobilindustrie für die deutsche Volkswirtschaft im europäischen Kontext: Endbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. ZEW Gutachten/Forschungsberichte.

Legler, Harald; Krawczyk, Olaf; Walz, Rainer; Eichhammer, Wolfgang; Frietsch, Rainer (2006): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz: Leistungsfähigkeit der deutschen Umwelt- und Klimaschutzwirtschaft im internationalen Vergleich. Hg. v. Umweltbundesamt. Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung NIW; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Dessau.

Leismann, Kristin; Enterlein, Indra (2012): Nutzen statt Besitzen. Auf dem Weg zu einer ressourcenschonenden Konsumkultur : eine Kurzstudie. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung (Schriften zur Ökologie, 27).

Lichtblau, Karl; Fritsch, Manuel; Buchweitz, Christian; Bähr, Cornelius; Bertenrath, Roman (2014): Strukturbericht für die M+E-Industrie in Deutschland. Berichtsstand 2014. Im Auftrag des Arbeitgeberverbandes GESAMTMETALL. Hg. v. Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH. Köln.

Liedtke, Ch.; Ameli, N.; Buhl, J. Oettershagen, Ph.; Pears, T.; Abbas, P. (2013): Designguide - Background, information and Tools. Wuppertal Institute.

Lösch, Oliver; Jochem, Eberhard; Reitze, Felix; Schön, Michael; Toro, Felipe; Gollmer, Christian (2016): Klimaschutz durch Energieeffizienz II: Konzept zur Erhöhung der Energieeffizienz und Erschließung von Treibhausgas-Minderungspotenzialen in den Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen. Arbeitspapier 1 - Darstellung Wissensstand und Bewertung etablierter und beschlossener Klimaschutzmaßnahmen für die Industrie und GHD in Deutschland. IREES. Karlsruhe, Berlin.

Ludwig, Jens Michael (2012): Energieeffizienz durch Planung betriebsübergreifender Prozessintegration mit der Pinch-Analyse. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek.

Ludwig, Johannes (2009): Sinus-Milieus. Hg. v. Sinus Sociovision. Heidelberg. Online verfügbar unter http://www.johannesludwig.de/dman/Essentials/Sinusmilieus_Informationen2010.pdf.

Lurgi (2006): Broschüre. MegaMethanol. Frankfurt am Main.

Maass, Werner (2016): Wirtschaftliche Vorteile durch Materialeffizienz in der Kunststoffindustrie. Effizienz Forum Wirtschaft. VDI ZRE. Ahlen, 16.03.2016. Online verfügbar unter http://www.effizienz-forum-wirtschaft.de/uploads/vortragsprogramm_2016/16_03_16_Pr%C3%A4sentation_VDI%20ZRE_WMA.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2016.

Mai, Michael; Glaser, K. (2015): Pilotprojekt Demand Side Management BW. Hg. v. IREES. Karlsruhe.

Marceau, Medgar; Nisbet, Michael A.; Van Geem, Martha G (2006): Life cycle inventory of portland cement manufacture. Portland Cement Association Skokie, IL.

Mattes, Helmut; Schaal, Frank; Hasse, Hans; Stroh, Norbert; Weimer, Thomas (2006): Membranapparate für umweltfreundliche Absorptionskälteanlagen und -wärmepumpen. Hg. v. mattes engineering GmbH. Berlin.

May, F.; Müller, C.; Bernstone, C. (2005): How much CO₂ can be stored in deep saline aquifers in Germany? In: *VGB PowerTech* 85 (6), S. 32–37.

McKinsey (2006): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Sektorenperspektive Industrie. Hg. v. BDI. McKinsey & Company Inc.

Meyer, Friedhelm; Gerlach, Oliver; Kratzert, Christian; Lübke, Horst (2012): Untersuchungen zu einem Online-Verfahren für die kontinuierliche Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von gewerblichen Kälteanlagen (EnEff_Cool). Hg. v. Cool Expert Entwicklungs GmbH. Allendorf.

Milford, R.L.; Allwood, J. M.; Cullen, J. M. (2011): Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO₂ abatement in the steel and aluminium sectors: Resour. Conser. Recycl. 55 (1185–1195).

Moore, Charles J.; Diaz, Delvane. B. (2015): Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. In: *Nature Climate change* 5 (2), S. 127–131. DOI: 10.1038/nclimate2481.

Morovic, T.; Gründung, F.-J.; Jäger, F.; Jochem, E.; Mannsbart, W.; Poppke, H. et al. (1987): Energy conservation indicators. A Report for the Commission of the European Communities. Hg. v. Springer. Berlin.

Moser-Marzi, Elisabeth; Erdelean, Milorad (2014): Nachhaltig Wirtschaften - Schaffung von rechtlichen Potenzialen für Urban Mining im Abfallrecht - Rechtlicher Teil. Abschlussbericht der Arbeitspakete AP4, AP5 und AP7. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien. Online verfügbar unter http://www.fabrikderzukunft.at/e2050/e2050_pdf/reports/endbericht_201431b_urban_mining.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

Moussallem, Imad; Pinnow, Stefan; Turek, Thomas (2009): Möglichkeiten zur Energierückgewinnung aus Wasserstoff bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse. In: *Chemie Ingenieur Technik* 81 (4), S. 489–493.

Muntzke, H.-P (2005): Branchen-Report Papiergewerbe. Starkes Wachstum der Papierexporte nach Osteuropa. Hg. v. Dresdner Bank AG. Dresdner Bank AG. Frankfurt am Main.

Naims, Henriette; Olfe-Krätlein, Barbara; Lorente Lafuente, Ana Maria; Bruhn, Thomas (2015): CO₂-Recycling - Option für Politik und Gesellschaft? IASS Working Paper. Potsdam.

Neitzel, Michael; Dangel, Daniel; Gottschalk, Wiebke; Schröder, Heike; Raschper, Norbert; Wiblishauser, Brigitte et al. (2015): Bericht der Baukostensenkungskommission. Im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen. Endbericht. Hg. v. Im Rahmen des Forschungsprogramms „Zukunft Bau“ des BMUB. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Wohnungswirtschaft/buendnis_baukostensenkungskommission_bf.pdf.

Nova (2013): Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. Unter Mitarbeit von Michael Carus, Achim Raschka, Horst Fehrenbach, Nils Rettenmaier, Lara Dammer, Susanne Köppen et al. Hg. v. Umweltbundesamt. nova-Institut GmbH. Dessau-Roßlau.

Nusser, M. (2008): Internationale Wettbewerbsfähigkeit forschungs- und wissensintensiver Unternehmen. Hg. v. Wirtschaftsdienst (ISSN 0043-6275. Vol. 88/ 9, S.594-603, doi:10.1007/s10273-008-0842-2).

Nusser, Michael; Wydra, Sven; Hartig, Juliane; Gaisser, Sibylle (2007;): Forschungs- und wissensintensive Branchen: Optionen zur Stärkung ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit. Innovationsreport. TAB. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/FuE-Branchen-Wettbewerbsfaehigkeit_TAB-116_final.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

Öko-Institut (2012): Eco@work. Nachhaltiges aus dem Öko-Institut.

Öko-Institut (2014): Die Zusatzgewinne ausgewählter deutscher Branchen und Unternehmen durch den EU-Emissionshandel. Unter Mitarbeit von Johanna Cludius und Hauke Hermann. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1996/2014-016-de.pdf>, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Olah, George A.; Goepfert, Alain; Prakash, G. K. Surya (2009): Beyond oil and gas. The methanol economy. 2nd updated and enlarged ed. Weinheim: Wiley-VCH.

Opletal, F. (2009): Trends in der Papierindustrie. Hg. v. Voith.

Pauliuk, Stefan; Wang, Tao; Müller, Daniel B. (2012): Moving toward the circular economy: the role of stocks in the Chinese steel cycle. In: *Environmental science & technology* 46 (1), S. 148–154. DOI: 10.1021/es201904c.

Pehnt, Martin; Bödeker, J.; Arens, Marlene; Jochem, Eberhard; Idrissova, Farikha (2010): Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Endbericht. Durchgeführt von Fraunhofer ISI; Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu); Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES). Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Nutzung_industrieller_Abwaerme.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2016.

Peters, Glen P.; Minx, Jan C.; Weber, Christopher L.; Edenhofer, Ottmar (2011): Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (21), S. 8903–8908. DOI: 10.1073/pnas.1006388108.

Peters, Sascha (2012): Smart Energy Materials. Werkstoffinnovationen für die Energiewende. Hg. v. HA Hessen Agentur GmbH. Wiesbaden (Aktionslinie Hessen-Nanotech, Band 21). Online verfügbar unter https://www.hessen-nanotech.de/mm/mm001/Smart_Energy_Materials_final_web.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2016.

PlasticsEurope (2016): Plastics - the Facts 2015. An analysis of European plastics production, demand and waste date.

PlasticsEurope Deutschland e.V. (2015): Geschäftsbericht 2014. Online verfügbar unter <http://www.plasticseurope.de/Document/geschäftsbericht-2014.aspx?FolID=2>, zuletzt geprüft am 24.05.2016.

POLITICO (2015): Plugging the carbon leak. The Commission tries to cut CO₂ emissions without forcing industry to flee to less stringent regions. Unter Mitarbeit von Kalina Oroschakoff und Sara Stefanini. Online verfügbar unter <http://www.politico.eu/article/plugging-the-carbon-leak-energy-emissions-trading-scheme-commission-reforms/>, zuletzt aktualisiert am 09.09.2015, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

Prakash, Siddharth; Dehoust, Günther; Gsell, Martin; Schleicher, Tobis; Stamminger, Rainer (2015): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“. Zwischenbericht.

Prakash, Siddharth; Dehoust, Günther; Gsell, Martin; Schleicher, Tobis; Stamminger, Rainer (2016): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“.

Prognos; EWI; GWS (2014a): Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose. Projekt Nr. 57/12. Hg. v. BMWi. Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH. Basel, Köln, Osnabrück.

Prognos; IREES; IFAM; ISE; BHKW-Consultant (2014b): Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014. Hg. v. BMWi. Fraunhofer IFAM; IREES GmbH; BHKW-Consultant. Berlin.

Prognos; VCI (2012): Die deutsche chemische Industrie 2030. Hg. v. Verband der Chemischen Industrie e. V. Frankfurt am Main.

PTJ; WING (2007): Hochleistungswerkstoffe zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Werkstoffprogramm des BMBF. Ausführungen zur Broschüre "Klimaschutz durch Werkstoffinnovationen im Automobilbau".

Rammer, Christian; Gehrke, Birgit; Wassmann, Pia (2015): Innovationsindikatoren Chemie. Unter Mitarbeit von Mark Leidmann. Hg. v. Verband der Chemischen Industrie e. V. ZEW; NIW. Mannheim, Hannover.

Rammer, Christian; Legler, Harald; Sofka, Wolfgang; Gehrke, Birgit; Krawczyk, Olaf (2009): Innovationsmotor Chemie. FuE-Potenziale und Standortwettbewerb. Unter Mitarbeit von Mark Leidmann. Hg. v. Verband der Chemischen Industrie e. V. ZEW; NIW. Mannheim, Hannover.

Ren, Tao; Patel, Martin; Blok, Kornelis (2006): Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. In: *Energy* 31 (4), S. 425–451.

Roes, Alexander Louis (2011): Ex-ante life cycle engineering: Application to nanotechnology and white biotechnology. Promotion. Universität Utrecht, Utrecht.

Roland Berger Strategy Consultants (2014): GreenTech made in Germany 4.0. Umwelttechnologieatlas für Deutschland. Hg. v. BMUB. Berlin.

Ruppelt, Erwin (2003): Druckluft-Handbuch. 4. Aufl. Essen: Vulkan-Verl.

Rürup Kommission (2003): Bericht der Kommission Nachhaltigkeit in der Finanzierung der sozialen Sicherungssysteme. Bonn.

Saygin, Deger; Patel, Martin K.; Marscheider-Weidmann, Frank (2008): Material and Energy Flows in the Chemical Sector by Processes and Subsectors. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

Scherhorn, Gerhard (2015): Wachstum oder Nachhaltigkeit. Die Ökonomie am Scheideweg. Erkelenz: Altius (Geld & Ethik, Bd. 3).

Schlacke, Sabine; Stadermann, Michael; Grunow, Moritz (2012): Rechtliche Instrumente zur Förderung des nachhaltigen Konsums - am Beispiel von Produkten. Hg. v. Umweltbundesamt. Forschungsstelle für Europäisches Umweltrecht. Dessau-Roßlau.

Schleich, Joachim; Rogge, Karoline; Borkel, Franziska; Haussmann, Philipp; Reichardt, Krisitn; Roser, Anette et al. (2010): Wirkungen neuer klimapolitischer Instrumente auf Innovationstätigkeit und Marktchancen baden-württembergischer Unternehmen. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS. Karlsruhe.

Schlomann, Barbara; Fleiter, Tobias; Hirzel, Simon; Arens, Marlene; Rohde, Clemens; Eichhammer, Wolfgang et al. (2011): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen von industriellen Branchentechnologien durch Prozessoptimierung und Einführung neuer Verfahrenstechniken. Schlussbericht. Hg. v. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Scholl, Gerd; Bietz, Sabine; Kristof, Kora; Otto, Siegmur; Reisch, Lucia; Rubik, Frieder; Süßbauer, Elisabeth (2010): Maßnahmenvorschläge für eine konsumbezogene Ressourcenpolitik. Arbeitspaket 12 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes), Arbeitsschritt 12.2. Hg. v. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Wuppertalinstitut für Klima, Umwelt, Energie GmbH; SRH Hochschule Calw. Wuppertal.

Scholl, Gerd; Gossen, Maike; Grubbe, Magnus; Brumbauer, Tanja (2013): PolRes AP2 - Politikansätze und -instrumente. Alternative Nutzungskonzepte - Sharing, Leasing und Wiederverwendung. Unter Mitarbeit von Umweltbundesamt. Hg. v. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. Online verfügbar unter http://www.ressourcenpolitik.de/wp-content/uploads/2013/04/PolRes_ZB_AP2-Vertiefungsanalyse_alternativ-eNutzungskonzepte.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

Schubert, Johannes; Kreysa, Jennifer (2010): Trends in der Virtuellen Produktion. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT.

Spindler, H.; Martinetz, S.; Fritz, D. (o. J.): STRUKTURSTUDIE »BWSHARE« - Gemeinschaftliche Nutzung von Ressourcen – Chancen und Herausforderungender Sharing Economy für die etablierte Wirtschaft in Baden-Württemberg. Gefördert durch das Land Baden-Württemberg. Fraunhofer IAO. Online verfügbar unter www.iao.fraunhofer.de/lang-de/images/iao-news/strukturstudie-bw-share.pdf.

Steinmüller, H. (2014): Roadmap Industrie – FuE-Fahrplan Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie, Zellstoff und Papier. Diskussionspapier. Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz. Linz.

Studio2020 (2014): Stade Chlor-Alkali Electrolysis. Online verfügbar unter http://video.dow.com/viewerportal/external/home.vp?programId=esc_program:38518, zuletzt geprüft am 04.11.2015.

Styring, Peter; Jansen, Daan; Coninck, H. de; Reith, H.; Armstrong, K. (2011): Carbon Capture and Utilisation in the green economy: Centre for Low Carbon Futures.

Technica (2014): Verbundwerkstoffe als großes Thema. In: *Fachzeitschrift für Fertigungstechnik und Automation*. Online verfügbar unter <http://www.technica-online.ch/artikel/verbundwerkstoffe-als-grosses-thema/>.

True, Warren R. (2012): Global ethylene capacity continues advance in 2011. In: *Oil & gas journal* 110 (7), S. 78–84.

TU Clausthal (01.06.2015): Recycling von Seltenen Erden im Harz geplant. Clausthal-Zellerfeld. Online verfügbar unter <http://www.fona.de/de/20054>, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

UBA (2014a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2012. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

UBA (2014b): Treibhausgasneutrales Deutschland. im Jahr 2050. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

UBA (2016a): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. 1990 - 2014. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>, zuletzt geprüft am 09.11.2015.

UBA (2016b): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. EU-Submission. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau.

ULCOS (2015): Ultra-Low CO₂ Steelmaking. Online verfügbar unter <http://www.ulcos.org/de>.

UN (2015a): UN Comtrade Data Bank. Online verfügbar unter <http://comtrade.un.org/>, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

UN (2015b): World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.241. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Hg. v. United Nations.

UNFCCC (2015): National Inventory Submissions 2015. Hg. v. United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations Framework Convention on Climate Change. Online verfügbar unter http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8812.php, zuletzt geprüft am 09.11.2015.

van der Straaten, R.; Elewaut, E.; Koelewijn, D.; Baily, H.; Holloway, S.; Barbier, J. (1996): Inventory of the CO₂ storage capacity of the European Union and Norway. In: Holloway S, editor. Final report of the Joule II project No. CT92-0031: The Underground Disposal of Carbon Dioxide. British Geological Survey. Nottingham.

Vangkilde-Pedersen, T.; Vosgerau, H.; Willscher, B.; Neele, F.; van der Meer, B.; Bossie-Codreanu, D. (2009): "Capacity standards and site selection criteria". WP 4 Report D 26. EU Geocapacity. Denmark.

VCI (2008): Dokumentation energiesparender bzw. emissionsparender Maßnahmen der chemischen Industrie 2005 – 2007. Frankfurt am Main.

VCI (2015): Chemiewirtschaft in Zahlen 2015. Hg. v. Verband der Chemischen Industrie e. V. Frankfurt am Main.

VCI (06.05.2015): Massive Mehrbelastung droht. Chemiebranche fordert Kompensation für Marktstabilitätsreserve. Kreth, Sebastian. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/presse/pressemitteilungen/massive-mehrbelastung-droht-chemiebranche-fordert-kompensation-fuer-marktstabilitaetsreserve.jsp>, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

VCI (2016): Chemiewirtschaft in Zahlen 2016. Hg. v. Verband der Chemischen Industrie e. V. Frankfurt am Main.

VDEh; WV Stahl (Hg.) (2016): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2015/2016. Stahlinstitut VDEh; Wirtschaftsvereinigung Stahl. 1. Aufl.

VDI (2015): 10 Jahre Emissionshandel - Bilanz und zukünftige Entwicklung. Unter Mitarbeit von Peter Plegniere. Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/artikel/10-jahre-emissionshandel-bilanz-und-zukuenftige-entwicklung-1/>, zuletzt aktualisiert am 24.06.2015, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

VDI ZRE (2013): Analyse von Potenzialen der Material- und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metall verarbeitenden Industrie. Hg. v. VZI ZRE Publikation, Zentrum Ressourceneffizienz.

VDI-GME (2014): Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung. Düsseldorf. Online verfügbar unter

http://www.vditz.de/fileadmin/media/news/documents/Studie_Werkstoffinnovationen_fuer_nachhaltige_Mobilitaet_und_Energieversorgung.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2016.

VDP (2012): Papier 2012. Ein Leistungsbericht. Hg. v. Verband Deutscher Papierfabriken. Bonn.

VDP (2015): Papier 2015. Ein Leistungsbericht. Hg. v. Verband Deutscher Papierfabriken. Bonn.

VDZ (2013): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. 2012. Hg. v. Verband Deutscher Zementindustrie. Düsseldorf.

VDZ (2015): Daten und Informationen des Verbands Deutscher Zementindustrie. Hg. v. Verband Deutscher Zementindustrie. Online verfügbar unter <https://www.vdz-online.de/>, zuletzt aktualisiert am 16.11.2015.

Viebahn, Peter; Vallentin, Daniel; Höller, Samuel (2012): Integrated assessment of carbon capture and storage (CCS) in the German power sector and comparison with the deployment of renewable energies. In: *Applied Energy* (Volume 97), S. 238–248.

Weber, Birgit (2010): Von der Selbstversorgung zum Konsum – Entwicklung und Situation privater Haushalte. In: *Information zur politischen Bildung* 2010 (308), S. 6–15.

Wiedmann, Thomas; Minx, Jan (2008): A definition of 'carbon footprint'. In: *Ecological economics research trends* 1, S. 1–11.

Wietschel, Martin; Arens, Marlene; Dötsch, Christian; Herkel, Sebastian; Krewitt, Wolfram; Markewitz, Peter et al. (2010): Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Technologiebericht. Hg. v. gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft, Technologie und Energie. Durchgeführt von Fraunhofer ISI.

Wilts, H.; Gries, N. von; Dehne, I.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Sanden, J. (2016): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_65_2016_steigerung_einsatz_sekundaerrohstoffe.pdf.

Winnacker, Karl; Küchler, Leopold (2005): Chemische Technik. Prozesse und Produkte. Band 3 Anorganische Grundstoffe, Zwischenprodukte. 5. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.

Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH (2014): Freiberg: Innovatives Verfahren zum Recycling seltener Erden aus Smartphones und PC-Bildschirmen. Online verfügbar unter http://www.wfs.sachsen.de/de/Meldung/Freiberg_Innovatives_Verfahren_zum_Recycling_seltener_Erden_aus_Smartphones_und_PC-Bildschirmen/179579.html?referer=139713, zuletzt geprüft am 30.05.2016.

Worrell, Ernst; Price, Lynn; Neelis, Maarten; Galitsky, Christina; Zhou, Nan (2007): World best practice energy intensity values for selected industrial sectors. In: *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

WV Stahl (2015): Statistische und sonstige Daten. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Online verfügbar unter <http://www.stahl-online.de/>.

WWF (2015): Letzte Chance für den Emissionshandel. Strukturelle Krise und Chance für eine Reform. Unter Mitarbeit von Juliette de Grandpré und Regine Günther. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Positionspapier-Letzte-Chance-fuer-den-Emissionshandel.pdf>, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

Zeier, Wolfgang; Panthöfer, Martin; Janek, Jürgen; Tremel, Wolfgang (2011): Thermo-elektrische Verbindungen. Strom aus Abwärme. In: *Chemie in unserer Zeit* 45 (3), S. 188–200. DOI: 10.1002/ciuz.201100393.

Zweck, Axel; Holtmannspötter, Dirk; Braun, Matthias; Cuhls, Kerstin; Hirt, Michael; Kimpeler, Simone (2015): Forschungs- und Technologieperspektiven 2030. Ergebnisband 2 zur Suchphase von BMBF Foresight Zyklus II: Ergebnisband.

8 Anhang

8.1 Methodisches Vorgehen

Für die genannten Fragestellungen wurden den betroffenen Fachgebieten und vorhandenen Daten entsprechende Methoden angewandt.

Analyse der Ausgangssituation der THG-Emissionen der Industrie und der vorliegenden BAU- und Zielszenarien sowie Darstellung des historischen und derzeitigen Energieverbrauchs der Industrie (vgl. Kapitel 2):

Die Analyse des bisherigen Verlaufs des industriellen Energieverbrauchs baut auf Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), insbesondere für die Jahre 1995 bis 2013, sowie auf speziellen Statistiken des statistischen Bundesamtes (Destatis) auf. Die Emissionsentwicklung wird historisch anhand der Daten des Umweltbundesamtes (Nationaler Inventarbericht) sowie prognostisch durch eine vergleichende Auswertung verschiedener aktueller Szenarien dargestellt. Die vorliegenden Studien basieren teilweise auf detaillierten Modellrechnungen, die im Rahmen dieses Vergleichs nicht validiert werden konnten. Soweit zeitlich möglich, wurden zu Grunde liegende Annahmen zu Wachstum und Produktivitätsentwicklung kritisch hinterfragt.

Darstellung möglicher produktions- sowie nachfrageseitiger Handlungsoptionen anhand qualitativer Analysen (vgl. Kapitel 3)

Der mögliche Einfluss technologischer und unternehmerischer Veränderungen wurde anhand von Literaturanalysen dargestellt. Hierzu zählen beispielsweise der Einfluss einer erhöhten Materialeffizienz und -substitution sowie veränderter Konsumgewohnheiten, die sich in veränderten Nachfragen nach industriell gefertigten Produkten niederschlagen.

Um die Bedeutung der Endnachfrage bzw. des privaten Konsums für die Industrieproduktion und die Gesamtwirtschaft zu verdeutlichen, wurde auf Statistiken des Statistischen Bundesamtes zurückgegriffen, beispielsweise auf die Verwendung des Bruttoinlandsprodukts nach der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung sowie auf die Sparquoten der privaten Haushalte. Darüber hinaus wurde die Außenhandelsstatistik zu Rate gezogen. Ergänzend wurde eine Reihe von Literaturquellen ausgewertet. Die strukturierten Handlungsoptionen basieren einerseits auf Literaturrecherchen, andererseits auch auf eigenem Hintergrundwissen. Anhand von Literaturhinweisen wurden Einflussfaktoren der Wirtschaftsentwicklung genannt und die Frage behandelt, ob die Entwicklung von Wirtschaftswachstum und Arbeitsproduktivität bis 2050 auch anders als projiziert infolge der Individualisierung und Wertedifferenzierung in der Bevölkerung verlaufen könnte.

Analyse des derzeitigen deutschen Außenhandels und seiner Perspektiven (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2).

Um Aussagen über die Perspektiven der deutschen Industrie hinsichtlich möglicher Exporte treffen zu können, wurde einerseits auf sehr langfristige Projektionen der globalen Wirtschaftsentwicklung nach Ländern bzw. Ländergruppen zurückgegriffen, zum anderen auf Ergebnisse vorliegender Umfragen in der Wirtschaft (z.B. des IW Consult 2015 oder von Roland Berger Strategy Consultants 2014). Letztere umfasst die Exportchancen klimarelevanter Exportgüter am Beispiel von Leadmärkten, an denen die deutsche Industrie teilhaben könnte.

Analyse des industriellen Strukturwandels in der Vergangenheit und von Gestaltungsmöglichkeiten durch Politik und Wirtschaft (vgl. Kapitel 4.3).

Das Statistische Bundesamt führt in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (Fachserie 19) eine Statistik über den Primärenergieverbrauch der Wirtschaft mit zu den üblichen Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen analogen branchenmäßigen Abgrenzungen. Dabei sind die Umwandlungsverluste und der Eigenverbrauch der Kraftwerke auf die Endverbraucher von Strom verteilt. Diese Statistik reicht in unveränderter Systematik von 1995 bis 2012. Dies erlaubt es, die Änderungen des Energieverbrauchs rechnerisch aufzugliedern in

- einen Struktureffekt: er drückt aus, wie viel Primärenergie im Lauf der Zeit aufgrund der Änderung der Branchenaktivitäten mehr oder auch weniger verbraucht wurde;
- einen Technologieeffekt: er drückt aus, wie sich der Primärenergieverbrauch durch den energietechnischen Fortschritt veränderte; inbegriffen sind hier allerdings auch Einflüsse durch strukturelle Änderungen innerhalb einer Branche, die sich in der statistisch ausgewiesenen (wertmäßigen) Produktionsentwicklung nicht widerspiegeln (z.B. geänderte Produktpalette innerhalb der Chemischen Industrie oder Trend zu mehr produktbegleitenden Dienstleistungen).

Die Wirtschaftsstruktur wird hierbei durch die Bruttowertschöpfung der einzelnen Branchen in preisbereinigten Werten repräsentiert. Die Berechnungen wurden für die Gesamtwirtschaft (45 Branchen) und für das Verarbeitende Gewerbe (19 Branchen) separat durchgeführt. Der Einfluss des inter-industriellen Strukturwandels und des Technologieeffekts (inklusive intra-industriellem Strukturwandel) wird durch Differenzbildung beim Primärenergiebedarf und der Bruttowertschöpfung unter zu Hilfenahme spezifischer Verbräuche und beobachteter oder angenommener Wachstumsraten in den jeweiligen Branchen für die jeweiligen Stützjahre berechnet.

Darstellung und Einschätzung möglicher technischer Lösungen, die insbesondere in der Grundstoffindustrie zu Energieeinsparungen, Energieträgerwechsel und Vermeidung von Prozessemissionen führen könnten (vgl. Kapitel 5)

Hierzu wurden in der Regel Literaturanalysen und eigene Datenrecherchen sowie telefonische Interviews mit Fachleuten und Verbändevertretern zu einzelnen speziellen Themen durchgeführt.