

Technologiebericht

6.1 Energieeffiziente Prozesstechnologien

innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende

Tim Hettesheimer

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



ISI

Disclaimer:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Hettesheimer, T. (2017): Technologiebericht 6.1 Energieeffiziente Prozesstechnologien. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:

Tim Hettesheimer

Tel.: +49 721/ 6809 – 448

Fax: +49 721 / 689 – 152

E-Mail: tim.hettesheimer@isi.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48

76139 Karlsruhe

Review durch:

Clemens Schneider (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie gGmbH)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	4
Tabellenverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Zusammenfassung (Steckbrief)	8
1 Beschreibung des Technologiefeldes	10
1.1 Motivation und Auswahl der Technologien	10
1.2 Eisen- und Stahlherstellung	11
1.3 Papierherstellung	12
1.4 Zementherstellung	13
2 Stand F&E in Deutschland	15
2.1 Eisen- und Stahlherstellung	15
2.2 Papierherstellung	16
2.3 Zementherstellung	17
2.4 Ausweisung und Systemgrenzen der Technologien in den relevanten Energieszenarien	18
3 Relevanz öffentlicher Förderung	21
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	21
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	23
4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes	29
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	29
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen	37
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	41
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	42
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	46
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	47
4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	50
4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	51
4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	53
4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität	53
5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	55
Literaturverzeichnis	57

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

AMS	Aktuelle-Maßnahmen-Szenario
BAU	Business-as-usual
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DME	Dimethylether
DRI	Direct Reduced Iron
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KS	Klimaschutzszenario
ORC-Verfahren	Organic-Rankine-Cycle-Verfahren
TGR	Top Gas Recycling
TK	Technologiekomponente
TRL	Technology Readiness Level
ULCOS	Ultra Low CO ₂ Steelmaking
WZ	Wirtschaftszweig

Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunden
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
Mt	Megatonne
MWh	Megawattstunden
PJ	Petajoule
t	Tonne
TWh	Terawattstunde

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Übersicht ausgewählter Langfristszenarien und Betrachtung der Fokustechnologien in den jeweiligen Studien. -----	19
Tab. 2-2	Vergleich der berücksichtigten Wirtschaftszweige in den relevanten Studien -----	20
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologiekomponente TK1 Hisarna und TK 2 Wasserstoffbasierte Direktreduktion-----	21
Tab. 3-2	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologiekomponente TK1Black liquor gasification und TK 2 Chemische Fasermodifikation -----	22
Tab. 3-3	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologiekomponente TK1Low-carbon Zement und TK2 Oxyfuel -----	22
Tab. 3-4	Aktuelles Entwicklungsstadium der Technologiekomponenten zur energieeffizienten Eisen- und Stahlherstellung -----	24
Tab. 3-5	Aktuelles Entwicklungsstadium der Technologiekomponenten zur energieeffizienten Papierherstellung-----	25
Tab. 3-6	Aktuelles Entwicklungsstadium der Technologiekomponenten zur energieeffizienten Zementherstellung -----	26
Tab. 3-7	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe Eisen- und Stahlherstellung-----	27
Tab. 3-8	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe Papierherstellung -----	27
Tab. 3-9	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe Zementherstellung -----	28
Tab. 4-1	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für die Rohstahlproduktion -----	30
Tab. 4-2	Analyse des globalen Marktpotenzials für die Rohstahlherstellung-----	30
Tab. 4-3	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für die Technologie Pulp-and-Paper-Produktion -----	31
Tab. 4-4	Analyse des globalen Marktpotenzials für die Technologie Pulp-and-Paper-Produktion -----	31
Tab. 4-5	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für die Zementherstellung -----	32
Tab. 4-6	Analyse des globalen Marktpotenzials für die Zementherstellung -----	32
Tab. 4-7	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Eisen- undStahlherstellung -----	33
Tab. 4-8	Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Eisen- und Stahlherstellung -----	34
Tab. 4-9	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Papierherstellung -----	35
Tab. 4-10	Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Papierherstellung -----	35
Tab. 4-11	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Zementherstellung-----	36
Tab. 4-12	Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Zementherstellung-----	37
Tab. 4-13	Ermittlung der Wachstumsraten für die Technologien -----	37
Tab. 4-14	Entwicklung zentraler Einflussgrößen in den Szenarien-----	39
Tab. 4-15	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch die Technologie Eisen-und Stahlherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall-----	40
Tab. 4-16	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch die Technologie Papierherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall-----	40

Tab. 4-17	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch die Technologie Zementherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	40
Tab. 4-18	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch die Technologie Eisen- und Stahlherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (in Spannbreiten)-----	41
Tab. 4-19	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch die Technologie Papierherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (in Spannbreiten)-----	41
Tab. 4-20	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch die Technologie Zementherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (in Spannbreiten)-----	42
Tab. 4-21	Jährliche Kosteneinsparpotenziale durch die Technologie Eisen- und Stahlherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr) -----	43
Tab. 4-22	Jährliche Kosteneinsparpotenziale durch die Technologie Papierherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr)-----	43
Tab. 4-23	Jährliche Kosteneinsparpotenziale durch die Technologie Zementherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr)-----	44
Tab. 4-24	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologie Eisen- und Stahlherstellung -----	47
Tab. 4-25	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologie Papierherstellung-----	47
Tab. 4-26	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologie Zementherstellung -----	48
Tab. 4-27	Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld energieeffiziente Prozesstechnologien – Input-Orientierung -----	49
Tab. 4-28	Bewertungsraster für die Akzeptanz von energieeffizienten Prozesstechnologien zum Status Quo (2015)-----	50
Tab. 4-29	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologiekomponenten der Eisen- und Stahlherstellung -----	52
Tab. 4-30	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologiekomponenten der Zementherstellung -----	52
Tab. 4-31	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologiekomponenten der Papierherstellung-----	53

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Anwendungsbilanz Brennstoffe und Strom nach Branchen in Deutschland 2015 -----	10
Abb. 1-2	Gliederungsebenen des Technologiefeldes -----	11
Abb. 4-1	Entwicklung ausgewählter Prozesse der Eisen-Stahlherstellung -----	33
Abb. 4-2	Entwicklung der Prozesse in der Papierherstellung -----	34
Abb. 4-3	Entwicklung ausgewählter Prozesse der Zementherstellung -----	36
Abb. 4-4	Diffusion ausgewählter Effizienzmaßnahmen -----	38
Abb. 4-5	Annualisierte Differenz-Fixkosten -----	45
Abb. 4-6	Annualisierte Differenz-Energiekosten -----	45

Zusammenfassung (Steckbrief)

Technologiefeld Nr. 6.1 Energieeffiziente Prozesstechnologien																																									
A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf																																									
Beschreibung des Technologiefeldes																																									
<p>Energieeffiziente Prozesstechnologien:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Technologie A: Eisen- und Stahlherstellung (inkl. vertiefender Betrachtung von Wasserstoff-Direktreduktion DRI und Hisarna) – Technologie B: Papierherstellung (inkl. vertiefender Betrachtung von Black-liquor Vergasung und Chemischen Fasermodifikation) – Technologie C: Zementherstellung (inkl. vertiefender Betrachtung von Low-Carbon Zementen und Oxyfuel Verfahren) 																																									
<p>Technologische Reife:</p> <p>Es existieren eine Vielzahl von Ansätzen mit unterschiedlichen TRL-Level, weshalb hier nur eine beispielhafte Aufführung von innovativen Ansätzen für die oben genannten Technologien erfolgt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Eisen- und Stahlherstellung: H₂-DRI – Technologieentwicklung (TRL=4) und Hisarna – Demonstration (TRL=6) - Papierherstellung: Black-liquor gasification – Demonstration (TRL=8) und Chem. Fasermodifikation – Demonstration (TRL=7) - Zementherstellung; Low-Carbon Zemente – Demonstration (TRL=6) und Oxyfuel Verfahren – Demonstration (TRL=6) 																																									
Entwicklungsziele																																									
<ul style="list-style-type: none"> – Eisen und Stahlherstellung: Ersatz von Kohlenstoff durch H₂; Möglichkeiten zur Einbindung von erneuerbarer Energie; Einbindung in bestehendes integriertes Hüttenwerk. – Papierherstellung: Vermehrter Einsatz von biogenen Brennstoffen und Verbesserung der innerbetrieblichen Wärmeflüsse. – Zementherstellung: Erhöhung der thermischen Energieeffizienz, Reduktion der CO₂-Emissionen durch neuen Produkte, Verbesserung des Klinkerfaktors und verbesserte Abwärmenutzung. 																																									
Technologie-Entwicklung - Marktpotenzial																																									
<p>Die Entwicklung des Marktpotenzials für energieeffiziente Prozesstechnologien steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung der damit gefertigten bzw. verbundenen Produktionsmengen (hier Mittelwert über Min 80 % und Max 95 %).</p>																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Deutschland [Mt/a]</th> <th style="text-align: center;">2020</th> <th style="text-align: center;">2030</th> <th style="text-align: center;">2040</th> <th style="text-align: center;">2050</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Eisen-und Stahlherstellung</td> <td style="text-align: center;">44</td> <td style="text-align: center;">42</td> <td style="text-align: center;">39</td> <td style="text-align: center;">39</td> </tr> <tr> <td>Papierherstellung</td> <td style="text-align: center;">24</td> <td style="text-align: center;">24</td> <td style="text-align: center;">23</td> <td style="text-align: center;">24</td> </tr> <tr> <td>Zementherstellung</td> <td style="text-align: center;">31</td> <td style="text-align: center;">29</td> <td style="text-align: center;">28</td> <td style="text-align: center;">28</td> </tr> <tr> <th style="text-align: left;">International [Mt/a]</th> <th style="text-align: center;">2020</th> <th style="text-align: center;">2030</th> <th style="text-align: center;">2040</th> <th style="text-align: center;">2050</th> </tr> <tr> <td>Rohstahl</td> <td style="text-align: center;">1.915</td> <td style="text-align: center;">2.120</td> <td style="text-align: center;">2.280</td> <td style="text-align: center;">2.435</td> </tr> <tr> <td>Pulp und Paper</td> <td style="text-align: center;">525</td> <td style="text-align: center;">660</td> <td style="text-align: center;">775</td> <td style="text-align: center;">895</td> </tr> <tr> <td>Zement</td> <td style="text-align: center;">4.475</td> <td style="text-align: center;">4.675</td> <td style="text-align: center;">4.845</td> <td style="text-align: center;">5.015</td> </tr> </tbody> </table>		Deutschland [Mt/a]	2020	2030	2040	2050	Eisen-und Stahlherstellung	44	42	39	39	Papierherstellung	24	24	23	24	Zementherstellung	31	29	28	28	International [Mt/a]	2020	2030	2040	2050	Rohstahl	1.915	2.120	2.280	2.435	Pulp und Paper	525	660	775	895	Zement	4.475	4.675	4.845	5.015
Deutschland [Mt/a]	2020	2030	2040	2050																																					
Eisen-und Stahlherstellung	44	42	39	39																																					
Papierherstellung	24	24	23	24																																					
Zementherstellung	31	29	28	28																																					
International [Mt/a]	2020	2030	2040	2050																																					
Rohstahl	1.915	2.120	2.280	2.435																																					
Pulp und Paper	525	660	775	895																																					
Zement	4.475	4.675	4.845	5.015																																					
F&E-Bedarf																																									
<p>Es besteht überwiegend nur noch ein geringes Effizienzpotenzial durch inkrementelle Prozessverbesserungen, da die Prozesse über Jahrzehnte hinweg optimiert wurden und entsprechend nahe des physikalischen Minimums betrieben werden. Es werden daher neue radikale Ansätze mit zum Teil erheblichen Vorlaufzeiten benötigt, z. B. elektrolytische Stahlerzeugung.</p>																																									

B) Multikriterielle Bewertung
Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen
Insgesamt hohes Minderungspotenzial, vor allem bei der Eisen- und Stahlherstellung durch den Übergang vom Hochofen-/Konverterprozess zur H ₂ -Direktreduktion mit nachgeschalteter Elektrostahlerzeugung (CDA, Carbon Direct Avoidance). In der Papierherstellung besteht Potenzial vor allem bzgl. des Energiebedarfs beim Herstellungsprozess von Papier und bei der Zementherstellung bei der Klinkerproduktion.
Kosteneffizienz
Langfristig sehr hohes Kostensenkungspotenzial bei der Eisen- und Stahlherstellung überwiegend durch Einsparungen von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen und CO ₂ . Langfristig hohes Potenzial bei der Papierherstellung bei Strom und kohlenstoffhaltigen Brennstoffen. Langfristig hohes Potenzial bei der Zementherstellung (überwiegend durch CO ₂ -Einsparungen).
Inländische Wertschöpfung
– Der Technologiebereich und die Technologiefelder sind stark heterogen, so dass keine detaillierte Analyse für alle drei Technologien möglich bzw. das Potenzial nicht quantifizierbar ist. – Generell besteht jedoch aufgrund der Struktur der deutschen Wirtschaft ein hohes Wertschöpfungspotenzial auf Seiten des Maschinen- und Anlagenbaus und der Komponentenzulieferer.
Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich
– Deutschland ist mit Blick auf energieeffiziente Prozesstechnologien in der Eisen- und Stahlherstellung sowie Zementherstellung wettbewerbsfähig bis Technologieführer und bei der Papierherstellung wettbewerbsfähig. – Das Förderbudget im Bereich der Energieeffizienz in der Industrie steigt in Deutschland stetig an in den letzten Jahren.
Gesellschaftliche Akzeptanz
– Eher hohe Marktakzeptanz (ggf. eingeschränkt durch hohe Investitionen oder Amortisationszeiten) – Hohe sozialpol. Akzeptanz und eher hohe lokale Akzeptanz (ggf. beeinträchtigt durch CCU oder CCS vor Ort)
Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit
– Auf Ebene einzelner Technologiekomponenten bestehen reale Nutzungsdauern von über 20 Jahren (Stahl- und Papierherstellung) und länger (Zementherstellung). – Teilweise hohe Investitionen notwendig (z. B. Oxyfuel Verfahren 330-360 Mio. €/ (Mt./a), für Retrofitting immer noch 100 €/ (Mt./a)).
Abhängigkeit von Infrastrukturen
– Generell eher geringe Infrastrukturabhängigkeit – Je nach Technologiekomponenten ggf. durch CCU/CCS oder den Ausbau der Anbindung an das Strom- und Erdgasnetz z. B. zur dezentralen Erzeugung von Wasserstoff für H ₂ -Direktreduktion).
Systemkompatibilität
Anpassungsbedarf überwiegend eher gering. Rückwirkungen und Wechselwirkungen liegen vielseitig vor, können jedoch nicht umfänglich adressiert werden. Beispielsweise führt auf Technologieebene der Wechsel vom Hochofen hin zur H ₂ -Direktreduktion mit nachgeschalteter Elektrostahlerzeugung zu Wechselwirkungen bzgl. des Strom- und Brennstoffbedarfs. H ₂ -DRI kann dabei ggf. auch zum Lastausgleich genutzt werden, wenn der Wasserstoff vor Ort produziert wird. Zudem besteht bei allen drei Technologien die Konkurrenz um Biomasse (Reststoffe) für einen Fuel-Switch.

1 Beschreibung des Technologiefeldes

1.1 Motivation und Auswahl der Technologien

Der Industriesektor besteht aus vielen unterschiedlichen Branchen, in denen die verschiedensten Prozesse Anwendung finden. Entsprechend unterschiedlich ist auch der Energieverbrauch in den einzelnen Branchen. Wie sich der Endenergieverbrauch bzgl. Brennstoffen und Strom konkret zusammensetzt, ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Einen maßgeblichen Anteil am Endenergieverbrauch des Industriesektors besitzen dabei die Metallherzeugung, das Papiergewerbe sowie die Verarbeitung von Steinen und Erden. Alle zusammen machen in etwa 37 % des Endenergiebedarfs aus. Neben den genannten Branchen besitzt zudem die Grundstoffchemie mit ca. 19 % einen relativ hohen Anteil. Sie wird jedoch an dieser Stelle von der Betrachtung ausgeklammert, da deren Komponenten (Ammoniak, Ethylen etc.) teilweise im Rahmen anderer Technologiefelder (z. B. *Technologiefeld 4.3: Power-to-liquids/chemicals*) adressiert werden. Zudem besitzen noch andere Branchen einen großen Anteil am Endenergiebedarf, darunter zählen beispielsweise die NE-Metalle, -gießereien, die sehr stromintensiv sind, oder beispielsweise auch die brennstoffintensive Herstellung von Glas und Keramik. Aufgrund der umfangreichen multikriteriellen Bewertung im Rahmen dieses Berichts können jedoch nicht alle Branchen behandelt werden, weshalb der Fokus im Folgenden auf den drei genannten Branchen *Metallherzeugung*, *Papiergewerbe* sowie die *Verarbeitung von Steinen und Erden* liegt. Zusammengenommen werden somit über 55 % des Endenergieverbrauchs des Industriesektors in Deutschland durch die Betrachtung abgedeckt. Im Fokus stehen dabei folgende Prozesse (Technologiegruppen):

- Eisen- und Stahlherstellung
- Papierherstellung
- Zementherstellung

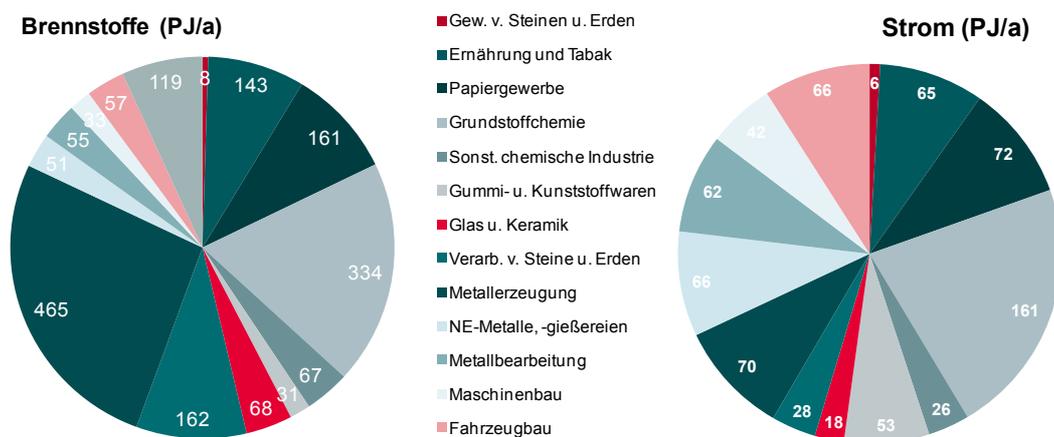


Abb. 1-1 Anwendungsbilanz Brennstoffe und Strom nach Branchen in Deutschland 2015

Quelle: Rohde (2016)

Zur Reduktion des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in diesen Branchen kommt daher den energieeffizienten bzw. CO₂-armen Prozesstechnologien

eine entscheidende Rolle zu. Der Begriff „Energieeffiziente Prozesstechnologie“ wird dabei im Rahmen dieses Technologieberichts bewusst um „CO₂-arme Prozesstechnologien“ erweitert, da Prozesse, die drastisch die CO₂-Emissionen senken, unter Umständen mehr Energie verbrauchen als derzeitige Prozesse¹.

Im Vergleich zu anderen Technologiefeldern sind die energieeffizienten Prozesstechnologien dabei in ihrer Zahl und somit auch Ausprägung wesentlich vielseitiger, weshalb sich nur bedingt verallgemeinerbare Aussagen treffen lassen. Aufgrund der großen Heterogenität des Technologiefeldes und auch der drei fokussierten Technologiegruppen ist es daher oftmals notwendig, den Aspekt der Energieeffizienz sehr differenziert zu diskutieren, was eine weitere Untergliederung der Technologien in eine Ebene der Teilkomponenten bedingt. Die sich daraus ergebende Gliederung des Technologiefeldes ist in nachfolgender Abb. 1-2 dargestellt². Teilweise kann nur auf Informationen zurückgegriffen werden, die auf Branchenebene vorliegen. Aus diesem Grund sind auch diese nochmals ergänzend für die jeweilige Technologie aufgeführt. Zudem wird im Fall der Papierherstellung nochmals exemplarisch angedeutet, dass den einzelnen Technologiekomponenten noch Effizienzmaßnahmen untergeordnet sind.

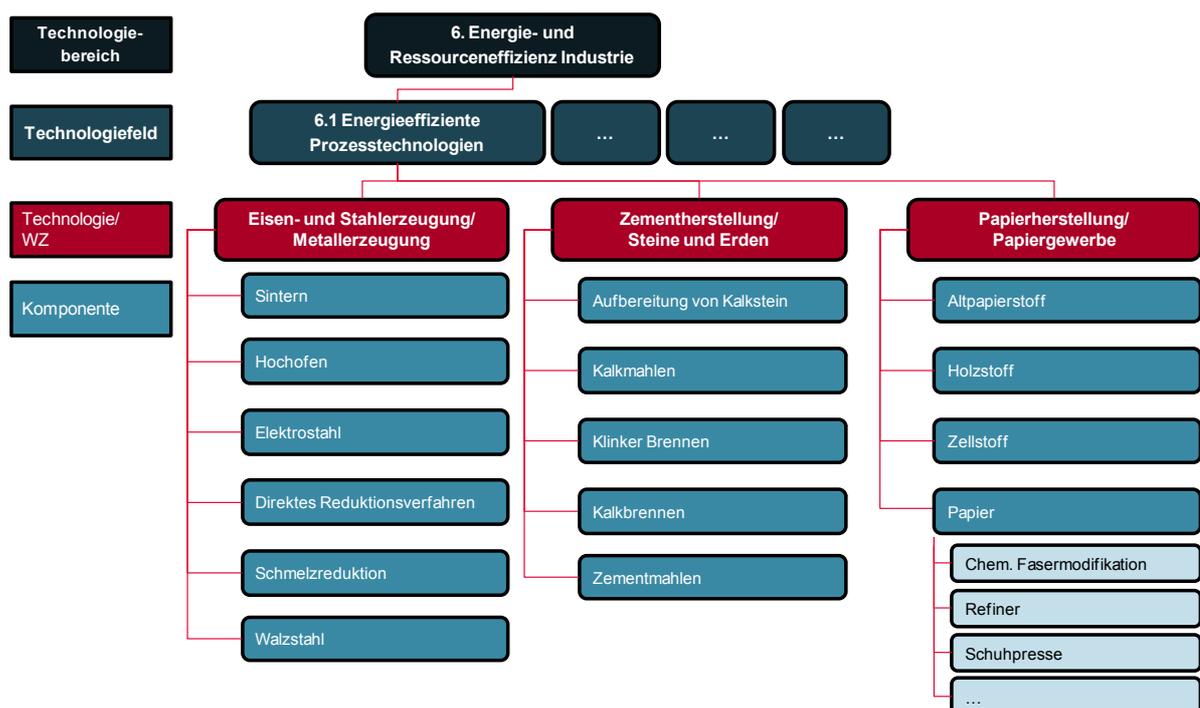


Abb. 1-2 Gliederungsebenen des Technologiefeldes

1.2 Eisen- und Stahlherstellung

In Deutschland besitzt die Eisen- und Stahlindustrie mit 21 % den größten Anteil am Endenergiebedarf des Industriesektors. Da sie weitestgehend auf fossilen Energie-

¹ So verbraucht beispielsweise die H₂-DRI mehr Energie als die herkömmliche Hochofenroute, setzt aber deutlich weniger CO₂ frei.

² Die Prozessstruktur der Komponenten orientiert sich dabei an der Struktur, wie sie auch in der Studie von Öko und ISI 2014 verwendet wird, die im Rahmen der Technologieberichte vielfach als Referenz herangezogen wird. Da die Studie zudem eine bedeutende Datenquelle für diese Technologie darstellt, wird hier dieselbe Prozessstruktur zugrunde gelegt.

trägern beruht, trägt sie auch maßgeblich zum CO₂-Ausstoß bei. Im Jahr 2014 wurden 42,9 Mio. t Rohstahl hergestellt (UBA 2014). Der Energiebedarf hierzu betrug 193,8 TWh an Brennstoffen und 13,8 TWh Strom. Als Rohstoffe wurden im Jahr 2015 in Deutschland u. a. 43 Mio. t Eisenerz, 11,3 Mio. t Koks-kohle, 8,4 Mio. t Zuschlagstoffe und 4,2 Mio. t Einblaskohle für die Stahlproduktion verwendet (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015).

Stahl wird in Deutschland im Wesentlichen mittels zweier Varianten hergestellt. Im *Primärverfahren* wird in der Hochofenroute Eisenerz mithilfe von Koks und Kohle zu Roheisen weiterverarbeitet. Die Umwandlung von Eisenerz zu Eisen im Hochofen ist der energieintensivste Schritt in der Eisen- und Stahlherstellung.

Das *Sekundärverfahren* recycelt mit dem Elektrolichtbogenofen Schrott zu Rohstahl. Dieses Verfahren verbraucht im Vergleich zur Hochofenroute deutlich weniger Energie, da im Schrott das Eisenerz bereits umgewandelt vorliegt. Allerdings benötigt dieses Verfahren Stahlschrott, welcher zuvor mit der Primärroute hergestellt wurde.

Die Elektrostahlroute macht in Deutschland ungefähr 30 % der Stahlproduktion aus. Hierzu wurden 2014 ca. 14 Mio. t Schrott verarbeitet. Dieser Anteil könnte jedoch langfristig mit zunehmender Stahlmenge auf 20 Mio. t ansteigen (UBA 2014). Weltweit wurden im Jahr 2014 ca. 1.665 Mio. t Stahl hergestellt. Der Anteil der Elektrostahlroute lag dabei bei ca. 26 %. Es ist davon auszugehen, dass der Anteil, der über die Elektrostahlroute produziert wird, zukünftig noch weiter anwächst (Worldsteel Association 2017).

Eine dritte Verfahrensrouten ist die *Direktreduktion* von Eisenerz mit Erdgas. Diesem Verfahren kommt in Deutschland – und auch in Europa – aufgrund hoher Erdgaspreise nur eine untergeordnete Rolle zu (DRI-Produktion in Deutschland: 0,4 Mio. t in 2014 (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015)).

1.3 Papierherstellung

Die Papierindustrie gehört neben der Eisen- und Stahlherstellung mit einem Energiekostenanteil von über 10 % zu einem der energieintensivsten Industriezweige in Deutschland (Wietschel et al. 2010). Der Papiersektor hatte 2015 einen Endenergieverbrauch von ca. 233 PJ (Rohde 2016). Deutschland nimmt in der Papierproduktion im europäischen Vergleich mit 24,9 % der gesamten europäischen Papierproduktion die Spitzenposition ein (CEPI 2015). Im Jahr 2016 wurden laut Verband Deutscher Papierfabriken e.V. in Deutschland insgesamt 22,63 Mio. t Papier, Pappe und Karton produziert (VDP 2016).

Als Energieträger werden insbesondere Erdgas (36 %), Strom (31 %), Fernwärme (13 %), Biomasse (12 %) und Kohle (6 %) eingesetzt (Rohde 2016). THG-Emissionen sind bei der Papierproduktion vorrangig auf die Verwendung von Strom und Brennstoffe zurückzuführen. Prozessbedingte THG-Emissionen spielen kaum eine Rolle (UBA 2014).

Bei der Papierproduktion in Deutschland stammt mit ca. 73 % und 16,9 Mio. t (im Jahr 2016) der überwiegende Anteil der Faserstoffe aus Altpapier (Sekundärfasern). Primärfaserstoffe machen somit nur 27 % bzw. 5,9 Mio. t (im Jahr 2016) der einge-

setzten Faserstoffe aus. Der Anteil der Zellstoffe unter den Primärfasern ist hierbei deutlich höher (~ 80 %) als der der Holzstoffe (VDP 2017b).

Die Herstellung von Papier erfolgt in zwei Schritten: der Gewinnung von Fasermaterial und der anschließenden Produktion des Produkts. Zunächst werden im ersten Schritt aus den Rohstoffen Holz und Altpapier Faserstoffe hergestellt (Wietschel et al. 2010):

- Meist direkt am Ort der Papierherstellung wird mithilfe eines mechanischen Verfahrens Holzstoff erzeugt.
- Zudem kann durch die Aufbereitung von Altpapier der sog. Altpapierstoff hergestellt werden.

Zusätzlich zum Zellstoff, dem Holzstoff und dem Altpapierstoff fließen noch weitere Füll- und Hilfsstoffe in die Produktion mit ein. Das Papierprodukt wird durch die Stoffaufbereitung und die anschließende Papiermaschine hergestellt. In der Stoffaufbereitung werden die Faserstoffe nach der Suspension mit Wasser in einem Refiner gemahlen, was je nach Fabrik und Papiersorte sehr energieintensiv sein kann. In der Papiermaschine wiederum wird die Fasersuspension (bestehend aus 1 % Feststoffgehalt) innerhalb weniger Sekunden zu einer Papierrolle transformiert. Die Transformation erfolgt durch die Schritte Stoffauflauf, Pressenpartie, Trockenpartie und Aufrollung. Insbesondere die Handhabung der Entwässerung und der Trocknung tragen wesentlich zu einer energieeffizienten Papiermaschine bei (Wietschel et al. 2010).

Die Jahresproduktion großer Papiermaschinen beträgt dabei bis zu 600.000 Tonnen (70 Tonnen pro Stunde). Mit einem Gewicht von bis zu 5.000 Tonnen, einer Bahnbreite bis zu 12 m und bis zu 250 m Länge gehören Papiermaschinen zu den größten Industriemaschinen (Wietschel et al. 2010).

1.4 Zementherstellung

Die Zementindustrie ist charakterisiert durch einen vergleichsweise hohen Anteil der Brennstoffe am Endenergieverbrauch. Dieser betrug im Jahr 2015 ca. 25 TWh, während der Anteil des Stroms bei vergleichsweise geringen 3,5 TWh lag (VDZ 2016b). Die weltweite Zementindustrie ist für fünf Prozent der anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich (Wietschel et al. 2010). Dabei sind in etwa 70 % (12,65 Mio. t in 2014) der gesamten CO₂-Emissionen der deutschen Zementindustrie rohstoffbedingt (VDZ 2016a).

Zement wird in vier Verfahrensschritten hergestellt. Zunächst wird das Rohmaterial (Kalkstein, Kalkmergel, Ton und Sand) gewonnen und anschließend zu Rohmehl mit einer definierten Zusammensetzung unter Verwendung von elektrischer Energie aufbereitet. Im dritten Schritt wird das Rohmehl mithilfe von Brennstoffen zu Zementklinkern gebrannt. Dieser wird abschließend, ggf. mit Zusätzen, ebenfalls unter Aufwendung von elektrischer Energie, gemahlen (Wietschel et al. 2010).

Die Nachfrage nach Zement ist abhängig von den Bautätigkeiten der jeweiligen Länder. China beispielsweise produziert mehr als die Hälfte (51,3 %) der weltweiten Zementnachfrage, während die Zementproduktion innerhalb Europas seit 2007 kontinuierlich gesunken ist (CEMBUREAU 2016).

Zwar konnten die spezifischen CO₂-Emissionen innerhalb von 20 Jahren (1990-2010) von etwa 350 kg CO₂/t Zement auf 175 kg CO₂/t Zement reduziert werden, jedoch seitdem nicht mehr merklich weiter gesenkt werden (VDZ 2017).

2 Stand F&E in Deutschland

Im Folgenden wird kurz der Stand der Technologieentwicklung für die fokussierten Technologiegruppen erläutert. Eine umfassende Abhandlung ist an dieser Stelle jedoch nicht möglich und es wird auf weiterführende Literatur (wie beispielsweise Fleiter et al. 2013 oder UBA 2014) verwiesen. In der vorliegenden Studie werden vielmehr solche Verfahren hervorgehoben, denen eine relevante Rolle im Rahmen der energieeffizienten Prozesstechnologien zukommen dürfte, allerdings ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Weiterhin wird hierzu auch die nationale Perspektive um eine internationale Perspektive erweitert.

2.1 Eisen- und Stahlherstellung

Verschiedene Studien zeigen, dass das Potenzial von Effizienzmaßnahmen in der Eisen- und Stahlindustrie begrenzt ist (Arens et al. 2016; Fleiter et al. 2013). Solche Maßnahmen umfassen beispielsweise die Abwärmenutzung am Elektrolichtbogenofen und der Hochofenschlacke oder das Dünnbrammengießen. Auch der Hüttengasverbund kann energetisch optimiert werden. Maßnahmen wie die Gichtgasrückführung oder die stoffliche Nutzung von Hüttengasen gehen jedoch über eine reine Energieeffizienzverbesserung hinaus, da die Gase damit nicht mehr (wie heute) zur Verstromung zur Verfügung stehen. Anstelle der sehr CO₂-intensiven Hüttengasverstromung könnte der Eigenstrombedarf der Hüttenwerke über erneuerbare Quellen gedeckt werden, so dass CO₂-Emissionen im Gesamtsystem vermieden würden. Das Schmelzreduktionsverfahren verzichtet im Gegensatz zur Hochofenroute auf die energieintensiven Prozesse der Koksofen- und der Sinteranlage, indem Kohle und Erze direkt in den Reaktor gegeben werden. Das Corex- und Finex-Verfahren sind kommerzielle Anlagen, die dieses Ziel verfolgen (Hasanbeigi et al. 2014). Das Schmelzreduktionsverfahren Hisarna wird derzeit im Rahmen von europäischen Förderprogrammen entwickelt (Ulcós 2017).

Weiterreichende CO₂-Reduktionen lassen sich nur über neue Prozesstechnologien erzielen, die nicht mehr auf Kohle als Reduktionsmittel basieren, sondern CO₂-arme Alternativen nutzen. Dies können zum einen Wasserstoff und zum anderen Strom sein, sofern sie CO₂-arm erzeugt wurden. Die Stahlherstellung mit Wasserstoff ist über die Direktreduktion möglich (H₂-DRI). Dieses Verfahren ist bereits kommerziell verfügbar. Forschungsbedarf besteht aber im Bereich der Versorgung dieser Anlage mit Wasserstoff, der aus Erneuerbaren Energien erzeugt wird. Die Stahlerzeugung mit Strom über die Elektrolyse ist ebenfalls eine CO₂-arme Prozesstechnologie, sofern der Strom aus Erneuerbaren Energien stammt. Dieses Verfahren befindet sich noch am Beginn der Entwicklung. Problematisch ist derzeit u. a. der zu erwartende hohe Flächenverbrauch sowie die notwendige Umwandlung von Eisen in Stahl durch einen notwendigen Kohlenstoffgehalt im Stahl von etwa 2 %. Für dieses Verfahren wird der Markteintritt für etwa 2050 erwartet. Weiterreichende CO₂-Emissionen in der Stahlherstellung werden voraussichtlich zu einem erhöhten Energiebedarf führen. Die Erzeugung von Stahl auf Basis von Wasserstoff wird mehr Energie verbrauchen, da die Umwandlung von Strom in Wasserstoff ein zusätzlicher energieintensiver Schritt ist. Die Rückführung des Gichtgases in den Hochofen (TGR-BF) erfordert u. a. eine zusätzliche energieintensive Gasreinigung (Wietschel et al. 2010; Weigel et al. 2016; Pardo und Moya 2013).

Im europäischen Ulcos-Projekt wurden vier Technologien erforscht (TGR-BF, Ulcored, eine Direktreduktion auf Erdgasbasis, Hisarna, und die Elektrolyse von Eisen-erz), von denen drei Technologien für die anschließende Abscheidung und Speicherung des entstandenen CO₂ (CCS) vorgesehen waren (Ulcos 2017).

Für die weitere Betrachtung der Technologie Eisen- und Stahlherstellung wird alkalische Elektrolyse aufgrund ihrer späten Verfügbarkeit ausgeklammert, während Hisarna und H₂-DRI teilweise explizit als Technologiekomponente bei der Bewertung einzelner Kriterien angeführt werden.

2.2 Papierherstellung

Bei der Papierherstellung bieten sich verschiedene Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung. So liegt der Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung der Papiermaschinen vor allem auf einer Erhöhung der Produktionskapazität und -geschwindigkeit. Zur Energieeffizienzsteigerung bei der Stoffaufbereitung bzw. der Mahlung des Faserstoffes im Refiner, bei dem üblicherweise ein sehr hoher Energieverbrauch zu verzeichnen ist, kann die Kompressionsmahlung eingesetzt werden (Fleiter et al. 2013).

Im Bereich der Trocknung stehen verschiedene Ansätze zur Auswahl: der Ansatz der Impulstrocknung, außerdem die Dampfprall- und Luftpralltrocknung, die Kondensationsband-Trocknung oder auch die luftlose Trocknung. Ein Beispiel für eine Innovation im Bereich der Trocknung in der Papiermaschine ist die Schuhpresse (Wietschel et al. 2010).

Innovationen bei elektrischen Antrieben sind darüber hinaus auch denkbar und werden im entsprechenden *Technologiefeld 6.2: Energieeffiziente Querschnittstechnologien* näher diskutiert. Neben den technischen Verbesserungen reduziert das Recycling von Papier ebenfalls stark den Energieverbrauch (Wietschel et al. 2010; Fleiter et al. 2013).

Auch hier bedarf es zudem weiterer „Breakthrough“-Technologien, um die Reduktionsziele zu erreichen. Hierbei werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, wie z. B. innovative Trockenverfahren, Deep eutetic solvents, Biorefinery-Konzepte oder auch wiederum die Einbindung von CCS. Nachfolgend soll nochmals auf zwei Ansätze etwas detaillierter eingegangen werden. Die Black liquor gasification, die auch bereits in IEA (2009) „Energy transitions industry“ und EC (2013) „Best practice in pulp and paper“ als vielversprechende Technologie genannt wurde, sowie die chemische Fasermodifikation, der ebenfalls ein hohes Effizienzpotenzial innewohnt. Die beiden Ansätze werden zudem stellenweise zur späteren Bewertung der Kriterien herangezogen.

1 | Black liquor Vergasung

Black liquor wird auch als Schwarzlauge bezeichnet und ist ein energiereiches Nebenprodukt der Zelluloseherstellung in der Papierindustrie. Es entsteht bei der Bildung der Papierfaser durch Trennung des Lignins vom Zellstoff. Durch die Verbrennung der Schwarzlauge kann ein Teil des Energiebedarfs innerhalb der Papierproduktion gedeckt werden. Möglich wäre auch eine Vergasung der Schwarzlauge, mit der im Anschluss Biowasserstoff beziehungsweise Biogas hergestellt werden kann (Bajpai 2014; IEA Bioenergy 2007).

2 | Fasermodifikation

Die Fasermodifikation ermöglicht höhere Anforderungen in Bezug auf Dimensionsstabilität und Feuchteaufnahme bei Verpackungs- und Spezialpapieren. Diese selektiven Modifizierungsverfahren lassen sich in die Stoffaufbereitung einer Papier- oder auch Zellstofffabrik integrieren, wodurch völlig neue Eigenschaften der Fasern und Papiere erreicht werden können. Prinzipiell stehen drei Verfahren zur Auswahl: der Einsatz von Carboxymethylcellulose, die Beschichtung der Faserwand mit Polyelektrolyten oder die Zugabe von microfibrillärer Cellulose. Die Energieeinsparungen können dabei bis zu 100 kWh/t Papier betragen (Erhard et al. 2010; Fleiter et al. 2013).

Langfristig kann die Energieeffizienz vor allem durch ein wasserloses Herstellungsverfahren und durch die Wärmerückgewinnung gesteigert werden. Zudem wird an Möglichkeiten des Einsatzes von Wasseralternativen für die Faser-Wasser-Suspension geforscht (Wietschel et al. 2010; Fleiter et al. 2013).

2.3 Zementherstellung

Zur Steigerung der Energieeffizienz und Verringerung des CO₂-Ausstoßes gibt es bei der Herstellung von Zement bisher drei wesentliche Möglichkeiten:

- Reduzierung des Klinkeranteils im Zement durch Erhöhung des Anteils an Zumahlstoffen (z. B. die granuliert Hochofenschlacke oder Kalksteinmehl) – dadurch kann thermische Energie eingespart werden, die das Klinkerbrennen benötigt. Der Anteil an Zumahlstoffen im Zement ist allerdings abhängig von den Eigenschaften der Zementsorten und der Akzeptanz von Seiten der Verbraucher (Fleiter et al. 2013; Wietschel et al. 2010; UBA 2014).
- Verstärkter Einsatz von Sekundärbrennstoffen (aus Abfall wie z. B. Kunststoffe oder Hausmüll und biogenen Brennstoffen) zur Schonung fossiler Energieträger wie z. B. Steinkohle oder Erdgas (Fleiter et al. 2013; Wietschel et al. 2010).
- Einsatz energieeffizienter und prozessoptimierter Maschinen und Anlagen, wie beispielsweise durch den Bau von größeren Ofeneinheiten sowie kleineren Durchmessern (z. B. durch Verwendung einer Tertiärluftleitung) und kürzeren Öfen (z. B. durch Verlagerung eines Teils der Entsäuerung des Rohmehls in den Calcinator), zur Reduktion spezifischer Wärmeverluste. Der Einbau eines Calcinator spart ca. 8 % des spezifischen thermischen Energieverbrauchs ein, bei einem modernen Rostkühler mit sich selbst einstellendem Kühlluftverteilungssystem sind es sogar 9 % (Fleiter et al. 2013; Wietschel et al. 2010).

Weitere Einsparungen können durch die Vorwärmung des Rohmaterials, Brennstoffs und der Verbrennungsluft durch die Nutzung von Abwärme erzielt werden. Durch das Organic-Rankine-Cycle-Verfahren (ORC-Verfahren) kann die Abwärme aus der Klinkerkühlerabluft auch zur Stromerzeugung verwendet werden. Beim Mahlen des Rohmaterials, Brennstoffs und Klinkers kann weiterhin Energie durch den Einsatz von Vertikal-Walzmühlen und Gutbett-Walzmühlen anstatt der üblichen Kugelmühlen eingespart werden (Fleiter et al. 2013; Wietschel et al. 2010).

Neben den genannten Ansätzen wird insbesondere auch den nachfolgenden Ansätzen ein sehr hohes Reduktionspotenzial zugesprochen: dem Post-Combustion CO₂

capture und Oxyfuel-Verfahren, wie es beispielsweise im CEMCAP-Projekt Anwendung findet, sowie den low-carbon Zementen.

1 | Post Combustion capture im Rahmen des CEMCAP-Projekts

Bei CEMCAP handelt es sich um ein im Rahmen von Horizon 2020 gefördertes EU-Projekt, das sich mit dem Auffangen und Speichern des während der Zementherstellung entstehenden CO₂ beschäftigt (Sintef 2017). Beim Post-Combustion-Verfahren wird das CO₂-haltige Abgas nach dem Verbrennungsvorgang durch chemische Absorption gebunden und vom Abgas getrennt.

2 | Oxyfuel-Verfahren

Beim Oxyfuel-Verfahren wird zuerst der Stickstoff in der Luft vom Sauerstoff abgetrennt. Anschließend erfolgt dadurch eine sauerstoffreiche Verbrennung von Kohle. Das dabei entstehende Abgas ist sehr CO₂-reich und kann eingelagert oder auch industriell weiterverwendet werden.

3 | Low-carbon Zement

Beim low-carbon Zement handelt es sich, wie beispielsweise im Fall von Celitement, um einen neuartigen Zement, der in Bezug auf Anwendungen und Eigenschaften mit herkömmlichem Portlandzement vergleichbar ist, jedoch bei der Herstellung nur 50 % der Energie benötigt und 50 % des CO₂ ausstößt (UBA 2014; Celitement 2017). Neben dem genannten CELITEMENT gibt es noch weitere solcher Ansätze, wie ECOBinder, Novacem oder Zeobond, wobei derzeit noch nicht absehbar ist, ob alle auch die Marktreife erreichen werden (UBA 2014).

Für die Diskussion einzelner Kriterien wird im späteren Verlauf nochmals näher auf das Oxyfuel-Verfahren und die Low-carbon Zemente eingegangen.

2.4 Ausweisung und Systemgrenzen der Technologien in den relevanten Energieszenarien

Für die nachfolgende Untersuchung und Bewertung der Kriterien wurden im Rahmen des Projekts relevante Studien ausgewählt und aufgelistet, die als entsprechende Grundlage für die Bewertung der Technologiefelder herangezogen werden sollen. Zur Bewertung der darin enthaltenen quantitativen Aussagen wurde vorab untersucht, inwieweit die Technologien für das betrachtete Technologiefeld darin behandelt werden. Einen Überblick über das Ergebnis dieser Literaturschau liefert die nachfolgende **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

In der BMU-Leitstudie werden die Technologien nur am Rande genannt, ohne Angaben bzgl. deren zukünftiger Entwicklung zu machen. Die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ liefert unter anderem konkret für die drei Branchen einen Ausblick zum Endenergieverbrauch und zu THG-Emissionen für das Jahr 2050. Für die zwischengelagerten Jahre wird jedoch keine Aussage getroffen. Prognos et al. (2013) beinhaltet ebenfalls Aussagen über den Energieverbrauch in den drei Branchen im Rahmen einer Referenz- und Trendprognose. Die Informationen liegen jedoch aggregiert auf Ebene der Sektoren (z. B. Industrie) vor und es werden keine dezidierten Angaben zu den THG-Emissionen gemacht. Die Klimaschutzszenarien 2050 von Öko und ISI beinhalten die beiden Szenarien KS 80 und KS 95, in denen ebenfalls Aussa-

gen zur Entwicklung der Energieverbräuche in den drei Branchen getroffen werden. Es werden Informationen sowohl auf Branchen-Ebene gegeben als auch Produktionsmengen für einzelne Prozesse darin. Angaben zu den THG-Emissionen werden für die relevantesten prozessbedingten Emissionen gelistet, insgesamt werden sie jedoch nur auf Sektorebene ausgewiesen.

Auf internationaler Ebene befassen sich die Energy Technology Perspectives 2016 (IEA 2016b) mit den Energiebedarfen in den drei Fokusbereichen, ohne Auskunft über die Produktionsmengen zu geben. Eine solche Information findet sich jedoch in der Vorgängerversion (IEA 2014). In allen weiteren gelisteten Studien finden die fokussierten Technologien keine explizite Nennung. Einzig der World Energy Outlook 2016 (IEA 2016a) befasst sich teilweise noch mit der Eisen- und Stahlherstellung, jedoch lediglich im Kontext mit dem Bedarf an hierzu benötigter Kohle.

Tab. 2-1 Übersicht ausgewählter Langfristszenarien und Betrachtung der Fokustechnologien in den jeweiligen Studien.

Autoren (Jahr)	Kurztitel	TG A	TG B	TG C
Deutschland				
DLR et al. (2012)	BMU Leitstudie 2011	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
UBA (2014)	Treibhausgasneutrales Deutschland	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Prognos et al. (2014)	Entwicklung der Energiemärkte	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fraunhofer IWES et al. (2015)	Interaktion EE-Strom, Wärme, Verkehr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Öko und ISI (2015)	Klimaschutzszenario 2050: 2. Endbericht	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fraunhofer ISE (2013)	Energiesystem Deutschland 2050	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ÜNB (2016)	Netzentwicklungsplan Strom / Gas 2030	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
International				
IEA (2016a)	World Energy Outlook 2016	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IEA (2016b)	Energy Technology Perspectives 2016	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Greenpeace International et al. (2015)	Energy [R]evolution	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
World Energy Council (2016)	World Energy Scenarios 2016	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologiegruppen A: Eisen- und Stahlherstellung, B: Papierherstellung, C: Zementherstellung				

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass sich auf Basis der ausgewiesenen Energieszenarien nur eine bedingt differenzierte Aussage treffen lässt, da es teilweise an alternativen Szenarien, der zeitlichen Auflösung oder dem notwendigen Detaillierungsgrad für die Technologien mangelt. Dadurch ist es notwendig, auf weitere Quellen zurückzugreifen, um dennoch eine quantitative Aussage zu den Kriterien treffen zu können. Aus diesem Grund werden ergänzend die Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland von ISI et al. (2017) mitbetrachtet. Die Langfristszenarien umfassen zwei relevante Szenarien: ein *Referenzszenario*,

das die Klimaziele verfehlt und dessen vorrangiger Zweck es ist, als Referenz für das Basisszenario zu fungieren. Entsprechend werden bereits etablierte Standards und Ordnungspolitiken beibehalten und bleiben auf dem derzeitigen Niveau bestehen, werden aber nicht mehr verschärft. Das *Basisszenario* basiert grundsätzlich auf den Annahmen des Referenzszenarios, unterstellt jedoch eine ambitioniertere Handlungsweise bzgl. Anlagenaustausch, Materialeffizienz usw. Ziel des Szenarios ist es zu untersuchen, wie die energie- und klimapolitischen Ziele zu möglichst geringen Kosten erreicht werden können. Die Langfristszenarien weisen dabei die Entwicklung der Produktionsmengen für einzelne Prozesse aus sowie, im Gegensatz zu obigen Studien, auch die THG-Emissionen für einzelne Technologien nicht auf Sektorebene, sondern auch für Branchen. Zudem liefert die Studie eine Betrachtung der Differenzkosten zwischen beiden Szenarien, was insbesondere für Kriterium 6 von Vorteil ist, da in obigen Studien keine Informationen zu Investitionen gegeben werden.

Um die übergreifende Vergleichbarkeit der Aussagen in den einzelnen nationalen Studien beurteilen zu können, werden diese nachfolgend nochmals etwas detaillierter bzgl. der Systematik betrachtet, wie sie die einzelnen Technologien bzw. Branchen abgrenzen.

Tab. 2-2 Vergleich der berücksichtigten Wirtschaftszweige in den relevanten Studien

	Öko und ISI (2015)	UBA (2014)	Prognos et al. (2014)	ISI et al. (2017)
Papier	Papiergewerbe (WZ 21)	Papier- und Zellstoffindustrie	Papiergewerbe (WZ 17)	Papiergewerbe (WZ 17)
Metall	Metallerzeugung (WZ 27.1)	Stahlherstellung	Roheisen, Stahl u. Ferrolegierungen (WZ 24.1)	Metallerzeugung (WZ 24.1)
Zement	Verarbeitung v. Steinen u. Erden (WZ 26 ohne 26.1, 26.2 und 26.3)	Zementindustrie, Kalkindustrie	Verarbeitung v. Steinen u. Erden (WZ 23 ohne 23.1, 23.2, 23.31, 23.32 und 23.4)	Verarbeitung v. Steinen u. Erden (WZ 23 ohne 23.1, 23.2, 23.31 und 23.4)

WZ = Wirtschaftszweig

Insgesamt orientieren sich die Studien an der Definition der Wirtschaftszweige (2003 oder 2008). Die berücksichtigten WZ bei Öko und ISI 2015 sowie ISI et al. 2017 sind dabei gleich. Auch Prognos et al. 2014 basiert auf dieser Einordnung, mit der Ausnahme, dass im Fall der Verarbeitung von Steinen und Erden die Ziegel (WZ 23.32) explizit ausgegrenzt werden. Somit entsteht hier eine Abweichung, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. UBA (2014) orientiert sich ebenfalls an der WZ-Klassifizierung, wobei dann in einem weiteren Schritt daraus nochmals die relevantesten Branchen ausgewählt wurden.

3 Relevanz öffentlicher Förderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Der Bereich der energieeffizienten Prozesstechnologien umfasst als Sammelbegriff eine Vielzahl an unterschiedlichen Prozesstechnologien, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden. Eine Bewertung auf der Ebene der Technologiegruppe energieeffiziente Prozesstechnologien oder der Technologien wie z. B. der Eisen- und Stahlherstellung wäre an dieser Stelle daher wenig repräsentativ und aussagekräftig, weshalb nochmals eine weitere Ebene tiefer auf die einzelnen Technologiekomponenten (TK) eingegangen wird. Während hierbei bei den bereits kommerziell verfügbaren Lösungen eine kontinuierliche Verbesserung der Prozesse angestrebt wird, soll im Folgenden der Fokus verstärkt auf neuere Ansätze mit einem hohen Effizienzpotenzial gelegt werden und diese exemplarisch betrachtet werden. Diese Ansätze wurden bereits im vorherigen Kapitel kurz erläutert. Die Auswahl wird im anschließenden Kriterium 2 ebenfalls wiederum aufgegriffen.

Eisen- und Stahlherstellung

Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologiekomponente TK1 Hisarna und TK 2 Wasserstoffbasierte Direktreduktion

Hisarna-Schmelzreduktion: Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Wasserstoff Direktreduktion: Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Papierherstellung

Tab. 3-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologiekomponente TK1Black liquor gasification und TK 2 Chemische Fasermodifikation

Black liquor gasification: Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Chemische Fasermodifikation: Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Zementherstellung

Tab. 3-3 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologiekomponente TK1Low-carbon Zement und TK2 Oxyfuel

Low-carbon Zement: Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Oxyfuel: Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Insgesamt spiegeln die obigen Einschätzungen die ungefähre Marktreife wieder. Ob diese Technologien letztendlich jedoch auch alle in Deutschland Verwendung finden werden, hängt natürlich auch immer von den unternehmenspolitischen Entscheidungen der Akteure ab.

Eine kommerziell verfügbare Anlage mit Schmelzreduktion entsprechend dem Hi-sarna-Prozess wird voraussichtlich noch zehn Jahre und mehr benötigen. Zuvor müssen noch erfolgreich Tests an den Pilotanlagen und Demonstratoren durchgeführt werden (Eurofer 2013). Die Errichtung einer Demoanlage ist für das Jahr 2020 geplant (Ghenda 2017). Im Fall der wasserstoffbasierten Direktreduktion ist eher mit

einem Markteintritt ab 2040 zu rechnen, da hierzu Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien in großen Mengen benötigt wird.

Die Verfahren aus dem Bereich der Papierherstellung sind bereits weit fortgeschritten, dürften bis zum Jahr 2020 verfügbar sein (CEPI 2011). Low-carbon Zemente und Oxyfuel im Bereich der Zementherstellung dürften voraussichtlich eher mittelfristig um das Jahr 2025 verfügbar sein.

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Wie bereits in der Erläuterung zu Kriterium 1 geschildert, gilt es auch hier der großen Heterogenität energieeffizienter Prozesstechnologien gerecht zu werden. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle ebenfalls eine vertiefende Betrachtung einzelner Technologiekomponenten.

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium

Nachfolgend erfolgt die Betrachtung für die drei Technologiegruppen der Eisen- und Stahlherstellung, Papierherstellung und Zementherstellung.

Eisen- und Stahlherstellung

Tab. 3-4 Aktuelles Entwicklungsstadium der Technologiekomponenten zur energieeffizienten Eisen- und Stahlherstellung

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TK1	TK2
Grundlagenforschung			
	TRL 1 - Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potenzielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 - Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 - Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 - Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 - Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 - Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung			
	TRL 9 - Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TF = Technologiefeld, TRL= Technology Readiness Level

Technologiekomponenten TK1: Hisarna, TK2: H₂-Direktreduktion

Die Einordnung der Technologiekomponenten entsprechend der TRL-Klassifikation zeigt, dass im Bereich der Technologien Eisen- und Stahlherstellung die TRL-Level zwischen 4 und 6 liegen. Dabei befindet sich die Hisarna-Schmelzreduktion bereits in der Phase der Demonstration im niederländischen Ijmuiden, während die wasserstoffbasierte Direktreduktion noch demonstriert werden muss. State-of-the-art bildet hier derzeit die Erdgas-DRI (ohne CCS).

Papierherstellung

Tab. 3-5 Aktuelles Entwicklungsstadium der Technologiekomponenten zur energieeffizienten Papierherstellung

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TK1	TK2
Grundlagenforschung			
	TRL 1 - Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potenzielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 - Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 - Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 - Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 - Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 8 - Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung			
	TRL 9 - Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TF = Technologiefeld, TRL= Technology Readiness Level

Technologiekomponenten TK1: Black-liquor gasification, TK2: Chemische Fasermodifikation

Im Bereich der Technologie der Papierherstellung befinden sich sowohl die Black liquor gasification als auch die chemische Fasermodifikation in der Demonstration. Die Vergasung der Schwarzlauge wird dabei erfolgreich von Chemrec beispielsweise in Piteå in Schweden betrieben (NETL o.A.).

Zementherstellung

Tab. 3-6 Aktuelles Entwicklungsstadium der Technologiekomponenten zur energieeffizienten Zementherstellung

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TK1	TK2
Grundlagenforschung			
	TRL 1 - Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potenzielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 - Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 - Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 - Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 7 - Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 - Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung			
	TRL 9 - Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TF = Technologiefeld, TRL= Technology Readiness Level

Technologiekomponenten TK1: Low-carbon Zement, TK2: Oxyfuel

Die Einordnung der Technologiekomponenten im Bereich der Zementherstellung zeigt, dass sich der Low-carbon Zement derzeit noch in der Demonstration befindet. So existiert beispielsweise in Schwenk ein Demonstrator zur Produktion verschiedenster Celitement-Varianten und einer Kapazität von ca. 150 kg/d. Die Oxyfuel combustion befindet sich ebenfalls ungefähr auf TRL 6 und muss noch demonstriert werden (Hoenig 2017).

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

Im Folgenden werden die drei Technologiegruppen Eisen- und Stahlherstellung, Papierherstellung und Zementherstellung in Bezug auf die fokussierten Technologiekomponenten bezüglich des damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Risikos bewertet.

Eisen- und Stahlherstellung

Tab. 3-7 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe Eisen- und Stahlherstellung

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
TK 1 Hisarna						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TK 2 H ₂ -Direktreduktion						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Auf Seiten der Eisen- und Stahlherstellung ist das technische Risiko beim Hisarna-Prozess als eher geringer einzuschätzen. Die wasserstoffbasierte Direktreduktion basiert im Kern auf der bekannten Direktreduktion, weshalb das technische Risiko gering ist. Mit Blick auf das wirtschaftliche F&E-Risiko sind beide Prozesse allein schon aufgrund der hohen Investitionen von mehreren 100 Mio. € als eher riskant einzustufen. Zudem besteht bei der H₂-DRI noch das wirtschaftliche Risiko bzgl. der Wasserstoffkosten bzw. der Kosten und Auslastung eines Elektrolyseurs, sofern der Wasserstoff selbst produziert werden soll.

Papierherstellung

Tab. 3-8 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe Papierherstellung

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
TK 1 Black liquor gasification						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TK 2 Chemische Fasermodifikation						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bei der Black liquor gasification bestehen nur geringe technische Hürden, die es zu überwinden bzw. zu beachten gilt. Dies betrifft beispielsweise das Feuerfest-System zum Schutz des Vergasers sowie die Reinheit des Synthesegases. Wirtschaftliche Risiken bestehen durch die fehlende Bereitstellung von Geldern und die hohen Kosten des Feuerfest-Systems. Die chemische Fasermodifikation kann dagegen, was sich auch im zugehörigen TRL-Level widerspiegelt, bezüglich des technischen und wirtschaftlichen Risikos als eher gering eingeschätzt werden.

Zementherstellung

Tab. 3-9 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe Zementherstellung

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
TK 1 Low-carbon Zement						
Das technische Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das wirtschaftliche Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TK 2 Oxyfuel						
Das technische Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das wirtschaftliche Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Das technische Risiko für die low-carbon Zemente kann ebenso wie das wirtschaftliche Risiko als eher hoch eingeschätzt werden. Dies betrifft zum einen die Produktqualität und die Zertifizierung; zum anderen die hohen Investitionen für Entwicklung solcher neuer Zementarten und die Produktionsstätten zu deren Produktion sowie deren unklare Marktdurchdringung. Das Oxyfuel combustion besitzt dagegen ebenfalls ein eher geringes technisches Risiko, während das wirtschaftliche Risiko für die F&E-Tätigkeiten wiederum aufgrund der hohen Investitionen als eher hoch eingeschätzt werden kann.

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Die Rohstoffe, die im Bereich der energieeffizienten Prozesstechnologien als kritisch zum Betrieb der Anlagen anzusehen sind, betreffen überwiegend die Rohstoffverfügbarkeit von Materialien zur Eisen- und Stahlherstellung, wie beispielsweise die Verfügbarkeit von Roheisen oder von Schrott zur Herstellung von Elektrostahl. Zudem sind Rohstoffe relevant, die zur Herstellung von legierten Stählen verwendet werden, wie beispielsweise Nickel oder Chrom.

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial

Die Bestimmung des internationalen Marktpotenzials erfolgt auf Basis der Szenarien aus IEA 2014. Eine weitere differenzierte Betrachtung ist hier jedoch aufgrund fehlender Informationen in den fokussierten Studien nicht möglich.

Das Marktpotenzial für energieeffiziente Prozesstechnologien ergibt sich durch deren Diffusion im Anlagenbestand im Zuge vom Neuaufbau oder Austausch von Produktionsanlagen. Somit kann die Produktionsmenge von Eisen und Stahl, Papier und Zement als Indikator für die Größe des Marktpotenzials aufgefasst werden. Hierzu werden zuerst die Bandbreiten der in der Studie hinterlegten Szenarien für die Jahresproduktionsmenge in Mt ausgewiesen und in einem weiteren Schritt das Marktpotenzial, das sich zum einen aus den sich daraus ableitenden Neuanschaffungen aufgrund eines Marktwachstums und zum anderen aus notwendigen Ersatzinvestitionen ergibt. Als Anlagenlebensdauer werden hierzu für die Eisen- und Stahlherstellung sowie Papierherstellung 25 Jahre angenommen und für die Zementherstellung 30 Jahre (obwohl diese auch zum Teil deutlich höher liegen können).

Eine monetäre Quantifizierung des Marktpotenzials kann für die energieeffizienten Prozesstechnologien weder auf internationaler noch auf nationaler Ebene in sinnvoller und konsistenter Weise gegeben werden. Der Grund hierfür liegt zum einen in der hohen Anzahl der Effizienztechnologien³, die in manchen Studien in die Berechnungen einfließen, und zum anderen darin, dass deren genaue Diffusion und Investitionen nicht erkennbar und somit auch nicht auf andere Studien übertragbar sind.

Die Szenarien der IEA gehen sowohl im 2°-Szenario als auch im >2°-Szenario von gleichbleibenden minimalen und maximalen Produktionsmengen aus. Aus diesem Grund sind die Angaben für beide Szenarien identisch. Diese minimalen und maximalen Produktionsmengen sollen dabei in den jeweiligen Szenarien nochmals eine Unterscheidung nach geringer und hoher Nachfrage nach dem Produkt darstellen.

³ So werden allein in Repenning et al. (2015) in den drei fokussierten Technologiebereichen mehr als 50 Effizienztechnologien eingesetzt.

Eisen- und Stahlherstellung

Tab. 4-1 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für die Rohstahlproduktion

Jahr	Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C	
	Mt		Mt	
Einheit	Min	Max	Min	Max
2020	1.840	1.990	1.840	1.990
2030	2.020	2.220	2.020	2.220
2040	2.160	2.400	2.160	2.400
2050	2.300	2.570	2.300	2.570

Die globale Produktion von Rohstahl wird von der IEA bis zum Jahr 2050 mit maximal 2.570 Mt. angegeben. Unter Berücksichtigung der Nachfrageentwicklung und evtl. Ersatzinvestitionen ergibt sich daraus für den Zeitraum 2041-2050 ein maximales Marktpotenzial von ca. 1.200 Mt.

Tab. 4-2 Analyse des globalen Marktpotenzials für die Rohstahlherstellung

Jahr	Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C	
	Mt		Mt	
Einheit	Min	Max	Min	Max
2011-2020	1.060	1.270	1.060	1.270
2021-2030	990	1.120	990	1.120
2031-2040	1.000	1.140	1.000	1.140
2041-2050	1.060	1.200	1.060	1.200

Papierherstellung

Tab. 4-3 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für die Technologie Pulp-and-Paper-Produktion

Jahr	Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C	
	Min	Max	Min	Max
2020	500	550	500	550
2030	600	720	600	720
2040	680	870	680	870
2050	760	1.030	760	1.030

Die globale Pulp-and-Paper-Produktion wird von der IEA bis zum Jahr 2050 mit maximal 1030 Mt. angegeben. Unter Berücksichtigung der Nachfrageentwicklung und evtl. Ersatzinvestitionen ergibt sich daraus für den Zeitraum 2041-2050 ein maximales Marktpotenzial von 570 Mt.

Tab. 4-4 Analyse des globalen Marktpotenzials für die Technologie Pulp-and-Paper-Produktion

Jahr	Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C	
	Min	Max	Min	Max
2011-2020	300	370	300	370
2021-2030	340	460	340	460
2031-2040	350	500	350	500
2041-2050	380	570	380	570

Zementherstellung

Tab. 4-5 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für die Zementherstellung

Jahr	Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C	
	Mt		Mt	
	Min	Max	Min	Max
2020	4.390	4.560	4.390	4.560
2030	4.360	4.990	4.360	4.990
2040	4.420	5.270	4.420	5.270
2050	4.480	5.550	4.480	5.550

Die globale Zementproduktion weist von den drei Technologiebereichen die größten Produktionsmengen auf. Diese werden von der IEA bis zum Jahr 2050 mit maximal 5550 Mt. angegeben. Unter Berücksichtigung der Nachfrageentwicklung und evtl. Ersatzinvestitionen ergibt sich daraus für den Zeitraum 2041-2050 ein maximales Marktpotenzial von ungefähr 2130 Mt.

Tab. 4-6 Analyse des globalen Marktpotenzials für die Zementherstellung

Jahr	Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C	
	Mt		Mt	
	Min	Max	Min	Max
2011-2020	2.220	2.450	2.220	2.450
2021-2030	1.420	2.090	1.420	2.090
2031-2040	1.530	2.040	1.530	2.040
2041-2050	1.550	2.130	1.550	2.130

Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial

Zur Bestimmung des nationalen Marktpotenzials kann auf eine detailliertere Datenbasis zurückgegriffen werden. Hier bieten insbesondere die Studien von Öko und ISI (2015), des UBA (2014) und die ergänzte Studie ISI et al. (2017) dezidierte Angaben zur Entwicklung der Produktionsmengen auf Prozessebene. Deren Entwicklung bildet in den Studien Öko und ISI (2015) und ISI et al. (2017) die Basis für die Bottom-up-Bestimmung der Energiebedarfe und THG-Emissionen mithilfe des FORECAST-Modells. Im Fall der Studie des UBA (2014) liegen diese Angaben teilweise ebenfalls vor, jedoch beschränkt auf das Jahr 2050. Die der Bewertung der Marktpotenziale zugrundeliegenden Min- und Max-Angaben für ausgewählte Prozesse in den jeweiligen Technologiebereichen aus den Studien werden nachfolgend vor Darstellung der

Marktpotenziale abgebildet. Die Darstellung der sich daraus ergebenden Marktpotenziale erfolgt anschließend auf aggregierter Ebene der Gesamtproduktion (beispielsweise an Papier) und nicht mehr auf Prozessebene. Das methodische Vorgehen bzgl. der Berechnung der Marktpotenziale ist dabei identisch zu der Bestimmung der internationalen Marktpotenziale.

Eisen- und Stahlherstellung

Das nationale Marktpotenzial für die Eisen- und Stahlherstellung wird überwiegend durch die Hochofen- und Elektrostahlroute bestimmt. Die eingangs erwähnte H₂-DRI oder der Hisarna-Prozess werden in den Studien nicht berücksichtigt bzw. explizit ausgewiesen. UBA (2014) berücksichtigt dagegen im Jahr 2050 auch DRI mit regenerativ erzeugtem Methan. In den Studien von Öko und ISI (2015) und ISI et al. (2017) wird lediglich der Weiterbestand der Erdgas-DRI Anlage in Hamburg abgebildet.

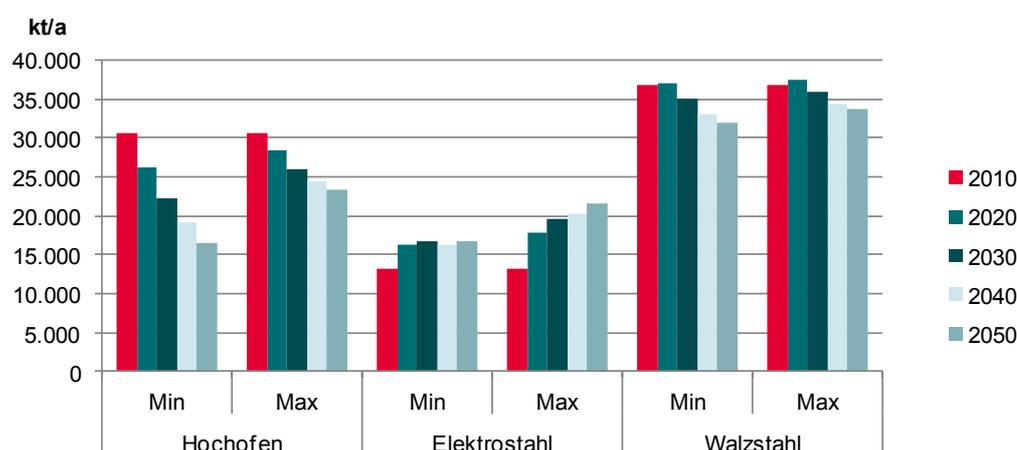


Abb. 4-1 Entwicklung ausgewählter Prozesse der Eisen-Stahlherstellung

Tab. 4-7 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Eisen- und Stahlherstellung

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
2020	44.160	44.720	44.160	
2030	41.722	42.791	41.721	
2040	39.434	40.970	39.434	
2050	38.104	40.109	38103	45.000

Die Studien gehen weitestgehend von einer sinkenden nationalen Eisen- und Stahlherstellung auf ca. 38 bis 40 Mio. t aus. Einzige Ausnahme bildet hier die Studie UBA (2014). Dort wird auch für das Jahr 2050 von einer Produktion um die 45 Mio. t ausgegangen. Das maximale Marktpotenzial liegt in den 2040er Jahren bei ca. 14 Mio. t beziehungsweise 23,6 Mio. t im Falle des Studie UBA (2014).

Tab. 4-8 Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Eisen- und Stahlherstellung

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
2014-2020	12.695	13.412	13.238	
2021-2030	14.220	15.480	14.280	
2031-2040	13.460	14.400	13.460	
2041-2050	13.940	15.140	13.800	23.600

Papierherstellung

Für die Papierherstellung zeichnet sich eine stetige Zunahme der Produktionsmenge ab, wobei der Anteil der Altpapierstoffe ebenfalls stetig zunimmt.

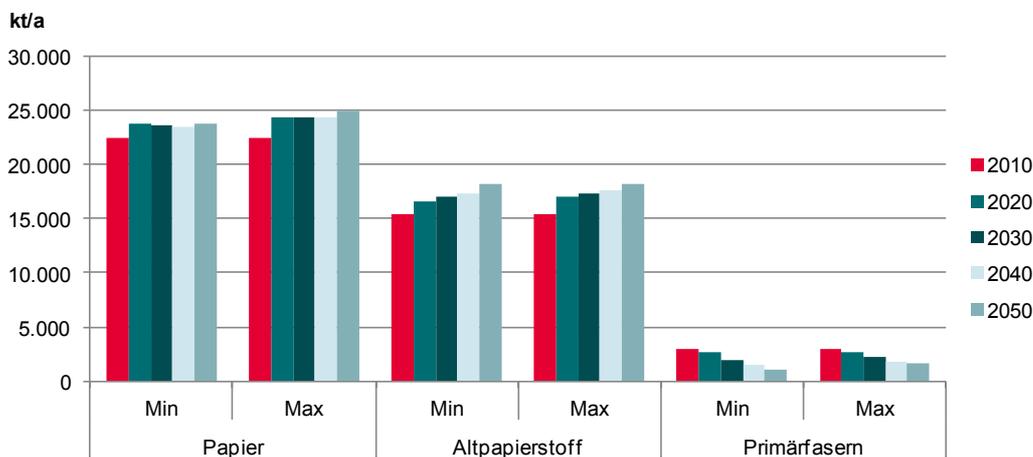


Abb. 4-2 Entwicklung der Prozesse in der Papierherstellung

Im Gegenzug reduziert sich der Anteil der produzierten Primärfasern über den Betrachtungszeitraum hinweg.

Tab. 4-9 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Papierherstellung

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
2020	23.700	24.000	23.700	
2030	23.700	24.300	23.700	
2040	23.500	24.400	23.450	
2050	23.700	25.000	22.600	23.700

Die Papierherstellung ist die einzige betrachtete Technologie, bei der die Studien von einer steigenden Produktionsmenge auf nationaler Ebene ausgehen. Diese wird für das Jahr 2050 auf 22 bis 25 Mio. t geschätzt. Das entsprechende Marktpotenzial dürfte somit in den 2040er Jahren bei 8 - 11,5 Mio. t liegen.

Tab. 4-10 Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Papierherstellung

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
2014-2020	7.830	8.200	7.830	
2021-2030	9.480	10.020	9.480	
2031-2040	9.200	9.860	9.130	
2041-2050	9.680	10.600	8.190	9.730

Zementherstellung

Für die Zementherstellung lässt sich auf Basis der Studien ein Rückgang der Produktionsmenge beobachten. Ebenfalls in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** kann der Rückgang der hierzu benötigten Menge an Klinkern abgelesen werden. Neben einer sinkenden Produktionsmenge kann dies auch auf den ebenfalls sinkenden Klinkerfaktor⁴ zurückgeführt werden.

⁴ Dieser Anteil kann für ausgewählte Szenarien in Tab. 4-14 nachgesehen werden.

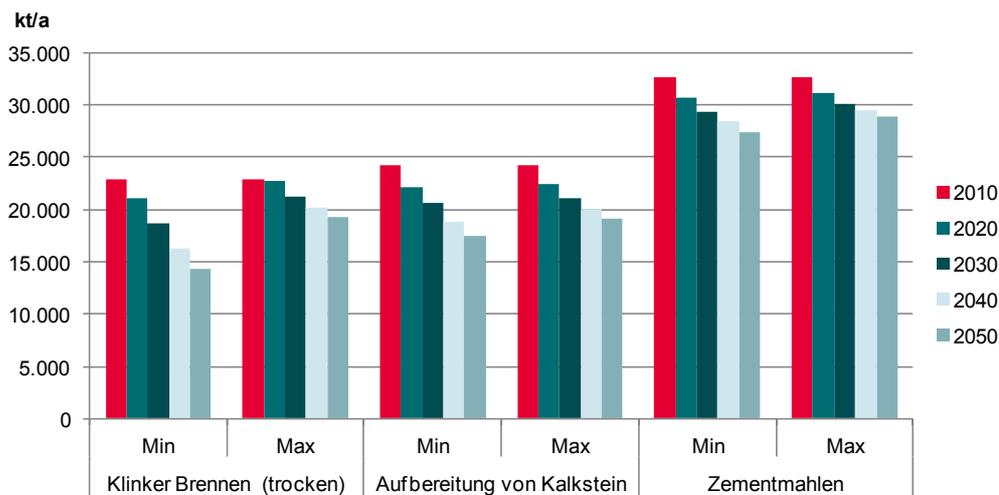


Abb. 4-3 Entwicklung ausgewählter Prozesse der Zementherstellung

Der Effekt des Klinkerfaktors auf den Bedarf an Klinkern wird in obiger Abbildung besonders für das Jahr 2050 durch die große Differenz zwischen den beiden Min- und Max-Werten deutlich.

Tab. 4-11 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Zementherstellung

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
2020	30.700	31.000	30.700	
2030	29.400	30.200	29.400	
2040	28.400	29.500	28.400	
2050	27.500	29.000	27.470	30.600

Auf Basis der Studien zeichnet sich ein Rückgang der Zementproduktion bis zum Jahr 2050 ab. Zu diesem Zeitpunkt dürfte die Produktion zwischen 27,5 und 30,5 Mio. t liegen. Das zugehörige Marktpotenzial in der Zeitspanne von 2041 bis 2050 ergibt sich damit zu 8,2 bis 9,2 Mio. t.

Tab. 4-12 Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Zementherstellung

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Einheit	kt	kt	
	Min	Max	Min	Max
2014-2020	5.140	5.510	5.140	
2021-2030	8.500	9.270	8.500	
2031-2040	8.470	9.130	8.470	
2041-2050	8.270	9.170	8.230	8.270

Auch wenn das Marktpotenzial nicht zusätzlich monetär bewertet werden konnte, so lässt sich doch erkennen, dass insgesamt ein großes Marktpotenzial besteht. Dieses Ergebnis auf Basis der ausgewerteten Studien spiegelt sich auch wieder in den Ergebnissen aus einer ergänzenden Onlineumfrage im Rahmen des Projekts zum Marktpotenzial der energieeffizienten Prozesstechnologien (für die Bereiche Fertigungstechnik, Thermoprozesse und chemische Prozesstechnik). Das Marktpotenzial wurde dort auch durchgehend als eher groß bis groß eingestuft (ifo Institut 2017).

Implizierte nationale Wachstumsrate der Technologien

Nachfolgend aufgeführt sind die Wachstumsraten für die drei Technologien. Die Zahlen spiegeln dabei nochmals wieder, was bereits in vorangegangenen Tabellen ersichtlich war.

Tab. 4-13 Ermittlung der Wachstumsraten für die Technologien

Technologie	CAGR (2030)	CAGR (2050)
Eisen- und Stahlherstellung	- 0,2	- 0,3
Papierherstellung	0,3	0,1
Zementherstellung	- 0,5	- 0,4

Für die Eisen- und Stahlherstellung sowie die Zementherstellung wird entsprechend der ausgewerteten Studien mit einem negativen CAGR gerechnet, während die Papierherstellung einen leicht positiven CAGR aufweist.

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen

Ausgehend von dem zuvor in Kriterium 3 ermittelten Marktpotenzial werden in Kriterium 4 die Potenziale zur Verringerung der Treibhausgasemissionen ermittelt. Grundlage für die Bewertung stellen die Studien und Szenarien von ÖKO und ISI (2014), Prognos et al. (2014) und ISI et al. (2017) dar. Als Referenzszenario dient das AMS-Szenario, das im Rahmen der Klimaschutzszenarien als BAU-Szenario fungiert

(Repenning et al. 2015). Das Referenzszenario umfasst somit die dort aufgeführten Produktionsstrukturen, -mengen und Diffusion der Effizienztechnologien. Somit handelt es sich bei der Referenz nicht um eine spezifische Technologie, sondern vielmehr um einen Technologiemix. Das Vermeidungspotential ergibt sich somit anhand der Differenz zwischen den betrachteten Szenarien und dem Referenzszenario.

In den Szenarien werden dabei nicht per se alle zur Verfügung stehenden Effizienzmaßnahmen implementiert, sondern die Entscheidung hierfür findet unter der Prämisse einer gewissen Wirtschaftlichkeit statt. Die theoretischen Einsparpotenziale dürften somit höher ausfallen. Die unterschiedliche Diffusion von Effizienzmaßnahmen ist in nachfolgender **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** für die drei fokussierten Technologien beispielhaft anhand zweier Szenarien aus ISI et al. (2017) abgebildet. Durch den Diffusionsgrad der Maßnahmen werden somit der Energiebedarf und somit auch die THG-Emissionen in den Szenarien unterschiedlich stark beeinflusst.

Neben der Diffusion der einzelnen Effizienzmaßnahmen gibt es in den jeweiligen Technologien zentrale Einflussgrößen⁵, die den Energiebedarf oder die THG-Emissionen ebenfalls sehr stark beeinflussen. Im Fall der Eisen- und Stahlherstellung ist dies beispielsweise der Anteil an Elektro Stahl⁶, im Fall der Papierherstellung der Anteil an Recyclingfaserstoffen und bei der Zementherstellung der bereits genannte Klinkerfaktor. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bietet hierzu eine Übersicht, wie sich diese Größen im Laufe der Zeit in den Szenarien aus Öko und ISI (2014) und ISI et al. (2017) entwickeln. In Prognos et al. (2014) sind hierzu keine Angaben ausgewiesen.

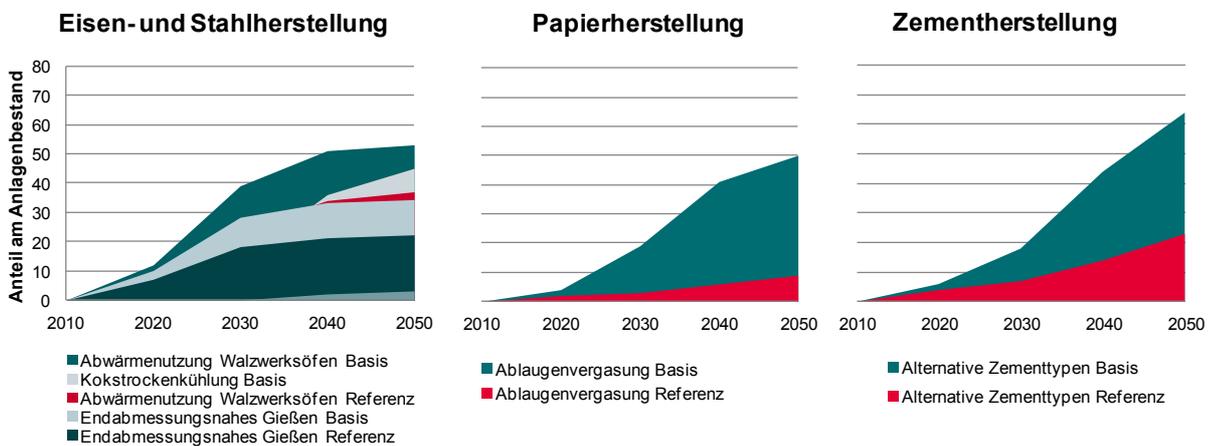


Abb. 4-4 Diffusion ausgewählter Effizienzmaßnahmen

Quelle: basierend auf ISI et al. (2017)

⁵ Hierbei kann es sich auch um eine Technologiekomponente handeln.

⁶ Dieser ist zudem von der Verfügbarkeit von Schrott abhängig.

Tab. 4-14 Entwicklung zentraler Einflussgrößen in den Szenarien

Prozent	2010	2030				2050				
		Ref	Basis	AMS/ KS80	KS95	Ref	Basis	AMS/ KS80	KS 95	UBA
Stahl: Anteil Elektrostahl	30	39	47	39	42	42	57	45	45	100
Papier: Anteil Recyclingfaserstoff	85	89	90	89	90	92	95	92	95	83
Zement: Klinkerfaktor	77	70	63	69	64	67	54	61	52	60

Letztlich werden die Treibhausgasemissionen noch dadurch stark determiniert, ob und in welchem Umfang CCS angewendet wird. Hier unterscheiden sich die Studien im Umgang bzw. bei der Berücksichtigung der Option von CCS/CCU. Während beispielsweise UBA (2014) und Prognos et al. (2014) diese Option ausschließen, findet sie bei Öko und ISI (2015) im KS 95 Szenario Verwendung. Der Anteil der von CCS erfassten Emissionen steigt dabei von 20 % im Jahr 2030 auf 100 % im Jahr 2050 an. In den Langfristszenarien von ISI et al. (2017) wird im Basisszenario ebenfalls CCS als Option angesehen und im Industriesektor für bestimmte Prozesse zugelassen. In den Studien werden mit Ausnahme von ISI et al. (2017) keine Angaben zu den CO₂-Emissionen auf Technologieebene gemacht, sondern nur für den Gesamtsektor Industrie. Zur Bestimmung der Emissionen wurde daher folgendes Vorgehen verfolgt:

In einem ersten Schritt wurden die Strom- und Brennstoffbedarfe in den unterschiedlichen Szenarien erhoben. Zur Bestimmung der energiebedingten Emissionen wurden anschließend für den Strom die in der Methodik vorgegebenen Emissionsfaktoren herangezogen. Für die Brennstoffe wurde der den drei Technologien spezifisch unterliegende Brennstoffmix berücksichtigt und Emissionsfaktoren entsprechend der Studie UBA 2017 verwendet. In einem weiteren Schritt wurden dann noch ggf. zusätzlich die prozessbedingten Emissionen wie in den Studien angegeben ergänzt und ggf. noch der Effekt von CCS in den Szenarien berücksichtigt⁷.

Aufgrund der Struktur der Studien beziehen sich die nachfolgenden Angaben zu den Treibhausgas-Emissionen und zur Energie- und Ressourceneffizienz (Kriterium 5) auf die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ausgewiesenen Wirtschaftszweige. Es handelt sich somit nicht ausschließlich um die Prozesse der Eisen- und Stahlherstellung, Papierherstellung oder Zementherstellung.

Entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise konnten für die drei Technologien folgende Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zum Referenzfall vermieden werden:

⁷ Für das KS 95 Szenario aus Öko und ISI (2014) wurde hierbei ein ähnlicher Effekt durch die Abscheidung wie im Basisszenario von ISI et al. (2017) unterstellt.

Tab. 4-15 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch die Technologie Eisen- und Stahlherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
Einheit	Mio. t CO ₂ -äq./a		Mio. t CO ₂ -äq./a	
2020	1	1	3	5
2030	1	3	8	11
2040	1	5	12	17
2050	1	5	12	19

Tab. 4-16 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch die Technologie Papierherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
Einheit	Mio. t CO ₂ -äq./a		Mio. t CO ₂ -äq./a	
2020	0	3	2	3
2030	2	6	3	6
2040	2	7	6	8
2050	1	4	6	10

Tab. 4-17 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch die Technologie Zementherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
Einheit	Mio. t CO ₂ -äq./a		Mio. t CO ₂ -äq./a	
2020	2	12	8	12
2030	4	12	5	12
2040	5	12	8	13
2050	6	11	10	11

4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Der Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz fokussiert, im Gegensatz zu Kriterium 4, die eingesparte Primärenergie. Hierbei wird sowohl das Einsparpotenzial an Strom als auch an Brennstoffen berücksichtigt. Als Grundlage für deren Berechnung werden, wie bereits bei Kriterium 4, wiederum die szenariospezifischen Strom- und Brennstoffbedarfe herangezogen. Zur Ausweisung der eingesparten Primärenergie wird der Strombedarf anschließend mit den methodisch vorgegebenen Primärenergiefaktoren multipliziert. Für die kohlenstoffbasierten Brennstoffe wird vereinfachend für den gesamten Betrachtungszeitraum ein Primärenergiefaktor von 1,1 angesetzt. Das Einsparpotenzial bildet hierbei wiederum die Differenz zum AMS-Szenario.

Auf Basis dieser Vorgehensweise ergeben sich folgende vermiedene Primärenergieeinsätze:

Tab. 4-18 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch die Technologie Eisen- und Stahlherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (in Spannbreiten)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	PJ/a		PJ/a	
	Min	Max	Min	Max
2020	13	14	40	65
2030	10	40	85	125
2040	50	60	110	145
2050	40	60	120	150

Tab. 4-19 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch die Technologie Papierherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (in Spannbreiten)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	PJ/a		PJ/a	
	Min	Max	Min	Max
2020	14	27	40	45
2030	25	40	75	80
2040	30	70	90	110
2050	20	80	60	130

Tab. 4-20 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch die Technologie Zementherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (in Spannbreiten)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	PJ/a		PJ/a	
	Min	Max	Min	Max
2020	0	15	0	20
2030	5	25	10	35
2040	20	40	25	60
2050	10	40	2	45

4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Zur Bestimmung der Kosteneffizienz werden die systemischen Kosten herangezogen. Diese sind in den relevanten Studien jedoch mit Ausnahme von ISI et al. (2017) nicht ausgewiesen. Eine rechnerische Bestimmung der systemischen Kosten bedingt es, die Investitionen und Betriebskosten einer Technologie hinreichend quantifizieren zu können. Dies ist jedoch im Falle der energieeffizienten Prozesstechnologien aufgrund der großen Anzahl an Optionen⁸ sowie deren szenarioabhängiger Diffusion in den drei fokussierten Technologien im Rahmen dieses Technologieberichts nicht zu leisten. Stattdessen erfolgt die Bewertung der Kosteneffizienz anhand der eingesparten bzw. vermiedenen Kosten, was auch dem auf „Vermeidung“ ausgerichteten Charakter des Technologiefeldes entspricht. Um dennoch, wenn auch nicht in der ganzen Breite über alle Szenarien hinweg, eine Einordnung zu den systemischen Kosten zu ermöglichen, erfolgt abschließend noch die Darstellung der Differenz-Energiekosten und Differenz-Fixkosten zwischen dem Basisszenario und dem Referenzszenario aus ISI et al. (2017).

Zur Berechnung der vermiedenen Kosten werden die drei Komponenten Stromkosten, Brennstoffkosten und Kosten für CO₂-Zertifikate berücksichtigt. Die jeweils zugrundeliegenden Mengen wurden in den vorangegangenen Kriterien bereits bestimmt. Für die Berechnung der eingesparten Stromkosten werden zudem die Börsenpreise und Netzentgelte, wie sie in der Methodik festgelegt wurden, herangezogen. Grundlage für die Bestimmung der eingesparten Strommenge bildet Kriterium 5. Ebenfalls auf Kriterium 5 beruht die eingesparte Menge an Brennstoffen. Die Brennstoffzusammensetzung basiert auf den Angaben für das AMS-Szenario (Öko und ISI 2014; Tabelle 5-28), das KS 80-Szenario (Öko und ISI 2014; Tabelle 5-31) und das KS 95-Szenario (Öko und ISI 2014; Tabelle 5-31). Die jeweiligen Energieträgerkosten wurden aus Fleiter et al. (2013) übernommen⁹. Die Kosten für emittiertes CO₂ werden auf Basis der vermiedenen Treibhausgase aus Kriterium 4 und den CO₂-

⁸ Im Fall der Klimaschutzszenarien und Langfristszenarien sind es über 50 Maßnahmen.

⁹ Die Energieträgerpreise sind dort nur bis zum Jahr 2035 gelistet. Für die nachfolgenden Jahre wurden die Werte vereinfachend als konstant angenommen.

Zertifikatspreisen aus der projektinternen Methodikvorgabe (*Teilbericht 1*) berechnet.

Unter den geschilderten Prämissen ergeben sich für die drei Technologien folgende Kostenersparnisse im Vergleich zur Referenz.

Tab. 4-21 Jährliche Kosteneinsparpotenziale durch die Technologie Eisen- und Stahlherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
Einheit	Mrd. €/a		Mrd. €/a	
2020	0,2	0,8	0,2	0,8
2030	0,2	0,9	0,2	0,9
2040	0,0	1,2	0,0	1,2
2050	1,1	1,5	1,1	1,5

Tab. 4-22 Jährliche Kosteneinsparpotenziale durch die Technologie Papierherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
Einheit	Mrd. €/a		Mrd. €/a	
2020	0,1	0,4	0,4	0,5
2030	0,0	0,6	0,9	1,0
2040	0,6	1,5	1,1	1,3
2050	0,6	1,9	1,0	2,3

Tab. 4-23 Jährliche Kosteneinsparpotenziale durch die Technologie Zementherstellung in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
2020	0,2	0,4	0,2	0,3
2030	0,4	0,7	0,3	0,6
2040	0,8	1,4	0,7	0,9
2050	1,0	1,8	0,7	0,9

Der Vergleich der Kosteneinsparpotenziale zwischen den drei Bereichen zeigt, dass sich auf Seiten der Eisen- und Stahlherstellung rein rechnerisch die größte Kostenersparnis ergibt, gefolgt von der Papierherstellung und der Zementherstellung. Die größten Treiber sind dabei im Fall der Zementherstellung die Reduktion der Treibhausgasemissionen und somit der damit verbundenen CO₂-Zertifikatskosten. Bei der Papierherstellung rühren die Einsparungen überwiegend von den Brennstoff- und Stromkosten her, während bei der Eisen- und Stahlherstellung die Reduktion der Brennstoffkosten maßgeblich für die Kostenersparnis ist. An dieser Stelle soll jedoch nochmals erwähnt werden, dass diese Ersparnisse auch stets mit Investitionen für die entsprechenden Prozesstechnologien verbunden sind. Aus diesem Grund sind die dargestellten Kostenersparnisse auch nicht alleine aussagekräftig. Hierfür ist die Ausweisung der systemischen Kosten besser geeignet. Da, wie bereits eingangs erläutert, hierzu jedoch nur in einer Studie Aussagen getroffen wurden, kann hier keine differenzierte Betrachtung erfolgen. Stattdessen werden die Ergebnisse der in ISI et al. (2017) aufgeführten Fixkosten-Differenz und Energiekosten¹⁰-Differenz nachfolgend wiedergegeben.

¹⁰ Somit werden etwaige Einsparungen durch CO₂-Zertifikate hierin nicht berücksichtigt.

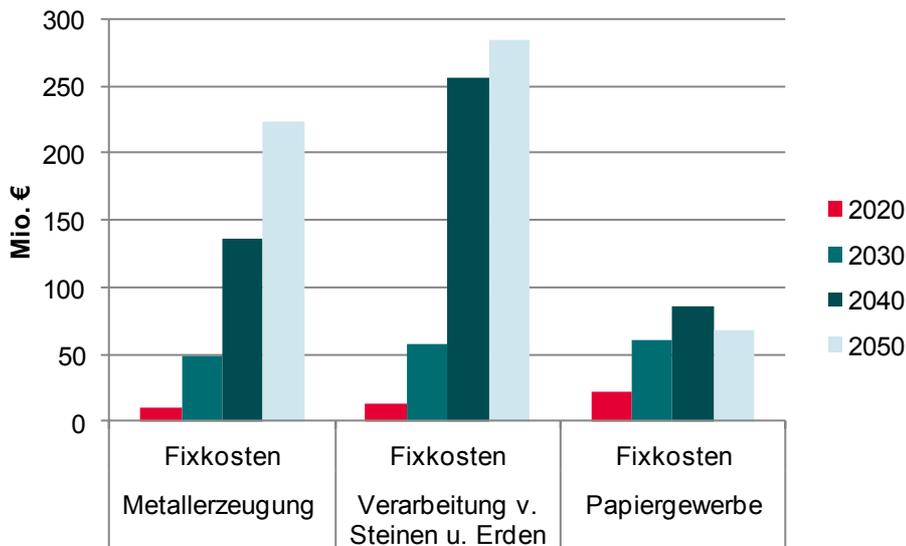


Abb. 4-5 Annualisierte Differenz-Fixkosten

Quelle: Basierend auf ISI et al. (2017)

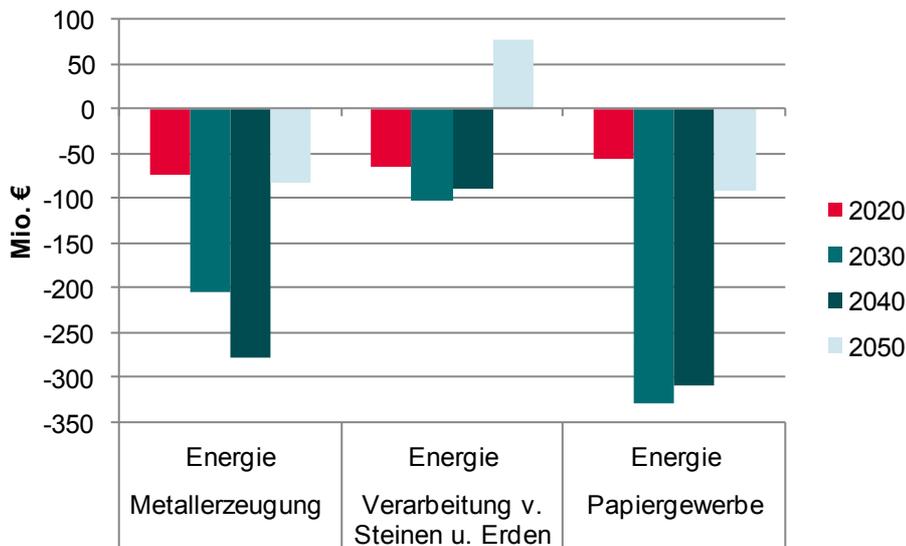


Abb. 4-6 Annualisierte Differenz-Energiekosten

Quelle: Basierend auf ISI et al. (2017)

Aus den beiden Diagrammen geht hervor, dass die Fixkosten im Bereich der Papierherstellung deutlich geringer sind als in den beiden anderen Fällen. Dennoch lässt sich hier die größte Einsparung an Energie verwirklichen. Für die Metallerzeugung sind die Fixkosten vergleichsweise hoch, was ebenso für die Verarbeitung von Steinen und Erden zutrifft. Der starke Anstieg in den Jahren 2040 und 2050 dürfte hierbei ein Indiz sein, dass ein Teil dieser Fixkosten auf Investitionen für CCS zurückzuführen sind. Die Einsparung an Energiekosten im Fall der Verarbeitung von Steinen und Erden fällt vergleichsweise gering aus und verursacht um das Jahr 2050 sogar

Mehrkosten. Dies unterstreicht nochmals die Vermutung, dass die Investitionen nicht primär getätigt wurden, um Energiekosten einzusparen, sondern um die THG-Emissionen zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund soll auch an dieser Stelle nochmals auf die Notwendigkeit hingewiesen werden, den Begriff der energieeffizienten Prozesstechnologien im Rahmen dieses Technologieberichts erweitert auch als „CO₂-arme Prozesstechnologien“ zu verstehen.

4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Der Beitrag zur inländischen Wertschöpfung durch energieeffiziente Prozesstechnologien lässt sich aufgrund der bereits genannten Heterogenität ohne eine ausgiebige Analyse nur schwer quantifizieren. Bestehende Studien verbleiben zudem auf einer eher aggregierten Ebene. So wird etwa das Effizienzpotenzial für die gesamte Industrie auf 450 Mrd. € beziffert. Aufgrund dieser schwierigen Datengrundlage werden das Kriterium und die Bedeutung der energieeffizienten Prozesstechnologien für die inländische Wertschöpfung daher eher qualitativ anhand ihrer direkten und indirekten Effekte diskutiert.

Energieeffiziente Prozesstechnologien liefern einen direkten Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Branchen, in denen sie verwendet werden. Alle drei fokussierten Branchen sind sehr energieintensiv und die Energiekosten machen einen nicht unerheblichen Anteil der Herstellkosten aus. Dieser liegt bei der Papierherstellung bei mehr als 10 % und bei der Zementherstellung bei ca. 16 % des Bruttoproduktionswertes. Eine entsprechende Verringerung dieser Kosten wirkt sich somit direkt auf die Herstellungskosten aus.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht kommt den drei Branchen eine wichtige Rolle zu. Die Papierindustrie erwirtschaftete im Jahr 2016 einen Umsatz von ca. 14,2 Mrd. €, wobei mit 10,1 Mio. Tonnen ungefähr 45 % der Produktion exportiert werden. Zudem beschäftigt sie 39 950 Personen (VDP 2017a). Der Umsatz der Zementindustrie war im Jahr 2015 mit 2,49 Mrd. € geringer. Generiert wird dieser von 22 Unternehmen, die 55 Zementwerke betreiben. Die Produktion dieser Werke liegt bei ca. 31,2 Mio. t und bietet Arbeit für 7.810 Beschäftigte (VDZ 2016b). Im Fall der Metallerzeugung und -verarbeitung (WZ 24) sowie der Herstellung von Metallerzeugnissen (WZ 25) lag der Umsatz im Jahr 2015 bei etwa 31,2 Mrd. € und es wurden 74.172 Personen beschäftigt (Statistisches Bundesamt 2017). Konkret für den Bereich der WZ24.1-Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen liegt die Bruttowertschöpfung bei ca. 6 Mrd. €.

Neben der Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit dieser Branchen bergen energieeffiziente Prozesstechnologien zudem das Potenzial, auch direkt auf lokaler Ebene einen Beitrag zur Beschäftigung zu liefern (Weigel et al. 2016).

Letztlich liefern die energieeffizienten Prozesstechnologien indirekt über die entsprechenden Technologien einen Beitrag zur Sicherung von Industriezweigen, die maßgeblich sind für die inländische Wertschöpfung und Exportstärke Deutschlands. So findet der produzierte Stahl beispielsweise direkte Verwendung in der Automobil- oder Maschinenbauindustrie (Lemken et al. 2008).

Für die Stahlherstellung liefert Limbers 2016 eine Abschätzung dieser wertschöpfungskettenübergreifenden Effekte. Hierbei wird die Entwicklung der Wertschöp-

fung und der Beschäftigung in der deutschen Stahlindustrie (WZ 24.1) untersucht. Dies erfolgt anhand eines Referenzszenarios, in dem keine CO₂-bedingten Kosten anfallen und entsprechend eines Belastungsszenarios, in dem der CO₂-Preis bis 2030 auf 40,7 €/t ansteigt. Im Basisszenario bleibt die Bruttowertschöpfung in etwa bei 6 Mrd. €, während sie im Belastungsszenario um 3,7 Mrd. € im Vergleich zu 2010 sinkt. In diesem Szenario wird weiterhin der Effekt auf den Industriesektor (exkl. WZ24.1) mit -8 Mrd. €, für die Baubranche mit -1 Mrd. € und auf gesamtwirtschaftlicher Ebene mit -30 Mrd. € beziffert (Limbers 2016).

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass, auch wenn sich der Beitrag von energieeffizienten Prozesstechnologien nicht exakt bestimmen lässt, es außer Frage steht, dass sie sowohl einen wesentlichen Einfluss auf die Wertschöpfung und Beschäftigung der sie verwendenden Branchen haben als auch auf deren nachgelagerte Branchen. Zudem profitieren natürlich auch die vorgelagerten Branchen wie der Maschinen- und Anlagenbau¹¹, die die entsprechenden Prozesstechnologien entwickeln und vertreiben.

4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

Die Bewertung der deutschen Industrie bezüglich der fokussierten Technologien erfolgt an dieser Stelle unter Berücksichtigung der vorherrschenden Heterogenität in aggregierter Form.

Tab. 4-24 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologie-Eisen- und Stahlherstellung

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?			
Technologiefeld	<input checked="" type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig	
	<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen	

Tab. 4-25 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologie-Papierherstellung

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefelds weltweit?			
Technologiefeld	<input type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig	
	<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen	

¹¹ (z. B. Siemens, ThyssenKrupp Industrial Solutions, SMS Siemag, etc.)

Tab. 4-26 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich der Technologie-Zementherstellung

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?

Technologiefeld	<input checked="" type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig
	<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen

Im Bereich der Eisen- und Stahlhersteller gibt es einige Akteure, die im Bereich der F&E sehr aktiv sind: Beispielsweise verfolgt ThyssenKrupp im Rahmen des Carbon2Chem-Projekts einen Ansatz abgeschiedenes CO₂ im Sinne eines CCU weiterzuverarbeiten. Die Salzgitter AG dagegen geht hier einen anderen Weg und plant im Rahmen des Projekts Salcos schrittweise mittels DRI von einer kohlenstoffbasierten Stahlproduktion zu einer wasserstoffbasierten Produktion zu wechseln. Hierzu wird die H₂-Direktreduktion mit einer nachgeschalteten Elektrostahlerzeugung gekoppelt (Ghenda 2017).

Im Fall der Zementherstellung ist HeidelbergCement der dominante deutsche Akteur. Das Unternehmen hat in den letzten 10 Jahren 800 Mio. € in Forschung und Entwicklung investiert. Entsprechend breit ist auch die Beteiligung des Unternehmens an Projekten. In Brevik erfolgt ein Projekt zur Erforschung von Möglichkeiten zum Carbon Capture. Zudem ist HeidelbergCement im Oxyfuel-Project von ECRA beteiligt und stellt direkt oder über Italcementi Prototypen wie beispielsweise den Kalzinator zur Verfügung. Weiterhin sind sie auch im Konsortium des Projekts LEILAC vertreten. Im Rahmen des CEMCAP-Projekts wurden im Werk in Hannover die Tests einer Klinkerkühlung durchgeführt (van der Meer 2017).

Mit Blick auf die Papierherstellung kann vermutlich weniger von einer Technologieführerschaft gesprochen werden, da hier überwiegend skandinavische Unternehmen dominant sind. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die deutsche Industrie in den fokussierten Technologien durchweg wettbewerbsfähig bis Technologieführer ist. Dabei soll jedoch an dieser Stelle nochmals betont werden, dass dieses Bild auf Einzelunternehmensebene auch abweichen kann. Zwar gibt es mit Unternehmen wie beispielsweise ThyssenKrupp in der Eisen- und Stahlherstellung oder HeidelbergCement in der Zementherstellung globale Technologieführer, denen stehen jedoch mitunter auch eine Vielzahl an kleineren KMU gegenüber, deren Leistungsfähigkeit nicht auf einem solchen Niveau rangiert.

Teilkriterium 8.2 F&E-Budgets

Tab. 4-27 Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld energieeffiziente Prozesstechnologien – Input-Orientierung

	Einheit	Wert
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene im jeweiligen Technologiefeld – Deutschland		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2015)	Mio. €	34,1
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ Mio. €/a	+3,46
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	+13,95
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mio. €	14.569
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	%	0,23
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	+16,66
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene im jeweiligen Technologiefeld – Internationaler Vergleich mit USA		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2015)	Mio. €	159,2
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ Mio. €/a	1,53
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	0,98
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mio. €	14.569
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	1,09
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	+3,39

Die Datengrundlage basiert auf der in der Projektmethodik vorgeschlagenen Datenbank der IEA zu F&E-Budgets. Die Werte betreffen hierbei die Gruppe 1: „Energy Efficiency“. Aufgrund der unvollständigen Datenbasis für Deutschland wird die komplette Untergruppe 1.1 „Industry“ berücksichtigt, um eine vergleichende Aussage treffen zu können. Zudem erlaubt die Datenbasis für einen direkten internationalen Vergleich nur den Benchmark gegen die USA, da beispielsweise auch auf EU-Ebene keine Daten hinterlegt sind, die einen Vergleich über die vergangenen fünf Jahre erlauben würden. Zudem sei erwähnt, dass die Gruppe 1.1 „Industry“ ebenfalls die Querschnittstechnologien umfasst, die im *Technologiebericht 6.3: Energieeffiziente Querschnittstechnologien* adressiert werden. Entsprechend sind die Ergebnisse an dieser Stelle identisch.

Teilkriterium 8.3 F&E-Outputs

Eine Ausweisung des F&E-Outputs anhand von Publikationen oder Patenten gestaltet sich im Bereich der energieeffizienten Prozesstechnologien äußerst schwierig. Die Analysen könnten einerseits auf der aggregierten Ebene der Technologien Eisen- und Stahlherstellung, Papierherstellung und Zementherstellung erfolgen, was jedoch auf-

grund der hohen Granularität und Unschärfe bzgl. der dadurch berücksichtigten Publikationen und Patente keine belastbare Schlussfolgerung zulassen würde oder auch zu Fehlinterpretationen führen könnte. Dieses Problem könnte durch eine feinere Auflösung bzw. der Definition einschlägiger Suchbegriffe gelöst werden. Hierzu müssten diese jedoch für die einzelnen Effizienzmaßnahmen definiert werden, was im Rahmen dieses Projektes nicht geleistet werden kann.

4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Für die energieeffizienten Prozesstechnologien ist insbesondere die Ebene des Marktes ausschlaggebend. Akzeptanzrelevante Effekte wie eine zunehmende Anlagengröße oder -verteilung werden in diesem Kontext als eher nebensächlich erachtet, da es sich in Deutschland im Grunde um die Substitution bereits bestehender Technologien handelt und sich der Kreis der Betroffenen zumeist auf das Unternehmen und das direkte Umfeld beschränkt.

Tab. 4-28 Bewertungsraster für die Akzeptanz von energieeffizienten Prozesstechnologien zum Status Quo (2015)

Technologien	Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
	Marktakzeptanz		Sozialpol. Akzeptanz		Lokale Akzeptanz	
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?		Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image		Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)
Eisen- und Stahlherstellung	<i>eher hohe Akzeptanz (2)</i>	Sofern die Wirtschaftlichkeit gegeben ist und keine neg. Einflüsse auf Prozesse bestehen	<i>hohe Akzeptanz (1)</i>	Keine negativen Auswirkungen. Energieeffizienz wird als positiv erachtet	<i>eher hohe Akzeptanz (2)</i>	Keine negativen Auswirkungen. Ggf. eingeschränkt durch direkte Nähe
Papierherstellung	<i>eher hohe Akzeptanz (2)</i>	Sofern die Wirtschaftlichkeit gegeben ist und keine neg. Einflüsse auf Prozesse bestehen	<i>hohe Akzeptanz (1)</i>	Keine negativen Auswirkungen. Energieeffizienz wird als positiv erachtet	<i>eher hohe Akzeptanz (2)</i>	Keine negativen Auswirkungen. Ggf. eingeschränkt durch direkte Nähe
Zementherstellung	<i>eher hohe Akzeptanz (2)</i>	Sofern die Wirtschaftlichkeit gegeben ist und keine neg. Einflüsse auf Prozesse bestehen	<i>hohe Akzeptanz (1)</i>	Keine negativen Auswirkungen. Energieeffizienz wird als positiv erachtet	<i>eher hohe Akzeptanz (2)</i>	Keine negativen Auswirkungen. Ggf. eingeschränkt durch direkte Nähe

Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

Die Akzeptanz von energieeffizienten Prozesstechnologien kann übergeordnet sowohl lokal, gesellschaftlich als auch aufseiten des Marktes als gegeben angesehen

werden. Auf Ebene der einzelnen Technologiekomponenten kann es jedoch zu Abweichungen kommen. So fällt die gesellschaftliche Akzeptanz im Bereich der Eisen- und Stahlherstellung beispielsweise im Fall des Hochofens in Kombination mit CCS deutlich ab (Weigel et al. 2016). Die wasserstoffbasierte Technologie der H₂-DRI dürfte im Gegenzug eine hohe Akzeptanz erfahren, sofern die notwendigen Sicherheitsstandards gewahrt bleiben. Auf lokaler Ebene könnte es jedoch durch die großen Mengen an Wasserstoff in direkter Nähe bei der Bevölkerung nur zu einer mittleren Akzeptanz kommen.

Bei der Papierherstellung beschränken die ambitionierten Amortisationszeiten von 2-3 Jahren die Marktakzeptanz neuer Effizienztechnologien, zudem besteht die Befürchtung, dass es durch Eingriffe in die bestehende Produktion zu Ausfällen oder Qualitätseinbußen kommen kann (Fleiter et al. 2013).

Lange Amortisationszeiten und hohe Investitionen stellen auch ein Hemmnis für die Marktakzeptanz bei der Zementherstellung dar. So benötigt allein das Retrofitting eines Werkes mit Post Combustion capture-Technologie beispielsweise Investitionen von 100 bis 300 Mio. \$. Zudem erhöhen sich hierdurch die Betriebskosten deutlich (CEMBUREAU 2013). Weiterhin ist bisher noch weitestgehend unklar, wie die Marktakzeptanz für die neuartigen Low-carbon Zemente ist (UBA 2014).

4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Die unternehmerische Pfadabhängigkeit kann auf der Einzelunternehmensebene als groß angesehen werden. Die technischen Anlagen haben eine reale Nutzungsdauer von mehr als 20 Jahren, im Fall der Zementherstellung sogar noch deutlich mehr. Diese Pfadabhängigkeit in Kombination mit der teils sehr hohen Kapitalintensität schränkt die Reaktionsfähigkeit der Unternehmen mitunter stark ein (Wietschel et al. 2010).

Nach dieser zusammenfassenden und übergeordneten Bewertung für die energieeffizienten Prozesstechnologien im Allgemeinen sind in nachfolgender **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** nochmals die spezifischen Investitionen sowie die ungefähren ökonomischen und technischen Nutzungsdauern der bereits zuvor fokussierten Technologiekomponenten aufgelistet. Da es sich hierbei überwiegend um Technologien handelt, über deren tatsächliche technische Nutzungsdauer noch keine Erfahrungswerte vorliegen, handelt es sich hierbei um Schätzungen. Die reale Nutzungsdauer eines Hochofens liegt beispielsweise in etwa zwischen 40 und 50 Jahren (Arens et al. 2016), die eines Zementofens zwischen 30 und 50 Jahren, wobei nach 20 bis 30 Jahren die Originalkomponenten in der Regel ausgetauscht werden (CEMBUREAU 2013).

Tab. 4-29 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologiekomponenten der Eisen- und Stahlherstellung

Variable	Einheit	Wert
Hisarna (Demonstrator auf industriellem Maßstab)		
Geschätzte ökonomische / technische Nutzungsdauer	Jahre	10 / > 20
Spezifische Investition	Mio. €/Demonstrator	300-350
Gas Direktreduktion (nur DRI)		
Geschätzte ökonomische / technische Nutzungsdauer	Jahre	20
Spezifische Investition	Mio. €/(Mt/a)	230

Quelle: Ghenda (2017) (Hisarna) und Eurofer (2013) (DRI)

Derzeit können die Investitionen einer H₂-DRI nicht exakt beziffert werden. Da diese jedoch weitestgehend auf der gleichen Technologie wie die Erdgas-DRI beruhen wird, wurden zur Näherung hierzu deren Kosten angegeben.

Tab. 4-30 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologiekomponenten der Zementherstellung

Variable	Einheit	Wert
Black liquor gasification		
Geschätzte ökonomische / technische Nutzungsdauer	Jahre	10 / > 20
Differenzkosten zum Standardverfahren	€/t	440
Chem. Fasermodifikation		
Geschätzte ökonomische / technische Nutzungsdauer	Jahre	10 / > 20
Differenzkosten zum Standardverfahren	€/t	4,1

Quelle: Fleiter et al. (2012)

Tab. 4-31 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologiekomponenten der Papierherstellung

Variable	Einheit	Wert
Low-carbon Zement		
Geschätzte ökonomische / technische Nutzungsdauer	Jahre	k. A.
Spezifische Investition	Mio. €/(Mt/a)	k. A.
Oxyfuel		
Geschätzte ökonomische / technische Nutzungsdauer	Jahre	10 / 20 - 30
Spezifische Investition	Mio. €/(Mt./a)	330-360 100 (Retrofitting)

Quelle Investitionen: CEMBUREAU (2013)

4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Die Bewertung der Abhängigkeit von Infrastrukturen ist im Falle der energieeffizienten Prozesstechnologien aufgrund der bereits erwähnten großen Heterogenität sehr stark abhängig von der betrachteten Technologiekomponente und ist für die energieeffizienten Prozesstechnologien nur schwer verallgemeinerbar und abhängig von dem Ausmaß der ergriffenen Effizienzmaßnahme. Handelt es sich beispielsweise nur um eine inkrementelle Optimierung, ist kein Ausbau notwendig.

Prinzipiell ist die Nutzung von energieeffizienten Prozesstechnologien nicht unabhängig von Infrastruktur möglich. Der Betrieb dieser Prozesse erfordert stets das Vorhandensein einer entsprechenden Energieversorgung oder auch einer Produktionsanlage, in die sie implementiert werden kann. Diese Implementierung ist im Fall der chemischen Fasermodifikation und bedingt auch noch beim Black liquor Verfahren ohne Ausbau der Infrastruktur möglich. Eine Umstellung der derzeitigen Primärstahlerzeugung auf Hisarna dürfte ebenfalls mit keinen großen Änderungen der Infrastruktur machbar sein. Zu berücksichtigen wäre hierbei jedoch im Falle einer Kombination mit CCS die Schaffung einer Möglichkeit zur Speicherung oder dem Transport des abgeschiedenen CO₂. Eine solche Möglichkeit müsste ebenfalls für die Verwendung des Oxyfuel-Verfahrens geschaffen werden. Würde im Fall der Stahlerzeugung jedoch eine Umstellung auf die wasserstoffbasierte DRI erfolgen, wäre dies mit großen Auswirkungen verbunden, da eine entsprechende Infrastruktur geschaffen werden muss, um den Prozess mit ausreichenden Mengen an Wasserstoff und auch Strom zu versorgen.

4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

Rückwirkungen beschreiben die eher negativ konnotierten Auswirkungen auf benachbarte Systeme. Insgesamt dürften diese negativen Rückwirkungen durch die Nutzung energieeffizienter Prozesstechnologien auf benachbarte Technologien eher gering sein und sich in erster Linie durch eine Verminderung des Strom- und Brenn-

stoffbedarfs ergeben. Diese müssen entsprechend auf der Verteilnetzebene berücksichtigt werden. Neben diesem übergeordneten Trend kann es jedoch auch auf Standortebene zu einem starken Anstieg des Strombedarfs durch den steigenden Anteil von Elektrostahl kommen oder etwa falls bei der H₂-DRI die Elektrolyse direkt in großem Maße vor Ort betrieben würde. Aufgrund der diskontinuierlichen Prozessführung kommt es dadurch ebenfalls zu Rückwirkungen auf das Lastmanagement sowie die Abwärmenutzung. Zudem stellt die Nutzung von CCS eine Konfliktsituation dar; das abgeschiedene CO₂ muss an geeigneter Stelle gespeichert werden und steht somit in Konkurrenz um diese Kapazitäten mit anderen Technologiefeldern. Der große Wasserstoffbedarf bei der H₂-DRI steht ebenfalls in Konkurrenz mit der Verwendung etwa im Stromverkehr.

Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf

Die Anpassungsbedarfe bezeichnen den Umfang an Änderungen, der bei angrenzenden Systemen aufgrund von energieeffizienten Prozesstechnologien erforderlich ist. Diese dürften auf übergeordneter Ebene eher minimal sein. Lokal und regional kann es durch die Schaffung der benötigten Infrastruktur (z. B. Schaffung einer Wasserstoffversorgung, Ausbau des Stromnetzes für die Elektrostahlproduktion) jedoch auch zu vergleichsweise größeren Anstrengungen kommen.

Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen

Die Wechselwirkungen umfassen im Vergleich zu den Rückwirkungen sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf angrenzende Systeme. In der Eisen- und Stahlherstellung ergeben sich potenzielle Wechselwirkungen etwa mit dem Power-to-gas-Bereich durch die Nutzung von Biogas und Wasserstoff für die Direktreduktion oder elektrolytische Stahlherstellung. Bei letzterer könnte sich ebenfalls die Möglichkeit bieten einen Sauerstoffüberschuss für die Oxyfuel combustion zu nutzen. Bei der Papierherstellung bietet sich durch das Black liquor-Verfahren die Möglichkeit durch Katalyse Produkte wie DME oder auch Methanol zu erzeugen, die dem Technologiefeld Power-to-fuel/chemicals zuzuordnen sind. Letztlich zeigt sich bei der Zementherstellung sowie auch bei den anderen Technologien die Konfliktsituation um die Verwendung von Biomasse zur Brennstoffsubstitution. Mit Blick auf die Abscheidung von CO₂ könnte auch dessen Nutzung im Sinne von CCU eine Alternative zum CCS darstellen.

Zusammenfassend lässt sich jedoch für die energieeffizienten Prozesstechnologien, insbesondere im Vergleich zu anderen Technologiefeldern, eine relativ hohe Systemkompatibilität postulieren.

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Forschungsprogramme der Bundesregierung zu energieeffizienten Prozesstechnologien sind zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit und Erreichung der Klimaziele für die Industrie von zentraler Bedeutung und sollten auch zukünftig weitergeführt werden.

Auf übergeordneter Ebene betrifft dies aus technologischer Perspektive die Förderung von Forschung und Entwicklung, Pilot- und Demonstrationsanlagen im Bereich der energieeffizienten Produktionsprozesse. Zudem bieten vor dem Hintergrund der aufgezeigten Kapitalintensität und Sensitivität bezüglich der Amortisationszeiten von energieeffizienten Prozesstechnologien finanzielle Anreize (im Rahmen von Fördermaßnahmen, aber auch beispielsweise durch Steuervergünstigungen) einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des wirtschaftlichen Risikos.

Weiterhin bietet der Anreiz zur Implementierung von Energiemanagementsystemen oder Energieaudits eine Möglichkeit, bestehende Einsparmöglichkeiten transparent aufzuzeigen. Diesen kommt große Bedeutung zu, um bestehende Einsparpotenziale aufzuzeigen. Kombiniert mit zinsgünstigen Investitionskrediten könnte es somit gelingen auch energieeffiziente Prozesstechnologien mit längeren Amortisationszeiten attraktiv zu gestalten. Dies betrifft insbesondere kapitalintensive Effizienztechnologien wie bspw. die genannte Black liquor gasification.

Die Förderung von Maßnahmen sollte sich insgesamt auf radikal neue Ansätze von energieeffizienten Prozesstechnologien konzentrieren, dabei jedoch auch weiterhin die inkrementelle Verbesserung der Prozesse nicht aus den Augen verlieren. Der Bedarf für weitere Forschung und Entwicklung im Bereich des industriellen CCS und CCU existiert dabei in allen betrachteten Branchen.

F&E-Empfehlungen für die Eisen- und Stahlherstellung konzentrieren sich zum einen auf die Weiterentwicklung und Demonstration der zuvor in Kapitel 2.1 beschriebenen neuartigen Verfahren: H₂-DRI, Hisarna-Schmelzreduktion und elektrolytische Stahlerzeugung, da diese einen großen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele liefern können. Zum andern bieten nach wie vor Technologien wie das endabmessungsnahe Gießen bei der Walzstahlherstellung oder die Nutzung der Abwärme zur Vorwärmung des Stahlschrotts bei der Elektrostahlherstellung auch weiterhin Forschungspotenzial.

Bei der Papierherstellung besitzen radikale Ansätze wie die wasserlose Papierherstellung ein großes Potenzial und deutlichen Forschungsbedarf. Weiterhin können neue effiziente Trocknungsverfahren und Mahlverfahren weiter erforscht werden. Die Demonstration der Anwendbarkeit von neuen Verfahren wie der chemischen Fasermodifikation stellt ebenfalls einen sinnvollen Ansatzpunkt für F&E-Tätigkeiten dar.

Im Bereich der Zementherstellung besteht F&E-Bedarf in Bezug auf die Verbesserung des Klinker-zu-Zement-Verhältnisses oder der Substitution von Klinkern. Hierbei sollte das Augenmerk auch darauf gelegt werden, dass die gleiche Qualität des Produkts erreicht wird. Die Demonstration der Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit der Low-carbon Zemente zur Steigerung der Marktakzeptanz könnte ebenfalls im Forschungsfokus stehen. F&E-Möglichkeiten im Zusammenhang mit CO₂ stellen bei-

spielsweise das „looping“ zur Steigerung der CO₂-Konzentration dar oder aber auch direkte Nutzung vor Ort zum Beispiel für die Algenzucht.

Insgesamt lässt sich somit festhalten, dass der Forschungsbedarf im Bereich der energieeffizienten Prozesstechnologien nach wie vor hoch ist. Diese Einschätzung wird auch nochmals durch die Ergebnisse der flankierenden Onlineumfrage untermauert, in der der Forschungsbedarf ebenfalls mit eher groß bis groß eingeschätzt wird (ifo Institut 2017).

Literaturverzeichnis

- 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GMBH; Tennet TSO GmbH; TransnetBW GmbH (Hrsg.) (2016): Szenariorahmen für die Netzentwicklungspläne Strom 2050. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber.
- Arens, M.; Worrell, E.; Eichhammer, W.; Hasanbeigi, A.; Zhang, Q. (2016): Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term – the case of Germany. *Journal of Cleaner Production*.
- Bajpai, P. (2014): *Black Liquor Gasification*. Burlington: Elsevier Science. <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1647480>.
- Celitement (2017): Celitement. <http://www.celitement.de/>. Letzter Zugriff: 03.04.2017.
- CEMBUREAU (2013): *The role of CEMENT in the 2050 low carbon economy*. Brüssel.
- CEMBUREAU (2016): *Activity Report 2015*. Brüssel.
- CEPI (2011): *The Forest Fibre Industry. 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy, 2011*.
- CEPI (2015): *Key Statistics 2015. European pulp & paper industry*. Brüssel.
- DLR; Fraunhofer IWES; IfnE (Hrsg.) (2012): *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146*. Stuttgart, Kassel, Teltow.
- Erhard, K.; Arndt, T.; Miletzky, F. (2010): Einsparung von Prozessenergie und Steuerung von Papiereigenschaften durch gezielte chemische Fasermodifizierung. *Eur. J. Wood Prod.* 68 (3) 271–280.
- Eurofer (2013): *A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050*. Brüssel.
- Fleiter, T.; Fehrenbach, D.; Worrell, E.; Eichhammer, W. (2012): Energy efficiency in the German pulp and paper industry? A model-based assessment of saving potentials. *Energy* 40 (1) 84–99.
- Fleiter, T.; Schломann, B.; Eichhammer, W. (2013): *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. Fraunhofer-Verlag.
- Fraunhofer ISE (Hrsg.) (2013): *Energiesystem Deutschland 2050. Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien*.
- Fraunhofer IWES; Fraunhofer IBP; ifeu; Stiftung Umweltenergie recht (Hrsg.) (2015): *Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung*.

Ableitung von optimalen strukturellen Entwicklungspfaden für den Verkehrs- und Wärmesektor.

- Ghenda, J. T. (2017): Finance for Innovation: Towards the ETS Innovation Fund. Workshop 1: Ferrous and Non-ferrous metals, 2017.
- Greenpeace International; Global Wind Energy Council; SolarPowerEurope (Hrsg.) (2015): energy [r]evolution. A Sustainable World Energy Outlook 2015. 100 % Renewable Energy for All.
- Hasanbeigi, A.; Arens, M.; Price, L. (2014): Alternative emerging ironmaking technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction. A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (2014) 645–658.
- Hoening, V. (2017): ECRA's CCS Oxyfuel Project. Finance for Innovation: Towards the ETS Innovation Fund. ECRA. Brüssel, 2017.
- IEA (Hrsg.) (2014): Energy Technology Perspectives 2014. Paris: OECD/IEA.
- IEA (Hrsg.) (2016a): World Energy Outlook 2016. Paris: OECD/IEA.
- IEA (Hrsg.) (2016b): Energy Technology Perspectives 2016. Towards Sustainable Urban Energy Systems. Paris: OECD/IEA.
- IEA Bioenergy (2007): Black Liquor Gasification. Summary and Conclusions from the IEA Bioenergy ExCo54 Workshop. Rotorua, Neuseeland.
- ifo Institut (2017): Auswertung der online-Umfrage unter den BMWi-Forschungsnetzwerken. Teilbereich TF_Energiewende. München.
- ISI; Consentec GmbH; IFEU; TU Wien; M-Five; TEP Energy GmbH (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Referenzszenario und Basisszenario. Karlsruhe.
- Lemken, T.; Liedtke, C.; Bienge, K.; Salzer, C. (2008): Stahl – ein Werkstoff mit Innovationspotenzial. Wuppertal.
- Limbers, J. (2016): Volkswirtschaftliche Folgen einer Schwächung der Stahlindustrie in Deutschland, 2016.
- NETL (Hg.) (o. A.): Black Liquor Gasification. National Energy Technology Laboratory. <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/blackliquor>. Letzter Zugriff: 20.06.2017.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (Hrsg.) (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Pardo, N.; Moya, J. A. (2013): Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the European iron & steel industry. *Energy* 54 (2013) 113–128.
- Prognos; EWI; GWS (Hrsg.) (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Endbericht. Projekt Nr. 72/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.
- Repenning, J.; Matthes, F. C.; Blank, R.; Emele, L.; Döring, U.; Förster, H. (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. In Öko-Institut e. V. Berlin (Hrsg.): Modellier-

- ungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Rohde, C. (2016): Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2015 mit Aktualisierungen der Anwendungsbilanzen der Jahre 2009 bis 2012. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe.
- Sintef (2017): CEMCAP. <https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/>. Letzter Zugriff: 07.04.2017.
- Statistisches Bundesamt (2017): Survey of investments in manufacturing, mining. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=42231-0001&zeitscheiben=3&language=en>.
- UBA (Hrsg.) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2015. Umweltbundesamt (Für Mensch & Umwelt).
- UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau.
- UBA (2017): Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015. Dessau-Roßlau.
- Ulcoss (Hg.) (2017): Überblick. http://www.ulcoss.org/de/about_ulcoss/home.php. Letzter Zugriff: 14.04.2017.
- Van der Meer, Rob (2017): CCS and CCU in cement industry Some projects. Heidelberg Cement. Brüssel, 2017.
- VDP (2016): Aktuelle Statistik. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. <https://www.vdp-online.de/industrie/statistik.html>
- VDP (2017a): Kennzahlen deutscher Zellstoff- und Papierfabriken. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. Bonn, 2017.
- VDP (2017b): Papier Kompass 2017. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. Bonn, 2017.
- VDZ (2016a): Tätigkeitsbericht 2012 -2015. Verein Deutscher Zementwerke. Düsseldorf.
- VDZ (2016b): Zementindustrie im Überblick 2016/2017. Verein Deutscher Zementwerke.
- VDZ (2017): Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung. Verein Deutscher Zementwerke.
- Weigel, M.; Fishedick, M.; Marzinkowski, J.; Winzer, P. (2016): Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies. *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 1064–1076.
- Wietschel, Martin; Arens, Marlene; Dötsch, Christian; Herkel, Sebastian; Krewitt, Wolfram; Markewitz, Peter; Möst, Dominik; Scheufen, Martin (2010): Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. ISI-Schriftenreihe Innovationspotentiale. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. <https://www.energietechnologien2050.de>

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2015): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. Düsseldorf.

World Energy Council (Hrsg.) (2016): World Energy Scenarios 2016. The Grand Transition.

Worldsteel Association (2017): Steel Statistical Yearbook 2016. Brüssel.