

Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren

Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als
Reduktionsmittel

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

im

**Fachbereich D – Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,
Sicherheitstechnik**

der

Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von

Dipl.-Phys. Max Weigel

aus Münster

Wuppertal, November 2014

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20150310-122418-6

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20150310-122418-6>]

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von November 2012 bis November 2014
auf Anregung von

Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick
und
Herrn Prof. Dr. Joachim M. Marzinkowski

in einer Zusammenarbeit des **Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie** und
der **Bergischen Universität Wuppertal**.

Danksagung

Für die großartige Betreuung dieser externen Promotion und viele anregende Diskussionen bedanke ich mich sehr bei Prof. Dr. Manfred Fishedick vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Prof. Dr. Joachim Marzinkowski und Prof. Dr. Petra Winzer von der Bergischen Universität Wuppertal.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie für den fachlichen Austausch und die offene und freundschaftliche Atmosphäre bedanken.

Für das intensive Korrekturlesen und das hilfreiche Feedback zur finalen Fassung der Arbeit möchte ich Patrick Mexner, meiner Mutter Jutta Ziehm-Weigel und meiner Frau Elena Jungk danken.

Zudem gilt allen hier nicht namentlich erwähnten Unterstützern dieser Arbeit mein herzlicher Dank.

Sylt im November 2014

Max Weigel

Vorwort

„Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“

Jules Verne 1870

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Zusammenfassung	13
2 Einleitung	16
2.1 Ziele dieser Arbeit	18
2.2 Methodisches Vorgehen	19
2.3 Aufbau der Arbeit	20
3 Stahlindustrie im Wandel	23
3.1 Stahlindustrie in Deutschland	23
3.2 Konventionelle primäre Stahlherstellungsverfahren	26
3.2.1 Hochofenroute	26
3.2.2 Elektrostahlverfahren	28
3.2.3 Direktreduktion mit Erdgas oder Kohle	30
3.2.4 Schmelzreduktion	32
3.3 Innovative primäre Stahlherstellungsverfahren	33
3.3.1 Verbesserte Hochofenroute	33
3.3.2 Kohlendioxid-Abscheidung und -Lagerung (CCS)	35
3.3.3 Direktreduktion mit Wasserstoff	36
3.3.4 Direktreduktion mit Methan	37
3.3.5 Wasserstoff Suspensionsreduktion	38
3.3.6 Eisenerzelektrolyse	39
3.3.7 Hochofenroute mit Biomasse	39
3.4 Literaturscreening Stahlherstellungsverfahren	42
3.4.1 Berücksichtigung und Bewertung konventioneller Verfahren	43
3.4.2 Berücksichtigung und Bewertung innovativer Verfahren	43
3.5 Ableitung des Untersuchungsgegenstandes	47
4 Technologiescreening Wasserstoff	49

4.1	Rolle und Anwendungsbereiche von Wasserstoff.....	50
4.1.1	Wertschöpfungskette von Wasserstoff	50
4.1.2	Branchenübergreifende Wasserstoffwirtschaft	52
4.2	Bewertung von Technologien und Funktionen von Wasserstoff	53
4.2.1	Methodik Technologiescreening Wasserstoff	54
4.2.2	Ergebnisse	58
5	Techno-ökonomischer Verfahrensvergleich primärer Stahlherstellung	67
5.1	Modellentwicklung	67
5.1.1	Systemgrenzen.....	67
5.1.2	Zeitlich konstante Annahmen	69
5.2	Verfahrensmodellierung.....	71
5.2.1	Hochofenroute (BF-BOF).....	71
5.2.2	Hochofenroute mit CCS (BF-CCS).....	74
5.2.3	Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR).....	75
5.2.4	Eisenerzelektrolyse (EW)	77
5.3	Methodik der Szenarioanalyse	78
5.3.1	Methodenüberblick der Zukunftsforschung.....	78
5.3.2	Methodenauswahl	80
5.4	Szenarioentwicklung.....	81
5.4.1	Konservatives Szenario	81
5.4.2	Moderates Szenario	82
5.4.3	Ambitioniertes Szenario.....	82
5.4.4	Projektionen einzelner Annahmen	82
5.5	Ergebnisse	90
5.5.1	Masse- und Energiebilanzen	91
5.5.2	Szenarioanalyse	94
5.5.3	Technologievergleich	97
5.5.4	Sensitivitätsanalyse.....	101
5.6	Diskussion	107
6	Multi-kriterielle Analyse ausgewählter Stahlherstellungsverfahren	110
6.1	Methodische Herleitung	110
6.1.1	Methodenanforderung	110

6.1.2	Methodenbeschreibung	110
6.1.3	Entwicklung Kriterienkatalog	111
6.2	Ganzheitliche Bewertung der ausgewählten Herstellungsverfahren	112
6.2.1	Kategorie Technologie	113
6.2.2	Kategorie Gesellschaft & Politik	117
6.2.3	Kategorie Ökonomie	119
6.2.4	Kategorie Sicherheit und Verletzlichkeit	121
6.2.5	Kategorie Ökologie	125
6.3	Gewichtung	126
6.4	Ergebnisse	128
6.4.1	Gleichverteilte Gewichtung	128
6.4.2	Beispielhafte Gewichtungsperspektiven	130
6.5	Diskussion	131
6.5.1	Zwischenfazit Bewertungsmethode	131
6.5.2	Ganzheitliche Bewertung	132
6.5.3	Implikationen	133
6.5.4	Einschränkungen	133
7	Standortabhängige Bewertung primärer Stahlherstellungsverfahren	135
7.1	Standortabhängige Modellannahmen	136
7.2	Standortabhängige Modellergebnisse	140
7.3	Standortabhängige MCA	144
7.4	Quo vadis Stahlindustrie?	152
8	Exkurse	153
8.1	Alternativverfahren Methan-Direktreduktion	153
8.2	Alternativmaterialien für Stahl	154
9	Fazit	158
10	Anhang	161
A.	Modellparameter	161
B.	Masse- und Energiebilanzen	166
C.	MCA	168
11	Literatur	169

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Ganzheitliche Bewertung zukünftiger primärer Stahlherstellungsverfahren in drei Schritten.....	20
Abbildung 3-1: Weltweite Stahlherstellung 2012 nach Verfahren basierend auf Daten von (World Steel Association 2013a) und (Midrex 2013).....	24
Abbildung 3-2: Übersicht Eisen- und Stahlherstellungsverfahren	25
Abbildung 3-3: Konventionelle primäre Stahlherstellungsverfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an Wörtler et al. 2013, S. 7).....	26
Abbildung 3-4: Energie- und Massenbilanz BAT Hochofenroute nach (Remus et al. 2013).....	28
Abbildung 3-5: Energie- und Massenbilanz Elektrostahlroute, BAT für EU-25; Quelle: (Remus et al. 2013, S. 429), (European Commission (JRC) 2010).....	29
Abbildung 3-6: Energie- und Massenbilanz Direktreduktion am Beispiel Midrex Technologie, BAT für EU-25; Quelle: (Remus et al. 2013, S. 429), (European Commission (JRC) 2010) und (Midrex Technologies 2014b).....	32
Abbildung 4-1: Wasserstoff Wertschöpfungskette mit beispielhaften Technologieanwendungen.....	50
Abbildung 4-2: Funktionen als "Übersetzungssystem"	56
Abbildung 4-3: Gesamtübersicht H ₂ -Technologien aus Wasserstoff Technologiescreening	59
Abbildung 4-4: Top 10 der heutigen und zukünftigen Wasserstoff-Querschnittstechnologien nach branchenübergreifender Anwendungshäufigkeit	60
Abbildung 4-5: Top 10 der heutigen und zukünftigen Wasserstoff Querschnittsfunktionen nach branchenübergreifender Häufigkeit	61
Abbildung 4-6: Auswertung Technologierelevanz von H ₂ -Herstellungstechnologien	63
Abbildung 4-7: Auswertung Technologierelevanz von H ₂ -Zwischentechnologien	64
Abbildung 4-8: Auswertung Technologierelevanz von H ₂ -Anwendungstechnologien	65
Abbildung 4-9: Auswertung Anzahl an aktuellen und zukünftigen H ₂ -Technologien pro Wirtschaftszweig.....	66
Abbildung 5-1: Systemgrenze für Stahlherstellungsmodelle einschließlich Berücksichtigung indirekter Effekte (Eigene Abbildung in Anlehnung an Wörtler et al. 2013).....	68
Abbildung 5-2: Energie- und Materialfluss Hochofenroute (BF-BOF)	71
Abbildung 5-3: Energie- und Materialfluss Hochofenroute mit CCS (BF-CCS)	74
Abbildung 5-4: Energie- und Materialfluss Herstellungsrouten Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR) ...	76
Abbildung 5-5: Energie- und Materialfluss Herstellungsrouten Eisenerzelektrolyse (EW).....	77
Abbildung 5-6: Szenarioabhängige Strompreisentwicklung und anschauliche Herleitung des Gesamtpreises aus fossilem und erneuerbarem Strompreis am Beispiel des <i>konservativen</i> Szenarios.....	86
Abbildung 5-7: Dimensionen der Szenarioanalyse.....	91
Abbildung 5-8: Vergleich zeitunabhängiger Ergebnisse (konstant in allen Szenarien)	93
Abbildung 5-9: Szenarioanalyse im <i>konservativen</i> Szenario (Zeitspanne vor Marktreife ist ausgegraut)	95
Abbildung 5-10: Szenarioanalyse im <i>moderaten</i> Szenario (Zeitspanne vor Marktreife ist ausgegraut).....	95
Abbildung 5-11: Szenarioanalyse im <i>ambitionierten</i> Szenario (Zeitspanne vor Marktreife ist ausgegraut)	96
Abbildung 5-12: Wirtschaftlicher NPV Vergleich der Herstellungsverfahren im <i>moderaten</i> Szenario.	99
Abbildung 5-13: Vergleich CO ₂ -Emissionen der untersuchten Herstellungsverfahren.....	100

Abbildung 5-14: Sensitivitätsanalyse CO ₂ -Preis	102
Abbildung 5-15: Sensitivitätsanalyse Emissionsfaktor Stromnetz im <i>ambitionierten</i> Szenario in 2050	103
Abbildung 5-16: Varianten der Industriekunden-Strompreisprojektionen für Sensitivitätsanalyse ..	104
Abbildung 5-17: Sensitivitätsanalyse Industriekunden-Strompreis	105
Abbildung 6-1: Beispielhafte Gewichtung von Akteuren mit unterschiedlichen Perspektiven	127
Abbildung 6-2: Multi-kriterielle Bewertung der ausgewählten Stahlherstellungsverfahren (gleichmäßige Gewichtung)	129
Abbildung 6-3: Vergleich der Auswirkung beispielhafter Gewichtungen auf ganzheitlich Bewertung	131
Abbildung 7-1: Verfahrenvergleich der Profitabilität (NPV) an drei Beispielstandorten	141
Abbildung 7-2: Verfahrenvergleich der CO ₂ -Emission an drei Beispielstandorten	143
Abbildung 7-3: Änderung der standortabhängigen MCA Bewertung (nur Kriterien mit Änderung gegenüber Ausgangsmodell am Standort NRW)	145
Abbildung 7-4: MCA Ergebnisse am Standort FRI	149
Abbildung 7-5: MCA Ergebnisse am Standort BRA.....	150
Abbildung 7-6: MCA Ergebnisse am Standort CHN	150
Abbildung 7-7: MCA Standort-Direktvergleich.....	151
Abbildung 8-1: Hauptanwendungsgebiete von Stahl weltweit (Datenbasis aus Allwood und Cullen 2012, S. 30–31, World Steel Association 2014)	155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Kurzübersicht Verfahrensvergleich Stahlherstellung	41
Tabelle 5-1: Zeitlich konstante Grundannahmen identisch für alle Modelle.....	70
Tabelle 5-2: Szenarioabhängige Annahmen (in grauer Schriftfarbe Annahmen, die sich zwischen den Szenarien nicht ändern)	89
Tabelle 6-1: Kriterienkatalog für multi-kriterielle Analyse (Details siehe Abschnitt 6.2).....	112
Tabelle 6-2: Bewertung von Brand- und Explosionsgefahren und Gesundheitsgefahren basierend auf Spaltenmodell nach (Smola 2001)	124
Tabelle 7-1: Änderung zeitlich konstanter Modellannahmen.....	138
Tabelle 7-2: Änderung zeitabhängiger Modellannahmen	139

Tabellenverzeichnis (Anhang)

Tab-A 1: Zeitlich konstante Annahmen Hochofenroute	161
Tab-A 2: Zusätzliche Annahmen Hochofenroute mit CCS (BF-CCS)	163
Tab-A 3: Zeitlich konstante Annahmen Herstellungsrouten Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR)	163
Tab-A 4: Zeitlich konstante Annahmen Herstellungsrouten Eisenerzelektrolyse (EW)	165
Tab-A 5: Ergebnisse Material- und Energiefluss Hochofen (Bezugsgröße 1 Tonne Rohstahl).....	166
Tab-A 6: Ergebnisse Material- und Energiefluss Hochofen mit CCS (Bezugsgröße 1 Tonne Rohstahl)	166
Tab-A 7: Ergebnisse Material- und Energiefluss Wasserstoff-Direktreduktion (Bezugsgröße 1 Tonne Rohstahl)	167
Tab-A 8: Ergebnisse Material- und Energiefluss Eisenerzelektrolyse (Bezugsgröße 1 Tonne Rohstahl)	167
Tab-A 9: Bewertung und Gewichtung der vier ausgewählten Stahlherstellungsverfahren.....	168

Abkürzungsverzeichnis

AFC	Alcaline Fuel Cell (Alkalische Brennstoffzelle)
BAT	Best Available Technology (beste verfügbare Technologie)
BF	Blast Furnace (Hochofen)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BOF	Basic Oxygen Furnace (LD-Konverter oder Oxygenkonverter)
BRIC-Staaten	Brasilien, Russland, Indien, China (Schwellenländer mit starkem Wirtschaftswachstum)
CAGR	Compound Annual Growth Rate (durchschnittliche jährliche Wachstumsrate)
CAPEX	Capital Expenditure (Investitionskosten)
CCS	Carbon Capture and Storage (Kohlenstoff-Abscheidung und –Speicherung)
CO	Kohlenstoffmonoxid (Gas)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid (Gas)
COP 21	21st Conference of the Parties on Climate Change (Klimakonferenz 2015 in Paris)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRI	Direct Reduced Iron (Eisenschwamm)
EAF	Electric Arc Furnace (Lichtbogenofen)
EBIT	Earnings Before Interest and Taxes (operatives Ergebnis)
EE	Erneuerbare Energien
EF	Emissionsfaktor des Stromnetzes (spezifische CO ₂ -Emission pro MWh Netzstrom)
EU	Europäische Union
EW	Electrowinning (Eisenerzelektrolyse)
GAU	Größter Anzunehmender Unfall
HBI	Hot Briquetted Iron (briquettierter und transportfähiger Eisenschwamm)
H-DR	Hydrogen Direct Reduction (Wasserstoff-Direktreduktion)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
J-I-T	Just In Time (zeitgenaue Lieferung, ohne Zwischenlagerung)
LKW	Lastkraftwagen
MCA	Multi-kriterielle Analyse (Methode der Verfahrensbewertung aus Abschnitt 6)
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat Brennstoffzelle)
NPV	Net Present Value (Kapitalwert)
NRW	Nordrhein Westfalen
OPEX	OPerational EXpenditure (Betriebskosten)
PCI	Pulverised Coal Injection (Kohlenstaubeinblasen)
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Polymerelektrolytbrennstoffzelle)
PKW	Personenkraftwagen
PSA	Pressure Swing Adsorption (Druckwechsel-Adsorption)
RS	Rohstahl (Rohform von Stahl beim Verlassen des Lichtbogenofens oder

	Oxygenkonverters)
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Festoxid Brennstoffzelle)
TGR	Top Gas Recycling (Gichtgasrezirkulierung)
THG	Treibhausgas (klimaaktives Gas)
ULCOS	Ultra-Low CO2 Steelmaking (europ. Stahl-Forschungsinitiative)

1 Zusammenfassung

Die deutsche Stahlindustrie, die einen wesentlichen Anteil am industriellen Aufschwung des vergangenen Jahrhunderts hatte, steht bei konsequenter Umsetzung der von der Bundesregierung geplanten Energietransformation vor großen Herausforderungen. Veränderte Umweltauflagen und das Einpreisen von CO₂-Kosten, sind dafür nur zwei Beispiele. Reaktionsmöglichkeiten bestehen für die Stahlindustrie kurzfristig durch die konsequente Ausschöpfung der noch bestehenden Energieeffizienzpotentiale und mittel- bis langfristig durch die Entwicklung und Einführung innovativer emissionsarmer Technologien. Diese Maßnahmen müssen politisch und wirtschaftlich flankiert werden um eine Abwanderung der Stahlindustrie in das weniger regulierte Ausland zu verhindern. Dabei besteht vor allem die Gefahr der Abwanderung in Länder mit hohem eigenem Rohstoffvorkommen. Ein solches Abwandern würde nicht nur schwerwiegende Effekte für die gesamte Industrie- und Arbeitsmarktsituation in Deutschland haben, sondern vermutlich auch eher zu einer Steigerung der weltweiten CO₂-Emissionen führen (Carbon-Leakage) und damit den Klimaschutzziele der Bundesregierung zuwider laufen.

Die vorliegende Arbeit soll mithilfe einer ganzheitlichen Technologiebewertung erste Aufschlüsse über technologische Entwicklungsmöglichkeiten in der primären Stahlherstellung aufzeigen und vor dem Hintergrund der Transformation der deutschen Energielandschaft bewerten. Durch eine neuartige dreischrittige Bewertungsmethode wurde neben klassischen technischen und betriebswirtschaftlichen Entscheidungskriterien eine Vielzahl weiterer Aspekte mit berücksichtigt und so eine ganzheitliche Beurteilung verschiedener technologischer Alternativen ermöglicht. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Rolle der Wasserstoff-Direktreduktion unter der Voraussetzung einer branchenübergreifenden Wasserstoffanwendung gelegt.

Das Ziel der Arbeit besteht darin, Industrie, Politik und Nichtregierungsorganisationen eine ganzheitliche Bewertung als Grundlage für eine kritische Einordnung der Wasserstoff-Direktreduktion, als zukünftigem Stahlherstellungsverfahren im Vergleich zu weiteren aktuellen und zukünftigen Verfahren, an die Hand zu geben.

Für einen ersten Überblick wurde in der vorliegenden Arbeit im deskriptiven Teil zunächst eine Bestandsaufnahme von etablierten und innovativen Stahlherstellungsverfahren durchgeführt, um eine begründete Auswahl an Verfahren für die anschließende Bewertung und Beurteilung zu treffen. Die folgenden Verfahren wurden für die weitere Untersuchung ausgewählt:

- 1) Konventionelle Hochofenroute (BF-BOF)
- 2) Konventionelle Hochofenroute mit Kohlenstoffabscheidung (BF-CCS)
- 3) Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR)
- 4) Eisenerzelektrolyse (EW)

Zum branchenübergreifenden Verständnis wurde zudem ein Screening von Wasserstofftechnologien durchgeführt, um zukünftige Synergiepotenziale zu identifizieren. Gerade unter der Voraussetzung einer branchenübergreifenden Wasserstoffwirt-

schaft konnten vielfältige Synergiepotenziale identifiziert werden, insbesondere mit anderen energieintensiven Industrien, dem Transportsektor und der Energiebranche.

Im ersten und zweiten Bewertungsschritt wurden die Wertschöpfungsketten der zu untersuchenden Stahlherstellungsverfahren am Standort Nordrhein Westfalen vor dem Hintergrund verschiedener Szenarien der Gesamtsystementwicklung über den Betrachtungszeitraum 2010 – 2070 modelliert. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Erfassung der zwangsläufig bestehenden Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung relevanter Variablen. Die techno-ökonomische Analyse der Simulationsergebnisse verdeutlichte, dass je nach Verlauf der Energiewende in Deutschland zwischen 2030 und 2050 die Wasserstoff-Direktreduktion das profitabelste und CO₂-ärmste Herstellungsverfahren im Verfahrenvergleich werden könnte. Je schneller die Energietransformation durch konsequente politische Maßnahmen vorangetrieben wird, desto schneller würde die konventionelle Hochofenroute an Attraktivität verlieren während neue Verfahren in den Markt eintreten könnten und noch vor 2050 einen signifikanten Beitrag zur Emissionsreduktion der Stahlindustrie leisten könnten. Die Eisenerzelektrolyse, das potenziell rohstoff- und energieeffizienteste Verfahren ist im Vergleich zur Wasserstoff-Direktreduktion stark abhängig vom resultierenden Industriekunden-Strompreis. Kritisch ist hier die Frage, ob und wann ein Erreichen der technischen Marktreife erwartet werden kann. Bei Verfügbarkeit von, in Zukunft auf erneuerbaren Energien basierendem Netzstrom zu günstigen Preisen und etablierter Technik, wäre die Eisenerzelektrolyse das Verfahren der Wahl.

Zusätzlich zur Betrachtung techno-ökonomischer Faktoren wurden im dritten Bewertungsschritt, der multi-kriteriellen Analyse (MCA), die vier Stahlherstellungsverfahren ganzheitlich bewertet. Neben technologischen und ökonomischen wurden auch gesellschaftliche, umweltpolitische und sicherheitsrelevante Kriterien in die Bewertung integriert. Aus einer ganzheitlichen Bewertungsperspektive verstärkte sich die Attraktivität der innovativen Verfahren nochmals. Nicht nur die langfristige Profitabilität und minimale Emissionen, sondern auch die möglichen positiven Einflüsse auf den Wirtschaftsstandort Deutschland und die höhere Rohstoff-Versorgungssicherheit führten zu einer hohen Bewertung der Eisenerzelektrolyse und vor allem der Wasserstoff-Direktreduktion. Wie schon das Wasserstofftechnologie-Screening vermuten ließ, könnte mit der wasserstoffbasierten Stahlherstellung zukünftig ein sehr hohes branchenübergreifendes Synergiepotenzial realisiert werden, sofern es zur Etablierung einer übergreifenden Wasserstoffwirtschaft käme. Die Hochofenroute in Kombination mit Kohlenstoffabscheidung (CCS: carbon capture and storage) würde aus wirtschaftlicher Sicht je nach Kostenentwicklung der CCS-Technologie die profitable Laufzeit des Hochofens verlängern, erhielt aber aufgrund ungeklärter Sicherheitsrisiken, Umweltbelastungen und Akzeptanzproblemen in der MCA die geringste Bewertung. Die Ergebnisse der MCA waren dabei sehr robust. Die Verwendung von drei unterschiedlichen Verteilungen von Gewichtungsfaktoren, die generisch die Perspektiven von drei beispielhaften Akteuren (Industrie, Politik, Umweltorganisation) abbildeten, zeigte übereinstimmend die grundsätzliche Präferenz für die Wasserstoff-Direktreduktion. Die verwendete dreischrittige Bewertung erschien zweckmäßig, um

eine möglichst ganzheitliche Einschätzung zukünftiger Stahlherstellungsverfahren zu gewährleisten.

Im Rahmen von Anwendungsbeispielen wurde die ganzheitliche Verfahrensbewertung auf drei Beispielstandorte angewendet: Friesland in Deutschland, Minas Gerais in Brasilien und Guangdong in China. Im Mittelpunkt stand hier die theoretische Frage nach der Attraktivität von Neubauvorhaben basierend auf den untersuchten Technologien und nicht die Nutzung bestehender Standorte, Anlagen und Infrastrukturen. In der ersten Jahrhunderthälfte, in der die innovativen Herstellungsverfahren in Deutschland voraussichtlich noch nicht wirtschaftlich sein werden, erschienen die außereuropäischen Standorte attraktiver: China durch günstige inländische Kohlever-sorgung und weniger strenge Umweltauflagen, Brasilien durch CO₂-armen Netzstrom und eine günstige und gesicherte inländische Erzversorgung. In der zweiten Jahrhunderthälfte würden die innovativen Verfahren in Deutschland, bei einer weitgehend umgesetzten Energiewende, profitabler und könnten so langfristig die Attraktivität des Standortes Deutschland sichern.

Die vorliegende Arbeit zeigt somit Möglichkeiten auf, wie eine der CO₂-intensivsten Branchen in Deutschland nicht nur einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten könnte, sondern sich auch durch technologische Innovation am Standort Deutschland im internationalen Wettbewerb behaupten könnte. Voraussetzung hierfür sind konsequente und nach Möglichkeit international abgestimmte Klima- und Umweltschutzmaßnahmen, sowie stabile und verlässliche politische Rahmenbedingungen, damit frühzeitig die notwendigen Entscheidungen hin zu einer CO₂-ärmeren Stahlindustrie getroffen werden können. Im Anbetracht der Dringlichkeit des Klimaschutzes müssen politische Regulierungen mit geeigneten Fördermaßnahmen Hand in Hand gehen. Eine schnelle Umsetzung kann nur gelingen, wenn die hohe Investitionslast für klimafreundliche Technologien verteilt wird und so die Belastung für den einzelnen Betreiber nicht zu hoch wird.

2 Einleitung

In nur 100 Jahren hat die Industrialisierung dazu geführt, dass für jeden Menschen auf dieser Erde jedes Jahr mehr als das 10-fache seines Körpergewichts an Zement, Stahl, Aluminium, Plastik und Papier produziert wird (Allwood und Cullen 2012, S. 4). Dieser Ressourcen hunger hat, neben anderen Effekten, vor allem eine globale Klimaerwärmung zur Folge und stellt damit eine der größten Herausforderungen für die Menschheit dar.

Seit dem vorindustriellen Zeitalter ist die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre stetig angestiegen, von 285 ppm¹ in 1850 (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014b, S. 27) auf ein Rekordhoch von 400 ppm im Mai 2013 (Birol et al. 2013, S. 11). Diese menschlich verursachte hohe Konzentration an klimaktiven Gasen führt durch Abschirmung der Wärmestrahlung der Erdoberfläche zu einer Erwärmung des globalen Klimas, mit verheerenden Folgen (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2007a, S. 18). Die Zunahme der Kohlenstoffdioxid (CO₂) Konzentration wird primär durch die Verbrennung fossiler Energieträger verursacht. Die Zunahme der Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O) Konzentration wird hauptsächlich durch die Land- und Forstwirtschaft verursacht (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2007b, S. 2). Um die globale Erwärmung mit einer 50%igen Wahrscheinlichkeit unter 2°C zu halten und so die schlimmsten Folgen zu vermeiden, gelten 450 ppm als maximale Konzentration. Diese wäre bei heutigen Emissionsintensitäten in ungefähr 30 Jahren erreicht (World Meteorological Organization 2013, S. 2).

Weltweit sind deshalb konsequente Klimaschutzmaßnahmen notwendig, um die stetig wachsende Treibhausgas-Emission (THG-Emission) möglichst schnell auf ein Minimum zu reduzieren. Für westliche Industrieländer empfiehlt der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) eine Reduktion der Treibhausgas Emission um 80-95% bis 2050 (Europäische Kommission 2011, S. 3). Bis zum Ende des Jahrhunderts sollte die weltweite THG-Emission auf nahezu Null reduziert werden, um schwerwiegende Folgen einer Klimaerwärmung zu vermeiden (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014b, S. 15). Auch die Bundesregierung hat in ihrem Energiekonzept von 2010 (BMU 2010) entsprechende Ziele formuliert. Hauptbestandteile darin sind Erneuerbare Energien, Energieeffizienz und technologische Innovation. Alle gesellschaftlichen Bereiche wie auch die Industrie müssen ihren Beitrag zu dieser Zielerreichung leisten.

Die Eisen- und Stahlindustrie ist in Deutschland verantwortlich für knapp 8% des deutschen Endenergiebedarfs (707 PJ von 8995 PJ)² und 4% der Treibhausgas-Emissionen (THG) (41Mt von 1022 Mt CO₂)³. Als einer der größten Energiekonsumenten ist sie deshalb aufgefordert Maßnahmen für eine CO₂-Reduktion zu entwickeln. (Europäische Kommission 2011, S. 7) Auch wenn derzeit keine national verbindlichen Reduktionsziele auf Branchenebene bestehen, empfiehlt der europäische Fahrplan

¹ ppm = parts per million

² Statistisches Bundesamt 2014

³ Statistisches Bundesamt 2013

für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050 (Europäische Kommission 2011, S. 6) eine 80%ige Emissionsreduktion für die europäische Industrie.

Im aktuellen IPCC Bericht (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014a, S. 1132–1134) werden für die Eisen- und Stahlindustrie vier Hauptmaßnahmen zur THG-Reduktion erarbeitet: Energieeffizienz, Emissionseffizienz, Materialeffizienz und Produkt-Nutzungseffizienz, die zu einem Nachfragerückgang führt.

Trotz Stagnation der Stahlnachfrage in einigen westlichen Märkten innerhalb des aktuellen Jahrhunderts, wird weltweit nicht mit einer sinkenden Stahlnachfrage gerechnet (Pauliuk et al. 2013, S. D). Die Umstellung auf die sekundäre Stahlherstellungsrouten durch Recycling von Stahlschrott hat einen großen Einfluss auf die CO₂-Emission (bis zu 80% Reduktion gegenüber Hochofenroute) (Hasan 2011, S. 217–218). Auch wenn langfristig höhere Recycling Raten erreicht werden können, so kann bis 2050 maximal 50% der Stahlnachfrage über Recycling abgedeckt werden (Wörtler et al. 2013; Morfeldt et al. 2014, S. 1). Hohe Lohnkosten und abnehmende Schrottqualität machen extensiveres Recycling von Stahlschrott schnell unattraktiv (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014a, S. 25). Durch kontinuierliche Optimierung nähert sich die primäre Stahlherstellung dem theoretischen Minimum der Hochofenroute von 1371 kg CO₂ / t Rohstahl (Kirschen et al. 2011, S. 6148). In den etablierten Stahlherstellungsverfahren besteht demnach nur noch wenig weiteres Verbesserungspotenzial.

Die vorliegende Forschungsarbeit fokussiert sich deshalb auf Emissionseffizienz durch neue Stahlherstellungstechnologien. Im Folgenden wird ein Überblick über die Berücksichtigung von innovativen Stahlherstellungsverfahren in aktuellen Veröffentlichungen im Zusammenhang der Energietransformation in Deutschland und Europa gegeben.

Im vergangenen Jahrzehnt gab es auf nationaler wie internationaler Ebene eine Vielzahl von Szenariostudien zum Transformationsverlauf der deutschen Energiewende. Branchenübergreifende Studien, wie (Diczfalusy 2012), (Di Valdalbero 2006), (Tzimas 2009), (Capros et al. 2010), (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2011), (Nitsch et al. 2012), (Pardo et al. 2012), (International Energy Agency (IEA) 2012b) behandeln Entwicklungen in allen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereichen im Wechselspiel mit politischen Rahmenbedingungen.

Andere Studien, wie z.B. (Wörtler et al. 2013), (Ahman et al. 2012), (Pardo und Moya 2013), (Germeshuizen und Blom 2013), (Rotering et al. 2012), (Tzimas 2009), (Tzimas 2009), (Remus et al. 2013), (Gerspacher et al. 2011) betrachten selektiv, dafür aber im Detail die Entwicklungen in einzelnen Branchen, wie der Eisen- und Stahlindustrie aus dem Zusammenspiel von Innovation, Wettbewerb und gesetzlichen Rahmenbedingungen. Zentral ist dabei immer die Frage, ob bestimmte Emissionsziele erreicht werden können und wenn ja zu welchem Preis.

Weitere Studien konzentrieren sich im technischen Bereich auf die Bewertung innovativer Verfahren, die durch einen technologischen Durchbruch einen Beitrag zur Er-

reichung von Klimazielen leisten könnten (HyWays-IPHE 2008), (Barbir 2013), (Garza 2006), (Koroneos 2004), (Remus et al. 2013), (Yuan und Haarberg 2008), (Hermann et al. 2012). Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms ULCOS⁴ kooperieren europäische Unternehmen, Universitäten, Forschungseinrichtungen und Partner aus Energie- und Bauwirtschaft mit dem Ziel, innovative Stahlherstellungstechnologien marktreif zu machen, die eine CO₂-Reduktion um mindestens 50% bewirken (Birat und Borlée 2008).

Laut den oben beschriebenen Studien sind die Technologien mit dem höchsten langfristigen Potenzial für die Stahlherstellung moderne Hochöfen (mit Gichtgasrezirkulierung (TGR) und Kohlendioxid-Abscheidung (CCS)), Direktreduktionsverfahren in Kombination mit dem Lichtbogenofen und das noch sehr junge Verfahren der Eisenerzelektrolyse. Da diese innovativen Technologien derzeit noch nicht oder nur vereinzelt industriell eingesetzt werden, finden sie bislang in den oben angegebenen Quellen nur am Rande Berücksichtigung. Sie werden aber noch nicht detailliert bewertet, weder im Detail im Rahmen techno-ökonomischer Modellierung, noch ganzheitlich im Hinblick auf ihr mögliches Zukunftspotential. Unter einer ganzheitlichen Bewertung wird im Folgenden eine Bewertung verstanden, die nach (Bibliographisches Institut GmbH 2014) über einzelne Aspekte hinausgreift und so einen größeren Zusammenhang darstellt.

Um bis 2050 signifikante Effekte bei der Emissionsreduktion zu erzielen, müssen bei Investitionszyklen von üblicherweise 15 oder mehr Jahren in der Stahlindustrie (Wörtler et al. 2013, S. 4), innovative Technologien frühzeitig in den Fokus rücken. Die vorliegende Arbeit setzt genau hier an und bewertet innovative Stahlherstellungsverfahren ganzheitlich in einem Betrachtungszeitraum bis 2070.

2.1 Ziele dieser Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die ganzheitliche Bewertung zukünftiger primärer Stahlherstellungsverfahren vor dem Hintergrund der Transformation im Energiesystem. Hierzu werden in einem neuartigen dreischrittigen Bewertungsverfahren techno-ökonomische Modelle mit dem Prognoseverfahren der Szenarioanalyse und anschließend einer multi-kriteriellen Analyse (MCA) kombiniert. Neben der ganzheitlichen Bewertung zukünftiger primärer Stahlherstellungsverfahren, die es in der Fachliteratur bisher noch nicht gibt, soll zusätzlich die gewählte dreischrittige Bewertungsmethode beurteilt werden.

Ein besonderer Fokus liegt auf dem Wasserstoff-Direktreduktionsverfahren, einem der erfolgversprechendsten CO₂-freien Stahlherstellungsverfahren, das gerade vor dem Hintergrund einer grundlegenden Energiewende in Deutschland ein besonderes Potenzial haben könnte (siehe Abschnitt 3.3).

Im Einzelnen sollen folgende Leitfragen beantwortet werden:

⁴ ULCOS = Ultra-Low CO₂ Steelmaking (EU)

- **Welches primäre Stahlherstellungsverfahren ermöglicht in Deutschland zukünftig eine wirtschaftlich realisierbare Erfüllung der Klimaschutzziele?**
- **Welches Stahlherstellungsverfahren erhält dabei die höchste ganzheitliche Bewertung auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Akteursperspektiven?**
- **Wie zweckmäßig ist die Anwendung der dreischrittigen ganzheitlichen Technologiebewertung?**
- **Welche besondere Rolle könnte die Wasserstoff-Direktreduktion in Zukunft einnehmen, unter Berücksichtigung zukünftiger Systemzusammenhänge und Synergien?**
- **Wie werden die zukünftigen Stahlherstellungsverfahren hinsichtlich sicherheitskritischer Kriterien bewertet?**
- **Wie könnte sich die ganzheitliche Bewertung der Stahlherstellungsverfahren an anderen Standorten verändern?**

Zur Beantwortung der obigen Leitfragen wird das im Folgenden Beschriebene dreischrittige ganzheitliche Bewertungsverfahren verwendet (siehe Abbildung 2-1). Industrie, Politik sowie Nichtregierungsorganisationen sollen anhand der Ergebnisse eine ganzheitliche, kritische Einordnung der Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR) im Vergleich zu anderen konventionellen und innovativen primären Stahlherstellungsverfahren im volkswirtschaftlichen Kontext vornehmen können. So kann eine qualifizierte Entscheidung über die Förderung und Integration dieser Technologie in ein zukunftsfähiges Wirtschafts- und Energiesystem getroffen werden.

2.2 Methodisches Vorgehen

Im Rahmen einer vorgelagerten Recherche werden zunächst ein branchenübergreifendes Screening von Wasserstofftechnologien und ein Screening von aktuellen und zukünftigen Stahlherstellungsverfahren durchgeführt. Diese schaffen eine fundierte Grundlage für die anschließenden Bewertungsschritte.

Basierend auf dem Screening von Stahlherstellungsverfahren werden vier primäre Stahlherstellungsverfahren ausgewählt, im Detail untersucht und am Standort Nordrhein Westfalen (NRW) bewertet. Um dem ganzheitlichen Bewertungsanspruch möglichst nahe zu kommen, wird ein technischer Vergleich durch Anlagenmodellierungen mit Szenarioanalysen bis 2070 und einer multi-kriteriellen Analyse (MCA) kombiniert.

Im ersten Schritt der dreischrittigen Bewertungsmethode werden techno-ökonomische Simulationsergebnisse hergeleitet, wie sie in der Investitionsplanung von Anlagenbetreibern derzeit üblich sind. Im zweiten Bewertungsschritt werden die Modellannahmen mithilfe von Szenarien bis 2070 prognostiziert und somit auch die techno-ökonomische Bewertung in die Zukunft erweitert. Diese zweischrittige Bewertung wird schon in (Pehnt 2001, S. 21–39) beschrieben und diskutiert. Hier finden sich dann jedoch keine Ansätze zu einer Erweiterung des Bewertungshorizontes durch weitere Bewertungskriterien. Da technologische Entscheidungen mit weitreichenden Folgen für die Gesellschaft, wie im Falle der Stahlindustrie, nicht isoliert von techni-

schen und ökonomischen Kriterien abhängen, werden im dritten Bewertungsschritt weitere relevante Entscheidungskriterien im Rahmen der MCA integriert. Aspekte aus den Bereichen Technologie, Gesellschaft, Ökonomie, Sicherheit und Ökologie werden hierbei vor dem Hintergrund der Gesamtsystementwicklung untersucht und bewertet. Die Kombination aus technischen Modellierungen mit einer anschließenden MCA wird in (Bättig et al. 2011) beschrieben. Die Kombination aller drei Bewertungsschritte (wie in Abbildung 2-1), um eine ganzheitliche Bewertung zu einem Zeitpunkt in der Zukunft zu erhalten, wird in der Fachliteratur bisher nicht beschrieben und soll in der vorliegenden Arbeit erprobt werden.

Nach einer kurzen Reflexion über die Bewertungsmethode wird diese im Rahmen von Fallbeispielen auf drei Beispielstandorte angewandt.

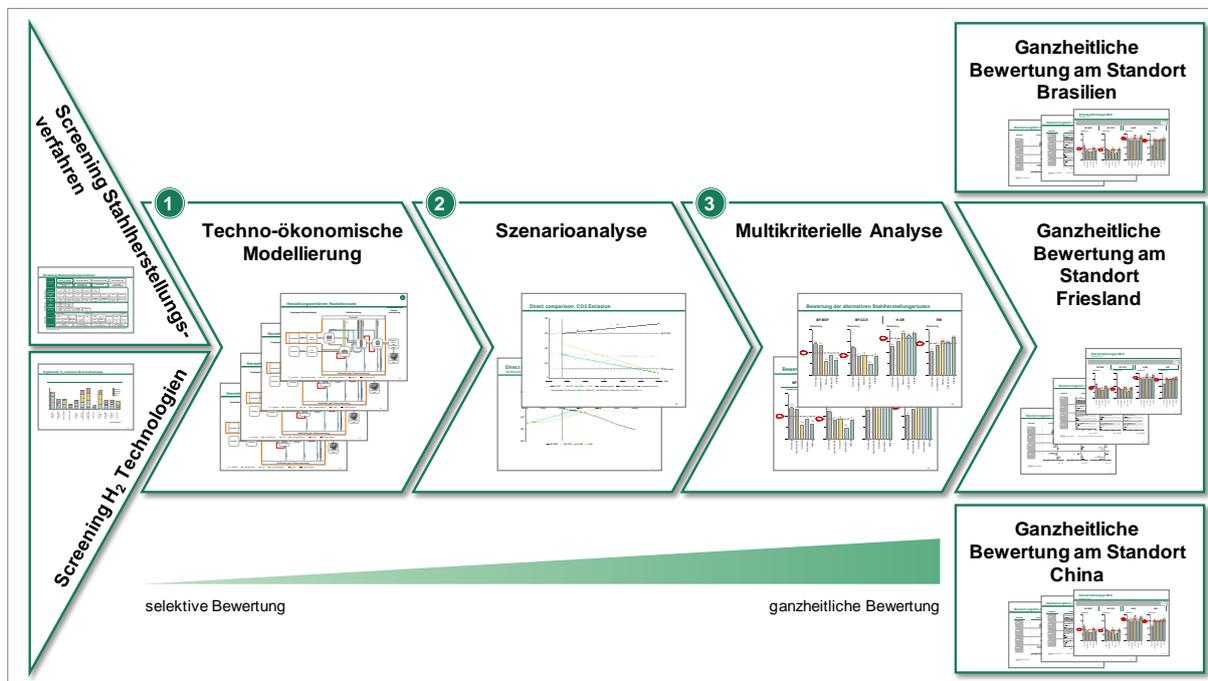


Abbildung 2-1: Ganzheitliche Bewertung zukünftiger primärer Stahlherstellungsverfahren in drei Schritten

2.3 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an die Kapitel *Zusammenfassung* und *Einleitung* gliedert sich die Arbeit in fünf inhaltliche Abschnitte.

Kapitel 3 Stahlindustrie im Wandel

Im Rahmen einer allgemeinen Bestandsaufnahme werden konventionelle sowie innovative Verfahren in der Eisen- und Stahlindustrie zusammengetragen und gegenüber gestellt. Je Verfahrensschritt wird das Spektrum möglicher technischer Variationen verdeutlicht. Im Rahmen eines Literaturscreenings wird anhand übergreifender Szenariostudien analysiert, welche Berücksichtigung die jeweiligen Verfahrensmifikationen in der Literatur erfahren. Aus den vorgestellten innovativen Herstellungsver-

fahren wird dann eine Auswahl getroffen, die im Folgenden bezüglich ihres Zukunftspotenzials genauer untersucht werden soll.

Kapitel 4 Technologiescreening Wasserstoff

Um Schnittstellen zu anderen Bereichen einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft zu identifizieren, wird zunächst branchenübergreifend untersucht, welche Rolle dem Wasserstoff in welchen Anwendungsbereichen, mit welchen Funktionen und aus welchen Quellen zugeschrieben wird. Hierzu wird eine Technologieübersicht in den verschiedenen Anwendungsbereichen entwickelt, auf der eine Relevanzanalyse der einzelnen Technologien und Funktionen aufbaut. Basierend auf diesen Ergebnissen kann dann im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung eingeschätzt werden, welche Synergien und Systeminterdependenzen die Wasserstoff-Direktreduktion in Zukunft haben könnte.

Kapitel 5 Techno-ökonomischer Verfahrensvergleich primärer Stahlherstellung

In dieser Phase wird zunächst eine kurze Einführung in die Methodik der Szenariotechnik gegeben. Dann werden die zu untersuchenden Stahlherstellungsverfahren am Standort NRW anhand von beispielhaften Anlagenmodellen verglichen. Die techno-ökonomische Zukunftsfähigkeit wird vor dem Hintergrund verschiedener Szenarien für den Verlauf der Energietransformation von 2010 bis 2070 in Deutschland bewertet. Durch selektive Experteninterviews aus dem Bereich der Stahlindustrie wird ein Realitätscheck der Modelle durchgeführt, bevor diese in der nächsten Phase einer multi-kriteriellen Analyse unterzogen werden.

Kapitel 6 Multi-kriterielle Analyse ausgewählter Stahlherstellungsverfahren

Der Bewertungsansatz der multi-kriteriellen Analyse, der in dieser Phase zum Einsatz kommt, wird zunächst methodisch hergeleitet. Danach werden in Anlehnung an (Zeiss und Valentin 2011), (Merten et al. 2013) und (Wang et al. 2009) relevante und überschneidungsfreie Kriterien für die multi-kriterielle Analyse (MCA) erarbeitet, die die Möglichkeit eines ganzheitlichen Vergleichs unterschiedlicher Stahlherstellungsverfahren eröffnen. Eine wesentliche Ergänzung ist die Integration von Kriterien zu Sicherheits- und Verletzlichkeitsaspekten, wie Brandgefahr oder Rohstoffabhängigkeit. Die Bewertung der untersuchten Stahlherstellungsverfahren entlang des definierten Kriterienkatalogs erfolgt aus den simulierten Ergebnissen der Modelle aus Abschnitt 5 oder durch die Einschätzung des Autors basierend auf Literaturinformationen und Expertenmeinung.

Das Ergebnis ist eine ganzheitliche Bewertung der vier Verfahren vor dem Hintergrund der Transformation des Gesamtsystems am Standort NRW in Deutschland.

Durch drei exemplarische Interviews mit jeweils einem Experten aus der Stahlindustrie, der Landesregierung NRW und einer Umweltorganisation werden drei beispiel-

hafte Ausprägungen von Gewichtungsfaktoren für den MCA Kriterienkatalog bestimmt. Diese Einschätzung ist nicht repräsentativ und soll lediglich eine exemplarische Stichprobe verschiedener Perspektiven und deren Auswirkung auf die Gewichtung geben. Dabei werden die relevanten Unterschiede herausgearbeitet und wichtige Erkenntnisse bezüglich der Umsetzungsanforderungen dieser Technologie gewonnen.

Kapitel 7 Standortabhängige Bewertung primärer Stahlherstellungsverfahren

Ergänzend zur Bewertung der Stahlherstellungsverfahren für den Standort NRW werden in diesem Abschnitt drei weitere Standorte exemplarisch untersucht. Die oben beschriebene dreischrittige Bewertung wird mit standortspezifischen Modellannahmen und MCA-Bewertungen an den Beispielstandorten Friesland in Deutschland (FRI), Minas Gerais in Brasilien (BRA) und Guangdong Provinz in China (CHN) durchgeführt (vgl. Abbildung 2-1), um standortabhängige Unterschiede in der Technologiebewertung zu verdeutlichen.

Kapitel 8 Exkurse

Im Rahmen eines Exkurses werden zwei weitere Themen als kurze Ergänzung aufgearbeitet, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit stehen. Zum einen wird das Herstellungsverfahren Methan-Direktreduktion, das der Wasserstoff-Direktreduktion sehr ähnlich ist, vorgestellt und als mögliche Alternative eingeordnet. Zum anderen soll ein kurzer Überblick über Alternativmaterialien zu Stahl gegeben werden, um einzuschätzen, ob Stahl auch in Zukunft seine hohe Bedeutung behalten wird.

Abschließend wird im letzten Abschnitt ein kritisches *Fazit* über alle Teilergebnisse der verschiedenen Schwerpunkte gezogen und ein Ausblick über zukünftige Forschungsfelder gegeben.

3 Stahlindustrie im Wandel

3.1 Stahlindustrie in Deutschland

Laut DIN Norm 10020 ist Stahl ein „Werkstoff, dessen Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elementes, dessen Kohlenstoffgehalt im Allgemeinen kleiner als 2% ist und der andere Elemente enthält“ (DIN EN 10020, S. 2). Stahl wird aus Roheisen durch Beimischung bestimmter Legierungselemente und durch Reduzierung anderer ungewünschter Elemente, wie Schwefel, Phosphor und Kohlenstoff (über 2%) hergestellt. Durch den geringen Kohlenstoffrestanteil von unter 2% und Legierungselemente (Chrom, Kobalt, Mangan, u.v.m.) vereint Stahl als Werkstoff Festigkeit mit Formbarkeit wie kaum ein anderer Werkstoff und ist deshalb einer der wichtigsten Werkstoffe des industriellen Zeitalters (Allwood und Cullen 2012, S. 43–45).

In fast allen Wirtschaftszweigen spielt Stahl eine Rolle – in einigen, wie z.B. der Automobilindustrie, der Bauindustrie und der Windkraft sogar eine fundamentale Rolle (Pardo und Moya 2013). Rund 55% des produzierenden Gewerbes in Deutschland sind stahlintensiv, d.h. Stahl hat einen Anteil von mehr als 10% an den Vorleistungen der zugehörigen Branchen (Rotering et al. 2012). Der durch globale Megatrends verursachte Strukturwandel in den weltweiten Märkten und Wertschöpfungsketten (vor allem in den BRIC⁵ Staaten), bietet für die Stahlindustrie wichtige Wachstumschancen. Die Industrie rechnet, nach Nachfrageeinbrüchen in 2009, mit einem langfristigen weltweiten jährlichen Wachstum von 4% (Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS) 2013). Stahl wird also auch zukünftig eine große Bedeutung behalten und die Stahlindustrie wird ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten müssen.

Derzeit ist die Stahlindustrie einer der größten Emittent von Treibhausgasen und verursacht in zweierlei Hinsicht Emissionen von CO₂. Sie verbraucht große Mengen Energie, die zurzeit überwiegend aus fossilen Brennstoffen gewonnen werden, und setzt Kohlenstoff als Reduktionsmittel der Eisenoxide ein. 1,3 Tonnen CO₂ werden durchschnittlich in Deutschland für eine Tonne Stahl emittiert (Hasan 2011). Die Eisen- und Stahlindustrie ist der größte industrielle CO₂-Emittent in Deutschland. Ca. 4% der gesamten deutschen CO₂-Emissionen gehen auf ihr Konto (Statistisches Bundesamt 2013). Stahl als hochwertiger Werkstoff ermöglicht jedoch auch den Bau von effizienteren Anlagen, Fahrzeugen und Kraftwerken und trägt somit indirekt zur Emissionsreduktion bei. In einigen Fallstudien konnten CO₂-Reduktionen in der Stahlanwendung gegenüber CO₂-Emission bei der Stahlherstellung im Verhältnis 6 zu 1 über den Lebenszyklus von Produkten nachgewiesen werden (Wörtler et al. 2013, S. 41). Seit der Gründung der ersten Gusstahlfabrik in Deutschland 1811 durch Friedrich Krupp (ThyssenKrupp AG 2014), haben sich die Herstellungsverfahren stetig weiter entwickelt. Alleine in den vergangenen 50 Jahren konnte die CO₂-Emission um 30% reduziert werden.

Das etablierteste Verfahren heutzutage ist die sog. Hochofenroute (siehe Abschnitt 3.2.1). Dabei wird im ersten Schritt Eisenerz im Hochofen unter Koksabgabe zu Rohei-

⁵ BRIC Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China)

sen reduziert. Im zweiten Schritt wird dann der Kohlenstoffgehalt des Roheisens im Oxygenkonverter auf das gewünschte Niveau für Stahl gesenkt. Liegt anstelle von Eisenerz ausreichend hochwertiger Stahlschrott vor, kann dieser im Elektrostahlverfahren direkt im Lichtbogenofen eingeschmolzen werden. Im Direktreduktionsverfahren wird festes Eisenerz mithilfe von Erdgas reduziert um dann anschließend, ähnlich zu Stahlschrott, im Lichtbogenofen eingeschmolzen zu werden. In der weltweiten Stahlherstellung haben diese drei Verfahren einen Anteil von über 98% (siehe Abbildung 3-1).

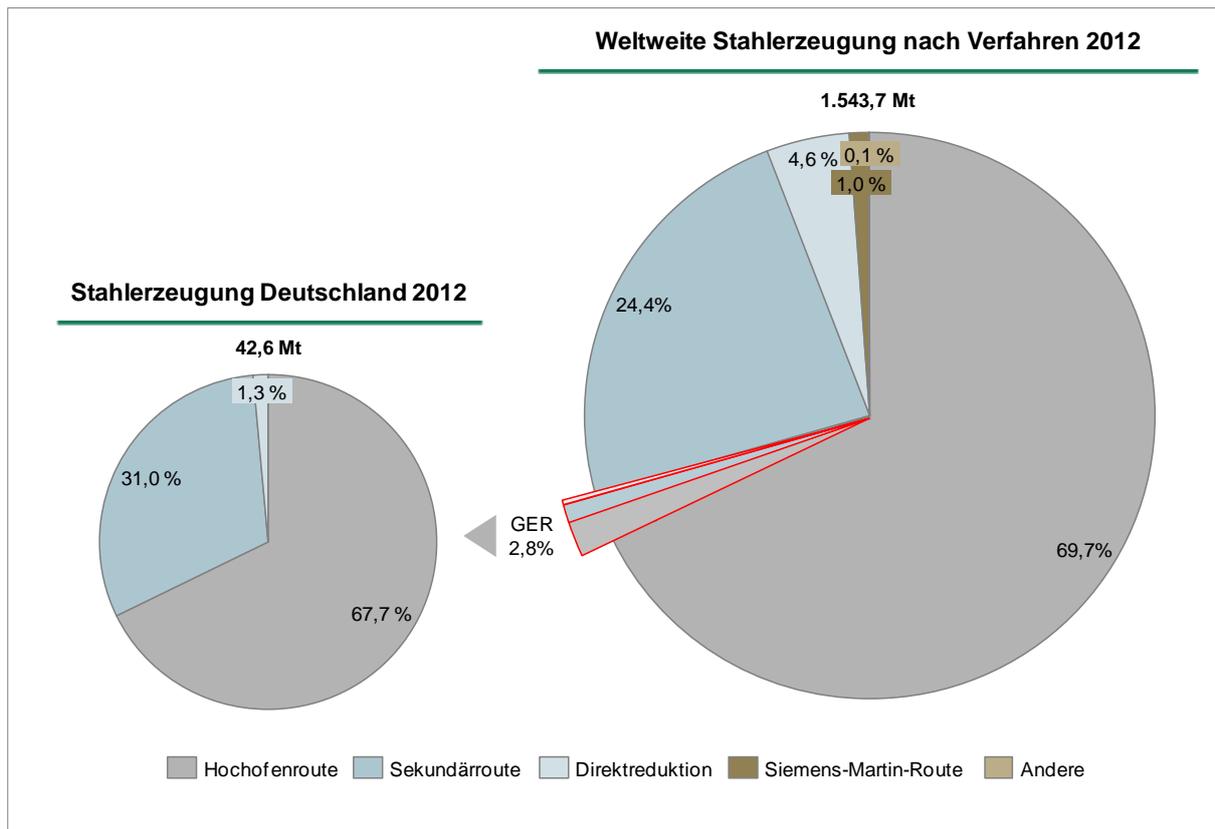


Abbildung 3-1: Weltweite Stahlherstellung 2012 nach Verfahren basierend auf Daten von (World Steel Association 2013a) und (Midrex 2013)

In Deutschland wurden 2012 43 Mt Stahl hergestellt, etwa 3% der weltweiten Stahlproduktion, 68% über die Hochföfenroute und 31% über das Elektrostahlverfahren aus wiederverwertetem Stahlschrott. Als einziges anderes Herstellungsverfahren in Deutschland gibt es derzeit eine Direktreduktionsanlage mit anschließendem Lichtbogenofen in Hamburg, die jährlich ca. 0,56 Mt (1,3%) produziert. Weltweit spielt die Direktreduktion mit ca. 4,6% (73 Mt) in 2012 und einem jährlichen Wachstum von 4,3% bereits eine wichtige Rolle (World Steel Association 2013b), (Midrex 2013). Gerade in Ländern mit günstigem Erdgas, ist diese Technologie bereits wettbewerbsfähig.

Neben den etablierten Herstellungsverfahren gibt es eine Vielzahl von weiteren Verfahren (Abbildung 3-2). Die Verfahren unterscheiden sich durch den Schritt der Eisenerzherstellung und den der Stahlherstellung, die aufeinander aufbauen und oft un-

mittelbar hintereinander geschaltet werden, um das noch flüssige Roheisen ohne großen Energieverlust direkt weiter zu verarbeiten. Schon die Form des Rohmaterials, das für den Schritt der Eisenherstellung verwendet wird, unterscheidet sich. Während der Hochofen mit Sinter, Pellets, Stückerz und zu einem gewissen Anteil auch mit Schrott beschickt werden kann, benötigt der Direktreduktions-, Schaft- oder Wirbelschichtofen Sinter oder Feinerz. Je nachdem, ob die Eisenherstellung im flüssigen oder festen Zustand erfolgt, unterscheiden sich die Zwischenprodukte (Eisenschwamm (DRi) oder Roheisen). Für den Schritt der Stahlherstellung verwendet die Großzahl aller Verfahren entweder den elektrisch betriebenen Lichtbogenofen, oder wenn der Kohlenstoffgehalt des Roheisens für eine exogene Reaktion reicht, den Oxygenkonverter.

Mit allen gängigen primären Herstellungsverfahren (eisenerzbasierte Verfahren) lassen sich alle Stahltypen herstellen. Durch derzeit höhere Betriebskosten für Direktreduktionsverfahren, werden diese üblicherweise für die Herstellung von sehr kohlenstoffarmen Spezialstahl genutzt. Durch moderne Qualitätsprozesse in der Stahlschrottaufbereitung lässt sich auch über die Sekundärroute Stahl nahezu jeder Qualität erzeugen - üblicherweise aber eher die qualitativ minderwertigen Baustähle.

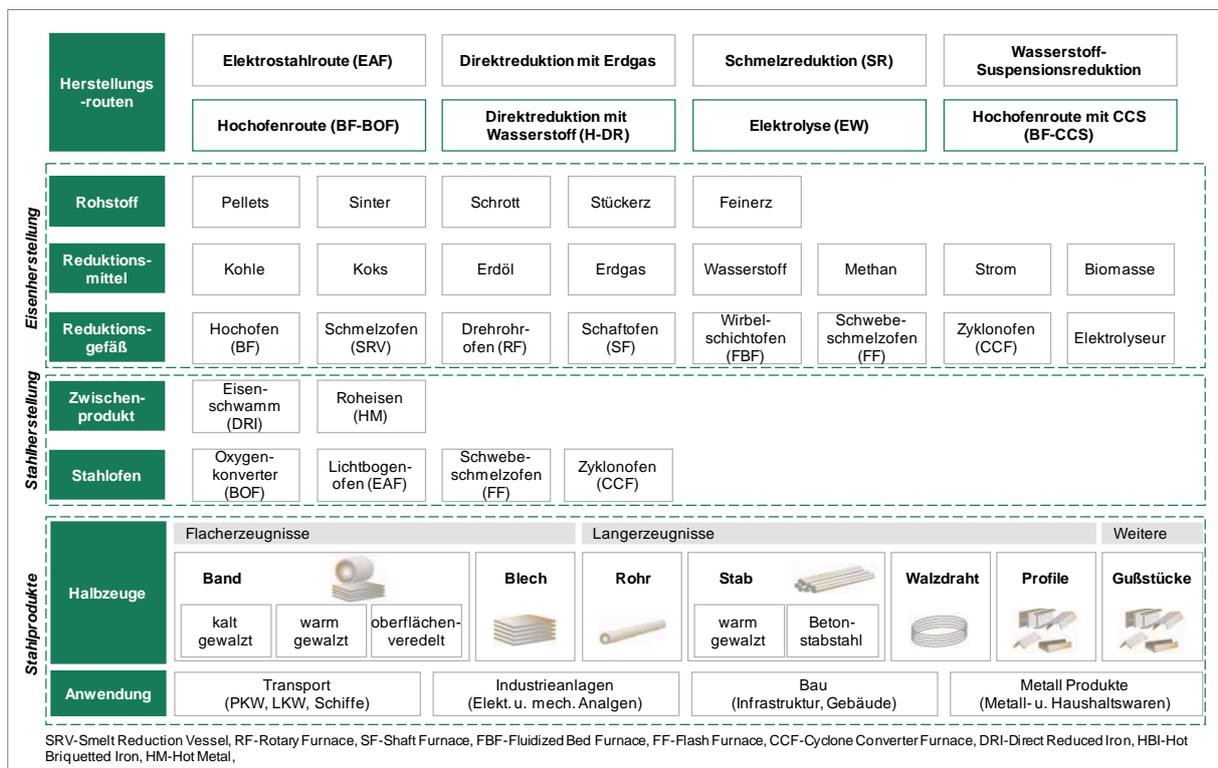


Abbildung 3-2: Übersicht Eisen- und Stahlherstellungsverfahren

Im Folgenden wird nun ein detaillierter Überblick über etablierte sowie innovative Stahlherstellungsverfahren gegeben (vgl. Tabelle 3-1).

3.2 Konventionelle primäre Stahlherstellungsverfahren

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts gewann die Stahlherstellung im Zuge der Industrialisierung zunehmend an Bedeutung. Zunächst verwendete man das Thomas- und Bessemer Verfahren, 1864 entwickelte sich das Siemens-Martin-Verfahren, sowie etwas später das Hochofenverfahren. In den 90er Jahren des 20. Jahrhundert wurden die letzten Siemens-Martin-Öfen still gelegt und zunehmend Stahl im Elektrostahlverfahren ‚recycelt‘ (Wörtler et al. 2013, S. 8). Seit den 90er Jahren dominieren in Deutschland nunmehr die zwei Herstellungsverfahren: Hochofenroute und Elektrostahlverfahren.

Erst in den letzten Jahren hat die Direktreduktion mit Erdgas in Ländern mit günstiger Erdgasversorgung an Bedeutung gewonnen. Diese drei wesentlichen konventionellen Verfahren werden im Folgenden kurz beschrieben (siehe Abbildung 3-3).

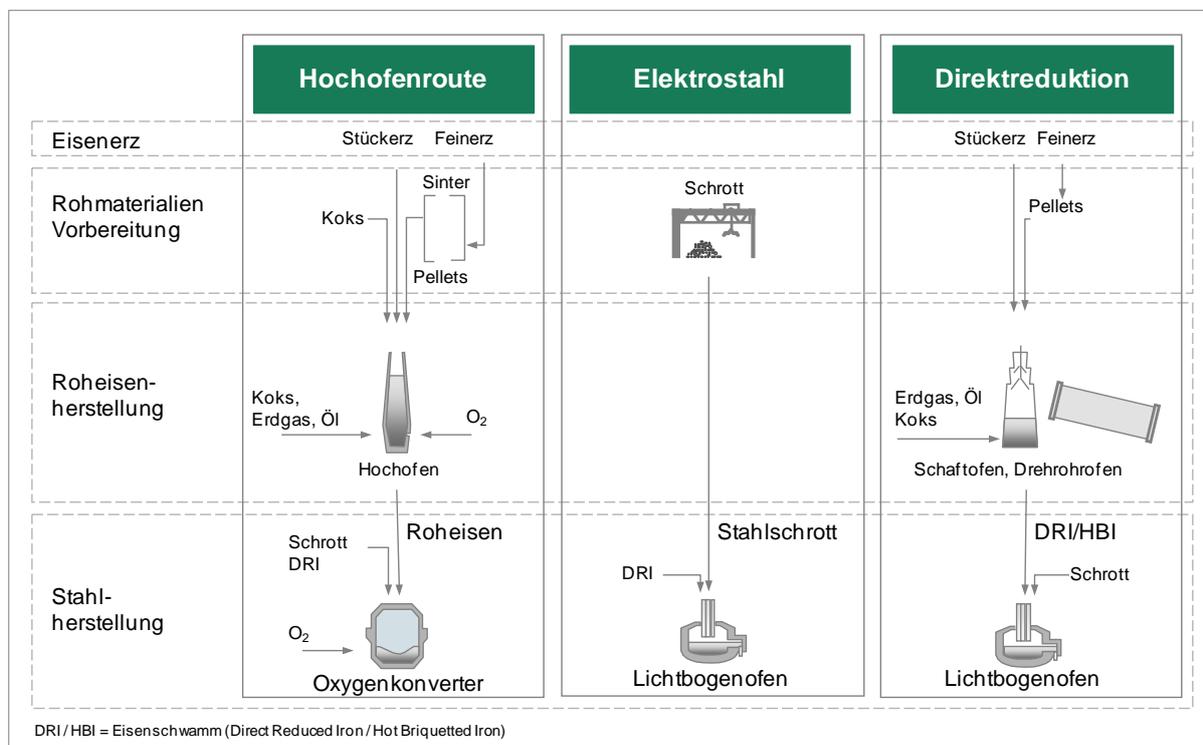


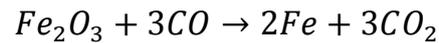
Abbildung 3-3: Konventionelle primäre Stahlherstellungsverfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an Wörtler et al. 2013, S. 7)

3.2.1 Hochofenroute

Die Hochofenroute auch häufig als *BF-BOF* (*Blast Furnace* mit *Basic Oxygen Furnace*) bezeichnet, besteht aus zwei Verfahrensschritten. Der Reduktion von Eisenerz zu Roheisen, sowie der Weiterverarbeitung im *Linz-Donawitz-Konverter* (Oxygenkonverter) zu Rohstahl (RS) (siehe Abbildung 3-3).

Für den Hochofen muss das Eisenerz möglichst homogene Stückgrößen besitzen. Darum wird es in Sinter- oder Pelletieranlagen vorab agglomeriert und gebacken. Die

Kokskohle wird in sogenannten Kokereien vorbearbeitet und porös gemacht, so dass sie den Gasaustausch im Hochofen ermöglicht. Etwa 16% des Energiebedarfs von ca. 18 GJ für eine Tonne Rohstahl werden für diese beiden Vorprozesse bereits aufgewendet (vgl. Abbildung 3-4). Koks, Eisenerz und Zuschlagstoffe werden als sog. *Möller* von oben in den kegelförmigen Hochofen geschichtet und weiter unten in der Schmelzzone in folgender chemischer Reaktion zu Roheisen umgewandelt (Latscha und Klein 2007):



Die exotherme Verbrennung von Koks setzt die benötigte Menge Kohlenstoffmonoxid (CO) frei, das die Eisenoxide zu Roheisen reduziert und in Form von Kohlenstoffdioxid (CO₂) den Hochofen verlässt. Um aus Roheisen Stahl zu erzeugen, muss der Kohlenstoffanteil im anschließenden Oxygenkonverter auf unter 2% reduziert werden (Gerspacher et al. 2011, S. 4). Dies geschieht im Sauerstoffblas-Verfahren durch Einbringen von Sauerstoff (Sauerstofffrischen). Wenn der Sauerstoff durch das flüssige Eisen strömt, reagiert er mit dem gelösten Kohlenstoff zu CO₂.

Ca. 80% des Energieverbrauchs findet bis zum Oxygenkonverter statt. 20% werden für die Weiterverarbeitung des Rohstahls durch Gießen, Walzen, etc. benötigt (Hasan 2011, S. 217). Für eine Tonne Rohstahl werden über drei Tonnen Rohmaterialien eingesetzt, wie in Abbildung 3-4 schematisch zu sehen ist. Je Tonne Rohstahl über die Hochofenroute werden je nach Berechnungsgrundlage ca. 1700 kg CO₂ emittiert (Remus et al. 2013), (Fruehan 2009, S. 3). Etwa 70% nur durch den Reduktionsprozess im Hochofen (Ecofys 2009, S. 9). Hier wird deutlich, welche entscheidende Wichtigkeit ein technologischer Umbruch im Bereich der Eisenerzreduktion für die Erreichung der Klimaziele hätte.

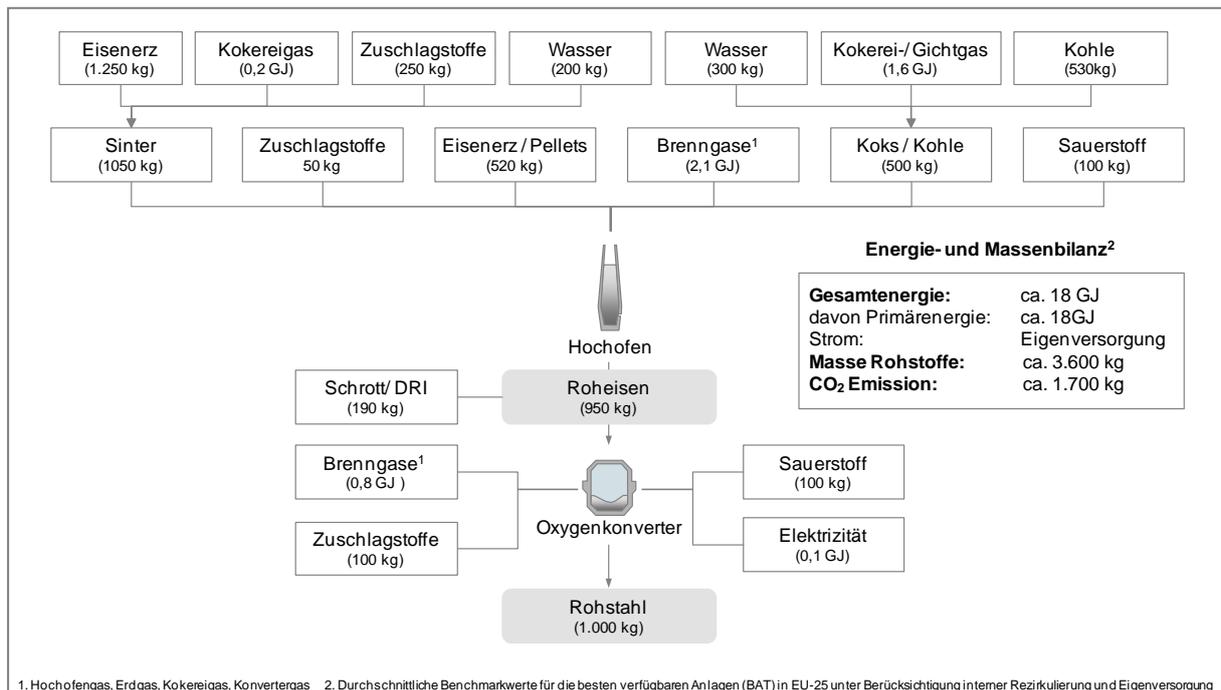


Abbildung 3-4: Energie- und Massenbilanz BAT⁶ Hochofenroute nach (Remus et al. 2013)

Die Vorteile des Hochofens sind eine sehr hohe Produktionskapazität, der kontinuierliche Betrieb und damit verbunden verhältnismäßig geringe Betriebskosten, sowie eine sehr konstante Stahlqualität, die robust gegen mögliche Schwankungen in der Rohstoffqualität ist. Für die weitere Benutzung von Hochofen ist eine günstige Versorgung mit Koks- und Kohle, sowie eine kontinuierlich hohe Nachfrage an Stahl notwendig. Sobald strengere Emissionsauflagen oder dezentrale, flexible Stahlnachfrage zur Regel werden, wird die Hochofenroute weniger attraktiv.

3.2.2 Elektrostahlverfahren

Elektrostahl bezeichnet das Wiederverwerten von Stahlschrott durch Einschmelzen im Lichtbogenofen (EAF), auch als Sekundärroute bezeichnet (Gerspacher et al. 2011) (siehe Abbildung 3-3).

Stahlschrott ersetzt bei diesem Stahlherstellungsverfahren das Roheisen. Da der Schrott jedoch im festen Aggregatzustand vorliegt, wird statt des Sauerstofffrischens im Konverter der Lichtbogenofen verwendet. Schrott und Zuschlagstoffe werden von oben in den Ofen geschichtet und durch elektrische Lichtbögen zwischen den Elektroden und dem Einsatzgut auf bis zu 1800°C erhitzt. Nichtmetallische Bestandteile aus Legierungsresten setzen sich in einer Schlackenschicht auf der Schmelze ab und können gesondert abgelassen werden. Neben Stahlschrott kann dem EAF auch Roheisen aus dem Hochofen oder Eisenschwamm aus der Direktreduktion hinzugefügt werden, um die gewünschte Stahlqualität zu erreichen (Stahlinstitut VDEh et al. 2010).

⁶ BAT = Best Available Technology für EU-25 Länder basierend auf Remus et al. 2013

Da der energieintensive Schritt der Eisenerzreduktion in diesem Verfahren wegfällt, wird beim heutigen Strommix nur ein Viertel der CO₂-Emission verursacht – ca. 400kg CO₂ / t Rohstahl (Hasan 2011). Mit Strom ausschließlich aus erneuerbaren Quellen, wäre das Elektrostahlverfahren sogar nahezu CO₂-neutral. Lediglich Transport- und Logistikaktivitäten für die Wiederverwertung von Stahlschrott stellen klimatische Belastungen dar. Mit einem Energieverbrauch von durchschnittlich 2,9 GJ (vgl. Abbildung 3-5, Remus et al. 2013, S. 429), stark abhängig von der Qualität des Einsatzgutes, ist die Elektrostahlroute aus Stahlschrott mit Abstand das energieeffizienteste Herstellungsverfahren. Für eine Tonne Rohstahl werden lediglich 1,5 Tonnen Stahlschrott und Zusatzstoffe benötigt. Die Produktionsmengen sind jedoch durch die begrenzte Verfügbarkeit von wiederverwertbarem Stahl stark begrenzt. (Pardo et al. 2012) sagt eine geringfügige Steigerung des Elektrostahlanteils von derzeit 41% auf 47% in 2030 vorher. Bis 2050 ist jedoch nicht mit einem Anteil der sekundären Route von über 50% zu rechnen (Wörtler et al. 2013, S. 16).

Unter strengen Emissionsbeschränkungen, einem funktionierenden Stahl Recycling System und zunehmend weniger integrierten Stahlwerken (Hochofen mit Oxygenkonverter) kann der Marktanteil von Elektrostahl noch weiter wachsen und einen wichtigen Beitrag zur Modernisierung der Stahlindustrie beitragen.

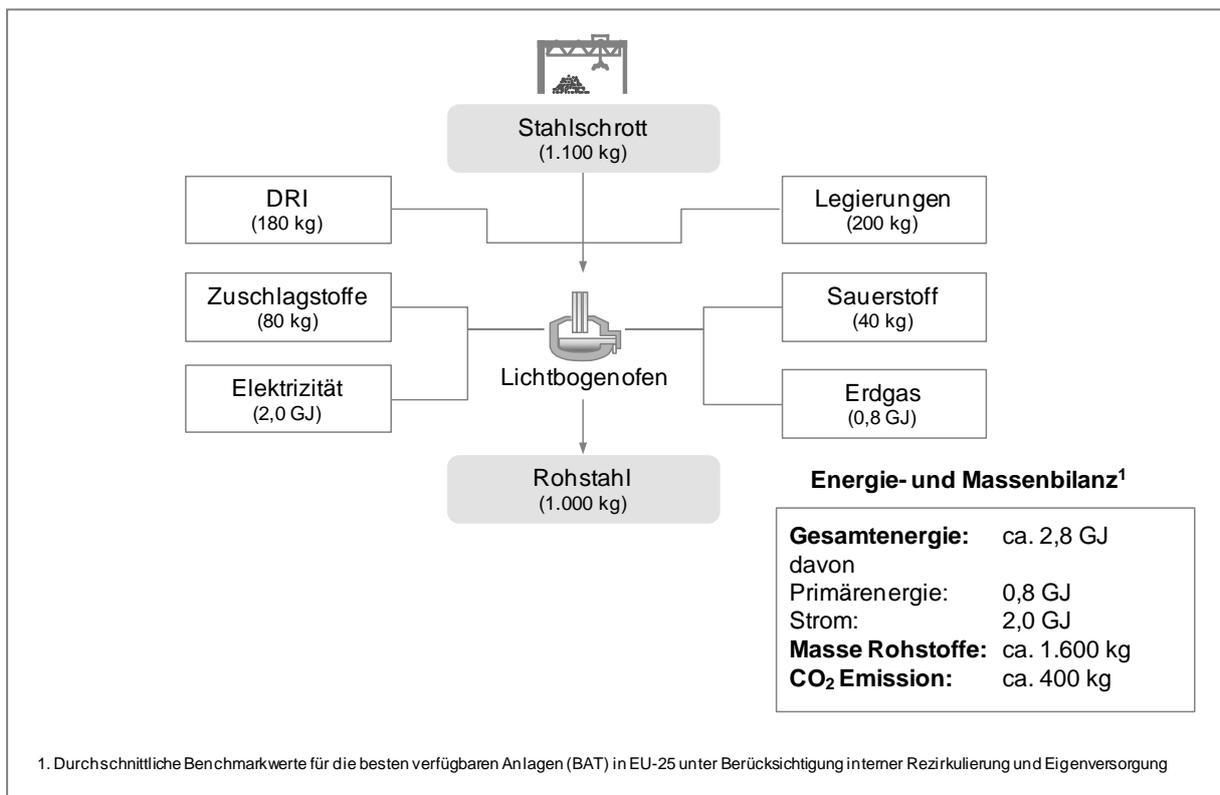
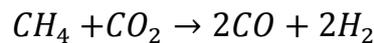


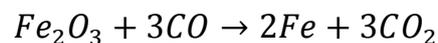
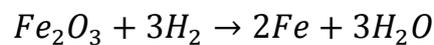
Abbildung 3-5: Energie- und Massenbilanz Elektrostahlroute, BAT für EU-25; Quelle: (Remus et al. 2013, S. 429), (European Commission (JRC) 2010)

3.2.3 Direktreduktion mit Erdgas oder Kohle

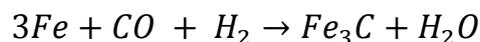
Anstelle von Luft, die durch den Hochofen geblasen wird und mit Kohlenstoff zu Kohlenstoffmonoxid reagiert, wird für die Direktreduktion kohlenwasserstoffhaltiges Reaktionsgas verwendet. Im Midrex Verfahren, dem etabliertesten Direktreduktionsverfahren mit ca. 60%⁷ des weltweiten Direktreduktionsvolumens, erfolgt die Reduktion von Stückerzen oder Pellets in einem Schachtofen. Erdgas wird dabei im katalytischen Midrex Reformer zu Reduktionsgas (H_2 und CO im Verhältnis 3:2) umgesetzt, das in die Reduktionszone des Schachtofens eingeblasen wird (Midrex Technologies 2014a):



Das Reduktionsgas reduziert Eisenerz in festem Zustand durch folgende chemische Reaktionen direkt zu Eisenschwamm (Midrex Technologies 2014b):



In geringen Mengen wird Kohlenstoff im Metallgitter eingelagert und so kann der Kohlenstoffgehalt des Eisenschwamms je nach Bedarf zwischen 0,5 – 2,5%⁸ eingestellt werden:



Der Eisenschwamm wird noch heiß im Lichtbogenofen zu Stahl weiterverarbeitet (siehe Abbildung 3-3). Meist wird Erdgas oder Kohle als Reduktionsmittel verwendet. Seit 1971 gibt es eine Midrex Anlage in Hamburg, die ca. 1% des deutschen Rohstahlbedarfs abdeckt (Arens et al. 2012). Dieses Verfahren stellt aktuell das CO_2 -ärmste primäre Stahlherstellungsverfahren dar. Im Finmet Verfahren, einem weiteren Direktreduktionsverfahren, wird Feinerz in einem Wirbelschichtofen reduziert. Derzeit wird weltweit eine Anlage in Venezuela betrieben (Schenk 2011). Auch weitere fossile Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Generatorgas, usw.) können im Gasumwandler zu Reaktionsgas umgewandelt werden.

Die Prozesstemperatur bei allen Direktreduktionsverfahren bleibt mit maximal 1000 °C deutlich niedriger als im Hochofen. Da bei der Direktreduktion keine Abscheidung der Gangart (nichtmetallische Bestandteile im Eisenerz) in der Schmelze erfolgt, kann nur Eisenerz mit einem hohen Eisenanteil verwendet werden (Remus et al. 2013).

Der Hauptvorteil der Direktreduktion ist, dass die Rohstoffvorbereitung wegfällt. So kann der Energieverbrauch und die CO_2 -Emission der Kokerei und der Sinteranlage eingespart werden. Für eine Tonne Rohstahl aus der Direktreduktion und anschließender Verarbeitung im Lichtbogenofen wird mit 12,1 GJ im Durchschnitt ca. 25 –

⁷ Midrex Technologies 2014b

⁸ Midrex Technologies 2014a, S. 3

30% weniger Energie verbraucht als im Hochofen. Wie in Abbildung 3-6 am Beispiel der Energie- und Massenbilanz des Midrex Verfahrens zu erkennen, werden je Tonne Rohstahl knapp 2 Tonnen Rohmaterial eingesetzt. Außerdem emittiert das Direktreduktionsverfahren deutlich weniger Staub und verbraucht weniger Wasser (Remus et al. 2013). Bei der Verwendung von Erdgas als Reduktionsmittel wird die CO₂-Emission im Vergleich zur Hochofenroute um 30% reduziert (1.200kg CO₂ / t Rohstahl)⁹. Direktreduktionsanlagen erlauben auch nichtkontinuierliche Produktion und können auch schon mit kleineren Kapazitäten effizient arbeiten.

Wirtschaftlich konkurrenzfähig ist diese Technologie jedoch nur an Standorten mit günstiger Erdgasversorgung (Indien, Venezuela, Iran, Mexico)¹⁰. Die Direktreduktion ist derzeit das häufigste Alternativverfahren in der primären Stahlherstellung zur Hochofenroute. Weltweit wird ca. 5%¹¹ des Rohstahls über die Direktreduktion hergestellt.

Im Falle der Nachfrage nach einer flexiblen und dezentralen Stahlherstellung und bei niedrigen Erdgaspreisen (z.B. USA) kann die Direktreduktion mit Erdgas mittelfristig an Bedeutung gewinnen. Langfristig wird sie jedoch wahrscheinlich nur in Kombination mit erneuerbar erzeugten Reduktionsmitteln wie Methan oder Wasserstoff (siehe Abschnitt 3.3) als CO₂-freies Verfahren an Bedeutung gewinnen.

⁹ Wörtler et al. 2013, S. 17

¹⁰ Remus et al. 2013, S. 523

¹¹ Midrex 2013, S. 8

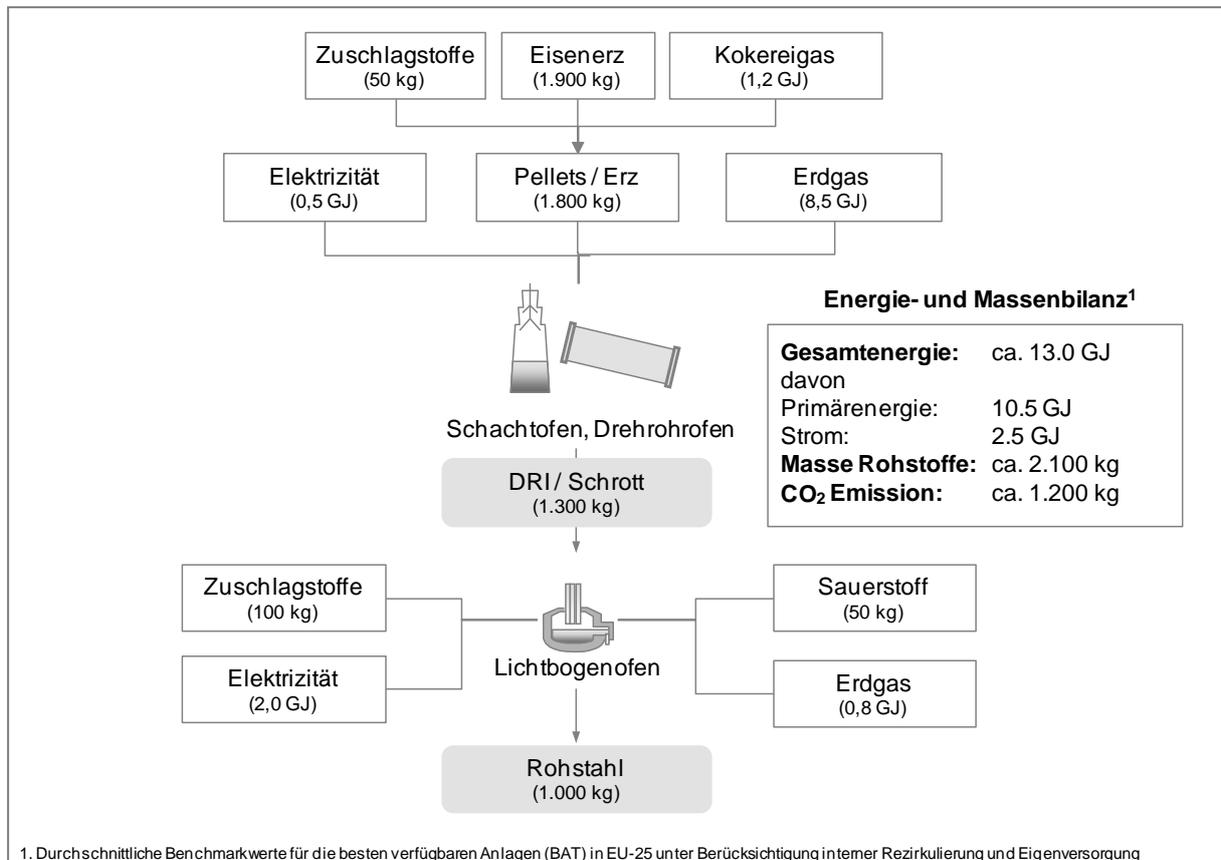


Abbildung 3-6: Energie- und Massenbilanz Direktreduktion am Beispiel Midrex Technologie, BAT für EU-25; Quelle: (Remus et al. 2013, S. 429), (European Commission (JRC) 2010) und (Midrex Technologies 2014b)

3.2.4 Schmelzreduktion

Die Schmelzreduktion ist ein noch relativ neues Stahlherstellungsverfahren, das Roheisen ohne Hochofen und mit Kohle statt Koks als Reduktionsmittel herstellt (Neelis und Patel 2006, S. 6). Die vorbereitenden Schritte der Verkokung, des Sinterns und Pelletierens entfallen. Bei dem zweistufigen Prozess wird zunächst per Direktreduktion (siehe Abschnitt 3.2.3) Eisenschwamm in festem Aggregatzustand hergestellt (Vorreduktion), der unmittelbar im zweiten Teilschritt eingeschmolzen und weiter zu Roheisen reduziert wird (Hauptreduktion).

Als Reduktionsgas für die Direktreduktion wird das kohlenstoffmonoxidhaltige Abgas aus dem Schmelzofen verwendet. Die Energie für das Einschmelzen des Eisenschwamms wird durch die Verbrennung von Kohle unter Emission großer Mengen Kohlenstoffmonoxids erzeugt. Das Ausgangsmaterial ist je nach Verfahrensvariation flüssiges Roheisen oder flüssiger Rohstahl (Remus et al. 2013, S. 526).

Die einzigen beiden Schmelzreduktionsverfahren, die heute kommerziell eingesetzt werden sind das Corex-Verfahren mit Eisenerzpellets im Schachtofen und das Finex-Verfahren mit Feinerz im Wirbelschichtofen (Arens et al. 2012). Derzeit sind weltweit sechs Corex und zwei Finex-Anlagen in Betrieb und produzieren jährlich 7,45 Millio-

nen Tonnen Roheisen (0,5% der weltweiten Stahlproduktion) (Stahlinstitut VDEh 2013), (Remus et al. 2013, S. 528). Keine der Anlagen steht in Europa, sondern nur in Afrika und Asien.

Durch die Verbrennung von Kohle ist die CO₂-Emission des Schmelzreduktionsverfahrens ohne CCS mit 1760 kg/t etwas höher als im Hochofenverfahren (Wörtler et al. 2013, S. 31). Da die Abgase eine hohe CO₂-Konzentration haben, ist die Schmelzreduktion sehr gut für die CCS-Anwendung geeignet und würde dann nur noch 440 kgCO₂ / t Stahl emittieren, etwa 25% der konventionellen Hochofenroute (Birat und Borlée 2008). In dieser Hinsicht könnte der Schmelzreduktion eine wichtigere Rolle im Falle der Etablierung von CCS zukommen.

Durch einen erhöhten Kohleverbrauch während der Schmelzreduktion hat die Schmelzreduktionsroute mit 17,5 GJ/t Rohstahl einen höheren Energiebedarf als die konventionelle Hochofenroute (Worrell et al. 2008, S. 10). Die große Menge an Abgasen kann jedoch vor Ort zur Stromerzeugung eingesetzt werden, wodurch die gesamte Energiebilanz verbessert würde.

3.3 Innovative primäre Stahlherstellungsverfahren

Die Stahlindustrie sucht seit über 50 Jahren nach alternativen Verfahren zur Hochofenroute. Besonders für den energieintensiven Schritt der Roheisenherstellung müssen dringend neue Verfahren gefunden werden, da hier 75% des Energieverbrauchs und 90% der CO₂-Emission anfallen (Lindroos 2009, S. 21), (Fruehan 2009). Außer der Direktreduktion und der Schmelzreduktion gibt es bislang keine ökonomisch attraktiven Alternativen. Durch steigende Energiepreise und anspruchsvolle Klimaschutzziele wird der Bedarf alternativer primärer Stahlherstellungsverfahren und innovativer Technologien immer höher. Verfahren, die heutzutage durch hohe Herstellungskosten oder hohen Elektrizitätsbedarf wirtschaftlich unattraktiv erscheinen, können im Verlauf der Energiewende wirtschaftlich attraktiv werden.

Einige innovative Verfahren haben bereits die technische Machbarkeit erreicht und werden derzeit auf industrielle Anwendbarkeit untersucht. So betreibt ULCOS¹² zum Beispiel im weltweit größten Stahlinnovationsprogramm, mit einem Investitionsrahmen von \$725 Millionen, industrielle Pilotanlagen für innovative Technologien, wie Hochofenverfahren mit Gichtgasrückführung, CCS, Direktreduktion mit Erdgas und Wasserstoff und Eisenerzelektrolyse.

Die vielversprechendsten innovativen Technologien sollen im Folgenden kurz vorgestellt und mit den etablierten Verfahren verglichen werden.

3.3.1 Verbesserte Hochofenroute

Es existiert eine Vielzahl von Verfahrensoptimierungen, die während der vergangenen 50 Jahre Hochofennutzung entwickelt wurden. Dabei handelt es sich nicht um

¹² Ultra Low CO₂ Steelmaking

grundsätzlich neue Verfahren, sondern um inkrementelle Verbesserung der konventionellen Hochofenroute. Hier sollen nur einige ausgewählte Verbesserungen mit besonders großem Potenzial zur Energie- oder CO₂-Einsparung vorgestellt werden.

Gichtgasrezirkulierung am Hochofen (TGR)

Gichtgas besteht aus 45% Kohlenmonoxid (CO), 36% Kohlendioxid (CO₂), 7% Wasserstoff (H₂) und 12% Stickstoff (N). Am oberen Schachtende des Hochofens, der Gicht, wird Gichtgas abgezogen und in den Gichtgaswäscher geleitet. Dort werden Schwerepartikel und vor der Rückführung in den Hochofen auch das CO₂ abgeschieden. Das verbleibende Gas wird aufgewärmt und zurück in den Hochofen geführt. Durch die Rückführung kann der Kohlenstoffbedarf des Hochofens um etwa 24% reduziert werden (Hasan 2011, S. 228). Das abgeschiedene Kohlendioxid könnte noch in unterirdischen Druckspeichern gelagert werden (CCS) um die CO₂-Emission weiter zu reduzieren. Da diese Technologie, als ‚Retrofit‘ einer bestehenden Technologie, nicht die üblichen Risiken neuer Technologieentwicklung birgt, kann sie einen wichtigen Beitrag als kurz- bis mittelfristige Brückentechnologie leisten.

Einblasen von Reduktionsmittel in den Hochofen

Über die Heißwinddüsen am Hochofen können Reduktionsmittel direkt in die Schmelzzone des Hochofens eingeblasen werden. Üblicherweise werden kohlenwasserstoffhaltige Brennstoffe, wie Kohlenstaub, Schweröl, Erdgas oder Kokereigas verwendet, die den Koksverbrauch des Hochofens reduzieren (Remus et al. 2013).

Das Einblasen von Kohlenstaub über die Heißwinddüsen auch PCI (Pulverised Coal Injection) genannt, ergibt Verfahrensvorteile, wie höhere Produktivität und Lebensdauer, sowie Einsparungen durch reduzierten Koksbedarf. In üblichen Hochöfen ist das Kohlenstaubeinblasen auf 150 kg/t Roheisen limitiert, um einen stabilen Hochofenbetrieb nicht zu gefährden. Durch das Einblasen von Kohlenstaub kann der gesamte Energiebedarf der Hochofenroute um 3,6 % reduziert werden (Remus et al. 2013). Die CO₂-Emissionen der Kokerei werden sogar um 30% reduziert (Hasan 2011, S. 229).

Das Einblasen weiterer alternativer Reduktionsmittel, wie Altplastik, Altöl, Biomasse, etc. wird derzeit erprobt. Da auf absehbare Zeit im Hochofen nicht auf Koks verzichtet werden kann, ist das Potenzial der alternativen Reduktionsmittel begrenzt.

Gichtgasentspannungsturbine am Hochofen

In modernen Hochöfen mit einem hohen Druck von bis zu 2,5 bar kann über eine Entspannungsturbine am Gichtgasausgang Energie gewonnen werden. Die Energieeinsparung beläuft sich auf 0,4 GJ/t Roheisen, also etwa 2% des Energiebedarfs des Hochofens.

Abwärmennutzung am Oxygenkonverter

Beim Sauerstofffrischen entstehen große Mengen Konvertergas, die über das Abgas-system aufgefangen werden können. Das Konvertergas hat eine Temperatur von 1200°C und einen CO-Anteil von 70-80% (Remus et al. 2013, S. 409). Es gibt zwei Verfahren, um Energie aus dem Konvertergas zu gewinnen. Erstens kann das Gas unter Mischung mit Umgebungsluft abgebrannt werden um dann die Wärme in einem Abgaskessel in Wasserdampf umzuwandeln. Das zweite Verfahren sieht die Abkühlung und Wasserdampferzeugung jedoch ohne die Verbrennung des Gases vor. Das Gas kann dann zu einem späteren Zeitpunkt als Brennstoff verwendet werden (z.B. im Hochofen). Das erste Verfahren hat sich bis heute stärker bewährt, weil mehr Energie aus dem Oxygenkonverter zurückgewonnen werden kann. Pro Tonne Rohstahl können zwischen 0,35 GJ und 0,7 GJ Energie eingespart werden. Das entspricht bis zu 5% des Energieverbrauchs der Hochofenroute (Remus et al. 2013).

3.3.2 Kohlendioxid-Abscheidung und -Lagerung (CCS)

Wenn alle Effizienzpotenziale der herkömmlichen Verfahren ausgeschöpft sind, müssen Energieverbrauch und CO₂-Emission entkoppelt werden um weitere Emissionsreduktionen zu erreichen (Remus et al. 2013, S. 538). Genau diese Entkopplung ist das Grundprinzip der Kohlendioxid-Abscheidung und -Lagerung (CCS). Im ersten Schritt wird CO₂ aus Kuppelgasen (Gichtgas, Koksofengas, Konvertergas) ausgewaschen und abgeschieden. Im zweiten Schritt wird das CO₂ komprimiert und zur Lagerstätte transportiert. Im dritten Schritt erfolgt dann die Lagerung des CO₂ in gasförmigem, festem oder überkritischem Zustand (Remus et al. 2013).

Für den ersten Schritt der CO₂-Abscheidung hat sich bisher noch kein Verfahren durchgesetzt. Derzeit gibt es vielerorts Forschungs- und Entwicklungsvorhaben wie in (Birat und Borlée 2008) beschrieben. Bis jetzt wurden hauptsächlich Verfahren der chemischen und physikalischen Absorption umgesetzt. So könnte beispielsweise vor der Rezirkulierung des Kuppelgases in den Hochofen CO₂ mittels Druckwechsel-Adsorption (PSA¹³) abgeschieden werden (Schreck und Trudeau 2011). Für den zweiten Schritt zeichnet sich der Transport in flüssigem oder überkritischem Zustand in Pipelines oder Einzelfracht per Schiff ab. Für den dritten Schritt der Lagerung ist die Absonderung in geologischen Formationen, wie erschöpften Öl- oder Gasfeldern, Kohlemienen oder Salzstollen geplant (Remus et al. 2013). Ab einer Tiefe von 800m ist es möglich CO₂ in überkritischem Aggregatzustand zu speichern, was zu einer effizienteren Nutzung der Speicherkapazitäten und einer erhöhten Speichersicherheit führt (Metz 2005, S. 208). Wichtige Voraussetzung ist ein Deckel aus impermeablen Gesteinsschichten, die langfristig ein Aufsteigen des CO₂ als Flüssigkeit oder als Gas verhindert.

Eine horizontale Migration des CO₂, oder aber der Austritt (Leckage) wäre so noch nicht ausgeschlossen (Metz 2005, S. 32). Hauptrisiken sind Umweltbelastungen, wie z.B. Versalzung oder Verschmutzung von Trinkwasser, oder aber das Risiko eines

¹³ PSA = Pressure Swing Adsorption

plötzlichen Austritts großer Mengen CO₂ mit der damit verbundenen Erstickungsgefahr. 1986 sind am Nyos-See in Kamerun innerhalb kürzester Zeit 1,3 Mio Tonnen CO₂ durch einen Hangrutsch freigesetzt worden, was zum Erstickungstod von mehr als 1700 Menschen in der Umgebung führte (Krupp 2010, S. 52). Eine Ablagerung am Meeresboden in einer Tiefe von ca. 3000m befindet sich derzeit noch im Forschungsstadium. Das Risiko einer Leckage und die Auswirkungen auf die Umwelt, z.B. durch Versauerung des Meerwassers, sind derzeit noch nicht abschätzbar (Metz 2005, S. 7).

CCS lässt sich mit allen Verfahrensschritten der Eisen- und Stahlherstellung kombinieren, bei denen konzentrierte CO₂-Abgasströme auftreten. Besonders gut geeignet ist z.B. die Schmelzreduktion mit Erdgas (Birat und Borlée 2008) oder die Anwendung am Hochofen in Kombination mit Gichtgasrezirkulierung (Remus et al. 2013).

Der Energieverbrauch am Hochofen steigt durch CCS um etwa 20% an, wird aber ggfs. durch die Einsparungen am Koksbedarf wieder kompensiert (siehe z.B. TGR Hochofen) (Birat et al. 2008). Die CO₂-Reduktion liegt je nach Literatur und Referenzanwendung zwischen 25%¹⁴ und 80%¹⁵. Für die Abscheidung wird mit Kosten von € 20 – 80 / t CO₂ gerechnet. Für Transport¹⁶ und Lagerung kommen € 1 – 25 / t CO₂ hinzu (Remus et al. 2013, S. 542).

CCS wird als Brückentechnologie gesehen, die CO₂-Emissionen in der Energieerzeugung und in energieintensiven Industrien über einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten hinweg reduzieren könnte, bis langfristige Reduktionsmaßnahmen die Marktreife erlangt haben (Remus et al. 2013). Wegen der hohen Investitionskosten, des höheren Energieaufwandes und den vielfältigen Umwelt- und Sicherheitsbedenken im Zusammenhang mit Lagerstätten für das abgeschiedene CO₂ ist eine Anwendung jedoch fraglich (Gerspacher et al. 2011, S. 44). Eine weitere Unsicherheit betrifft die politische und gesellschaftliche Akzeptanz der CO₂-Speicherung, insbesondere an Land (Oei et al. 2011, S. 269).

Auch wenn CCS eine Möglichkeit darstellt um weiterhin fossile Brennstoffe in einer CO₂-limitierten Welt nutzen zu können, darf die Stahlindustrie jedoch in ihrer strategischen Planung nicht schon davon ausgehen, dass diese Technologie zur Anwendung kommt (Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS) 2013).

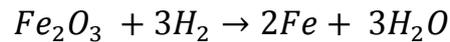
3.3.3 Direktreduktion mit Wasserstoff

Koks oder Erdgas als Reduktionsmittel im Direktreduktionsverfahren (siehe Abschnitt 3.2.3) lassen sich durch erneuerbar erzeugte Reduktionsmittel wie Wasserstoff oder Bio-Methan substituieren. Bei der sogenannten Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR), wird Eisenerz im festen Aggregatzustand in einem Schacht-, Drehrohr- oder Wirbelschichtofen durch Wasserstoffgas zu Eisenschwamm reduziert. Die Reaktion kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden (Germeshuizen und Blom 2013, S. 10679).

¹⁴ Lindroos 2009, S. 23

¹⁵ Croezen und Korteland 2010

¹⁶ Transport über 250 km



Anschließend wird der Eisenschwamm in einem Lichtbogenofen geschmolzen, von Gangart entfernt und zu Rohstahl weiterverarbeitet. Die technische Umsetzung wurde bereits 1999 in einer ersten Wasserstoff-Direktreduktionsanlage (Circored) in Trinidad demonstriert (Nuber et al. 2006). Die Anlage ist derzeit aufgrund des hohen Preises von Wasserstoffgas nicht in Betrieb. Im Circored Verfahren wird ein moderner Wirbelschichtofen eingesetzt, der bei einer Temperatur von nur 900°C die Verklebung des Feinerzes verhindert. Der Eisenschwamm hat anschließend einen Eisengehalt von mind. 95% und keinen Kohlenstoffgehalt (Nuber et al. 2006). Der anschließende Schmelzprozess im Lichtbogenofen muss leicht adaptiert werden, um den fehlenden Kohlenstoff (ca. 2% in Stahl) einzutragen (Wörtler et al. 2013, S. 30).

Wird dagegen Erdgas für die Wasserstoffherstellung verwendet, so bleibt die CO₂-Emission bestehen. Wird der Wasserstoff jedoch durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom vor Ort erzeugt und der Lichtbogenofen mit erneuerbarem Strom betrieben, so kann Stahl mit diesem Verfahren nahezu emissionsfrei hergestellt werden (Hasan 2011, S. 279). Lediglich die aufwendige Speicherung und der Transport zum Direktreduktionsofen verursachen noch indirekte Emissionen. Der Primärenergiebedarf ist durch die Wasserstoffherstellung höher als bei der Direktreduktion mit Erdgas. Für eine Tonne Rohstahl werden ca. 14 - 17 GJ Energie benötigt. Davon gute 60% für die Wasserstoffelektrolyse (Pregger et al. 2008), (Ahman et al. 2012), (Remus et al. 2013).

Nichtsdestotrotz wird dieser Technologie ein hohes Zukunftspotenzial zugeschrieben. Ein zunehmender Anteil volatiler, regenerativer Energiequellen stellt ein günstige ‚grüne‘ Stromquelle für die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse dar (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2011). Die übliche Anlagengröße von nur etwa ein bis zwei Megatonnen Stahl pro Jahr ermöglicht eine höhere Flexibilität der Produktionskapazität.

3.3.4 Direktreduktion mit Methan

In Analogie zur oben beschriebenen H-DR (siehe Abschnitt 3.3.3) kann statt Wasserstoffgas oder Erdgas auch Methan verwendet werden. Methan kann entweder aus Biomasse, oder durch Synthetisierung aus Wasserstoff erzeugt werden. Der Prozess im Reduktionsofen läuft identisch zur Direktreduktion mit Erdgas ab (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Die bei der Verbrennung von Methan ausgestoßene Menge CO₂ entspricht genau der Menge CO₂, die bei der Synthetisierung verbraucht wurde. Somit ist diese Technologie ohne Berücksichtigung indirekter Effekte theoretisch CO₂-neutral, sofern das Methan durch erneuerbare Energieträger hergestellt wurde. Durch die Methanisierung gehen ca. 20% des Energiegehaltes verloren, so dass dieser Verfahrensweg eine deutlich ungünstigere Energieeffizienz im Vergleich zur Wasserstoff-Direktreduktion aufweist (Nitsch et al. 2010, S. 77). Auch befindet sich die Methan-Synthetisierung noch in einem frühen Forschungsstadium ohne Erfahrungen aus ersten Pilotanlagen.

Durch die Eigenschaft von Methan als Übergangsenergieträger zwischen Erdgas und zukünftigem Wasserstoff könnte diese Technologie mittelfristig als Brückentechnologie zum Einsatz kommen. Methan aus Erneuerbaren Energiequellen (EE) kann ohne weiteres in der bestehenden Erdgas-Infrastruktur (Leitungen, Messgeräten, Endverbrauche, etc.) verwendet werden. Durch das bestehende Erdgasnetz mit einer Speicherkapazität von 220 TWh entfielen weitestgehend die Notwendigkeit neuer kostspieliger Speichersysteme, wie z.B. bei Wasserstoff (Nitsch et al. 2010, S. 77). Auf die Rolle von Methan-Direktreduktion als Alternativ- oder Brückentechnologie zur Wasserstoff-Direktreduktion wird in dem Exkurs in Abschnitt 8.1 genauer eingegangen.

3.3.5 Wasserstoff Suspensionsreduktion

Die Wasserstoff-Suspensionsreduktion, auch als *Hydrogen Suspension Reduction* oder *Hydrogen Flash Reduction* bezeichnet, ist ein neues wasserstoffbasiertes Herstellungsverfahren, das sich noch im frühen Entwicklungsstadium befindet. Feinerze (Konzentrat ca. 30µm Korngröße) werden kontinuierlich von oben in den Schwebeschmelzofen eingblasen (American Iron and Steel Institute 2010, S. 18). Dort schmelzen sie und werden bei Temperaturen von ca. 1300°C mit Wasserstoff reduziert. Trotz der kurzen Reduktionszeit von nur wenigen Sekunden kann eine Reduktionsrate von 90-99% erreicht werden. Das Ausgangsprodukt kann entweder in Form von flüssigem Roheisen direkt im Lichtbogenofen weiterverarbeitet werden, oder aber als briquetiertes Eisen (HBI) gelagert und transportiert werden. Pro Tonne Rohstahl werden zwischen 12 und 16,5 GJ Energie benötigt (International Energy Agency (IEA) 2012b), (American Iron and Steel Institute 2010). Die Universität von Utah, an der seit 2007 an diesem Verfahren geforscht wird, arbeitet derzeit an einer Erweiterung zur integrierten Stahlherstellung. Dabei werden die Eisen- und Stahlherstellungsschritte in einem Ofen kombiniert und so direkt Rohstahl erzeugt (Choi 2010, S. 18–20). Laut (International Energy Agency (IEA) 2010a) ist mit der Marktreife frühestens 2025 zu rechnen.

Außer Wasserstoff können auch Erdgas oder Synthesegas aus der teilweisen Verbrennung von Kohle verwendet werden. Bei der Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff wäre das Verfahren nahezu CO₂-neutral. Durch die Verwendung von Erdgas könnte die CO₂-Emission der Hochofenroute immerhin noch um 60% reduziert werden (American Iron and Steel Institute 2010, S. 18). Weitere Vorteile der Suspensionsreduktion sind, dass die Schritte der Rohstoffaufbereitung (Verkokung, Sintern, Pelletieren) entfallen und das Verkleben der Eisenerze, wie in der Direktreduktion, durch den Schwebeschmelzofen und die kurzen Reaktionszeiten bei der Suspensionsreduktion nicht auftritt.

Wenn günstiger CO₂-freier Wasserstoff zur Verfügung stünde und die technische Marktreife gegeben wäre, dann wäre die Wasserstoff-Suspensionsreduktion eine gute Alternative zur konventionellen Hochofenroute oder Schmelzreduktion mit CCS (International Energy Agency (IEA) 2012b, S. 253).

3.3.6 Eisenerzelektrolyse

Die Elektrolyse ist keine neue Technologie in der Metallherstellung. Sie ist für Aluminium und Magnesium sogar das einzig gebräuchliche Herstellungsverfahren. Ähnlich zur Schmelzflusselektrolyse von Aluminium wird durch Anlegen eines elektrischen Stroms flüssiges Eisenoxid an der Kathode zu Eisen reduziert. An der Anode entsteht Sauerstoff. Durch die konventionelle, effiziente und günstige Kohlenstoffreduktion wurde die Elektrolyse zur Stahlherstellung bislang kaum beachtet und steht noch am Anfang ihrer Entwicklung (Birat und Borlée 2008). Entwicklungspotenzial für die Anwendung in der Eisen- und Stahlindustrie haben vor allem die Hochtemperaturelektrolyse bei über 1600°C und die Elektrolyse alkalischer Eisenoxidlösung bei 110°C (Ahman et al. 2012, S. 31). Theoretisch ist eine komplett CO₂-freie Stahlherstellung möglich, wenn die großen Mengen benötigter Elektrizität aus EE stammen (Croezen und Korteland 2010). Pro Tonne Rohstahl wird je nach Verfahren eine Energie von 10 – 16GJ benötigt (Birat et al. 2008), (Worrell et al. 2008), (Remus et al. 2013).

Da jedoch sowohl die industrielle Marktreife, als auch der 100% erneuerbar hergestellte Strom eher langfristige Entwicklungsziele sind, kann mittelfristig mit diesem Herstellungsverfahren noch nicht gerechnet werden. (Hasan 2011) geht von einer Marktreife nicht vor 2040 aus.

3.3.7 Hochofenroute mit Biomasse

Laut (Remus et al. 2013, S. 568) wäre die Verwendung von nachhaltiger Biomasse im Hochofen eine ironische Wendung der Geschichte. Nachdem Stahl für Jahrhunderte mit Biomasse hergestellt wurde und erst mit der Industrialisierung Kohle zum Einsatz kam, würde man jetzt wieder zurück zur biomassebasierten Stahlherstellung gehen.

Das technologisch recht einfache Verfahren besteht aus der Substitution von fossilem Kohlenstoff durch nachhaltigen Kohlenstoff aus Biomasse. Derzeit befindet sich das Verfahren noch in der Forschungsphase (Birat 2009). Das Hochofenverfahren kann im Wesentlichen unverändert beibehalten werden. Statt fossilem Koks wird aus Biomasse erzeugte Holzkohle, Bio-Öl oder Bio-Gas verwendet. Für die Stahlindustrie bietet sich am ehesten die Holzkohle mit geringem Ascheanteil aus hochwertigem Holz (z.B. Eukalyptusplantagen) an.

Da die Biomasseverfügbarkeit und die möglichen Anbauflächen in Deutschland geringer sind als die Nachfrage, würde die Stahlindustrie in eine Wettbewerbssituation mit anderen energieintensiven Branchen über die verfügbare Biomasse treten. Der großflächige Anbau von Biomasse-Monokulturen mit den notwendigen Verarbeitungs- und Transportschritten kommt nicht ohne CO₂-Emissionen aus. Wenn durch die geringe inländische Verfügbarkeit noch der Import aus tropischen Ländern (z.B. Brasilien oder Kongo) notwendig wird, kann nicht mehr von nachhaltiger Biomasse gesprochen werden (Croezen und Korteland 2010, S. 31).

Insgesamt kann also festgehalten werden, dass es vielfältige Alternativen in der primären Stahlherstellung gibt. Viele dieser Technologien befinden sich noch in einem frühen Forschungsstadium und es ist noch nicht absehbar ob mit ihnen jemals Stahl

im industriellen Maßstab zu wettbewerbsfähigen Preisen hergestellt werden kann. Qualitätsprobleme, die beim Recycling von Stahlschrott zunehmend durch Verunreinigungen auftreten spielen bei den innovativen Primärtechnologien keine Rolle. Durch ausgewogene Prozesstechnik und Zugabe von gewünschten Zuschlagstoffen kann auch über jedes innovative Verfahren jede gewünschte Stahlqualität erzielt werden. Besonders durch den geringen Kohlenstoffanteil des Direktreduktionsverfahrens könnten Spezialstähle besonders gut hergestellt werden, ohne durch Sauerstofffrischen den Kohlenstoffgehalt aufwendig zu reduzieren.

Tabelle 3-1: Kurzübersicht Verfahrensvergleich Stahlherstellung

Verfahren	Kurzbeschreibung	Entwicklungsstand	Technische Marktreife	Veränderung CO ₂ -Emission ¹	Veränderung Energiebedarf ¹
Konventionelle Hochofenroute	Reduktion von Eisenerz im Hochofen. Durch Einblasen heißer Luft verbrennt Kohle zu CO (Reduktionsmittel). Anschließend Linz-Donawitz-Verfahren im Konverter (stark exotherm). Kühlung durch Zugabe von Stahlschrott oder Eisenschwamm.	Industrieller Maßstab	besteht	Referenz: 1700 kg / t RS	Referenz: 18 GJ / t RS
Sekundäre Stahlerzeugung	Stahlschrott wird im Lichtbogenofen eingeschmolzen, gereinigt und zu neuem Stahl verarbeitet. Limitiert durch Schrottverfügbarkeit (max. 50% bis 2050)	Industrieller Maßstab	besteht	- 70 – 80%	- 85 – 95%
DR mit Erdgas	Direktreduktion von Erz durch Gas im Drehrohr- oder Schaftofen zu festem Eisenschwamm. Anschließend schmelzen und CO ₂ -Reduzierung im Lichtbogenofen. Ggfs. in Kombination mit CCS.	Industrieller Maßstab	besteht	- 30% (-70-80% mit CCS)	- 20 – 30%
Schmelzreduktion	Zweistufiges Verfahren aus Direktreduktion mit anschließendem Schmelzprozess des Eisenschwamms. Kohle wird vergast und als Reduktionsmittel verwendet.	Industrieller Maßstab (nur 8 Anlagen weltweit)	besteht	+ 4% (-75% mit CCS)	- 0 – 8%
Verbesserte Hochofenroute	Hochofenroute s.o. ausgestattet mit inkrementellen Verbesserungen: - Gichtgasrückführung BF (TGR) - Gas-Rezirkulierung Sinteranlagen - Kokstrockenkühlung - Konvertergas recyceln - Gichtgasentspannungsturbine - Kohlenstaubeinblasen	Pilotanlagen	2015-2020	- 10 – 20%	- 10 – 20%
Hochofen mit CCS	Hochofen ausgestattet mit TGR und CCS nach neuem Stand der Technik	Pilotanlagen	2020	- 25 – 80%	- 0 – 15%
Hochofen mit Biomasse	Konv. Hochofenroute mit Koks aus Biomasse. Am besten geeignet ist Holzkohle aus Eukalyptus. Kombinierbar mit CCS um CO ₂ -Senke zu erzeugen.	Anwendungsforschung	N/A	quasi CO ₂ -frei ²	+ 5 – 10%
Direktreduktion mit H ₂	Direktreduktion von Erz durch H ₂ im Drehrohr-, Schacht- oder Wirbelschichtofen zu festem Eisenschwamm. Anschließend Schmelzen und Entfernen von Gangart im Lichtbogenofen.	Pilotanlagen	besteht	- quasi CO ₂ -frei ²	- 5 – 30%
Direktreduktion mit CH ₄	Direktreduktion s.o. mit erneuerbarem Methan anstelle von Wasserstoff	Pilotanlage für Methan-synthese	N/A	quasi CO ₂ -frei ²	- 0 – 15%
Elektrolyse	Elektrochemische Spaltung von Eisenerz in Sauerstoff und Roheisen durch elekt. Spannung. Entwicklungspotenzial auch für industrielle Anwendung hat vor allem die Elektrolyse von alkalischer Eisenoxidlösung (110°C). Anschließend Stahlherstellung im Lichtbogenofen.	Grundlagenforschung	2040	quasi CO ₂ -frei ²	- 10 – 50%

H ₂ Suspensions- reduktion	Einschrittige Schmelzreduktion mit Wasserstoff. Bei deutlich höheren Temperaturen als Direktreduktion in "Flash furnace"	Grundlagen- forschung	N/A	quasi CO ₂ -frei ²	-10 – 35%
¹ Reduktion im Vergleich zur konventionellen Hochofenroute					
² Nur geringe CO ₂ -Mengen durch indirekte Emissionen und kohlenstoffhaltige Zuschlagstoffe					
Quellen: (Birat 2009), (Remus et al. 2013), (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2011), (Fruehan 2009), (Aichinger und Steffen 2006), (Wörtler et al. 2013), (Schlesinger et al. 2010), (Lindroos 2009), (American Iron and Steel Institute 2010), (Arens et al. 2012), (Hasan 2011), (Kirschen et al. 2011), (Worrell et al. 2008), (Gerspacher et al. 2011), (Garza 2006), (European Commission 2011), (Croezen und Korteland 2010), (Kirchner und Matthes 2009), (Ahman et al. 2012), (International Energy Agency (IEA) 2012b), (Allwood und Cullen 2012), (International Energy Agency (IEA) 2012a), (Choi 2010), (World Steel Association 2012)					

3.4 Literaturscreening Stahlherstellungsverfahren

Seit den ersten verpflichtenden Klimaschutzzielen der Bundesregierung 1995 auf dem Klimagipfel in Berlin werden die politischen Klimaschutzanstrengungen wissenschaftlich begleitet. Spätestens seit der Veröffentlichung des aktuellen Energiekonzeptes der Bundesregierung in 2010 (BMU 2010) und dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergie in 2011 wird der mittel- und auch langfristige Verlauf der Klimaschutzmaßnahmen in diversen Szenariostudien untersucht. Energieintensive Industrien, wie die Eisen- und Stahlindustrie, stehen dabei im Fokus. Die Szenariostudien versuchen wahrscheinliche Entwicklungspfade und Entscheidungspunkte im Hinblick auf die Klimaziele der Bundesregierung aufzuzeigen und die Wirkung untersuchter Klimaschutzmaßnahmen zu bewerten.

Klimaschutzmaßnahmen sind vielfältig. Je nach Branche und Anwendungsbereich gibt es Maßnahmen im Bereich Energieeffizienz, Emissionseffizienz, Materialeffizienz oder Reduzierung im Produkt- bzw. Servicebedarf (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014a, S. 4). In der Eisen- und Stahlindustrie sind im Rahmen der Modernisierungen der vergangenen Jahrzehnte die meisten Maßnahmen aus den Bereichen Energie- und Materialeffizienz durch inkrementelle Verbesserungen an den bestehenden Verfahren umgesetzt. Der Wechsel auf die sekundäre Stahlherstellung ist durch die Verfügbarkeit von hochwertigem Stahlschrott bis 2050 auf max. 50% begrenzt (Wörtler et al. 2013, S. 16). Eine reduzierte Stahlnachfrage, mit zweifelsfrei starkem Effekt auf die THG-Emission, führt unweigerlich zu einer Verschlechterung der Beschäftigungssituation und einer Reduktion der Investitionsbudgets in innovative Verfahren und wird deshalb politisch derzeit nicht verfolgt. In den stahlverarbeitenden Branchen wird aus Kostengründen der Stahlbedarf durch kontinuierlich gesteigerte Materialeffizienz bereits optimiert. Aktuelle Szenariostudien wie (Wörtler et al. 2013, S. 17), (Birol et al. 2013, S. 78), (Allwood et al. 2010) zeigen auf, dass das Ziel der Europäischen Union (EU)¹⁷, 80% Reduktion der CO₂Emission bis 2050 im Eisen- und Stahlsektor, mit inkrementellen Emissionseffizienzmaßnahmen kaum zu erreichen ist. Besonders die innovativen Stahlherstellungsverfahren könnten hier einen wichtigen Beitrag leisten und sollen deshalb im Literaturscreening genauer untersucht werden.

¹⁷ Europäische Kommission 2011

Hierzu werden aktuelle Szenariostudien¹⁸ auf die Berücksichtigung verschiedener Stahlherstellungsverfahren hin untersucht.

3.4.1 Berücksichtigung und Bewertung konventioneller Verfahren

Da laut (Ahman et al. 2012) bis 2030 keine CO₂-Reduktionen durch technologische Umbrüche zu erwarten sind, werden mittelfristig eine Vielzahl an kleineren Verbesserungsmaßnahmen erwartet. Fast alle Szenariostudien berücksichtigen die etablierten konventionellen Herstellungsverfahren samt inkrementeller Verbesserungen. Die am häufigsten berücksichtigten inkrementellen Maßnahmen, die mittelfristig zum Einsatz kommen sollen, sind:

- Gichtgasrückführung am Hochofen
- Kokstrockenkühlung
- Konvertgasrezirkulierung
- Gichtgasentspannungsturbine
- Kohlenstaubeinblasen am Hochofen
- Injektion von Erdgas/Generatorgas am Hochofen
- Schrottvorwärmen im Elektrostahlverfahren
- Abwärmenutzung am Oxygenkonverter

Der Fahrplan der Europäischen Kommission sieht für die Industrie eine CO₂-Reduktion von mind. 30-40% bis 2030 und 80-90% bis 2050 vor (Europäische Kommission 2011, S. 7). Selbst wenn alle inkrementellen Verbesserungen komplett eintreten würden, ergäbe sich 2050 nur eine CO₂-Reduktion um etwa 40%, also gerade einmal der Hälfte des EU Ziels von 80% (Wörtler et al. 2013). Die Reduktionsziele des Eisen- und Stahlsektors werden also nur durch inkrementelle Verbesserungen nicht zu erreichen sein (Ahman et al. 2012).

3.4.2 Berücksichtigung und Bewertung innovativer Verfahren

So konsistent die obigen Szenariostudien bei der Vorhersage der etablierten Herstellungsverfahren sind, so inhomogen sind die Annahmen im Zusammenhang mit innovativen Technologien. Hauptunterschied ist die Auswahl, welche neuartigen Herstellungsverfahren überhaupt berücksichtigt werden. Weitere Unterschiede sind Annahmen zur spezifischen CO₂- und Energiereduktion sowie zum zeitlichen Verlauf der Markteinführung.

Kohlenstoff Abscheidung und –Lagerung (CCS)

¹⁸ Neelis und Patel 2006, Croezen und Korteland 2010, Allwood et al. 2010, Nitsch et al. 2010, Wörtler et al. 2013, International Energy Agency (IEA) 2012b, Matthes et al. 2013, Kirchner und Matthes 2009, Schlesinger et al. 2011, Nitsch et al. 2012, Zeiss und Valentin 2011, Pardo et al. 2012, Brown et al. 2012, Hasan 2011, Wang et al. 2007, Gerspacher et al. 2011, Ahman et al. 2012, Croezen und Korteland 2010, Schlesinger et al. 2010, Birol et al. 2013, Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2011, European Commission (JRC) 2010, Diczfalusy 2012, European Commission 2011

Laut (International Energy Agency (IEA) 2012b, S. 11) ist CCS die einzige Technologie in "Sichtweite" die energieintensiven Sektoren, wie der Eisen- und Stahlindustrie, die Erfüllung ambitionierter Emissionsreduktionsziele ermöglichen würde.

Folgende Szenariostudien berücksichtigen CCS-Anwendung im Detail: (Kirchner und Matthes 2009), (Croezen und Korteland 2010), (Lindroos 2009), (Ahman et al. 2012), (Remus et al. 2013), (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2011), (International Energy Agency (IEA) 2012b). Selbst im Energiekonzept der Bundesregierung¹⁹ wird CCS für die Minderung prozessbedingter-Emissionen eine hohe Bedeutung zugesprochen.

Ab 2020 - 2025 könnte CCS für Industrieanwendungen Marktreife erreichen. Ab 2035 könnte CCS dann auch bei der Herstellung von Biokraftstoffen angewendet werden um CO₂-Senken zu generieren (International Energy Agency (IEA) 2012b, S. 11).

Etwas konservativer schätzt (Matthes et al. 2013) die Marktreife von CCS nicht vor 2030 ein, weil durch notwendige Genehmigungsverfahren von Speicherstätten mit langen Vorlaufzeiten zu rechnen ist. Die CO₂-Emissionen werden durch CCS je nach Szenario und Referenzwert um 20% bis 75% reduziert.

Gerade Szenariostudien, die innovativen Herstellungsverfahren keine oder nur eine untergeordnete Rolle einräumen, weisen auf die Unverzichtbarkeit von CCS hin (vgl. Birol et al. 2013).

Fest steht, dass durch die schlechte Planbarkeit der Entwicklungsprozesse alternativer Herstellungsverfahren die Notwendigkeit für einen Ausweichplan gegeben ist. Dieser Ausweichplan kann, so lassen viele Studien erkennen, derzeit nur die CCS-Technologie sein. Da auch diese Technologie noch einige Jahre vor ihrer Marktreife steht, weist (Birat und Borlée 2008) auf das Risiko hin, dass viele Akteure auf die rechtzeitige Etablierung von CCS vertrauen und nicht mit der notwendigen Intensität an alternativen Verfahren arbeiten.

Als Haupthindernis wird derzeit die fehlende Akzeptanz dieser Technologie in der Bevölkerung gesehen (EUROFER 2013, S. 37–38). Es bestehen noch viele Unsicherheiten und Befürchtungen über Umwelt- und Sicherheitsrisiken (Fishedick et al. 2007, S. 66–86), (Metz 2005, S. 12–14). Der Transport und die unterirdische Lagerung könnten neben den potentiellen Umweltschädigungen zusätzlich noch zu Nutzungskonflikten mit zukünftiger Energieinfrastruktur führen (z.B. unterirdischen Energiespeichern für Druckluft, Methan, Wasserstoff) (Fishedick et al. 2007, S. 172), (Metz 2005).

Hochofen mit Biomasse

Durch den vorhergesagten Preisanstieg der Emissionszertifikate wächst der Druck, nicht-fossile Verfahren einzusetzen. Derzeit würden die CO₂-Emissionszertifikate bereits 50% bis 60% des Kohlepreises ausmachen, wäre die Metallindustrie nicht über

¹⁹ BMU 2010, S. 19

eine Ausnahmeregelung bis mindestens 2020 vom CO₂-Ausgleich befreit (Europäische Union).

Die Verwendung von erneuerbar erzeugter Holzkohle oder Bio-Öl als Kohlenstoffersatz im Hochofen hat verschiedene Vorteile. Die bestehende Anlagentechnik kann weitestgehend genutzt werden, da Holzkohle ähnliche physikalische Eigenschaften besitzt wie Steinkohle oder Koks. Durch streng kontrollierten Biomasseanbau, z.B. in Eukalyptus Plantagen, kann Holzkohle nahezu CO₂-frei hergestellt werden (Birat und Borlée 2008). In Kombination mit CCS-Technologien bietet die Bio-Kraftstoffherstellung sogar die Möglichkeit der negativen CO₂-Emission, also der CO₂-Senke (International Energy Agency (IEA) 2012b, S. 11).

Trotzdem ist die Berücksichtigung von Biomasseanwendung in der Eisen- und Stahlindustrie sehr unterschiedlich. Studien wie (Hasan 2011) geben zu bedenken, dass die Fläche Belgiens in einer klimatischen Region wie Brasilien mit Eukalyptus bepflanzt werden müsste, um den Energiebedarf der europäischen Stahlindustrie zu decken. Außerdem stellt der Import von Biomasse aufgrund des global begrenzten Biomaspotenzials keine nachhaltige Lösung dar (Nitsch et al. 2012).

Gerade für den Einsatz im Hochofen wird hochwertige, aschearme Biomasse benötigt, die nicht aus landwirtschaftlichen Abfällen erzeugt werden kann, sondern eigens angebaut werden müsste. Szenariostudien wie (Croezen und Korteland 2010, S. 31), (Gerspacher et al. 2011) berücksichtigen Biomasse wegen der zweifelhaften Nachhaltigkeit nicht als technologische Option.

In anderen Szenarien spielt Biomasse als Kohlenstoffersatz in der Hochofenroute jedoch eine wichtige Rolle (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2011), (Birat 2009), (Birat und Borlée 2008), (International Energy Agency (IEA) 2012b), (Ahman et al. 2012). In Brasilien, einem Land mit einem hohen Biomassevorkommen pro Kopf, werden aktuell schon einige kleine Hochöfen zu 100% mit Biomasse betrieben. Im Rahmen des Forschungsprogramms ULCOS wird daran gearbeitet, diese Technologie auch nach Europa zu bringen. Somit könnte ein biomasse-betriebener Hochofen mittelfristig ein alternatives Verfahren sein. Langfristig wird Biomasse jedoch keine tragende Rolle als alternatives Reduktionsmittel einnehmen.

Durch die begrenzten Anbauflächen in Europa, wird es für das geringe Vorkommen an hochwertiger Biomasse eine hohe Nachfrage geben. Der verbraucherseitige Wettbewerb zwischen den energieintensiven Industrien (Eisen- und Stahl, Papier, Zement), der Energiewirtschaft und dem Transportsektor lässt einen Preisanstieg erwarten, der die Wirtschaftlichkeit der Biomasseverwendung in Frage stellt. In (Nitsch et al. 2012) wird ab 2030 mit einer Stagnation der Biomasseproduktion gerechnet.

Direktreduktion mit Wasserstoff oder Methan

Die Direktreduktion mit Erdgas ist mit ca. 5%²⁰ der weltweiten Stahlproduktion ein etabliertes Verfahren. Sogar für die Direktreduktion mit Wasserstoff gibt es schon eine erste Anlage im industriellen Maßstab (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Wenn Szenariostudien innovative Stahlherstellungsrouten berücksichtigen, dann wird der Direktreduktion mit erneuerbarem Wasserstoff oder Methan immer eine wichtige Rolle zugemessen (Nitsch et al. 2012), (World Steel Association 2012), (International Energy Agency (IEA) 2012b), (Ahman et al. 2012), (Croezen und Korteland 2010). Durch die Eisenerzreduktion mit Koks im Hochofen fallen 80% der CO₂-Emission an. Auf dem Weg zu einer CO₂-armen Stahlherstellung, ist die Etablierung eines alternativen, CO₂-freien Reduktionsmittels der wichtigste Schritt (Ahman et al. 2012, S. 30).

Eine besondere Rolle als Brückentechnologie könnte die Direktreduktion mit erneuerbarem Methan einnehmen, weil die bestehende Erdgasinfrastruktur ohne weiteres genutzt werden kann (Nitsch et al. 2012). Verfahrenstechnisch sind die Verfahren mit Methan oder Wasserstoff nahezu identisch. Lediglich ein weiterer Umwandlungsschritt zur Methansynthesierung wäre notwendig.

Die derzeitigen Preise für Wasserstoffgas hemmen den Markteintritt der Wasserstoff-Direktreduktion. So steht die einzige Wasserstoff-Direktreduktionsanlage ‚Circored‘ seit einigen Jahren still (Birat und Borlée 2008).

Derzeitige Überkapazitäten blockieren zusätzliche durch hohe Schließungskosten bestehender Anlagen den Neubau moderner Direktreduktionsanlagen (Wörtler et al. 2013). Auch bei diesem innovativen Herstellungsverfahren muss also ein Markteintritt durch geeignete politische Maßnahmen und durch ein funktionierendes Emissionshandelssystem (ETS)²¹ gefördert werden. In (International Energy Agency (IEA) 2012b, S. 257) wird der Wasserstoff-Direktreduktion ein Markteintritt ab 2030 vorhergesagt. Bis 2050 wird ein Marktanteil von 8-11% an der weltweiten Rohstahlproduktion erwartet.

Besonders hoch sind bei dieser Technologie die Abhängigkeiten von der Entwicklung in anderen Industrien. Entwickelt sich Wasserstoff, wie im ‚Szenario 2011 THG95‘ (Nitsch et al. 2012) zu einer tragenden Rolle als chemischem Speicher und als Energieträger für den Wärme- und Verkehrssektor, so lägen große Mengen günstigen Wasserstoffs sowie eine Wasserstoffinfrastruktur vor. Für die Eisen- und Stahlindustrie ergäben sich große Synergien, so dass langfristig wasserstoffbasierte Stahlherstellungsverfahren auch ökonomisch am profitabelsten wären.

Elektrolyse

Die Elektrolyse von Eisenerzen zu Roheisen befindet sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Trotzdem wird diese Technologie in vielen Szenariostudien als

²⁰ Arens et al. 2012 und Midrex 2013

²¹ ETS = Emission Trading System

langfristige Zukunftstechnologie mit hohem Potenzial berücksichtigt (Nitsch et al. 2012), (Remus et al. 2013), (Ahman et al. 2012), (Croezen und Korteland 2010). Für (Croezen und Korteland 2010, S. 43) stellt die Elektrolyse als energieeffizientestes Verfahren sogar das Verfahren mit dem höchsten zukünftigen Potenzial überhaupt dar.

Die Elektrolyse der alkalische Eisenoxidlösung scheint zum jetzigen Entwicklungsstand energieeffizienter und einfacher auf industrielle Maßstäbe skalierbar zu sein, als die Hochtemperatur-Elektrolyse (Birat 2009). Ein Markteintritt wird jedoch erst ab 2040 - 2050 erwartet (International Energy Agency (IEA) 2012b).

Da die technische Machbarkeit im Labormaßstab bereits demonstriert wurde, ist die Hauptvoraussetzung für den Markteintritt der Eisenerzelektrolyse die Verfügbarkeit von günstigem, CO₂-freiem Strom, der dieses Verfahren ökonomisch profitabel werden ließe.

Wasserstoff-Suspensionsreduktion

Die Wasserstoff-Suspensionsreduktion ist eine Technologie, die noch am Anfang Ihrer Entwicklung steht. Bisher haben nur wenige Szenarien diese Technologie berücksichtigt, ihr langfristig aber ein großes Potenzial zugesprochen (World Steel Association 2012), (International Energy Agency (IEA) 2012b, S. 257), (Ahman et al. 2012).

Eine Angabe zur erwarteten Marktreife gibt keine der Studien. Aus Forschungsarbeiten, wie (Choi 2010, S. 108) ist zu entnehmen, dass das Verfahren im Labormaßstab gute Ergebnisse gezeigt hat und nun die Vorbereitungen an einer ersten kleinen Pilotanlage laufen.

Ähnlich wie bei der Wasserstoff-Direktreduktion ist hier neben der technologischen Entwicklung vor allem die Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Rolle von Wasserstoff als Energieträger entscheidend.

Nachdem nun die wichtigsten konventionellen und innovativen Stahlherstellungsverfahren aus der aktuellen Literatur zusammengefasst wurden (siehe Tabelle 3-1), soll nun eine Auswahl für den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit getroffen werden.

3.5 Ableitung des Untersuchungsgegenstandes

In den aktuellen Szenariostudien werden bisher vorwiegend Veränderungen bei der Energieeffizienz der Stahlindustrie, sowie der teilweise Übergang auf die sekundäre Stahlerzeugung berücksichtigt. Unter der Voraussetzung einer konstanten oder leicht wachsenden Stahlnachfrage verfehlt der prognostizierte Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen die EU Klimaziele jedoch bei weitem (Wörtler et al. 2013). Nur wenige Szenarien gehen bei der Berücksichtigung innovativer Technologien (vgl. Abschnitt 3.3) über die CCS Anwendung an bestehenden Herstellungsrouten hinaus. Selbst wenn innovative Technologien der Eisen- und Stahlherstellung in den Szenarien berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 3.4.2), so doch eher als beispielhafter Ausblick in

die Zukunft. Einige technologische Arbeiten beschäftigen sich im Detail mit der weiteren Entwicklung der Technologien bis zu Marktreife (Remus et al. 2013).

Laut (Wörtler et al. 2013); (Birat und Borlée 2008); (Remus et al. 2013); (Gerspacher et al. 2011); (International Energy Agency (IEA) 2012b) sind die Herstellungstechnologien mit dem höchsten Zukunftspotenzial in der Eisen- und Stahlindustrie CCS in Kombination mit Kuppelgasrezirkulierung am konventionellen Hochofen, Direktreduktion (DR) in Kombination mit dem Lichtbogenofen (EAF) und die noch sehr unreife Technologie der Eisenerzelektrolyse (EW). Eine detaillierte ganzheitliche Bewertung dieser innovativen primären Stahlherstellungsverfahren basierend auf Anlagenmodellierungen gibt es bisher jedoch nicht. Genau dieser Ansatz soll mit der vorliegenden Arbeit verfolgt werden.

Als Referenz soll die etablierte Hochofenroute (BF-BOF)²² dienen. Als erstes innovatives Verfahren wird die Hochofenroute in Kombination mit CCS²³-Technologie (BF-CCS) betrachtet, die von vielen Szenariostudien als wichtige oder einzige mittelfristige Maßnahmen gesehen wird, um die CO₂ Emission in der Stahlindustrie zu senken. Als Repräsentant der Direktreduktionsverfahren wird die Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR)²⁴ untersucht, die durch Synergien mit dem Energieträger Wasserstoff eine besondere Bedeutung erlangen könnte. Als besonders innovatives Verfahren soll schlussendlich noch die Eisenerzelektrolyse (EW)²⁵ untersucht werden, die sich bislang noch in einem frühen Forschungsstadium befindet. Somit werden insgesamt vier unterschiedlichen Verfahren der primären Stahlherstellung verglichen - zwei hochofenbasierten Verfahren (BF-BOF und BF-CCS) und zwei Verfahren mit innovativen Reduktionsmitteln (H-DR und EW).

Um eine ganzheitliche Bewertung der oben genannten Verfahren zu realisieren, muss neben der eigentlichen Stahlherstellung zusätzlich die gesamte Wertschöpfungskette samt Herstellung des Reduktionsmittels berücksichtigt werden. In einem neu entwickelten dreischrittigen Bewertungsverfahren wird, basierend auf techno-ökonomischen Modellen der vier Herstellungsverfahren, eine ganzheitliche multi-kriterielle Bewertung unter Berücksichtigung technischer, gesellschaftlicher, wirtschaftlicher und ökologischer Sichtweisen vorgenommen.

Zuvor wird im folgenden Exkurs aber zunächst ein Screening von Wasserstofftechnologien durchgeführt, um eine Voraussetzung für die Bewertung der branchenübergreifenden Synergien der Wasserstoff-Direktreduktion zu schaffen.

²² BF-BOF = Blast Furnace followed by Basic Oxygen Furnace

²³ CCS = Carbon Capture and Storage

²⁴ H-DR = Hydrogen Direct Reduction

²⁵ EW = Electrowinning

4 Technologiescreening Wasserstoff

Wasserstoff ist das leichteste der chemischen Elemente und gleichzeitig das im Universum am häufigsten vorkommende. Auf der Erde kommt Wasserstoff unter Normalbedingungen nur in chemisch gebundenen Zuständen vor und ist Bestandteil von Wasser und vielen organischen Verbindungen. Somit kommt Wasserstoff in allen lebenden Organismen vor.²⁶

Erstmals wurde Wasserstoff vom englischen Wissenschaftler Henry Cavendish im Jahre 1766 entdeckt, als er Quecksilber und Säuren zusammenbrachte und sich kleine Gasbläschen bildeten. Unabhängig von Cavendish entdeckte im Jahre 1787²⁷ Antoine Lavoisier Wasserstoff beim Erhitzen von Wasser in einer geschlossenen Apparatur. Das entstandene Gas war brennbar und bildete selber wieder Wasser, worauf der Name *hydro-gène* (griechisch: hydro = Wasser, genes = erzeugend) abzielte. 1839 entdeckte Sir William Grove die Funktionsfähigkeit einer Wasserstoff-Sauerstoff Brennstoffzelle zur direkten Umwandlung von chemischer in elektrische Energie.

Erst in den 1960er Jahren kam die Brennstoffzellentechnologie zu ersten Einsätzen in der amerikanischen Raumfahrttechnik.

Unter Normalbedingungen kommt Wasserstoff nicht in atomarer Form vor, sondern nur in chemischen Bindungen oder als molekulares Wasserstoffgas. Wasserstoffgas ist geruchs- und farblos, ruft keine Verätzungen oder Reizungen hervor und ist nicht gesundheits- oder umweltschädlich. Wasserstoff ist bei Umgebungstemperatur gasförmig und muss auf sehr tiefe Temperaturen abgekühlt werden, bevor er flüssig wird. Die Siedetemperatur bei Atmosphärendruck liegt bei 20,3 K, d.h. etwa -253°C. Die Verflüssigung gelang erstmals 1898 dem englischen Forscher James Dewar. Für die Abkühlung bis auf die Kondensationstemperatur, die in Form von hintereinander geschalteten Kühlkreisläufen stattfindet, bedarf es heutzutage in Großanlagen einer Energie von 10 kWh/kg (knapp einem Drittel des Energiegehaltes von Wasserstoff von 33 kWh/kg) (Klemm 2011, S. 3).

Wasserstoff reagiert bei Zündung mit Sauerstoff und Chlor heftig exotherm mit kaum sichtbarer Flamme. Je wärmer das Gas wird, desto reaktionsfreudiger ist es und geht mit Metallen und Nichtmetallen Verbindungen ein. Wasserstoff ist das chemische Element mit der geringsten Dichte. Als molekularer gasförmiger Wasserstoff ist es deutlich leichter als Luft. Auch im flüssigen Zustand sorgt die geringe Dichte für Schwierigkeiten in der Handhabung. Aufgrund seiner besonderen chemischen Eigenschaften, wie der geringen Dichte und der damit verbundenen geringen Viskosität und den hohen mittleren Molekülgeschwindigkeiten (1770 m/s bei 298 K²⁸), lässt sich Wasserstoff deutlich schwieriger handhaben und speichern. Die hohe Diffusivität kann dazu führen, dass Wasserstoff aus Behältnissen entweicht, die für andere Gase

²⁶ Jordan 2008

²⁷ Jordan 2008

²⁸ Jordan 2008

oder Flüssigkeiten dicht sind. Das sich bildende Wasserstoff-Luft Gemisch ist dann bei einer Wasserstoffkonzentration von 4% - 75% entflammbar.²⁹

Wasserstoff diffundiert auch außerordentlich schnell in Eisen, Platin und andere Übergangsmetalle und verursacht dort Versprödung durch Einlagerung von Wasserstoffatomen im Metallgitter. Somit ist der Einsatz von Metallen zur Wasserstoffspeicherung, -transport und -verarbeitung stark eingegrenzt. Oxidationsschichten oder besondere Edelmischmetalle (z.B. Cr-Ni-Stähle) können diesen Effekt stark reduzieren und sind somit Standardmaterialien der Wasserstofftechnik.

Bevor in Abschnitt 4.2 das Technologiescreening durchgeführt wird, soll im folgenden Abschnitt ein Überblick über die Rolle von Wasserstoff in den vielfältigen Anwendungsbereichen gegeben werden.

4.1 Rolle und Anwendungsbereiche von Wasserstoff

Der Vorteil von Wasserstoff gegenüber Elektrizität liegt in der leichteren Speicherbarkeit. In allen Anwendungsfällen, in denen Strom erzeugt wird und vor Ort verwendet werden kann, macht der Umweg über Wasserstoff keinen Sinn (Schindler und Schmidt 2004). Überall wo eine längere Speicherung oder aber ein Transport notwendig ist, wird Wasserstoff durch seine gute Speicherbarkeit in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Wasserstoff als ein Sekundärenergieträger spielt besonders für einen gleitenden Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern eine wichtige Rolle, da er aus einer Vielzahl von konventionellen und regenerativen Primärenergiequellen gleichermaßen hergestellt werden kann (Schindler und Schmidt 2004). Damit bleibt die Flexibilität der freien Wahl der Energiequelle erhalten und trotzdem kann ein einheitliches Distributions- und Endanwendungsnetzwerk aufgebaut werden.

Für die Beurteilung der Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff aus gesamt-systemischer Perspektive ist die Betrachtung der Wertschöpfungskette von besonderer Bedeutung.

4.1.1 Wertschöpfungskette von Wasserstoff

Die Wertschöpfungskette von Wasserstoff stellt sich wie in Abbildung 4-1 dar und wird im Folgenden näher beschrieben.

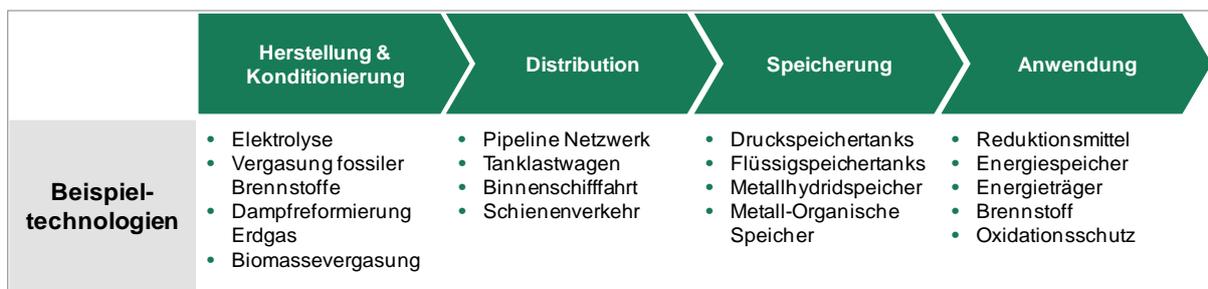


Abbildung 4-1: Wasserstoff Wertschöpfungskette mit beispielhaften Technologieanwendungen

²⁹ Wurster und Schmidtchen 2011

Herstellung und Konditionierung

Das günstigste Verfahren heutzutage um Wasserstoff herzustellen, ist die Dampfreformierung von Erdgas (Schindler und Schmidt 2004). Da im Reformierungsprozess bereits CO₂ emittiert wird, handelt es sich nicht um CO₂-neutralen Wasserstoff, es sei denn das Kohlenstoffdioxid wird eingefangen und permanent gespeichert (CCS). Ähnlich wie bei der Dampfreformierung von Erdgas können auch andere fossile Brennstoffe unter CO₂-Emission reformiert werden.

Nachhaltige Technologien der Wasserstofferzeugung sind verschiedene Elektrolysetechniken³⁰, die sich ideal mit volatilen Energiequellen kombinieren lassen. Die Vergasung von nachwachsender Biomasse (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2011) stellt ebenfalls eine Möglichkeit dar.

Je nach Herstellungsverfahren und Weiterverwendung muss der Wasserstoff verschiedene Schritte der Reinigung, Kompression und Verflüssigung durchlaufen.

Distribution

Die Distribution von Wasserstoff hängt sehr stark von Systemzusammenhängen ab. Derzeit, beim vereinzelt Einsatz von Wasserstoff, wird dieser entweder direkt vor Ort über Elektrolyse erzeugt, oder in Druckspeicherbehältnisse abgefüllt und über Straße, Schiene oder Wasser zum Abnehmer transportiert. Sollte Wasserstoff in Zukunft ein Hauptenergieträger mit breitem Einsatzbereich werden, so sind auch Flüssigspeicher und Flüssigtransporte, sowie ein Netzwerk aus Wasserstoffpipelines vorteilhaft, aber mit hohen Investitionskosten und Energieaufwand verbunden.

Speicherung

„Der Vorteil von Wasserstoff gegenüber Strom liegt in seiner Speicherbarkeit.“ (Schindler und Schmidt 2004) Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, Wasserstoff in gasförmiger, flüssiger oder fester Form zu speichern. Druckspeichertanks, in denen gasförmiger Wasserstoff üblicherweise unter hohem Druck (ca. 700bar) gespeichert wird, sind kostengünstig und für kurz- bis mittelfristige Lagerung, (z.B. Automobiltank oder Salzkavernenspeicher) geeignet (HyWays-IPHE 2008). Flüssigspeicher sind durch die Verflüssigung von Wasserstoff und die anschließende Kühlung auf 20 Kelvin deutlich aufwendiger. Flüssiger Wasserstoff ist dafür weniger reaktionsfreudig und hat eine höhere Dichte, wodurch er problemlos auch längerfristig gelagert werden kann. Durch die hohe Reaktionsfreudigkeit von Wasserstoff kann er auch gut in gebundener Form, z.B. in Metallhydridspeichern gelagert werden. Auch mit nur geringem Druck, können hier durch die Einlagerung der Wasserstoffatome in das Metallgitter hohe Speicherdichten erzielt werden. Durch das hohe Gewicht des Metallhydrids kommt diese Speichertechnologie vor allem dort zur Anwendung, wo Gewicht keine Rolle

³⁰ Durch elektrische Aufspaltung von Wasser in einer Elektrolysezelle wird Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt

spielt (z.B. U-Boote) (Schindler und Schmidt 2004). In Zukunft könnten metallorganisch-poröse Gitterstrukturen hohe Speicherdichten mit wenig Gewicht kombinieren.

4.1.2 Branchenübergreifende Wasserstoffwirtschaft

Der Anwendungsbereich für Wasserstoff ist so vielfältig, wie für kaum ein anderes Gas. Aktuell wird Wasserstoff hauptsächlich in chemischen Reaktionen als Reduktionsmittel verwendet (z.B. Fetthärtung, Hydrierung von Kohle, Ammoniaksynthese). In geringen Mengen wird Wasserstoff auch als Schutzgas beim Schweißen und Plasmaschneiden oder als Brennstoff bei der Glasherstellung eingesetzt.

Eine Reihe von Zukunftsszenarien schreibt Wasserstoff eine tragende Rolle bei der Umsetzung der Energiewende zu. Laut (Di Valdalbero 2006) wird Wasserstoff ab 2030 hauptsächlich als Kraftstoff im Transportsektor eingesetzt werden. Im Zuge der zunehmenden Integration von erneuerbaren Stromquellen im Energienetz wird Wasserstoff in seiner Funktion als Energiespeicher zur Stabilisierung der Stromnetze beitragen (Nitsch et al. 2012). Durch leicht skalierbare Brennstoffzelleneinheiten eignet sich Wasserstoff als Energieträger für portable Mikroanwendungen bis hin zur stationären industriellen Großanwendung.

Wasserstoff als reaktionsfreudiges Gas mit einer sehr geringen Dichte und geringer Molekülgröße, stellt jedoch besondere Anforderungen an sichere und effiziente Distribution und Lagerung. Wasserstoffatome dringen in Metallgitter ein und sorgen für eine Versprödung, beispielsweise von Rohrleitungen oder Speicherbehältnissen (Mazloomi und Gomes 2012). Aus diesem Grund ist der maximale Grenzwert von Wasserstoff Beimischung im Erdgasnetz auf 5% limitiert.³¹ Eine erdgasähnliche Vollversorgung mit Wasserstoffnetzen aufzubauen wäre prohibitiv aufwendig. Auch verteuern sich bei reinem Wasserstoff wegen der höheren Verdichterleistungen die Transportkosten um rund 50% gegenüber Erdgas, die Kapazität von Gasspeichern sinkt bei gleichem Druck bei Wasserstoff etwa auf ein Drittel gegenüber Methan (Nitsch et al. 2012, S. 103). Ein flächendeckendes Wasserstoffnetz ist jedoch nicht notwendig, wenn Wasserstoff dezentral, in der Nähe von Großverbrauchern (wie z.B. Stahlindustrie, Wasserstofftankstellen) erzeugt und kurzzeitig gespeichert wird. Regionale Ausgleichsnetze könnten für optimale Auslastungen der dezentralen Wasserstoff-Elektrolyseure sorgen. Ohne weitläufige Pipelines kann so auch die Gefahr von Wasserstoffaustritt reduziert werden. Im Betrieb der kleineren Netzwerke und Speicher muss jedoch mit regelmäßigen Risikoabschätzungen und Maßnahmenplänen eine maximale Sicherheit garantiert werden (Jordan 2009, S. 61–70). Trotzdem kann es, wie bei allen brennbaren Gasen, durch Leckagen zu explosiven Gas-Luft Gemischen kommen, die schwerwiegende Sicherheitsrisiken darstellen (Rigas und Sklavounos 2005, S. 1).

Würde sich Wasserstoff in Zukunft als Energieträger und Speichermedium in vielen Industrien etablieren, so würden Synergieeffekte zwischen Regionen, Unternehmen, Produzenten und Verbrauchern weiter zunehmen. Innovative Wasserstofftechnologien

³¹ DVGW G 260

gien würden allmählich etablierte Technologien verdrängen. Ein Beispiel einer innovativen Wasserstofftechnologie ist die in dieser Arbeit untersuchte Wasserstoff-Direktreduktion in der Eisen- und Stahlindustrie. Bislang ist das Verfahren aufgrund der hohen Kosten der Wasserstoffherstellung unprofitabel, aber sobald sich die Rahmenbedingungen hin zu einer Wasserstoffwirtschaft entwickeln würden, könnte diese innovative Technologie ökonomisch wettbewerbsfähig werden (Birat und Borlée 2008).

Bis zu einer weit verbreiteten Wasserstoffwirtschaft sind in den kommenden Jahren eine Reihe von Hürden zu nehmen (Tzimas 2009). Hürden aus technologischer Sicht sind die Leistungsfähigkeit, Lebensdauer und die Kosten von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen, sowie die Sicherheit und Effizienz von Wasserstoffspeicherung. Aus ökonomischer Sicht sind die größten Hindernisse die Investitionskosten für wasserstoffbasierte Anlagen, sowie die hohen Preisniveaus von Wasserstoff als Energieträger. Durch die Wirtschaftskrise fehlt in vielen Unternehmen die Liquidität um notwendige Startinvestitionen zu tätigen. Aus politischer Sicht fehlen angemessene und eindeutige Rahmenbedingungen für eine optimale, schrittweise Integration von Wasserstofftechnologien in das bestehende Energiesystem. Soziale Hürden stellen hauptsächlich die Akzeptanz, die Sicherheitswahrnehmung und die fehlende Expertise im Bereich Wasserstofftechnologien dar. Die Frage nach der Sicherheit ist in der öffentlichen Wahrnehmung ein wesentlicher Aspekt, obwohl aus technischer Sicht das Gefährdungspotenzial von Wasserstoff mit dem anderer gasförmiger und flüssiger Brennstoffe zu vergleichen ist (Schindler und Schmidt 2004).

4.2 Bewertung von Technologien und Funktionen von Wasserstoff

Bevor die in der vorliegenden Arbeit verwendete Methodik näher beschrieben wird, soll kurz auf das zugrunde liegende Technologieverständnis eingegangen werden. Klassisch wird die Technologie als Wissenschaft von der Technik definiert (Ropohl 2009, S. 31). Im gesellschaftswissenschaftlichen und politischen Sprachgebrauch wird heutzutage Technologie in Anlehnung an das angloamerikanische Wort ‚technology‘ ebenso häufig im Sinne von Technik verwendet. Da viele der verwendeten Szenariostudien den modernen, etwas unscharfen Technologiebegriff verwenden, wird der Vergleichbarkeit halber auch in der vorliegenden Arbeit das weitere Technologieverständnis vorausgesetzt. Immer wenn von Technologie die Rede ist, muss aus dem Kontext entnommen werden, ob auf einer Metaebene die Wissenschaft von der Technik oder die Technik selber gemeint ist.

Viele Wasserstofftechnologien sind durch jahrzehntelange Anwendung in Bereichen der chemischen und petrochemischen Industrie, der Metallherstellung, der Halbleiterindustrie und der Lebensmittelindustrie erprobt (Schindler und Schmidt 2004). Viele technische Hürden sind somit bewältigt. Für eine flächendeckende Wasserstoffwirtschaft bleiben also vor allem noch die Hürde der Skalierbarkeit auf industrielle Maßstäbe und die Hürde der Systemkompatibilität zu nehmen. Wichtige Voraussetzung hierfür ist die Schaffung von frühen Märkten und eine konsequente Weiterentwicklung der Technologien in neuen oder größeren Anwendungsbereichen.

Etwa seit den 90er Jahren tritt Wasserstoff als ‚Energieträger der Zukunft‘ prominent in Erscheinung. Im vergangenen Jahrzehnt gab es eine Vielzahl an Forschungs- und Förderprogrammen, die zu beachtlichen Forschungserfolgen und Entwicklungsfortschritten in allen Wasserstoff Technologiebereichen geführt haben (Tzimas 2009). Auch zukünftig wird in diesem Bereich mit einer rasanten Technologieentwicklung gerechnet. Neben starken Treibern, wie CO₂-Emissionszielen, Volatilität im Energienetz und steigenden Preisen fossiler Brennstoffe, investiert die Bundesregierung jährlich in Forschung und Entwicklung von Wasserstofftechnologien. Auch in den nächsten Jahrzehnten wird es von entscheidender Bedeutung sein, die Wasserstofftechnologie-Entwicklung zu beobachten und zu bewerten, um besonders anwendungsrelevante Technologien zu identifizieren und speziell zu fördern. Wie (Heubach 2008) feststellt, kommt dabei einer unternehmens- und branchenübergreifenden Analyse eine besondere Bedeutung bei der Identifikation von *Querschnittstechnologien* oder *Enabling Technologies*, also Technologien mit übergreifendem Anwendungsprofil zu. Im Sinne von (Heubach 2008, S. 166) müssen im Hinblick auf die starke Förderung und Forschung in den neuen Technologien Konzepte und Werkzeuge entwickelt werden, „die bereits frühzeitig die Markt- und Anwendungsrelevanz der Technologie für unterschiedliche Märkte und Produkte analysieren“.

4.2.1 Methodik Technologiescreening Wasserstoff

Zu diesem Zweck wird in der vorliegenden Arbeit ein branchenübergreifendes Screening von Wasserstofftechnologien durchgeführt, um Querschnitts- und Brückentechnologien mit besonderer Relevanz für die Energiewende zu identifizieren. Im Unterschied zur „Technologiepotenzialanalyse“ des Fraunhofer Instituts nach (Spath 2010, S. 34) soll in der vorliegenden Arbeit anstelle der Unternehmensperspektive eine ganzheitliche Systemperspektive für das folgende Wasserstoff-Technologiescreening angelegt werden. Im ersten Schritt werden den identifizierten Wasserstofftechnologien Funktionsmerkmale im Sinne von (Bullinger 2008, S. 27) zugeordnet und im zweiten Schritt deren Anwendung und Nachfrage den verschiedenen Wirtschaftszweigen zugeordnet. Eine „Funktion“ im Sinne vom (VDI 2803) ist „jede einzelne Wirkung des Objektes“. Für ein branchenübergreifendes Screening ist die Abstraktion in Funktionsmerkmale der Technologie besonders wichtig um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Im dritten Schritt wird eine Technologierelevanz im Hinblick auf den potentiellen Beitrag zur Energiewende ermittelt. Die Bewertung der Technologierelevanz setzt sich aus zwei gleichgewichteten Parametern zusammen. Auf der einen Seite die Anzahl an Anwendungsbereichen der Technologie und auf der anderen Seite ein Technologiepotenzial, dass je nach Technologiegruppe verschieden gewählt wird. Für die Wasserstoff-Herstellungstechnologien wird die ‚Energieeffizienz‘, für die Zwischentechnologien der Konditionierung, Distribution und Speicherung die ‚Wichtigkeit als Enabler‘ und für die Wasserstoff-Anwendungstechnologien das ‚CO₂-Reduktionspotenzial‘ herangezogen.

Im Folgenden werden die einzelnen Analyseschritte der Technologiebewertung im Detail beschrieben.

Technologie-Identifikation

Zur Identifikation der zu betrachtenden Technologien werden Forschungsliteratur und Szenariostudien der letzten 10 Jahre auf relevante Wasserstoff-Technologieentwicklungen hin untersucht. Für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Branchen werden integrierte Technologien auf die zugrunde liegenden Basistechnologien herunter gebrochen. Einige Ausnahmefälle gibt es dort, wo die integrierte Technologie einen völlig anderen Charakter oder Anwendungstypus bekommt. Z.B. werden die meisten integrierten Anwendungsformen von Brennstoffzellen auf die drei Grundtypen von Brennstoffzellen (PEMFC³², SOFC³³, MCFC³⁴) herunter gebrochen. Trotzdem wird die Technologie *Tragbare Mini-Brennstoffzelle* gesondert aufgelistet und analysiert, obwohl sie letztendlich auf die Polymerelektrolyt (PEM) -Brennstoffzellentechnologie zurückzuführen ist. Durch den speziellen mobilen Anwendungstypus der tragbaren Energieversorgung erschließt sich diese Technologie einen völlig anderen Anwendungsbereich als die PEM-Brennstoffzelle.

Wertschöpfungsschritt

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die identifizierten Wasserstofftechnologien in einem ersten Schritt den generischen Wasserstoffwertschöpfungsschritten Erzeugung, Konditionierung, Distribution, Speicherung und Anwendung zugeordnet. Für die Bewertung werden die Herstellungstechnologien, die Anwendungstechnologien und als Gruppe die Zwischentechnologien der Konditionierung, Distribution und Speicherung getrennt betrachtet. Die genaue Herleitung der jeweiligen Bewertungsfaktoren wird im Folgenden näher beschrieben.

Funktionen

Die Funktion einer Technologie als „die Wirkung eines Produktes oder seiner Bestandteile“³⁵ soll im Kontext dieses Screenings als „Übersetzungssystem“³⁶ zwischen der Technikspezifikation einerseits und den Kunden, bzw. Marktanforderungen andererseits verstanden werden (vgl. Abbildung 4-2). So ist der Startpunkt in der Technologieentwicklung üblicherweise ein Lastenheft mit konkreten Anforderungen an die Technik oder das Produkt. In der Entwicklung werden der Technik Funktionen verliehen, die dann während des gesamten Entwicklungsprozesses mit den Anforderungen rückgekoppelt werden.

Ziel des Technologiescreenings ist unter anderem die Verknüpfung der aus der Technologie abgeleiteten Funktionen mit möglichen Marktanforderungen (Spath 2010, S. 34). Um auf verschiedenen Detailstufen Funktionsgruppen und Vergleiche bilden zu können, wird zusätzlich noch in eine *Allgemeine Funktion* und eine *Detailfunktion* un-

³² Proton Exchange Membrane Fuel Cell

³³ Solide Oxide Fuel Cell

³⁴ Molten Carbonate Fuel Cell

³⁵ DIN EN 1325-1, S. 4

³⁶ Bullinger 2008, S. 27

terschieden. Um die Komplexität in dieser weit angelegten Technologieübersicht nicht zu groß werden zu lassen, wird auf eine weitere Unterscheidung in *Haupt- und Nebenfunktionen* wie in (VDI 2803, S. 4) verzichtet.

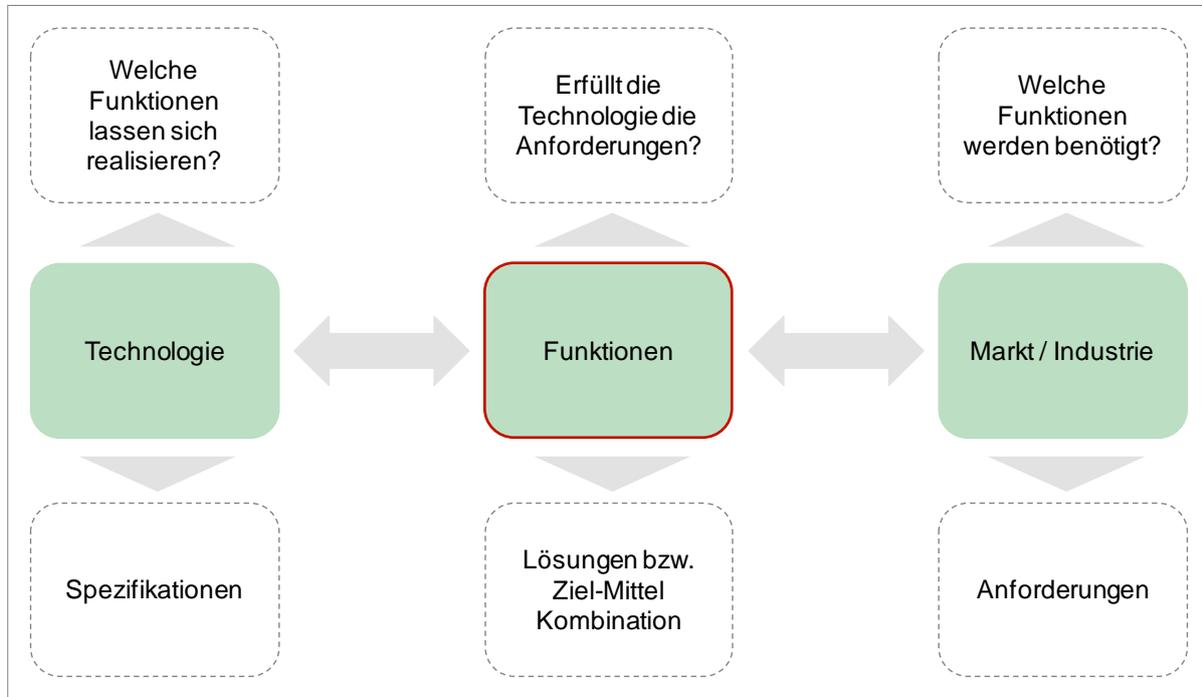


Abbildung 4-2: Funktionen als "Übersetzungssystem" (eigene Darstellung)

Hauptanwendung

Viele der Wasserstoff-Technologien werden in unterschiedlichen Anwendungsbereichen und Wirtschaftszweigen verwendet. Um ein besseres Verständnis von der Funktionsweise und dem üblichen Einsatz zu bekommen, wird in diesem Arbeitsschritt die häufigste Anwendungsform als Anwendungsbeispiel gegeben (siehe Analyseschritt *Anwendungsbereiche*).

Voraussetzungen für Umsetzung

In der vorliegenden Analyse kann nicht für alle, knapp 50 Technologien, ein Technologiepfad bis zur Marktreife aufgezeigt werden. Trotzdem werden einige wichtige Eckpunkte genannt, die eine Voraussetzung oder einen starken Treiber für eine flächendeckende Umsetzung der jeweiligen Technologie darstellen können.

Anwendungsbereiche

Zur Bestimmung der Anwendungsbereiche wird eine vereinfachte Klassifizierung der Wirtschaftszweige in Anlehnung an die Klassifikation der Wirtschaftszweige des Statistischen Bundesamtes³⁷ gewählt. Die Zuordnung der Technologien zu den Wirtschaftszweigen erfolgt durch eine Literaturrecherche. Insgesamt werden aktuelle

³⁷ Statistisches Bundesamt 2007

Veröffentlichungen zu den Forschungsfeldern zukünftiger Technologien, sowie Beschreibungen des aktuellen Technologie Entwicklungsstandes ausgewertet. Die Zuordnung erfolgt nach der zeitlichen Dauer bis zur voraussichtlichen Marktreife in vier Gruppen. Die Gruppe *aktuell* bezeichnet die Technologien, die in der jeweiligen Branche schon benutzt werden. *Kurzfristig* zeigt an, dass die Technologien voraussichtlich bis 2015 eine Marktreife erreichen könnten. *Mittelfristig* gibt an, dass die Technologien bis 2020 eine Marktreife erreichen könnten und *langfristig* geht von einer Marktreife bis 2040 - 2050 aus.

Aufgrund der häufigen Anwendung von Wasserstoff in unterschiedlichsten Wirtschaftszweigen werden jeweils nur die Hauptanwendungsmärkte aufgezeigt. Zum Beispiel wird das Plasmaschneiden unter Wasserstoffschutzgas in fast allen Industrien, die Metallelemente bearbeiten, eingesetzt. Aufgezählt, da Hauptanwendungsmarkt, wird in vorliegender Analyse jedoch nur das Plasmaschneiden in der Metallverarbeitungsindustrie.

Technologiepotenzial

Um neben der Anzahl an Anwendungsbereichen noch einen weiteren Faktor mit in die Bewertung der *Technologierelevanz* aufzunehmen, wird je Technologiegruppe noch ein weiterer Faktor für das *Technologiepotenzial* erfasst. Für die *Wasserstoff-Herstellungstechnologien* wird die *Energieeffizienz*, für die *Zwischentechnologien* der Konditionierung, Distribution und Speicherung die *Wichtigkeit als ‚Enabler‘* und für die *Wasserstoff Anwendungstechnologien* das *CO₂-Reduktionspotenzial* herangezogen. Nach einer Normierung der Werte auf einer Skala von 1 bis 100 werden jeweils die beiden Faktoren (Anzahl Anwendungsbereiche und der jeweilige weitere Faktor) pro Technologiegruppe gleichgewichtet und bilden als Summe das Ergebnis der *Technologierelevanz*. Die quantitative Bewertung der Parameter erfolgt aus einer Literaturrecherche. Bei abweichenden Angaben verschiedener Autoren wird ein Wertebereich angegeben, dessen Mittelwert in die Auswertung einfließt. Die Berechnung der drei Technologiepotenziale wird im Folgenden näher erläutert.

Da es sich bei allen hier bewerteten Herstellungsverfahren um CO₂-freie Techniken handelt, ist eine Bewertung des *CO₂-Reduktionspotenzials* für die Herstellung wenig aussagekräftig. Stattdessen wird eine Bewertung der *Energieeffizienz* eingesetzt. *Energieeffizienz* ist in diesem Zusammenhang definiert als das prozentuale Verhältnis des Energiegehaltes des produzierten Wasserstoffs zum Energieinput.

Für Technologien der Wasserstoff-Konditionierung, -Distribution und -Speicherung ist die Berechnung eines *CO₂-Reduktionspotenzials* verglichen mit konventionellen Technologien nicht zielführend. Im Vergleich zu Strom als Energieträger beispielsweise, bei dem die genannten Zwischenschritte wegfallen oder deutlich weniger aufwendig sind, müssten die analogen H₂-Technologien mit einem stark negativen *CO₂-Reduktionspotenzial* bewertet werden, das zu einer sehr geringen Bewertung der *Technologierelevanz* führen würde. Viele der aufgeführten Distributions-, Konditionierungs- und Speichertechnologien haben jedoch als *Enabler* für die Etablierung von

besonders CO₂-armen Anwendungstechnologien eine hohe Bedeutung. Aus diesem Grund fließt in die Bewertung der *Enabling-Technologien* anstelle der *Energieeffizienz* oder des *CO₂-Reduktionspotenzials* die qualitative Bewertung der *Wichtigkeit als Enabler* mit ein. Es wird in vier Gruppen unterschieden: *sehr wichtig* (100 Punkte), *wichtig* (75 Punkte), *moderat* (50 Punkte) und *weniger wichtig* (25 Punkte).

Für Anwendungstechnologien wird das relative *CO₂-Reduktionspotenzial* im Vergleich zur etabliertesten konventionellen Alternativtechnologie angegeben. Hierbei werden CO₂-Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus betrachtet. Als Grundannahme wird von 100%ig regenerativer Wasserstoffherstellung ausgegangen (beispielsweise Windstrom mit Elektrolyse), so dass die CO₂-Emission aus der Wasserstoffherstellung vernachlässigbar ist. Für die PEM Brennstoffzelle beispielsweise wird das relative *CO₂-Reduktionspotenzial* im Vergleich zum Otto Verbrennungsmotor angegeben, da die häufigste zukünftige Anwendung voraussichtlich im Transportsektor konventionelle Verbrennungsmotoren ersetzen wird.

Auswertung der Technologierelevanz

Das Ergebnis des vorliegenden *Technologiescreenings* ist die Bewertung der *Technologierelevanz* von verschiedenen Wasserstofftechnologien. Die *Technologierelevanz* ergibt sich, wie oben beschrieben aus der Anzahl an Anwendungsbereichen und dem entsprechenden Faktor für das *Technologiepotenzial*. Nach einer Normierung auf einer Skala von 1 bis 100 gehen die zwei Faktoren jeweils gleichgewichtet in den Mittelwert der *Technologierelevanz* ein.

Die Wasserstofftechnologien mit den höchsten Bewertungen werden also in Zukunft wichtige Querschnittstechnologien mit einer hohen Relevanz für die Erreichung der Klimaziele sein. Im Folgenden werden nun die Ergebnisse nach verschiedenen Auswertungsdimensionen unterteilt vorgestellt.

4.2.2 Ergebnisse

Es wurden 49 Wasserstofftechnologien in 11 Branchen identifiziert. Daraus sind 21 Zukunftstechnologien, die heute noch nicht marktreif sind und 28 Technologien, die aktuell in einigen Wirtschaftszweigen schon im Einsatz sind (siehe Abbildung 4-3). Auch die aktuellen Technologien werden teilweise indirekt von Entwicklungsforschritten in anderen Anwendungsbereichen profitieren und im Zuge der Energiewende verstärkt zur Anwendung kommen.

Aktuelle Technologien (bereits etablierte und vielfach angewendete Technologien)	Zukünftige Technologien (noch nicht etablierte Technologien mit Zukunftspotenzial)
<ul style="list-style-type: none"> • Alkalische Wasserelektrolyse • Dampfreformierung von Erdgas • Wasserstoffverflüssigung • Wasserstoffverdichtung • H₂ Pipeline • H₂ Tractor • Schifffahrt • Schienenverkehr • H₂ Druckspeichertanks • H₂ Flüssigspeichertank • Fetthärtung • Hydrierung von Kohle, Erdöl und Teer • Vergasung von Kunststoffabfällen • Schutzgas beim Löten, Schweißen und Plasma-Schneiden • Wasserdampferzeugung • Ammoniak-Synthese 	<ul style="list-style-type: none"> • Reichstein-Synthese Herstellung • Wasserstoffperoxid • Methanisierung • Ethanol-Synthese • Brenngas bei Glasherstellung • Kühlgaswendung • Wasserstoffreduktion der Oberflächenoxide • Halbleiterdotierung durch Diffusion • Schutzgas bei Wärmebehandlung von Metallen • Trägergas beim Aufkohlen von Stahl • Schutzgas bei Elektrolyse von Magnesium • Schutzgas bei Floatglasherstellung
	<ul style="list-style-type: none"> • Vergasung von fossilen Brennstoffen unter CCS • Hochtemperatur-Elektrolyse • Membranelektrolyse • Photolytische Wasserstoffherstellung • Biomassevergasung (BIG) • Electrohydrogenese von Biomasse • H₂ Metallhydridspeicher • H₂ Metal Organic Framework (MOF) Speicher • Salzkavernenspeicher • Festoxid Brennstoffzelle SOFC (hochtemp.) • Polymermembran Brennstoffzelle PEMFC (niedrigtemp.)
	<ul style="list-style-type: none"> • Schmelzkarbonat Brennstoffzelle MCFC (hochtemp.) • H₂ Tankanlage • Heimtankstellen • Wasserstoffmetallurgie • H₂ Blockheizkraftwerke (BHKW) • Wasserstoff Verbrennungsmotor (ICE) • Wasserstoffturbine • Tragbare Mini-Brennstoffzelle • APU (Auxiliary Power Unit) • IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) Kraftwerk

Abbildung 4-3: Gesamtübersicht H₂-Technologien aus Wasserstoff Technologiescreening

Die intensive Technologieentwicklung und –förderung im Bereich Wasserstoff in den vergangenen Jahrzehnten ist nicht ohne Wirkung geblieben. Kein anderer Energieträger bietet ein so vielseitiges Anwendungsspektrum und verfügt über eine solche Vielzahl von vielversprechenden Zukunftstechnologien, von Energiespeicherung über Kraftstoffeinsatz bis hin zum Einsatz in vielerlei chemischen Verfahren.

Als erstes werden nun die Ergebnisse der Auswertung nach Querschnittstechnologien vorgestellt.

Querschnittstechnologien

Als einfacher Auswertungsansatz für Querschnittstechnologien wird die Anzahl der Anwendungen in unterschiedlichen Branchen herangezogen. Wie in Abbildung 4-4 zu erkennen ist, gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen den meist-verwendeten Wasserstofftechnologien heute und in Zukunft. Die einzigen beiden aktuellen Wasserstofftechnologien, die auch in Zukunft noch zu den Top 10 Querschnittstechnologien zählen, sind *H₂-Druckspeichertanks* und *Dampfreformierung von Erdgas*. Diese beiden Brückentechnologien spielen besonders kurz und mittelfristig eine wichtige Rolle im gleitenden Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern. Langfristig werden auch diese beiden Technologien nur noch in begrenztem Maße Anwendung finden.

Heutige Wasserstoff-Querschnittstechnologien dienen hauptsächlich der Anwendung in chemischen Prozessen und der damit zusammenhängenden Erzeugungs- und Speicherungslogistik. Sechs aus den Top 10 basieren auf chemischen Reaktionen von Wasserstoff in Verfahren der chemischen oder petrochemischen Industrie.

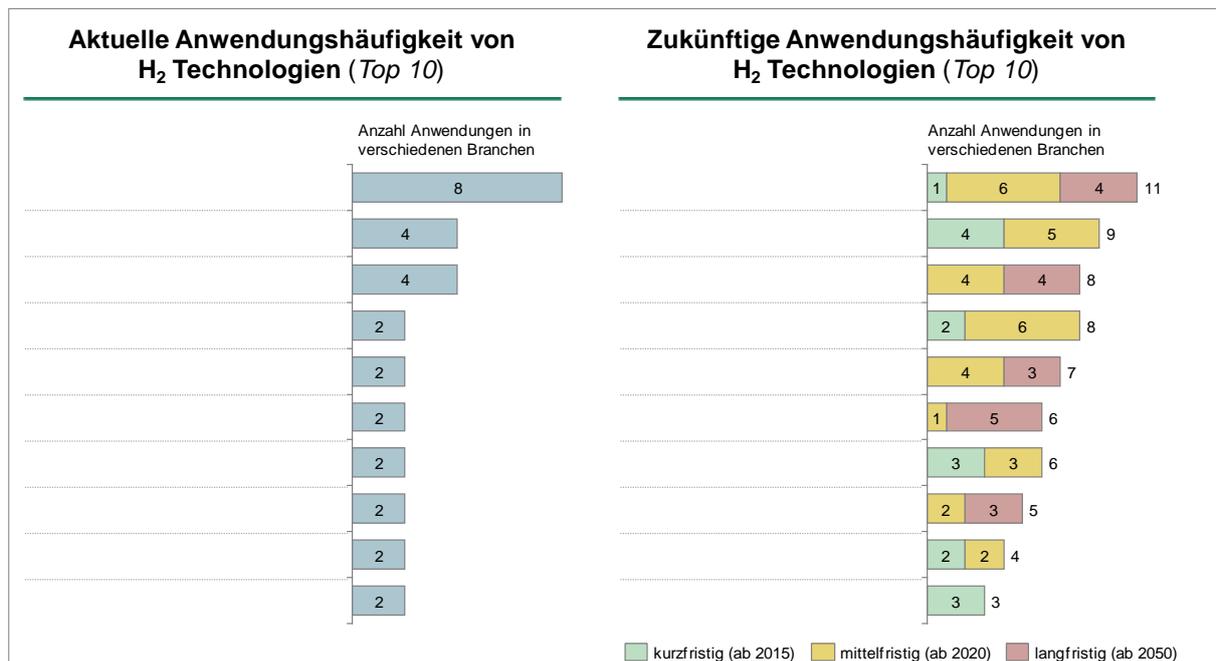


Abbildung 4-4: Top 10 der heutigen und zukünftigen Wasserstoff-Querschnittstechnologien nach branchenübergreifender Anwendungshäufigkeit

Querschnittstechnologien der Zukunft dagegen umfassen besonders Technologien der Energieerzeugung, Wasserstoffherstellung und –speicherung, also klassische Funktionen im Energiesektor. Die Entwicklung der Wasserstoffanwendung zunehmend in der Rolle als Energieträger lässt sich an der prognostizierten Anwendungshäufigkeit (Abbildung 4-4) sehr gut ablesen, in der eine starke Ausweitung der typischen Anwendungsbereiche eines Energieträgers zu beobachten ist.

Von besonderem Interesse und deshalb bereits vielfach untersucht sind die Querschnittstechnologien Brennstoffzellen (*SOFC*³⁸ und *PEMFC*³⁹) und die drei innovativen Wasserstoff-Speichertechnologien (*Flüssigtank*, *Druckspeichertank* und *Metalhydridspeicher*). Mit einem Fokus auf die Stahl- oder Chemieindustrie könnten die *Hochtemperaturelektrolyse* sowie die *Wasserstoffmetallurgie* sehr wichtige Wasserstofftechnologien der Zukunft werden, auch wenn sie nicht in der Top 10 Übersicht erscheinen.

Querschnittsfunktionen

Um unabhängig von den konkreten technischen Realisierungen ein Verständnis der Anforderungen an die Funktionen der Wasserstofftechnologien zu bekommen, ist die Ranglistenauswertung der Funktionen nach Wirtschaftszweigen besonders hilfreich.

Wie in Abbildung 4-5 zu erkennen, ist sowohl heute als auch in Zukunft eine der wichtigsten Querschnittsfunktionen von Wasserstofftechnologien, über viele Wirtschaftszweige hinweg, die *Erzeugung von Wasserstoff*. Über diese zentrale Funktion hinaus

³⁸ SOFC = Solide Oxide Fuel Cell

³⁹ PEMFC = Proton Exchange Membrane Fuel Cell

liegen die aktuellen Funktionsanforderungen wieder im Bereich der industriellen Nutzung für chemische und petrochemische Verfahren.

Zukünftig spielt neben der Funktion *Erzeugung von Wasserstoff* besonders die Funktion *Erzeugung von Elektrizität und Wärme* eine tragende Rolle und verdeutlicht damit die veränderte Anwendung von Wasserstoff als einen *Hauptenergieträger der Zukunft*. Des Weiteren sind die Funktionen der verschiedenen Wasserstoffspeichertechnologien sowie Wasserstoff-Verdichtung und -Verflüssigung in Zukunft über viele Wirtschaftszweige hinweg gefragt.

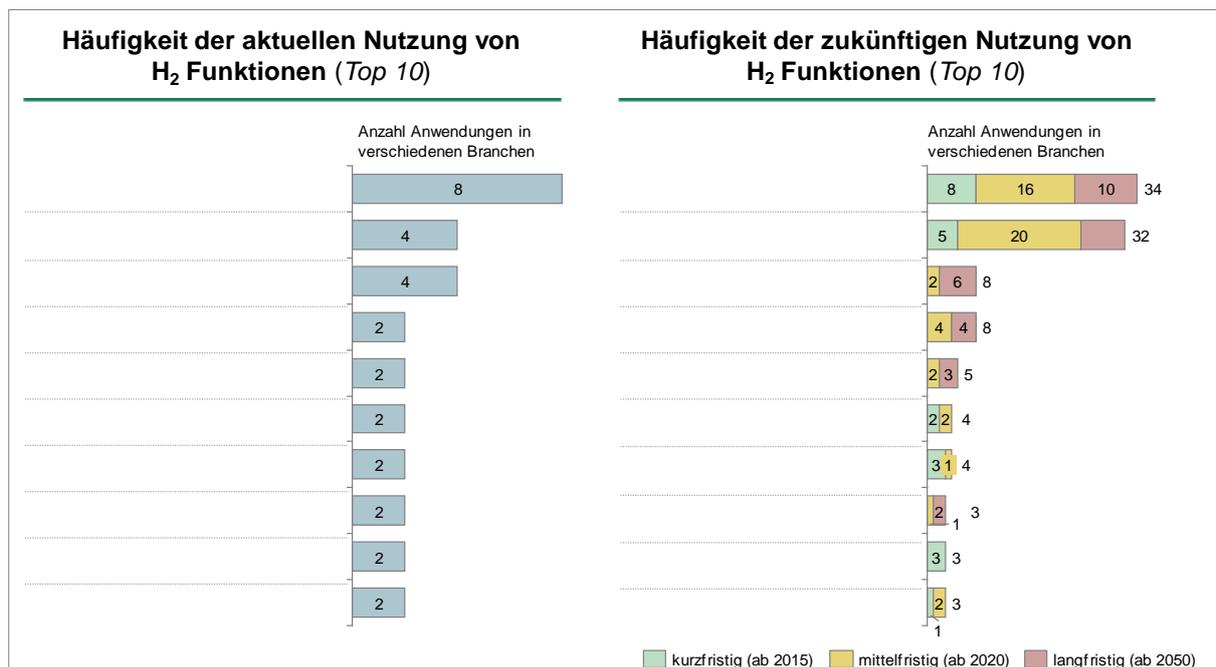


Abbildung 4-5: Top 10 der heutigen und zukünftigen Wasserstoff Querschnittsfunktionen nach branchenübergreifender Häufigkeit

Technologiepotenzial

Das *Technologiepotenzial* wird neben der Anzahl an Anwendungsbereichen als zweiter Bewertungsfaktor für die Technologierelevanzanalyse herangezogen. Hierbei werden für die drei Gruppen der Wasserstofftechnologien verschiedene Faktoren als Indikatoren für das *Technologiepotenzial* angesetzt (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Für *Wasserstoff-Herstellungstechnologien* wird die *Energieeffizienz* herangezogen (siehe Abbildung 4-6). Für die *Zwischentechnologien* wird die qualitative Bewertung der *Wichtigkeit als Enabler* angesetzt (siehe Abbildung 4-7) und für die *Anwendungstechnologien* wird das relative *CO₂-Reduktionspotenzial* verglichen mit der hauptsächlichen konventionellen Alternativtechnologie (siehe Abbildung 4-8). In diesem Bewertungsschritt werden nur zukünftige, also innovative Wasserstofftechnologien betrachtet, die langfristig als Alternative zu bestehenden konventionellen Technologien gesehen werden. Nur für diese Wasserstofftechnologien ist eine Betrachtung der re-

lativen CO₂-Reduktion sinnvoll. Gegenwärtige Wasserstofftechnologien werden in die Bewertung des Technologiepotenzials nicht mit einbezogen.

Auswertung Technologierelevanz

Die drei betrachteten Technologiegruppen werden separat ausgewertet, da das Ergebnis der Technologierelevanz aufgrund der unterschiedlichen Einflussfaktoren nicht vergleichbar ist. Der Absolutwert der Technologierelevanz auf der Skala von 1-100 hat keine Aussagekraft. Lediglich der relative Vergleich, also die Rangfolge der Technologierelevanz innerhalb einer Technologiegruppe wird im Folgenden diskutiert.

Technologierelevanz der Herstellungstechnologien

Ähnlich wie schon in der Auswertung der Anwendungsbereiche liegen die *Membranelektrolyse*, die *Vergasung fossiler Brennstoffe* und die *Dampfreformierung von Erdgas* durch ihre vielseitige Einsetzbarkeit und die hohe Energieeffizienz (zwischen 60 und 70%) ganz vorne in der Rangliste der *Technologierelevanz* (siehe Abbildung 4-6). Wobei die *Dampfreformierung* und die *Vergasung von fossilen Brennstoffen* unter CCS eher mittelfristige Brückentechnologien bis zur flächendeckenden erneuerbaren Erzeugung von Wasserstoff darstellen. Die Membranelektrolyse dagegen ist eine Zukunftstechnologie die langfristig in fast allen Branchen eingesetzt werden wird. Die beiden Herstellungstechnologien mit der geringsten Energieeffizienz derzeit, die *Photolytische Wasserstoffherstellung* und die *Elektrohydrogenese von Biomasse*, befinden sich noch in einem sehr frühen Forschungsstadium und könnten ggfs. in den kommenden Jahrzehnten durch technische Weiterentwicklung eine höhere Relevanz bekommen.

Die effizienteste Herstellungstechnologie ist die Hochtemperaturelektrolyse, die in ersten Pilotanlagen eine Energieeffizienz von 76% erzielt hat. Die alkalische Elektrolyse mit nur geringfügig kleinerer Energieeffizienz ist durch die deutlich höhere technische Reife mittelfristig für die industrielle Anwendung besser geeignet. So wird in Abschnitt 5.1 der Wasserstoffbedarf der Wasserstoff-Direktreduktionsanlage über diese Elektrolysetechnologie realisiert.

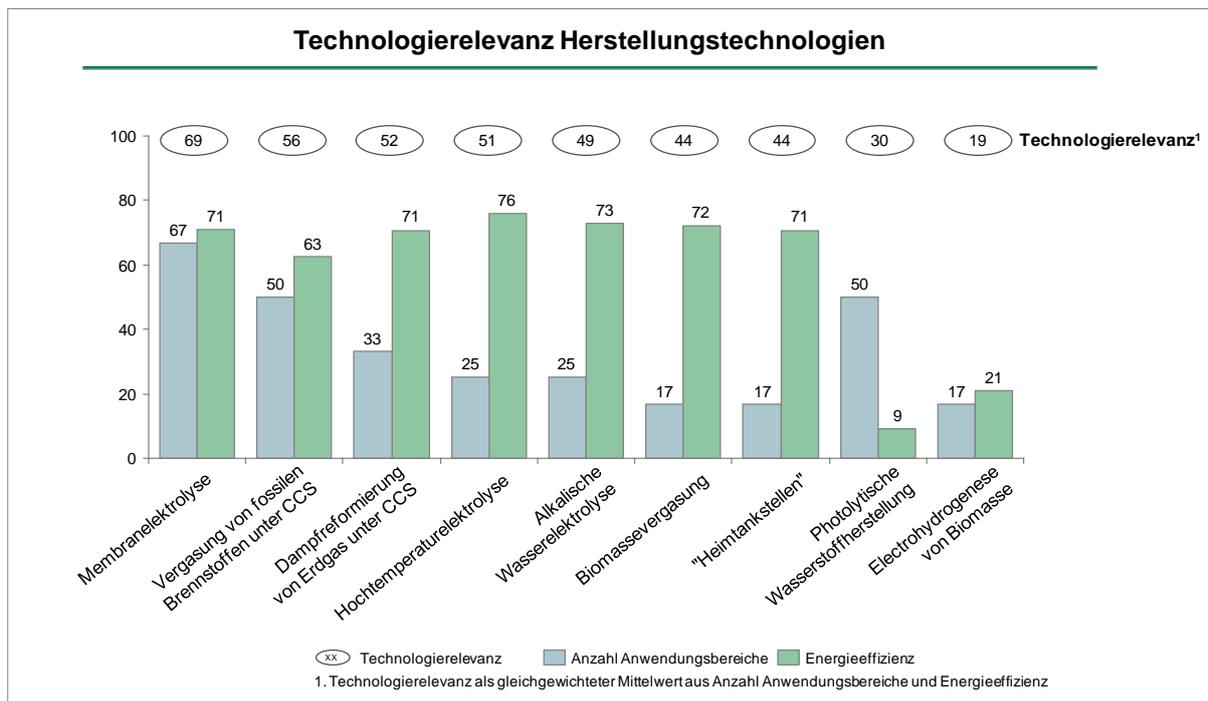


Abbildung 4-6: Auswertung Technologierelevanz von H₂-Herstellungstechnologien

Technologierelevanz der Zwischentechnologien

Die Technologierelevanz der Zwischentechnologien aus den Wertschöpfungsschritten Konditionierung, Distribution und Speicherung ist vor allem geprägt durch den Faktor *Wichtigkeit als Enabler* (siehe Abbildung 4-7). Besonders die Technologien im Zusammenhang mit flüssigem Wasserstoff erhalten hier eine besondere Bedeutung, da langfristig eine Wasserstoffwirtschaft mit großen Mengen an Wasserstofftransport und Speicherung auf flüssigem Wasserstoff basieren wird (Schindler und Schmidt 2004).

Da Wasserstoff besonders für den Einsatz als Kraftstoff im Transportsektor ein hohes Potenzial verspricht (Forsberg 2007), ist die Wasserstofftankstellen-Technologie eine der Technologien mit der höchsten Relevanz.

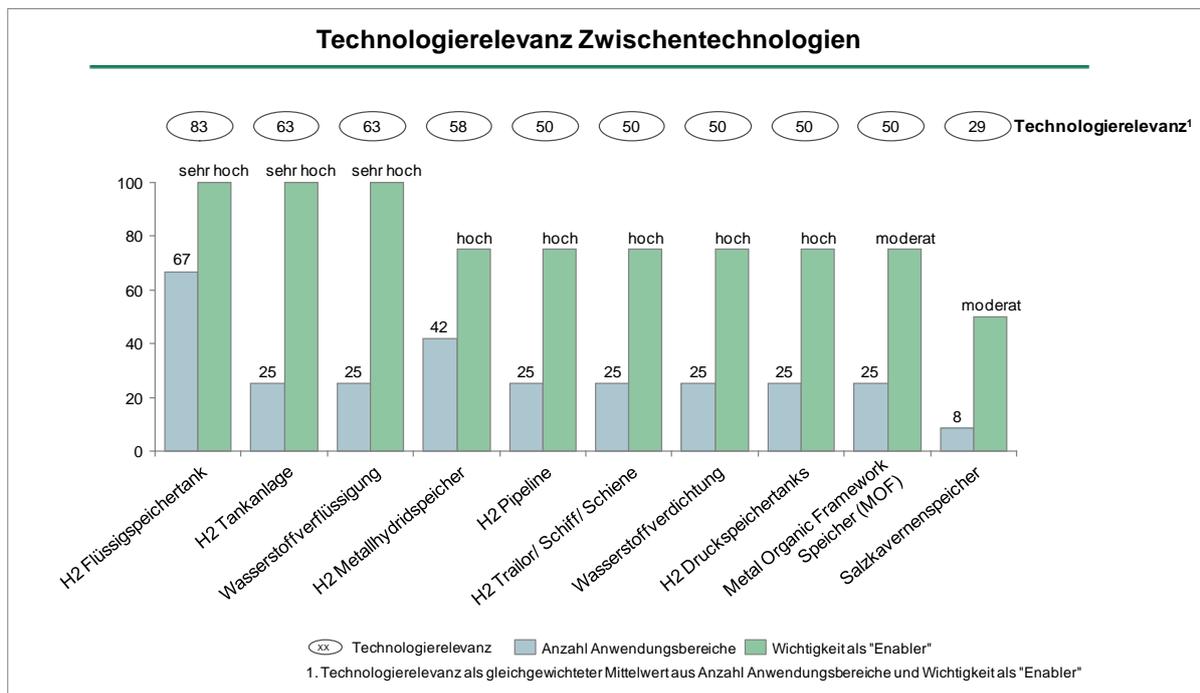


Abbildung 4-7: Auswertung Technologierelevanz von H₂-Zwischentechnologien

Anwendungstechnologien

Auf der Anwendungsseite erhalten die drei Brennstoffzellen-Technologien (SOFC, PEMFC, MCFC) die höchste Bewertung der Technologierelevanz (siehe Abbildung 4-8). Einerseits bedingt durch die Skalierbarkeit und vielfältige Anwendbarkeit in fast allen Branchen, andererseits durch das hohe *CO₂-Reduktionspotenzial* im Vergleich zum konventionellen Otto Verbrennungsmotor, der hier als konventionelle Referenztechnologie gewählt wird (Feck et al. 2002).

Wasserstoff *Blockheizkraftwerke* für die dezentrale Energieversorgung von Wohnimmobilien haben ein ähnlich hohes relatives *CO₂-Reduktionspotenzial* von 88% gegenüber einem konventionellen Erdgas BHKW⁴⁰ (Pregger et al. 2008). Da die Anwendung aber vorwiegend auf die Branche der Energieversorger beschränkt bleibt, befindet sich diese Technologie lediglich im oberen Mittelfeld der Technologierelevanz-Rangliste.

Eine ähnliche Situation ist für die Technologie der *Wasserstoff-Direktreduktion* zu beobachten. Diese kann lediglich in der Metallindustrie angewendet werden, würde dort aber zu einer relativen Reduktion der CO₂-Emissionen um 50% - 90% führen. Berücksichtigt man die absolut sehr hohen CO₂-Emissionen dieser Branche (29% der weltweiten CO₂-Emission (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2011)), ist der Einfluss dieser Technologie auf die weltweiten Klimaschutzziele durchaus bedeutend.

⁴⁰ BHKW = Blockheizkraftwerk

Die Relevanz von tragbaren Mini-Brennstoffzellen wird als gering eingeschätzt. Erste Analysen der Ökobilanz im Vergleich zu konventionellen Batterien zeigen aufgrund der aufwendigen Produktion der Brennstoffzelle keine signifikante CO₂-Reduktion gegenüber konventionelle Batterien oder Akkus (Larsson und Henrik 2011).

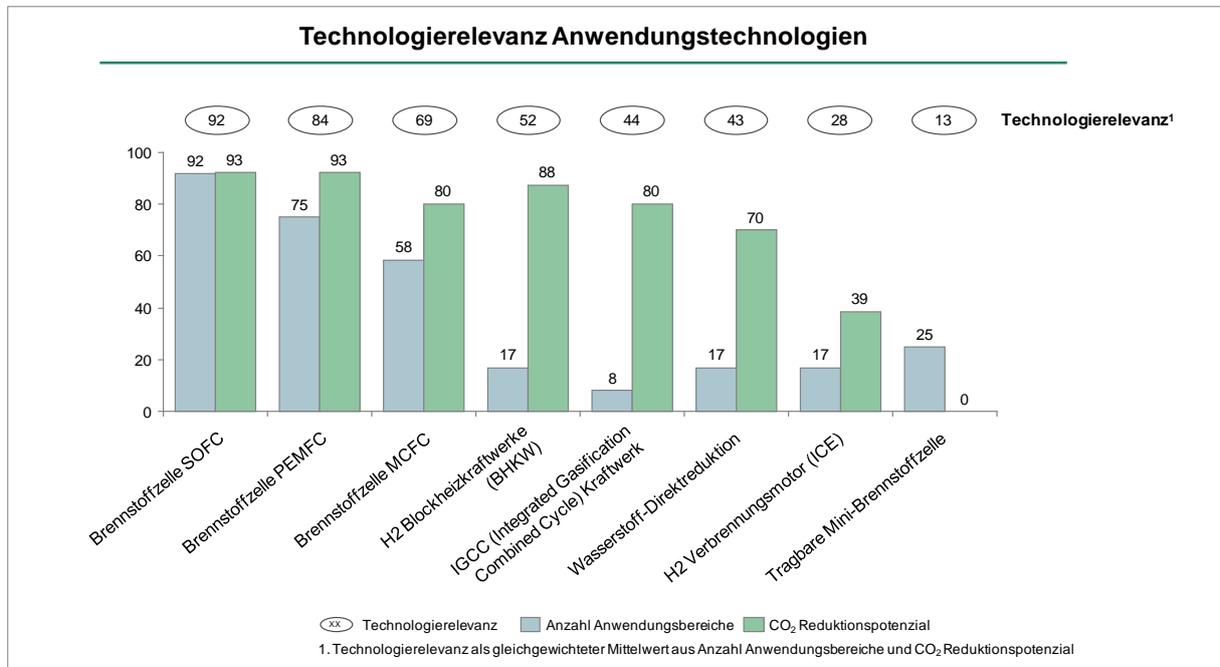


Abbildung 4-8: Auswertung Technologierelevanz von H₂-Anwendungstechnologien

H₂-affine Wirtschaftszweige

Für eine weitreichende Analyse von Wirtschaftszweigen ist die Auswahl der 11 berücksichtigten Wirtschaftszweige nicht ausreichend. Ein relativer Vergleich lässt trotzdem einige Schlüsse zu.

Wie Abbildung 4-9 deutlich zeigt, lässt sich eine Schwerpunktverschiebung der besonders wasserstoffaffinen Wirtschaftszweige mit der Zeit erkennen. Aktuell werden Wasserstofftechnologien besonders in der chemischen, petrochemischen, Metall- und Reinigungsindustrie angewendet.

In naher Zukunft geht die Anwendung der Zukunftstechnologien eher fokussierter über die Brückenmärkte *zentraler und dezentraler Energieerzeugung* sowie *Transport* hin zu einer auf lange Sicht breiten Anwendung in fast allen Wirtschaftszweigen. Dieser Effekt ist durch die selektive Marktreife einiger Technologien in ganz speziellen, frühen Märkten (Energieerzeugung, Transport) zu erklären, die dann zu einer flächendeckenden Etablierung von Wasserstofftechnologien in allen Wirtschaftszweigen führt. Falls sich Wasserstoff in Zukunft als ein wesentlicher Energieträger mit eher dezentraler Erzeugungscharakteristik etabliert, würde es über den naheliegenden Einsatz im Transportsektor hinaus, in nahezu jeder industriellen Einrichtung dezentrale Energieerzeugung über Wasserstoff Brennstoffzellen geben.

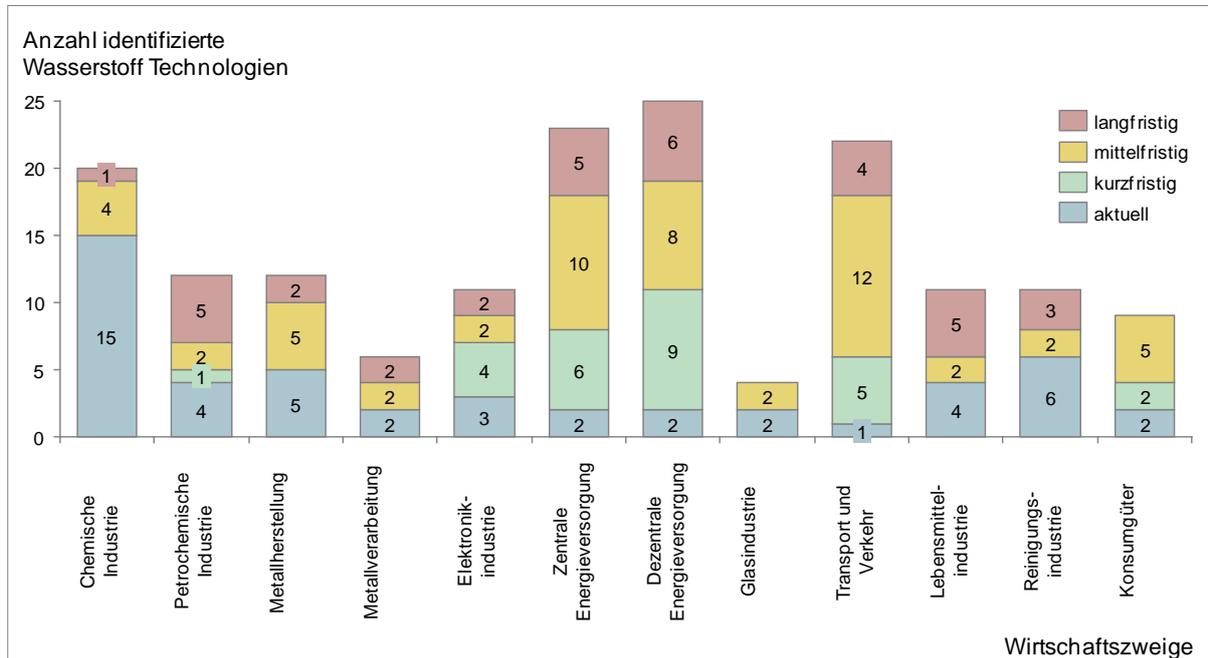


Abbildung 4-9: Auswertung Anzahl an aktuellen und zukünftigen H₂-Technologien pro Wirtschaftszweig

Neben den klassischen Wasserstoffzukunftsmerkten *Energieerzeugung* und *Transport*, die bereits in vielen Forschungsarbeiten behandelt wurden, bieten sich die *Metallherstellung*, die *Petrochemische*- und die *Lebensmittelindustrie* als weitere Branchen mit vielen zukünftigen Wasserstofftechnologien für weitere branchenspezifische Untersuchungen an.

Nach diesem kurzen Exkurs zur Rolle von Wasserstoff werden nun in den folgenden Kapiteln 5 und 6 die zuvor identifizierten Verfahren der Eisen- und Stahlherstellung in einem dreischrittigen Verfahren ganzheitlich bewertet.

5 Techno-ökonomischer Verfahrensvergleich primärer Stahlherstellung

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Modellentwicklung dargelegt und in Abschnitt 5.2 die vier verwendeten Modelle der Stahlherstellungsverfahren samt Annahmen vorgestellt. Anschließend wird die Verwendung der Szenarioanalyse zur zeitlichen Prognose der Modellergebnisse methodisch hergeleitet (siehe Abschnitt 5.3). In Abschnitt 5.4 werden die drei verwendeten Zukunftsszenarien und die zeitliche Veränderung der Modellannahmen im Detail beschrieben. Abschließend werden in Abschnitt 5.5 und 5.6 die Simulationsergebnisse präsentiert und diskutiert.

5.1 Modellentwicklung

Nach (Hinkelmann 2005, S. 7) sind numerische Modelle aus der Disziplin der Prozessanalyse und -optimierung geeignete Methoden um die Konsequenzen von veränderlichen Systembedingungen zu untersuchen und neue Prozesse zu verstehen. Als Modell versteht man in der Verfahrenstechnik eine zielabhängige, begrenzte, vereinfachte, aber immer noch adäquate Repräsentation des zu modellierenden Systems. Es ermöglicht eine Abstraktion von den unwichtigen Bestandteilen bei gleichzeitiger Konzentration auf die wichtigsten und spezifischsten Eigenschaften (Avgoustinov 2007, S. 7).

Numerische Modelle von Beispielanlagen der primären Stahlherstellung sollen in diesem Abschnitt die Einflüsse von veränderlichen Rahmenbedingungen durch die Energiewende veranschaulichen und bewerten. Hierzu werden technische ‚bottom-up‘ Modelle verwendet (vgl. Fishedick 2008, S. 95). In Anlehnung an die Prozesskettenbilanzierung nach (Blass 1997, S. 483–490) werden für jede der vier Herstellungsverfahren Prozesskettenmodelle mit Material- und Energieflüssen aufgestellt. Diese werden mithilfe der Materialflusskostenrechnung nach (DIN EN ISO 14051) durch eine knappe Wirtschaftlichkeitsberechnung ergänzt.

Die folgenden exemplarischen Stahlherstellungsmodelle simulieren jeweils die Produktion einer Tonne Rohstahl unter Verwendung der vier in Abschnitt 3.5 ausgewählten Verfahren:

- 1) Hochofenroute (Referenz) (BF-BOF)
- 2) Hochofenroute mit CCS (BF-CCS)
- 3) Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR)
- 4) Eisenerzelektrolyse (EW)

Als Produktionsstandort wird für alle Modelle das Ruhrgebiet vorausgesetzt. Die Implikationen alternativer Standorte werden in Abschnitt 7 genauer diskutiert.

5.1.1 Systemgrenzen

Die Systemgrenze ist so gewählt, dass sie neben dem Produktionsverfahren selber auch die gesamte vorgelagerte Wertschöpfungskette des jeweiligen Reduktionsmittels (Koks, Wasserstoff, Strom) mit einschließt. So können in der anschließenden Bewertung auch Aspekte entlang der Wertschöpfungskette des Reduktionsmittels mit

einbezogen werden. Der flüssige, gießfertige Rohstahl verlässt die Systemgrenze. Nachgelagerte Schritte der Wertschöpfungskette, wie Umformungsverfahren werden nicht mit berücksichtigt, da sie unabhängig vom Herstellungsverfahren stattfinden (vgl. Germeshuizen und Blom 2013, S. 10680).

Für alle Prozessschritte werden Energie- und Masseflüsse, zugehörige direkte THG-Emissionen und betriebswirtschaftliche Größen (Kosten, Einnahmen, etc.) berechnet. Für alle verwendeten Rohstoffe werden Preisannahmen verwendet um die entstandenen Kosten pro Einheit Rohstahl zu beziffern. Hat ein Rohstoff einen hohen THG-Fußabdruck (Footprint), d.h. sind während der Herstellung schon große Mengen THG emittiert worden, so werden diese indirekten Emissionen mit in die Emissionsbilanz des Modells integriert. Für Rohstoffe mit geringen THG-Emissionen in der Herstellung bzw. nur geringen Verbrauchsmengen im Modell werden die indirekten Emissionen der Übersichtlichkeit halber vernachlässigt. Abbildung 5-1 verdeutlicht welche indirekten Effekte mit berücksichtigt werden.

In der Stahlherstellung wird als THG fast ausschließlich Kohlenstoffdioxid (CO_2) emittiert. Andere THG (Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O)), die nur in sehr geringen Mengen ausgestoßen werden, werden in ihre CO_2 -Äquivalenz umgerechnet (CO_2e). Wenn im weiteren Verlauf der Arbeit von CO_2 -Emission gesprochen wird, ist immer die CO_2e -Emission gemeint.

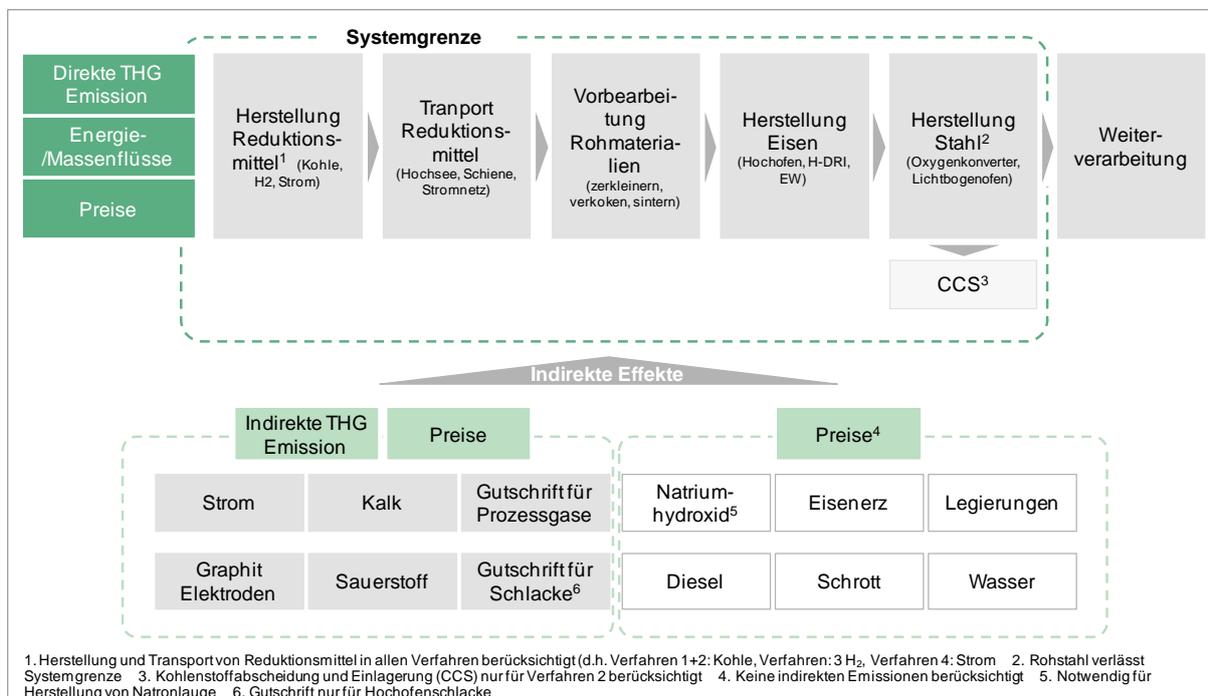


Abbildung 5-1: Systemgrenze für Stahlherstellungsmodelle einschließlich Berücksichtigung indirekter Effekte (Eigene Abbildung in Anlehnung an Wörtler et al. 2013)

Um die Vergleichbarkeit der Modelle zu garantieren werden folgende Konventionen einheitlich umgesetzt:

- Indirekte Emissionen von Strom, Kalk, Graphit Elektroden und Sauerstoff werden für die Emissionsbilanz des Verfahrens mit berücksichtigt
- Indirekte Emissionen von Natriumhydroxid, Eisenerz, Legierungen, Diesel, Schrott und Wasser werden nicht berücksichtigt (sehr geringer Einfluss auf Modellergebnisse)
- Gutschriften für die Verstromung von Prozessgasen werden mit der Differenz zum durchschnittlichem Emissionsfaktor des Strommix berücksichtigt⁴¹
- Gutschrift für Schlacke als Klinkersubstitution in der Zementherstellung erfolgt nur für Hochofenschlacke (ohne CCS)
- Alle THG-Emissionen werden zu 100% durch Emissionszertifikate zum jeweiligen Marktpreis ausgeglichen (so wird eine ökonomische Vergleichbarkeit gewährleistet)
- Prozessuale THG-Emissionen fallen an der Stelle an, wo sie die Systemgrenze verlassen (Verursacherprinzip)
- Abfallprodukte werden, wenn möglich, intern verwendet („Self sufficiency assumption“ Wörtler et al. 2013, S. 13)
- Rohstoffe werden zu angenommenen Marktpreisen frei ab Verwendungsstelle bezogen (siehe Tabelle 5-2, Anhang A)
- Für Energie-Masse Umrechnungen wird jeweils der untere Heizwert verwendet
- Alle Geldwerte sind Realwerte zum Basisjahr 2010
- Aus einer Tonne Rohstahl werden in allen Modell 910 kg Warmbandstahl hergestellt, der dann zu einem einheitlichen Preis das Modellsystem verlässt
- Nicht verfügbare technische Annahmen werden in Anlehnung an ähnliche marktreife Technologien zuzüglich eines Sicherheitsabschlages hergeleitet (z.B. Investitionskosten für EW in Tab-A 4)

5.1.2 Zeitlich konstante Annahmen

In jedes Modell fließen eine Vielzahl von externen Parametern ein, z.B. Masse- und Energieströme sowie technische Parameter (siehe Tabelle 5-1 und Abschnitt 5.2). Viele dieser Annahmen können näherungsweise als zeitlich konstant angenommen werden oder sie haben nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtbilanz des Herstellungsverfahrens⁴². Diese Parameter werden dann nicht als Teil der Zukunftsszenarien zeitabhängig projiziert (siehe Abschnitt 5.4), sondern bleiben über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant, so z.B. auch technische Leistungsparameter, wie Energieeffizienz, prozessbedingte Emissionen, Rohstoffbedarf. Dies hat den Nachteil, dass keine technische Weiterentwicklung der Modellanlagen simuliert wird, erlaubt aber ein deutlich pragmatischeres Vorgehen bei der Modellierung. Diese vereinfachende Annahme ist bei ausgereiften Anlagentechnologien und langen Investitionszyklen wie in der Stahlindustrie eine akzeptable Vereinfachung, die gleichzeitig die Komplexität

⁴¹ In Anlehnung an Ecofys 2009, S. 14 jedoch nicht bezogen auf Erdgas Emissionsfaktor, sondern auf durchschnittlichen Emissionsfaktor des Stromsektors, da Betrachtungszeitraum deutlich länger als 2020 ist.

⁴² Einfluss < 10% auf gesamte Energie/ Masse/ Emission

des Systems deutlich reduziert. Im Übrigen wird für die konventionellen Verfahren keine signifikante inkrementelle Verbesserung mehr erwartet (Pardo und Moya 2013, S. 127), so dass eher mit einem Technologiewechsel zu rechnen ist, der sich wiederum sehr gut mit den hier entwickelten Modellen für innovative Herstellungsverfahren darstellen lässt. Tendenziell werden durch diese Vereinfachung die innovativen Technologien, bei denen eher mit einer Leistungssteigerung durch Lerneffekte zu rechnen ist (H-DR und EW), stärker benachteiligt.

Die folgenden zeitlich konstanten Grundannahmen werden in allen vier Modellen identisch benutzt.

Tabelle 5-1: Zeitlich konstante Grundannahmen identisch für alle Modelle

Größe	Wert	Einheit	Kommentar	Quelle
Kalkulationszinssatz	10	%	Weighted Average Cost of Capital (WACC)	(Wörtler et al. 2013)
Inflation	3	%		(Wörtler et al. 2013)
Abschreibungsdauer	20	Jahre		(Wörtler et al. 2013) (Europäische Kommission 2010)
Lohnkosten pro t Rohstahl ⁴³	38	EUR / t Rohstahl	entspricht ca. 9% von OPEX BF-BOF nach (Wörtler et al. 2013)	(Kesseler 2014)
Preis Wasser	1,5	EUR / m ³		(Ramming 2003)
Preis Sauerstoff	66	EUR / t		(Pardo und Moya 2013) (Steelonthenet.com 2014)
Preis Diesel	28	EUR / GJ		(OECD 2010)
Preis Zuschlagstoffe	27	EUR / t	Durchschnittspreis aus Kalk € 20 / t und Kalkstein € 100 / t im Mengenverhältnis 10:1	(Pardo und Moya 2013)
Preis Ferrolegierungen	1.777	EUR / t	Annahme: Menge und Preis identisch für alle Verfahren	(Pardo und Moya 2013)
Materialverlust Rohstahl zu Endprodukt Warmbandstahl	9	%	Warmbandstahl kann dann als Output mit einem Materialpreis belegt werden	(Birat et al. 2008)
Wartungskosten	3	%	von CAPEX	(Voigt und Schmidt 2014)
Sonstige Aufwendungen (Fix- u. Verwaltungskosten)	10	%	von Umsatz durch Stahlverkauf	(Kesseler 2014)
Steuerlast	25	%		(Europäische Kommission 2010) (Kesseler 2014)
CO ₂ - "Rucksack" Sauerstoff	239	kg/t O ₂		(Voigt und Schmidt 2014)
CO ₂ - "Rucksack" Zuschlagstoffe	1.150	kg/t Zuschlagstoffe	hauptsächlich Kalkbrennen	(Voigt und Schmidt 2014)

⁴³ Kleinere Anlagengrößen bei den innovativen Verfahren (H-DR und EW) sorgen für einen höheren spezifischen Personalaufwand um ca. 40% gegenüber der etablierten Hochofenroute Kesseler 2014

Die Annahmen weisen Unsicherheiten von bis zu $\pm 20\%$ auf. Für die Ergebnisgrößen der Simulation muss also mit Unsicherheiten mindestens in dieser Größenordnung gerechnet werden. In Abschnitt 5.5.4 wird mithilfe einer Sensitivitätsanalyse die Sensitivität der Modellergebnisse in Abhängigkeit von Unsicherheiten der Modellannahmen untersucht.

5.2 Verfahrensmodellierung

5.2.1 Hochofenroute (BF-BOF)

Die Hochofenroute ist das verbreitetste konventionelle Stahlherstellungsverfahren (siehe auch Abschnitt 3.2.1). In dem vorliegenden Modell wird keine spezifische Anlage modelliert, sondern ein hypothetisches, modernes integriertes Stahlwerk nach dem neusten Stand der Technik mit folgenden Eigenschaften simuliert (vgl. Abbildung 5-2):

- integriertes Hochofen Stahlwerk mit eigener Sinteranlage und Kokerei
- Jahreskapazität von ca. 5 Mt Rohstahl
- Wärme/Energie Rückgewinnung in Sinteranlage, Kokerei, Hochofen und Konverter
- Hochofen mit Gichtgasentspannungsturbine
- Kokerei mit Kokstroeknühlung (*Coke-Dry-Quenching*)

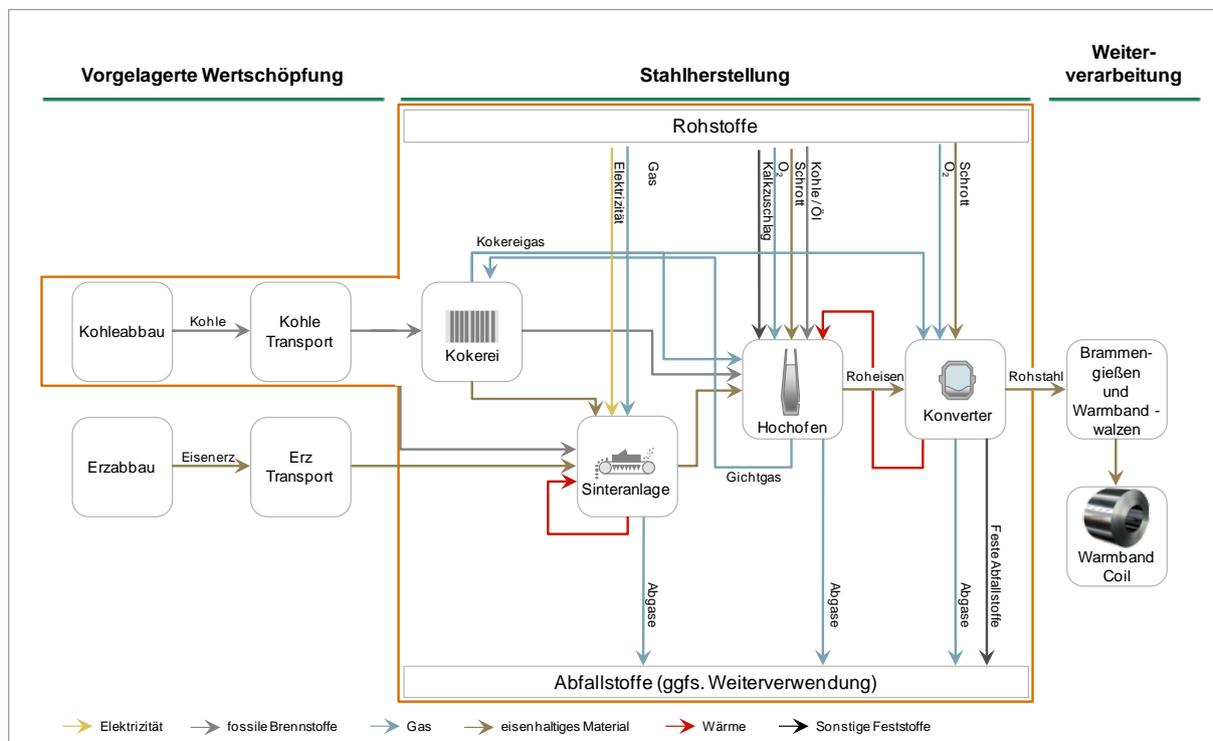


Abbildung 5-2: Energie- und Materialfluss Hochofenroute (BF-BOF)

Kohleabbau und Transport

Beispielhaft wird in diesem Modell der Kohletagebau in den USA (als eine der Hauptquellen für Kohle in Deutschland (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 2013)) gewählt. Investitionskosten für Anlagen und Erschließung des Tagebaus werden nicht berücksichtigt. Dagegen geht der spezifische Energieaufwand in Form von Elektrizitäts- und Kraftstoffmengen pro Tonne Kohle in das Modell mit ein.

Beim Hochseetransport nach Europa und dem anschließenden Transport per Schienenverkehr zur Verwendungsstelle werden der Materialverlust und der Kraftstoffverbrauch berücksichtigt. Ein Materialverlust durch die anschließende Lagerung im Stahlwerk wird jedoch nicht berechnet, da zunehmend Lieferungen nach dem Just-In-Time (J-I-T)⁴⁴ Konzept sofort verbraucht werden und Lagerbestände klein gehalten werden.

Kokerei

Die Koks Kohle, die per Schiene an das Stahlwerk geliefert wird, wird zum Großteil (ca. 80%) in der Kokerei zu Hochofenkoks gebrannt. Dabei wird sie in einem speziellen Koksofen auf ca. 1000 °C erhitzt, so dass die flüchtigen Bestandteile der Kohle freigesetzt und verbrannt werden. Zurück bleibt der poröse, kohlenstoffhaltige Feststoff – Koks. Vor allem der reduzierte Schwefelgehalt erleichtert die spätere Verwendung als Brennstoff und Reduktionsmittel im Hochofen. Die Wärme bei der Verbrennung wird aufgefangen und dem Koksofen wieder zugeleitet. Damit der Koks bei Sauerstoffzufuhr nicht sofort verbrennt, muss er direkt nach Verlassen des Ofens gelöscht werden. In dem vorliegenden Modell per Kokstrockenkühlung in Löschtürmen mithilfe eines Kühlgases (stickstoffhaltig), so dass auch hier die Wärme in Form von Wasserdampf zurückgewonnen werden kann. CO₂-Emissionen finden vor allem bei Be- und Entladung des Koksofens, sowie bei der Verstromung des überschüssigen Kokereigas statt.

Sinteranlage

Damit das eisenhaltige Material die notwendige Struktur für einen durchgasbaren Möller im Hochofen hat, müssen Feinerze und Konzentrate in der Sinteranlage agglomeriert werden. Hierzu wird in dem vorliegenden Modell eine moderne Sinteranlage simuliert, die ein Gemisch von Erzen, Koks und Zuschlagstoffen auf dem Sinterband entzündet. Durch Ansaugen von Luft verbrennt der Koks im Stoffgemisch und schmelzt die Erze an, so dass sie teigig werden. Am Ende des Sinterprozesses wird der Sinterkuchen in grobkörniges Granulat zerbrochen, das dem Hochofen zugeführt werden kann (Remus et al. 2013). CO₂ tritt in der Sinteranlage durch das Brenngas (Kokereigas, Erdgas) und durch die Koksverbrennung aus.

⁴⁴ J-I-T = Just In Time (zeitgenaue Lieferung, ohne Zwischenlagerung)

Alternativ kann anstelle einer Sinteranlage auch eine Pelletieranlage verwendet werden. Da jedoch nur sehr wenige integrierte Stahlwerke eine Pelletieranlage betreiben (Remus et al. 2013, S. 181), wird in der vorliegenden Modellierung keine Pelletieranlage berücksichtigt.

Hochofen

Das Kernstück der Hochofenroute bildet auch in diesem Anlagenmodell der Hochofen. Es wird ein moderner Hochofen (Jahreskapazität von ca. 5 Mt) mit einem geschlossenen Wasserkreislauf, einem Druckbetrieb von 4 bar und dem direkten Einblasen von Kohlenstaub (160 kg / t Roheisen) über die Winddüsen (Remus et al. 2013) modelliert. Zur weiteren Effizienzsteigerung wird eine 15 MW Gichtgasentspannungsturbine ergänzt, die etwa 1 GJ Strom aus dem Druckabfall des Gichtgases von einer Tonne Rohstahl erzeugt (Remus et al. 2013). Der Strom wird für den Eigenbedarf des gesamten Stahlwerkes verwendet und der Überschuss ins Stromnetz eingespeist. Der Hochofen wird von oben mit Sinter, Erzen, Koks und Zuschlagstoffen beschickt und von unten durch Einblasen von Druckluft und Sauerstoff befeuert. Der Koks verbrennt und reduziert die Eisenoxide zu flüssigem Roheisen, das am unteren Ende des Hochofens abgestochen wird. CO₂ tritt über das entweichende Gichtgas und über die Verbrennung weiterer Brenngase (Kokereigas, Konvertergas, Erdgas) in den Winderhitzern aus.

Oxygenkonverter

Das flüssige Roheisen wird in speziellen Behältnissen zur Weiterverarbeitung zum Linz-Donawitz-Konverter transportiert. In diesem wird der Kohlenstoffgehalt durch Einblasen von Sauerstoff, dem Sauerstofffrischen, auf den gewünschten Gehalt reduziert – maximal 2% und bei Spezialstählen deutlich niedriger. Zur Kühlung der stark exothermen Reaktion wird gewöhnlich bis zu 20% Stahlschrott hinzugegeben (Remus et al. 2013). Durch Abfangen und unterdrückte Verbrennung des Konvertergases und anschließende Verstromung kann 80% der chemischen Energie des Gases zurückgewonnen werden. Die indirekte CO₂-Emission aus der Konvertergasverstromung wird nach dem Verursacherprinzip dem Oxygenkonverter zugerechnet, abzüglich der Gutschrift für die Substitution von anderen Brennstoffen im Energiesystem mit dem durchschnittlichen Emissionsfaktor des Strommix.

Annahmen

Die anlagenspezifischen Annahmen für das BF-BOF-Verfahren (siehe Anhang, Tab-A 1) stammen größtenteils aus (Wörtler et al. 2013), (Worrell et al. 2008), (Schwaiger 1996); (Spath et al. 1999), (Weißbach et al. 2013), (Pardo und Moya 2013). Sie erheben keinen allgemeingültigen Anspruch, sondern liegen im Wertebereich einer beispielhaften modernen Anlage, um das charakteristische Verhalten in den verschiedenen Annahmenszenarien realistisch zu simulieren.

5.2.2 Hochofenroute mit CCS (BF-CCS)

Durch die Kombination der Hochofenroute mit Kohlendioxid-Abscheidung ist eine CO₂-Reduktion ohne technologischen Umbruch möglich (siehe auch Abschnitt 3.3.2). Das in Abschnitt 5.1.2 beschriebene integrierte Stahlwerk bleibt identisch bestehen. Lediglich der Hochofen wird mit einer Gichtgasrezirkulierungsanlage (TGR⁴⁵) anstelle der Gichtgasentspannungsturbine ausgestattet. Vor der Rezirkulierung in den Hochofen wird CO₂ aus dem Gichtgas mittels Druckwechsel-Adsorption (PSA⁴⁶) abgeschieden (Schreck und Trudeau 2011). Das CO₂-reiche Restgas wird zur weiteren Verbrennung über die Winddüsen erneut in den Hochofen eingeleitet. Das abgeschiedene CO₂-Gas wird verdichtet, durch eine Pipeline transportiert und in geologischen Formationen unterirdisch gelagert (Metz 2005, S. 208). Wie (Birat 2010, S. 31) abschätzt, sind in 100-200 km Umkreis aller europäischen Stahlwerke potentielle CO₂-Speicherstätten vorhanden. Die Kohlendioxid-Abscheidung und -Verdichtung wird noch innerhalb der Systemgrenzen der Modellanlage berücksichtigt (siehe Abbildung 5-3). Der Transport und die Lagerung finden dann systemextern statt und schlagen nur durch entsprechend erhöhte Kosten für Prozessabfallstoffe zu Buche. Trotz des höheren Energieaufwandes in der CO₂-Abscheidung kann durch Einsparungen beim Koksbedarf die CO₂-Emission der Modellanlage um 45% - 60% reduziert werden.

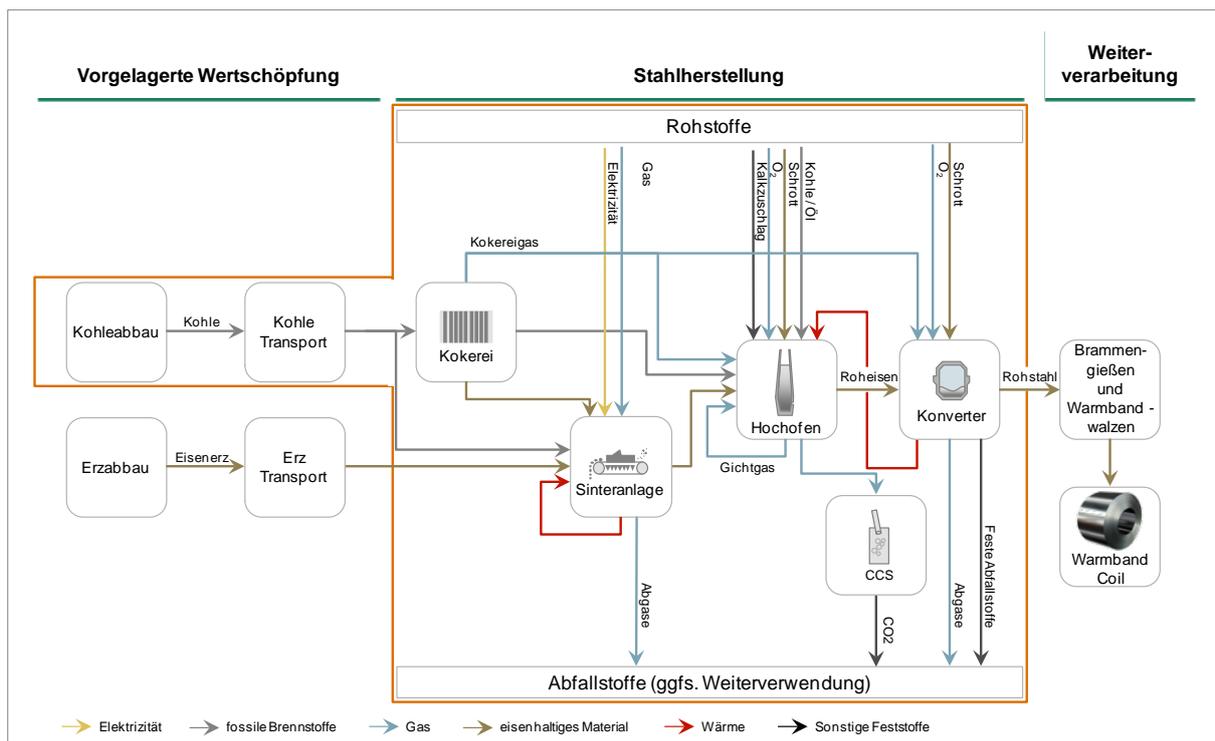


Abbildung 5-3: Energie- und Materialfluss Hochofenroute mit CCS (BF-CCS)

⁴⁵ TGR = Top Gas Recycling

⁴⁶ PSA = Pressure Swing Adsorption

Annahmen

Zusätzlich zu den Annahmen für das BF-BOF-Verfahren (siehe Tab-A 1) werden für die Kohlendioxid-Abscheidung und –Speicherung einige zusätzliche Annahmen getroffen. So steigen die Investitionskosten von € 442 auf € 566 / t Kapazität (+ 30%). Der Strombedarf steigt um 360 MJ / t CO₂ an und der Koks- und Kohlebedarf wird durch die TGR Technologie um ca. 25% reduziert (weitere Annahmen siehe Anhang Tab-A 2).

5.2.3 Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR)

Die Wasserstoff-Direktreduktion ist eine der vielversprechendsten innovativen Stahlherstellungsverfahren, weil sie das Reduktionsmittel Kohle durch das kohlenstofffreie Reduktionsmittel Wasserstoff ersetzt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Sie basiert dabei auf der bereits seit vielen Jahren etablierten Direktreduktion (vgl. Abschnitt 3.2.3), die üblicherweise mit Erdgas oder Kohle betrieben wird. Moderne Direktreduktionsanlagen sind mit einer Jahreskapazität von 1-2 Megatonnen deutlich kleiner und flexibler als die Hochofenroute (Remus et al. 2013, S. 524).

Der zweischrittige Prozess verwendet Wasserstoff, um im Wirbelschichtofen (Circored Technologie⁴⁷) Feinerze direkt in festen Eisenschwamm zu reduzieren (siehe Abbildung 5-4). Der Eisenschwamm wird noch warm in den Lichtbogenofen gegeben, in dem er dann eingeschmolzen wird, von Gangart getrennt und ähnlich zur sekundären Stahlherstellung weiterverarbeitet wird. Ähnlich wie beim Oxygenkonverter wird auch hier von einem Schrottanteil um 25% ausgegangen.

Der Wasserstoffbedarf wird über einen alkalischen Druckelektrolyseur gedeckt. Durch Wasserstoffspeicher ist die Elektrolyse zeitlich vom Bedarf der Stahlherstellung entkoppelt und kann 80% des Strombedarfs über erneuerbaren Überschussstrom abdecken. Besonders in den Szenarien mit hohem EE-Anteil kann Überschussstrom praktisch zum Nulltarif bezogen werden und so das Reduktionsmittel besonders günstig hergestellt werden. Der in der Elektrolyse entstehende Sauerstoff kann als Nebenprodukt verkauft werden.

⁴⁷ Nuber et al. 2006

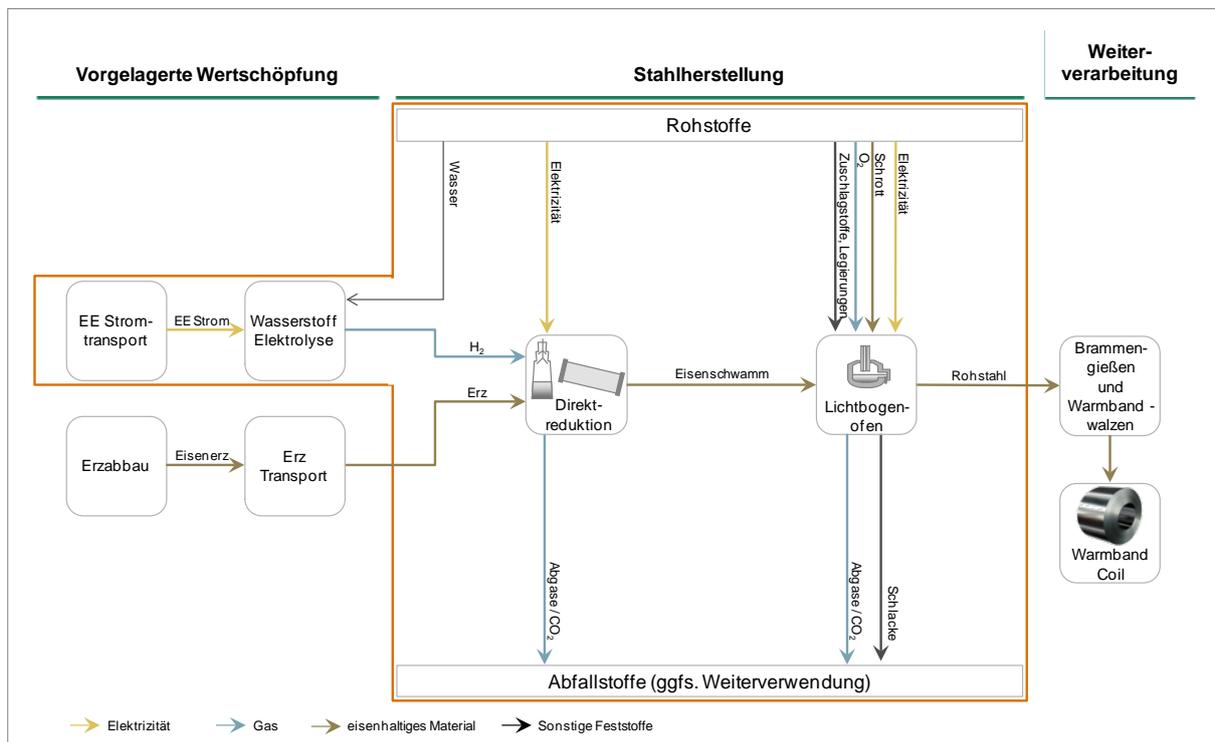


Abbildung 5-4: Energie- und Materialfluss Herstellungsroute Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR)

Annahmen

Die zeitlich festen Annahmen für die H-DR-Modellanlage sind in Tab-A 3 zu finden. Die Investitionskosten sind durch den Wasserstoff Elektrolyseur und die notwendigen Speicherkapazitäten recht hoch. Um entkoppelt vom Dauerbetrieb des Direktreduktionsofens Wasserstoff zu Zeiten günstigen Überschussstroms herzustellen, wird ein Elektrolyseur mit doppelter Kapazität (ca. 1400 MW_{el}) des kontinuierlichen Wasserstoffbedarfs angenommen und mit Investitionskosten von $\text{€ } 650 / \text{kW}_{el}$ (Smolinka et al. 2011) berechnet. Der Wasserstoffspeicher geht mit einem Speichervolumen von 14 Tagen und Investitionskosten von $\text{€ } 0,09 / \text{kWh}$ in die Gesamtinvestitionskosten ein. Da als Standort für den Wasserstoffelektrolyseur das Ruhrgebiet angenommen wird, muss zu dem Strompreis noch ein Netzentgelt von 12% für den Stromtransport berechnet werden. Die Lohnkosten steigen durch die neue Technologien und geringere Anlagengrößen um ca. 40%⁴⁸ im Vergleich zu BF-BOF. Da im Wirbelschichtofen des vorliegenden Anlagenmodells nur Feinerze und Konzentrate mit einem hohen Eisenanteil (mind. 68%) verwendet werden können, wird ein Preiszuschlag auf den regulären Eisenerzpreis von 10% kalkuliert. Das Nebenprodukt Sauerstoff aus dem Wasserstoffelektrolyseur wird für 60% des Sauerstoff-Einkaufspreises (Tabelle 5-1) verkauft.

⁴⁸ Kessler 2014

5.2.4 Eisenerzelektrolyse (EW)

Durch die Effizienz moderner Hochofenanlagen ist die Herstellung von Eisen durch Elektrolyse fast in Vergessenheit geraten, obwohl sie für andere Metalle (wie z.B. Aluminium) das einzig praktikable Verfahren darstellt. Der stetig steigende EE-Anteil am Strommix könnte die Eisenerzelektrolyse mittel- bis langfristig durch die niedrigen indirekten CO₂-Emissionen betriebswirtschaftlich interessant machen (siehe auch Abschnitt 3.3.6). In der vorliegenden Modellanlage wird die Eisenerzelektrolyse in wässriger Alkalilösung (bei 110°C) simuliert. Fein- und Stückerze müssen zunächst zerkleinert werden bevor sie in den mit Natronlauge gefüllten Elektrolyseur gegeben werden (siehe Abbildung 5-5).

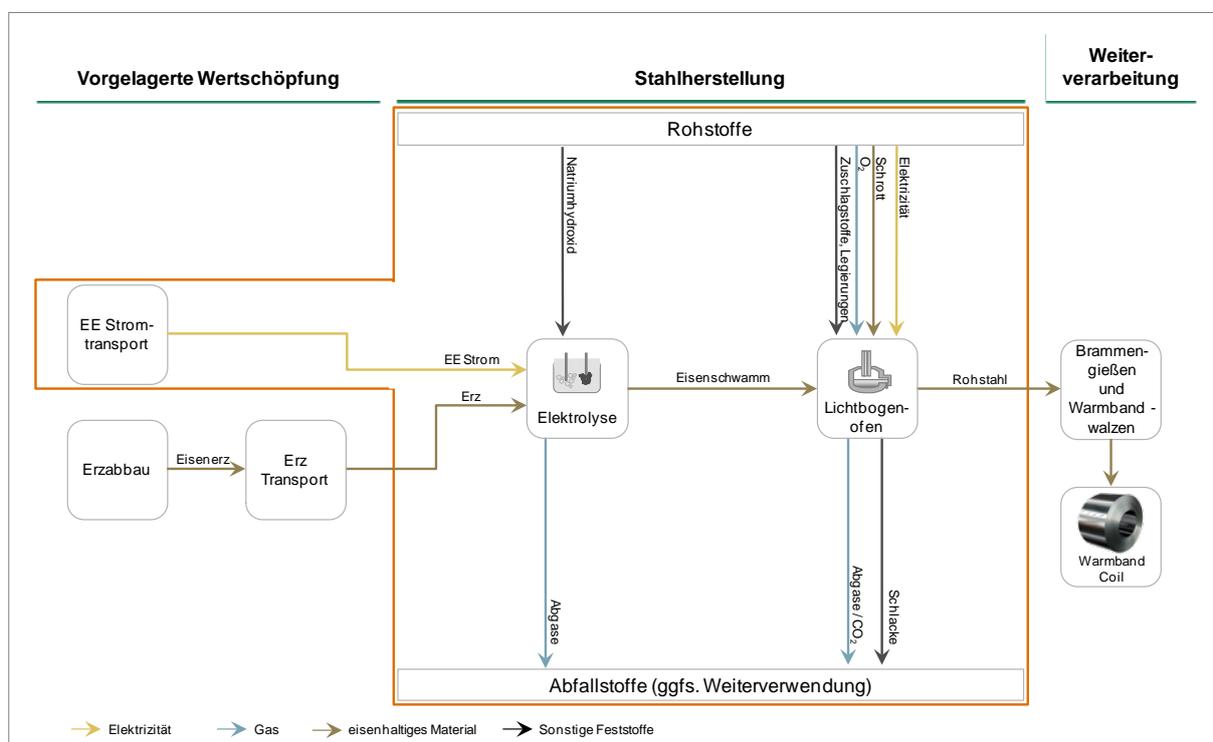


Abbildung 5-5: Energie- und Materialfluss Herstellungsroute Eisenerzelektrolyse (EW)

Durch Anlegen einer Gleichspannung entsteht an der Kathode festes Eisen und an der Anode Sauerstoff. Das feste Roheisen wird dann ähnlich zur sekundären Stahlherstellung im Lichtbogenofen geschmolzen, von Gangart gereinigt und zu Rohstahl weiterverarbeitet. Analog zum H-DR-Modell wird auch hier von einem Schrottanteil von 25% ausgegangen.

Annahmen

In Tab-A 4 sind die zeitlich konstanten Annahmen für das EW-Modell zusammengefasst. Die Investitionskosten sind mit € 639 / t Kapazität durch die neue Eisenerzelektrolyse-Technologie recht hoch. Da bisher keine Erfahrungen für Investitionskosten im industriellen Maßstab für die Eisenerzelektrolyse vorliegen, werden die doppelten Investitionskosten von H₂ Elektrolyseuren (siehe Abschnitt 5.2.3) verwendet (€ 1300 / kW_{el}). Hinzu kommen noch übliche Investitionskosten für den Lichtbogenofen

(€ 184 / t Kapazität⁴⁹). Auf lange Sicht ist mit einer weiteren Absenkung der Investitionskosten zu rechnen, wodurch die Eisenerzelektrolyse als sehr schlankes Verfahren auf Investitionskosten im Bereich der konventionellen Herstellungsrouten oder geringer kommen könnte.

Der Strombedarf des Elektrolyseurs wird zu 25% über erneuerbaren Überschussstrom gedeckt. Da die Anlage aber im Dauerbetrieb betrieben wird, müssen die restlichen 75% über den durchschnittlichen Strommix abgedeckt werden. Analog zu H-DR wird auch hier ein Preiszuschlag für den Transport des Überschussstroms und für das Eisenerz mit hohem Fe-Anteil, sowie um 40% erhöhte Lohnkosten berechnet. Die Annahmen für den Lichtbogenofen sind identisch zum H-DR Modell (siehe Tab-A 3).

Um im nächsten Bewertungsschritt die Auswirkung zeitlicher Veränderung bis 2070 in den Simulationsergebnissen sichtbar zu machen, werden bestimmte Modellannahmen über eine Szenarioanalyse zeitlich variiert (siehe 5.4.4). Zunächst soll jedoch die Auswahl der Szenariomethode begründet werden.

5.3 Methodik der Szenarioanalyse

5.3.1 Methodenüberblick der Zukunftsforschung

Der Mensch war immer schon darauf angewiesen einschätzen zu können, wie sich sein Umfeld in Zukunft entwickeln könnte, sei es um rechtzeitig Gefahren zu erkennen oder um frühzeitig Vorkehrungen treffen zu können. Dass dies vor dem Hintergrund einer komplexer werdenden Welt mit immer größeren und langfristigeren Herausforderungen noch an Bedeutung gewinnt, ist evident. (Lechtenböhrer 2008, S. 7)

So hat sich die wissenschaftliche Disziplin der Zukunftsforschung entwickelt, die sich nach (Steinmüller 1997) und (Lechtenböhrer 2008, S. 10) in vier wesentliche Methodenrichtungen unterscheidet, die je nach Aufgabenstellung und Zielrichtung entsprechend kombinierbar sind:

- Prognoseverfahren
- Szenariomethoden
- Expertenbefragungen
- Kreativmethoden

Prognoseverfahren

Zur eher kurzfristigen und quantitativen Zukunftsvorhersage existieren eine Reihe von Prognoseverfahren, wie die Trendextrapolation, die Simulation und die Wachstums-Modelle, die z.B. in Meteorologie und Wirtschaft eingesetzt werden um eine sehr wahrscheinliche Zukunftsvorhersage der nahen Zukunft zu treffen. Charakteristisch für diese Verfahren ist die starke Datenbasierung und damit fehlende Offenheit

⁴⁹ Wörtler et al. 2013, S. 22

gegenüber neuen und unerwarteten Entwicklungen der Zukunft (Sondeijker 2009, S. 47–49).

Szenariomethode

Ereignisse wie die Ölkrise in 1973 führten Zukunftsforschern die Unvorhersehbarkeit der Zukunft und damit Grenzen der Prognoseverfahren vor Augen. Die Entwicklung der Szenariomethode sollte den fehlenden explorativen Charakter der Prognoseverfahren beheben indem von mehreren möglichen Zukünften ausgegangen wird, ohne eine Aussage über deren Eintrittswahrscheinlichkeit zu treffen. Es werden bewusst unterschiedliche mögliche Zukunftsentwicklungen dargestellt, um diese gegenüber zu stellen und die Auswirkungen heutiger Entscheidungen und Entwicklungstendenzen im Vergleich sichtbar zu machen (Zeiss und Valentin 2011, S. 33). Szenarien ermöglichen es, für spezifische Fragestellungen Antworten zu finden und Entwicklungs- und Handlungskorridore darzustellen (Zeiss und Valentin 2011, S. 33).

Die Szenariomethode hat sich in den letzten Jahren immer mehr zum Kernkonzept der Zukunftsvorschau etabliert (Lechtenböhrer 2008, S. 17). Durch die breite Anwendung der Szenariotechniken ist es zu einer Auflockerung des Begriffes und der Methode gekommen. Grundsätzlich kann jedoch nach der Art der Annahmen in qualitative und quantitative Szenariotypen unterschieden werden. Nach der Art der Vorhersagerichtung kann in projektive und normative Szenariotypen unterschieden werden. Die Ersteren treffen basierend auf Vergangenheitstrends oder aktuellen Annahmen eine Vorhersage der Zukunft („Forecasting“ Szenario). Die Letzteren stellen ein Ziel- oder Wunschscenario, abgeleitet aus normativen Vorstellungen dar und beschreiben die Maßnahmen und Pfade der Zielerreichung („Backcasting“ Szenario). Häufig werden diese normativen Zielszenarien Referenzszenarien gegenüber gestellt um notwendige Änderungen und Weichenstellungen gegenüber dem ‚business-as-usual‘ Pfad zu identifizieren (Lechtenböhrer 2008, S. 13). Häufig wird die Szenariotechnik mit Modellen des untersuchten Systems kombiniert, um den zeitlichen Verlauf quantitativ abbilden zu können. Nach (Fischedick 2008, S. 95) kann für den Energiesektor in *Energiesystemmodelle*, d.h. technisch orientierte ‚bottom-up‘ Modelle (Optimierungsmodelle, Simulationsmodelle) und *Energiewirtschaftsmodelle*, d.h. ökonomische ‚top-down‘ Modelle (allgemeine Gleichgewichtsmodelle, Input-/Output Modelle) unterschieden werden.

Expertenbefragung

In der Zukunftsforschung wird häufig, mangels geeigneter Literaturquellen und eindeutiger quantitativer Modellierung, auf Experteneinschätzung zurück gegriffen (Lechtenböhrer 2008, S. 14). Die Methoden der Expertenbefragung reichen dabei von einfachen Interviews, über interaktive Expertenworkshops bis hin zu aufwendigeren Methoden wie der Delphi-Technik, bei der Experten anonym in mehreren Runden zu bestimmten Zukunftstrends befragt werden und in der folgenden Runde jeweils mit den Zwischenergebnissen der Vorrunde konfrontiert werden und sich so be-

stimmte Trends herauskristallisieren (Lechtenböhrer 2008, S. 15). In der Praxis haben die unaufwendigeren Verfahren der Expertenbefragung und Expertenworkshops aus pragmatischen Gründen die höchste Bedeutung. So lassen sich mit überschaubarem Aufwand eine Vielzahl von Informationen aus unterschiedlichen Bereichen und Blickwinkeln gewinnen (Amara 1991, S. 645).

Kreativmethoden

Im Gegensatz zu den Expertenbefragungen wird bei den Kreativmethoden (z.B. Zukunftswerkstätten) der Sachverstand und die Einschätzung der Betroffenen, also z.B. von Bürgerinnen und Bürgern, mit einbezogen. Einerseits können so Informationen aus weiteren Blickwinkeln mit aufgenommen werden und andererseits führt ein solch partizipatives Verfahren zu einer größeren Akzeptanz bzgl. der zukünftigen Maßnahmen (Lechtenböhrer 2008).

5.3.2 Methodenauswahl

Nachdem ein Überblick über die häufigsten Methoden der Zukunftsforschung gegeben wurden, wird die Methodenauswahl für die vorliegende Arbeit begründet. Wie schon die Leitfragen (vgl. Abschnitt 2.1) der vorliegenden Arbeit andeuten, soll eine ergebnisoffene Analyse ausgewählter primärer Herstellungsverfahren von Rohstahl vor dem Hintergrund verschiedener Transformationspfade des Energiesystems durchgeführt werden. Die Bewertung erfolgt ganzheitlich, d.h. unter Berücksichtigung technischer, betriebswirtschaftlicher, gesellschaftlicher, ökologischer und sicherheitstechnischer Aspekte. Als Grundlage für die Bewertung der technischen und betriebswirtschaftlichen Aspekte werden quantitative techno-ökonomische Modelle herangezogen. Betrachtet wird ein Zeitraum von 2020 bis 2070 um nicht nur eine Entwicklung bis zur Zielerreichung in 2050, sondern auch grobe Entwicklungstrends darüber hinaus aufzeigen zu können. Da für sehr junge Technologien, wie die Eisenerzelektrolyse, erst mit einem Markteintritt ab 2030 gerechnet wird, wäre ein Betrachtungszeitraum bis 2050 nicht ausreichend um eine Bewertung dieser Technologie vornehmen zu können. Nichtsdestotrotz beinhalten Trendvorhersagen über einen so langen Zeitraum eine stark erhöhte Unsicherheit.

Aus den Zielen der vorliegenden Arbeit lassen sich folgende Anforderungen an die Zukunftsforschungsmethode zusammenfassen:

- Zukunftsvorhersage muss quantitativ sein
- Entwicklung muss ergebnisoffen sein
- Methode muss mit technischen Modellen kombinierbar sein
- Zukunftsvorhersagen müssen ein breites Spektrum an möglichen Entwicklungen abdecken
- Langer Betrachtungszeitraum muss handhabbar sein
- Vergleichbarkeit zu Szenariostudien der Energiewende Deutschland soll gegeben sein

Vor allem auf Grund des explorativen Charakters der Fragestellung, dem langen Betrachtungszeitraum bis 2070 und der Vergleichbarkeit mit Zukunftsszenarien anderer

Studien wird die *Szenariomethode* gewählt. Um den oben genannten Anforderungen zu genügen werden im Detail drei quantitative ‚Forecasting‘ Szenarien für verschiedene Umsetzungsgeschwindigkeiten der Energiewende in Deutschland formuliert. Jedes Szenario wird durch 11 zeitabhängige Annahmen quantitativ untermauert (vgl. Abschnitt 5.4). Hierbei werden nach intensiver Literaturrecherche jeweils zwei Extremtrends pro Annahme definiert und durch einen moderaten Trend (Mittelweg) ergänzt. Die identifizierten Trends werden in mehreren Expertengesprächen diskutiert und auf ihre Konsistenz hin überprüft.

5.4 Szenarioentwicklung

Die Annahmen, die einerseits für alle vier Herstellungsverfahren relevant sind und andererseits, bedingt durch den tatsächlichen Ablauf der Energiewende in ihrem zeitlichen Verlauf bis 2070 stark variieren, werden in Form von Zukunftsszenarien beschrieben (z.B. Preis Koks Kohle, Preis CO₂-Zertifikate, Anteil EE am Strommix, etc.). Um die Bandbreite der möglichen Verläufe der Energiewende abzubilden, werden drei mögliche, in sich konsistente Szenarien gebildet (*konservativ, moderat, ambitioniert*). Dabei bildet das *konservative* Szenario ein verlangsamtes Fortschreiten der Transformation der Energiewende ab. Das *moderate* Szenario repräsentiert als Referenzszenario eine konsequente Entwicklung der Energiewende nach Plan und das *ambitionierte* Szenario stellt eine beschleunigte Entwicklung im Hinblick auf die Transformation des Energiesystems dar.

Im Folgenden werden die drei Szenarien ausführlich beschrieben und bilden damit den Rahmen für die Projektionen der einzelnen Modellannahmen (siehe Tabelle 5-2).

5.4.1 Konservatives Szenario

Das *konservative* Szenario geht vom Fortlauf der derzeitigen Bemühungen aus, berücksichtigt aber keine verstärkte Anstrengung für eine konsequentere Verfolgung der Energiewendeziele. Aufgrund der aktuellen Herausforderungen beim Ausbau von Offshore Windparks und durch den öffentlichen Druck gegenüber Strompreiserhöhungen verlangsamt sich die Transformation des Energiesystems. Die CO₂-Reduktionsziele werden um 20 Jahre verschoben, so dass erst 2070 eine CO₂-Emissionsreduktion von 80% gegenüber 1990 erreicht wird. Der nachlassende politische Druck führt zu einem verzögerten Ausbau der EE und zu einer gestärkten Bedeutung fossiler Energieträger für die nahe und mittelfristige Zukunft. Der Preis für CO₂-Zertifikate steigt nur langsam, weil keine international verbindlichen Klimaschutzziele festgelegt werden und kein einheitliches Emissionshandelssystem aufgebaut wird. Durch Netzausbau und intelligente Steuerung kann die Stromproduktion der Nachfrage auch ohne zentrale Speicher angepasst werden. Der Atomausstieg bis 2022 wird wie geplant umgesetzt. Im Verkehrssektor bleiben fossile Kraftstoffe dominierend.

5.4.2 Moderates Szenario

Im *moderaten* Szenario wird angenommen, dass die Energiewende konsequent weiter umgesetzt wird, d.h. dass CO₂-Reduktionsziele entsprechend (BMU 2010) erreicht werden. Somit stellt das *moderate* Szenario das Referenzszenario der vorliegenden Szenarioanalyse dar. Der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch erreicht 2050 80%. Durch den hohen Anteil volatiler Energiequellen sinkt der Strompreis gerade zu Zeiten von Überangebot (Überschussstrom). Der Preis für CO₂-Zertifikate steigt durch einen konsequenten nationalen Emissionshandel mit wenigen Ausnahmeregelungen moderat an. Die Netzstabilität wird übergangsweise über einen Kapazitätsmarkt mit fossilen Reservekraftwerken gewährleistet. Langfristig werden Schwankungen durch intelligente Netze, Batterie- und Langzeit-Wasserstoffspeicher ausgeglichen. Im Verkehr dominiert ab 2050 der Elektroantrieb.

5.4.3 Ambitioniertes Szenario

Im *ambitionierten* Szenario wird von einer beschleunigten Energiewende ausgegangen. CO₂-Reduktionsziele werden übertroffen und angepasst (80% CO₂-Reduktion schon 2040). Ein sehr hoher EE-Anteil im Energie- und Strommix wird durch zentrale Wasserstoffelektrolyse und -speicher stabilisiert. Sowohl im Verkehrssektor als auch in der Industrie spielt Wasserstoff eine zunehmend wichtige Rolle und kann durch günstigen Überschussstrom sehr kostengünstig hergestellt werden. Die notwendige Infrastruktur wird geschaffen. Strompreise sinken ab 2040 unter das heutige Niveau und der Bedarf an fossilen Brennstoffen nimmt ab. CO₂-Preise steigen durch verbindliche Reduktionsziele und ein internationales Handelssystem für Zertifikate stark an. Ab 2050 steht im Stromnetz CO₂-freier Strom zu günstigen Preisen zur Verfügung. Im Verkehrssektor spielen fossile Kraftstoffe ab 2050 keine Rolle mehr und werden durch elektrische Kurzstreckenfahrzeuge und wasserstoffbetriebene Langstreckenfahrzeuge ersetzt.

5.4.4 Projektionen einzelner Annahmen

Die Überlegungen zu den zeitlichen Entwicklungen der szenarioabhängigen Annahmen werden im Folgenden im Detail erläutert. Die angegebenen Werte sind die netto Realwerte zum Basisjahr 2010. Eine Übersicht ist in Tabelle 5-2 zu finden.

Preis Koks-kohle

Gerade beim Preis für Kohle gehen die Meinungen und Szenariovorhersagen in der Literatur sehr weit auseinander. (Kirchner und Matthes 2009) geht von einem Preisanstieg von 3,4% pro Jahr (CAGR⁵⁰) bis 2050 aus, hauptsächlich verursacht durch erhöhte Beschaffungskosten und Steuern. (Nitsch et al. 2012, S. 3) sagt einen Preisanstieg für Steinkohle zwischen 1,4% und 2,8% jährliche Wachstumsrate vorher. Da das Kohleaufkommen selbst bei gleichbleibend hohem Verbrauch noch mindestens 150

⁵⁰ CAGR = Compound Annual Growth Rate

Jahre ausreicht (International Energy Agency (IEA) 2010b, S. 207) ist innerhalb des Betrachtungszeitraumes nicht mit einem Preisanstieg durch Verknappung zu rechnen. Kokskohle ist eine qualitativ hochwertige Spezialkohle, die nicht den normalen Preisschwankungen von bspw. Steinkohle folgt, sondern eher direkt mit dem weltweiten Bedarf in der Eisen- und Stahlindustrie korreliert. Unabhängig von der Nachfragesituation in Deutschland wird die Stahlnachfrage und damit auch die Kokskohle Nachfrage durch das Wachstum der Weltbevölkerung bis mindestens 2050 steigen (Neelis und Patel 2006, S. 71–74), unter der Prämisse, dass kohlefreie Stahlherstellungsverfahren nicht flächendeckend vor 2050 Anwendung finden. (Pardo und Moya 2013, S. 119) sagt vom aktuellen Kokskohlepreis von € 170 / t in 2010 eine jährliche Wachstumsrate von 1,64% voraus. In der vorliegenden Arbeit wird diese Annahme bis 2050 fortgeführt. Ab 2050 steigt der Kokskohlepreis dann nur noch mit 0,75% pro Jahr, weil angenommen wird, dass die Stahlnachfrage in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts abflacht und zunehmend kohlefreie Herstellungsrouten zu einem Rückgang der Kokskohlenachfrage führt (Neelis und Patel 2006, S. 74). Da der Verlauf der deutschen Energiewende kaum Einfluss auf die weltweiten Kokskohlepreise hat, wird die Kokskohle Preisprojektion zwischen den Szenarien nicht verändert.

Preis Eisenerz

Der Eisenerzpreis ist in den vergangenen 50 Jahren um 2,56% pro Jahr angestiegen (Babies et al. 2010, S. 137). Aktuelle Szenariostudien der Eisen- und Stahlindustrie sagen einen anhaltenden Anstieg von 1,2% CAGR bis 2050 voraus (Pardo und Moya 2013, S. 119). Mittelfristig rechnen Analysten aber eher mit einem Überangebot bis 2020, weil die Stahlproduktion langsamer als die Erzförderung wächst (Lelong et al. 2014, S. 24). Da der Eisenerzpreis nicht unmittelbar mit der Transformation der Energiewirtschaft zusammenhängt und alle Herstellungsszenarien sehr ähnliche Mengen Eisenerz verbrauchen, wird die Preisprojektion für Eisenerz mit einem geringen jährlichen Wachstum von 0,75% angesetzt und zwischen den Szenarien nicht variiert. Ab 2050 bleibt der Eisenerzpreis dann in allen Szenarien real konstant.

Preis CO₂-Zertifikate

Die Entwicklung des CO₂-Preises ist sehr schwer vorherzusehen, weil sie nicht nur von Angebot und Nachfrage, sondern maßgeblich auch von politischen Entscheidungen abhängt. Durch den geplanten Atomausstieg und damit erhöhter CO₂-Emission wird ein hohes Preisniveau für CO₂-Zertifikate vorhergesagt (Schlesinger et al. 2011, S. 14). Trotz derzeitiger Ausnahmeregelungen für energieintensive Industrien, wie die Stahlindustrie (Bundesministerium der Justiz (BMJ) 9/26/2011, S. 12), werden in der vorliegenden Arbeit alle CO₂-Emissionen durch Emissionszertifikate ausgeglichen. Nur so lassen sich die unterschiedlichen Herstellungsrouten auch ökonomisch vergleichbar machen. Ausgehend von einem CO₂-Preis von € 14 / t CO₂ in 2010 wird im *ambitionierten* Szenario ein sehr starker Preisanstieg mit einer CAGR von 4,2% basierend auf „Preisfad A - deutlich“ aus (Nitsch et al. 2012, S. 51) verwendet. Für das *moderate*

und *konservative* Szenario werden Preispfade „B - moderat“ und „C - sehr niedrig“ mit Wachstumsraten von 3,5% bzw. 2,9% aus (Nitsch et al. 2012, S. 51) verwendet. Die jeweiligen Wachstumsraten werden auch nach 2050 fortgeschrieben. Ein Mindestpreis von € 75 / t CO₂ gilt als „ökologisch korrekter“ Preis unter Berücksichtigung der potenziellen Schäden des Klimawandels (Nitsch et al. 2012, S. 3). Durch einen funktionierenden CO₂-Handel und regelmäßige Verknappung der Emissionsmengen kann der Preis sogar noch höher steigen. In der vorliegenden Arbeit wird ein maximaler Preis für CO₂-Zertifikate von € 100 / t CO₂ angenommen. Sobald in den drei Szenarien dieser Preis erreicht wird, bleibt er bis zum Ende des Betrachtungszeitraums konstant.

Preis Erdgas

Der Erdgaspreis wird langfristig, ähnlich wie andere fossile Brennstoffe, durch steigende Förderkosten und durch die wachsende Nachfrage besonders in Schwellenländern weiter steigen. Um die Bandbreite der möglichen Preisprojektionen abzubilden, werden erneut die drei Preispfade aus (Nitsch et al. 2012, S. 51) übernommen. Im *ambitionierten* Szenario der „Preisfad A“ mit einer CAGR von 2,3%, im *moderaten* Szenario der Preisfad B mit einer CAGR von 1,5% und im *konservativen* Szenario „Preisfad C“ mit CAGR 0,8%. Der Einfluss des Erdgaspreises beschränkt sich in den vorliegenden Modellen jedoch auf die hochofenbasierten Herstellungsverfahren durch den Erdgaseinsatz (ca. 500 MJ) in Hochofen und Oxygenkonverter und durch die indirekte Kopplung des Verkaufspreises von Prozessgasen an den Erdgaspreis.

EE-Anteil am Bruttostromverbrauch

Der Anteil EE am Bruttostromverbrauch hängt seinerseits wieder von vielen Annahmen und Entwicklungsparametern ab, die sich im Zuge der politischen Umsetzung der Energiewende im Betrachtungszeitraum noch stark ändern können. In einigen Szenariostudien wird der EE-Anteil als Simulationsergebnis mit errechnet (Nitsch et al. 2012), (Schlesinger et al. 2011). In der vorliegenden Arbeit soll der Simulationsschwerpunkt jedoch auf Stahlherstellungsverfahren liegen, so dass hier die vereinfachte Annahme getroffen wird, dass sich im *moderaten* Szenario der EE-Anteil gemäß der Zielvorgabe der Bundesregierung entwickelt (BMU 2010, S. 4), d.h. 80% EE-Anteil ab 2050. Im *ambitionierten* Szenario wird das 80% Ziel bereits 10 Jahre früher, also in 2040 erreicht und im *konservativen* Szenario erst 20 Jahre später in 2070. Vom derzeitigen Wert wird die Entwicklung linear extrapoliert.

Strompreis

Der Strompreis basiert auf den Gestehungskosten fossiler Kraftwerke und erneuerbarer Stromquellen, gewichtet mit dem aktuellen Strommix. Erneuerbare Energiequellen sind zum Beginn des Betrachtungszeitraumes durch hohe Investitionskosten und schwankende Auslastung noch deutlich teurer als fossile Kraftwerke. Durch sehr ge-

ringe variable Kosten der EE (Merit Order Effekt) und weitere Lerneffekte der jungen Technologien auf der einen Seite, und die steigenden Preise fossiler Brennstoffe auf der anderen Seite, ergibt sich eine gegenläufige Strompreisentwicklung für fossile und erneuerbare Energiequellen.

Die Projektion von Großhandelspreisen für die fossile Stromerzeugung basiert auf den Preispfaden A,B und C von (Nitsch et al. 2010, S. 167) zuzüglich eines Netzentgelts von 12% (Bundesnetzagentur 2010, S. 24). Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate wird bis 2050 fortgeschrieben. Dabei wird Preispfad A dem *ambitionierten* Szenario zugeordnet, für das ein hoher Preisanstieg für fossile Stromerzeugung erwartet wird. Preispfad B wird dem *moderaten* Szenario und Preispfad C dem *konservativen* Szenario mit dem geringsten Preisanstieg fossiler Stromerzeugung zugeordnet.

Die Entwicklung der Preise für erneuerbare Stromerzeugung basiert auf dem Anfangswert von (Nitsch et al. 2010, S. 167) für 2010 von €140/MWh zuzüglich einem Netzentgelt von 12% (Bundesnetzagentur 2010, S. 24) und weist dann den typischen Verlauf einer Erfahrungskurve⁵¹ ähnlich (Nitsch et al. 2012, S. 212) auf. Die langfristigen unteren Grenzkosten der erneuerbaren Stromerzeugung von €40/MWh⁵² werden je nach Szenario in 2050 (*ambitioniert*), 2060 (*moderat*) bzw. 2070 (*konservativ*) erreicht.

Im gewichteten Mittel ergibt sich eine Strompreisentwicklung für stromintensive Industrien ähnlich zu (Schlesinger et al. 2010, S. 131), mit einem Strompreis Höhepunkt zwischen 2020 und 2030 und Strompreisniveaus auf dem Niveau von heute oder niedriger ab 2040 (siehe Abbildung 5-6). Das relativ hohe Strompreis Anfangsniveau resultiert aus dem Netzentgelt von 12%, das auf die Großhandelsstrompreis aufgeschlagen wird. Der Strompreisabfall nach 2020-2030 kann nur unter Beibehaltung der bestehenden Ausnahmenregelungen für die Stahlindustrie eintreten. Wenn durch zunehmenden Druck der Öffentlichkeit neue Allokationsmechanismen die Belastung privilegierter Nutzer erhöhen, dann bleibt der Strompreis über den Betrachtungszeitraum eher konstant (vgl. hierzu Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 5.5.4). Welche Strompreisvergünstigungen die innovativen Stahlherstellungsverfahren in Zukunft zugesprochen bekommen, kann derzeit noch nicht abgeschätzt werden.

⁵¹ Erfahrungskurve mit typischem exponentiellen Verlauf der Form $f(x)=ax^{-b}$, mit $a=157$

⁵² In Anlehnung an Nitsch et al. 2010, S. 24 reduziert um €10/MWh für weitere Lerneffekte über den längeren Betrachtungszeitraum

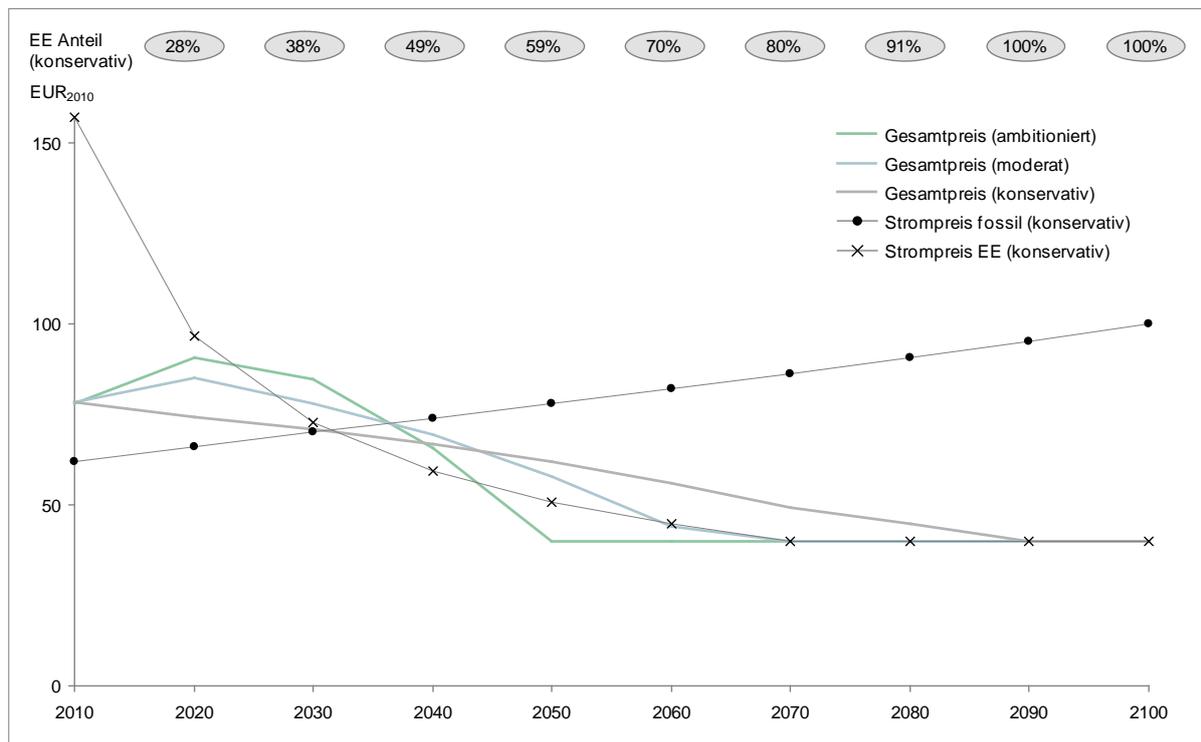


Abbildung 5-6: Szenarioabhängige Strompreisentwicklung und anschauliche Herleitung des Gesamtpreises aus fossilem und erneuerbarem Strompreis am Beispiel des *konservativen* Szenarios

Preis Überschussstrom

Mit *Überschussstrom* ist Strom zu Zeiten hoher Stromproduktion gemeint (z.B. starker Wind, hohe Sonneneinstrahlung), der zu sehr günstigen oder zum Teil negativen Preisen verkauft wird, um die Netzstabilität zu gewährleisten. Je höher der Anteil EE ist, desto höher sind die Schwankungen im Stromnetz, die durch variable Preismodelle ausgeglichen werden müssen. Der Preis von Überschussstrom verläuft in der vorliegenden Arbeit linear von den heutigen minimalen Erzeugungskosten für Windstrom von € 50 / MWh⁵³ bis zu dem Jahr in dem der EE-Anteil am Strommix 100% erreicht. Je nach Szenario ist der zeitliche Verlauf des Überschussstrompreises also unterschiedlich. Im *ambitionierten* Szenario fällt der Preis am schnellsten und kann schon im Jahr 2050 modellhaft vereinfacht zum Nulltarif angeboten werden. Im *moderaten* Szenario liegt Überschussstrom erst im Jahr 2070 zum Nulltarif vor. Im *konservativen* Szenario wird ein minimaler Preis von € 13 erreicht. Diese Minimalpreise als Jahresmittelwert erscheinen nach den kurzzeitig zum Teil stark negativen Preisen für Überschussstrom⁵⁴ der vergangenen Jahre durchaus realistisch und ermöglichen eine ökonomisch rentable chemische Speicherung von Überschussstrom in Form von Wasserstoff.

⁵³ Nitsch et al. 2010, S. 23

⁵⁴ Bundesnetzagentur 2010, S. 33

CO₂-Emission Strommix

Der Emissionsfaktor (EF) ist die durchschnittliche Menge CO₂, die bei der Stromerzeugung pro MWh entsteht. Jeder Stromkonsument verursacht pro MWh diese indirekte Emission. Für die Entwicklung des EF wird ein linearer Verlauf in Abhängigkeit vom EE-Anteil in der Stromerzeugung angenommen. Hierbei wird vereinfachend angenommen, dass der EF des konventionell erzeugten Stromanteils nahezu konstant bleibt. Wie schon beim Preis von Überschussstrom wird ein linearer Verlauf des 2010er Referenzwertes, bis zu dem Jahr in dem 100% des Stroms erneuerbar erzeugt werden, angenommen. Der Wert für 2010 liegt nach (Icha 2013, S. 2) bei 546 kg / MWh. Im *ambitionierten* Szenario fällt der Emissionsfaktor bis 2050 auf 0 kg / MWh ab, da Strom zu 100% erneuerbar erzeugt wird. Bei dem Wert von 0 kg / MWh handelt es sich selbstverständlich um eine vereinfachende Annahme, da in Realität immer indirekte Effekte zu einer geringfügigen CO₂-Emission führen. Im *moderaten* bzw. *konservativen* Szenario wird dieser Punkt erst 2070 bzw. 2090 erreicht.

Preis Stahlschrott

Stahlschrott stellt eine gute Alternative zu dem primären Rohstoff Eisenerz dar. Das Recycling von Schrott zu Rohstahl ist deutlich energiesparender und emissionsärmer als die Herstellung über die Primärroute. Deshalb ist der Preis für hochwertigen Schrott üblicherweise mehr als doppelt so hoch wie für unreduziertes Eisenerz. Im *konservativen* Szenario bleibt dieser Preisunterschied über den gesamten Betrachtungszeitraum bestehen, d.h. der Schrottpreis steigt synchron zum Eisenerzpreis mit 0,75% pro Jahr an. Im *moderaten* Szenario, in dem höhere CO₂-Preise schon früher die sekundäre Herstellungsrouten begünstigen, steigt die Nachfrage nach Schrott bis 2050 stärker an, so dass bis 2050 ein schnellerer Preisanstieg mit 1,2%⁵⁵ pro Jahr zu beobachten ist. Durch die innovativen Herstellungsverfahren H-DR und EW, die bei niedrigen Strompreisen über die primäre Route profitabel und nahezu emissionsfreien Rohstahl herstellen können, wird die Schrottnachfrage gedämpft, so dass der Schrottpreis von 2060 bis 2100 konstant bleibt. Im *ambitionierten* Szenario tritt dieser Effekt noch etwas stärker auf, so dass der Schrottpreis ab 2050 sogar mit -0,5% pro Jahr sinkt.

Preis Warmbandstahl

Als Umsatzquelle wird das dem Rohstahl am nächsten stehende Endprodukt herangezogen – der Warmbandstahl. Mit der Annahme, dass aus einer Tonne Rohstahl etwa 910 kg Warmbandstahl hergestellt wird, kann der Kostenseite der Herstellungsmodelle auch eine Umsatzseite gegenüber gestellt werden. Um den Zustand des Marktgleichgewichts zu erhalten und die deutsche Stahlindustrie nicht einseitig zu belasten, steigt der Preis für Warmbandstahl synchron mit dem Preis für Eisenerz um 0,75% pro Jahr und bleibt dann ab 2050 konstant. Der Startpreis in 2010 von € 631 / t

⁵⁵ Pardo und Moya 2013, S. 119

Warmbandstahl stammt aus (Statistisches Bundesamt 2012, S. 77). Die gleichen Preisprojektionen werden für alle drei Szenarien benutzt.

Tabelle 5-2: Szenarioabhängige Annahmen (in grauer Schriftfarbe Annahmen, die sich zwischen den Szenarien nicht ändern)

Input Größen	Preis Koks- kohle	Preis Eisenerz	Preis CO ₂ - Zertifikate	Preis Erdgas	Anteil EE	Strompreis fossil	Strompreis erneuerbar	Preis Über- schussstrom	CO ₂ -Emission Strommix	Preis Schrott	Preis Warm- bandstahl
Jahr \ Einheit	EUR ₂₀₁₀ / t	EUR ₂₀₁₀ / t	EUR ₂₀₁₀ / t	EUR ₂₀₁₀ / GJ	%	EUR ₂₀₁₀ /MWh	EUR ₂₀₁₀ /MWh	EUR ₂₀₁₀ MWh	kg/MWh	EUR ₂₀₁₀ / t	EUR ₂₀₁₀ / t
Ambitioniertes Szenario											
2010	170	106	14	5,8	17%	62	157	50	546	255	631
2020	200	114	27	8,1	38%	93	87	38	410	287	680
2030	235	123	45	10,5	59%	118	62	25	273	324	733
2040	277	133	60	12,7	80%	136	48	13	137	365	790
2050	326	143	75	14,9	100%	157	40	0	0	411	851
2060	351	143	100	18,7	100%	197	40	0	0	391	851
2070	378	143	100	23,5	100%	247	40	0	0	372	851
2080	408	143	100	29,5	100%	310	40	0	0	354	851
2090	439	143	100	37,0	100%	389	40	0	0	336	851
2100	473	143	100	46,4	100%	489	40	0	0	320	851
Moderates Szenario											
2010	170	106	14	5,8	17%	62	157	50	546	255	631
2020	200	114	23	7,0	35%	81	93	42	455	287	680
2030	235	123	34	8,3	50%	88	68	33	364	324	733
2040	277	133	45	9,6	65%	97	55	25	273	365	790
2050	326	143	57	10,6	80%	106	46	17	182	411	851
2060	351	143	80	12,3	95%	122	40	8	91	411	851
2070	378	143	100	14,3	100%	140	40	0	0	411	851
2080	408	143	100	16,6	100%	161	40	0	0	411	851
2090	439	143	100	19,2	100%	185	40	0	0	411	851
2100	473	143	100	22,3	100%	212	40	0	0	411	851
Konservatives Szenario											
2010	170	106	14	5,8	17%	62	157	50	546	255	631
2020	200	114	20	6,1	28%	66	96	44	478	275	680
2030	235	123	26	6,6	38%	70	73	38	410	296	733
2040	277	133	36	7,3	49%	74	59	31	341	319	790
2050	326	143	45	8,1	59%	78	51	25	273	344	851
2060	351	143	60	8,8	70%	82	45	19	205	371	851
2070	378	143	80	9,5	80%	86	40	13	137	399	851
2080	408	143	100	10,3	91%	91	40	6	68	430	851
2090	439	143	100	11,1	100%	95	40	0	0	464	851
2100	473	143	100	12,1	100%	100	40	0	0	500	851
Quelle	(Pardo und Moya 2013, S. 119)	(Pardo und Moya 2013, S. 119)	(Nitsch et al. 2012, S. 51)	(Nitsch et al. 2012, S. 51)	(BMU 2010); (Böhme et al. 2011)	(Nitsch et al. 2010, S. 167); (Bundesnetzagentur 2010)	(Nitsch et al. 2010, S. 167); (Bundesnetzagentur 2010)	(Nitsch et al. 2010, S. 23); [EA]; (Schinko et al. 2014)	(Icha 2013)	(Pardo und Moya 2013, S. 119)	(Statistisches Bundesamt 2012)

5.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die zeitunabhängigen Ergebnisse der Masse- und Energiebilanzen aus dem ersten Bewertungsschritt präsentiert (Abschnitt 5.5.1). Anschließend werden die zeitabhängigen Ergebnisse basierend auf den drei Zukunftsszenarien aus dem zweiten Bewertungsschritt verglichen. Im Abschnitt 5.5.2 liegt der Fokus auf der Wirtschaftlichkeit unter Voraussetzung der unterschiedlichen Zukunftsszenarien und im Abschnitt 5.5.3 auf dem direkten Vergleich der ausgewählten Technologien und ihrer Potenziale zur Erreichung der Klimaschutzziele. Die Ergebnisse werden entlang dreier Dimensionen dargestellt und diskutiert (siehe Abbildung 5-7). Jede der vier Herstellungsrouten wird entlang des Betrachtungszeitraumes und entlang der drei Szenarien (*konservativ, moderat, ambitioniert*) analysiert. Anschließend wird die Sensitivität der Ergebnisse auf Variationen in einigen wichtigen Kernannahmen mithilfe einer Sensitivitätsanalyse überprüft (siehe Abschnitt 5.5.4). In der abschließenden Diskussion (siehe Abschnitt 5.6) werden die Ergebnisse kritisch hinterfragt und Schlussfolgerungen getroffen.

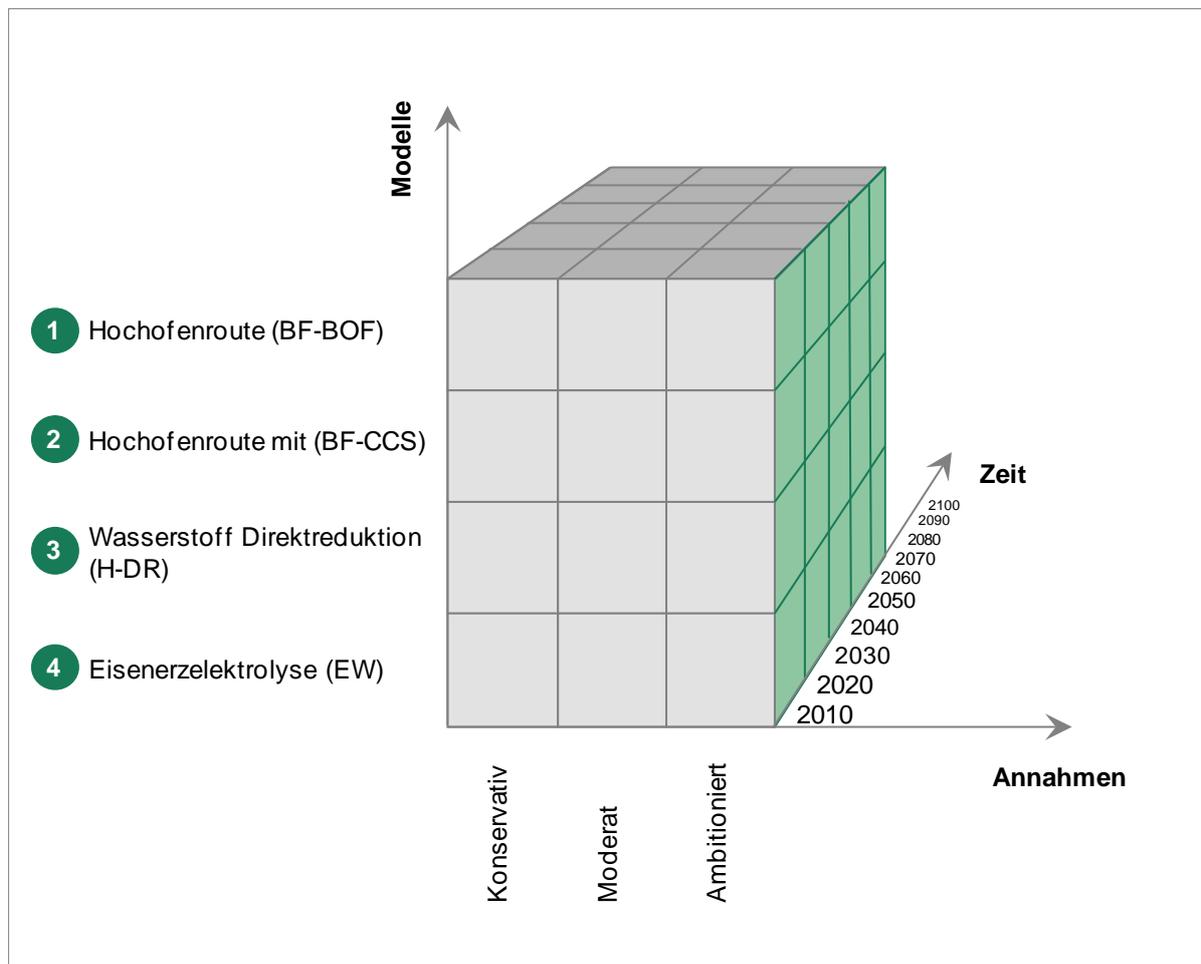


Abbildung 5-7: Dimensionen der Szenarioanalyse

5.5.1 Masse- und Energiebilanzen

Zur Prozessanalyse gehört die Bilanzierung von Masse- und Energieströmen. Da keine technische Weiterentwicklung der modellierten Anlagen simuliert wird, sind diese zeitlich über den Betrachtungszeitraum konstant.

1 - Hochofenroute

Eine detaillierte Zusammenfassung der Energie- und Materialflussanalyse des integrierten Stahlwerks einschließlich vorgelagerter Wertschöpfungsschritte von Kohleabbau und Logistik ist in Tab-A 5 zu sehen. Der Energiebedarf ohne die vorgelagerten Wertschöpfungsschritte liegt bei ca. 18 GJ / t Rohstahl (einschließlich Energiegehalt des Reduktionsmittels Kohle). Mit prozessbedingten CO₂-Emissionen von ca. 1,8t über den gesamten Betrachtungszeitraum liegt die Modellanlage schon relativ nahe am technischen Minimum von 1518 kg CO₂ / t Rohstahl (Kirschen et al. 2011, S. 6148) und repräsentiert damit ein hochmodernes Stahlwerk. Knapp ein Vierfaches an Rohstoffmasse ist notwendig um eine Tonne Rohstahl herzustellen.

Über 99% der verwendeten Energie stammt aus fossilen Energieträgern (Kohle und Erdgas). Das moderne integrierte Stahlwerk produziert über Abgasrezirkulierung und

Wärmerückgewinnung mehr Elektrizität als es selber verbraucht und ist somit ein netto Strom Exporteur.

2 - Hochofenroute mit CCS

Dieses Verfahren kombiniert die konventionelle Hochofenroute mit der Technologie für Kohlenstoff-Abscheidung und -Lagerung (CCS). Dadurch kann der Kohlebedarf um 22% und die CO₂-Emission um 45 - 60% gegenüber dem konventionellen Verfahren reduziert werden (siehe Tab-A 6). Obwohl fast 90% des Gichtgas-CO₂ abgeschieden wird, sorgt der erhöhte Stromverbrauch von ca. 640 MJ / Tonne Rohstahl und die nicht gefilterten Emissionen der Sinteranlage und Kokerei für eine im Ergebnis geringere Emissionsreduktion. Mit 550 kg abgeschiedenem CO₂ und einem um 15% reduzierten Energieverbrauch von 15,6 GJ je Tonne Rohstahl könnte dieses Verfahren dennoch einen deutlichen Beitrag zum Klimaschutz liefern.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht unterscheidet sich die Hochofenroute mit CCS nur durch höhere Investitionskosten (ca. 5%), und bedingt durch den erhöhten Strombedarf, höhere Betriebskosten. Erst durch eine deutliche Steigerung der Preise für CO₂-Emissionszertifikate kann der Kostenvorteil der konventionellen Hochofenroute ausgeglichen werden.

3 – Wasserstoff-Direktreduktion

Die Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsmittel anstelle von Kohle führt zu einem hohen Elektrizitätsbedarf zur Wasserstoffherstellung (siehe Abbildung 5-8). Trotzdem ist H-DR mit ca. 13,6 GJ / t Rohstahl energieeffizienter als BF-BOF und BF-CCS, sofern man in die Energiebilanz den Energiegehalt der Kohle mit einschließt. Der Gesamtrohstoffbedarf liegt mit 2,6 t / t Rohstahl ebenso deutlich unter dem der kohlebasierten Herstellungsverfahren. Es kann kaum Prozesswärme oder Energie wiederverwertet werden. Als Abfallstoffe treten neben den hauptsächlich indirekten CO₂-Emissionen nur noch Schlacke und Sauerstoff auf.

4- Modell Eisenerzelektrolyse

Die Eisenerzelektrolyse ist das energie- und rohstoffeffizienteste Verfahren. Als Reduktionsmittel wird direkt Strom verwendet, wodurch die energieintensiven Umwandlungsschritte entfallen und für eine Tonne Rohstahl nur 9,7 GJ Energie notwendig ist (siehe Tab-A 8). Neben dem üblichen Eisenerz und Schrott werden nur noch geringe Mengen an Zusatzstoffen und Legierungen benötigt. Die Herstellung des Elektrolyts erfordert etwa 130 kg Natriumhydroxid. Je nach Emissionsfaktor des Strommix wird pro Tonne Rohstahl 180 – 1300 kg CO₂ emittiert.

Direktvergleich Masse- und Energiebilanz

In Abbildung 5-8 ist der Energie- und Rohstoffbedarf der vier untersuchten Herstellungsverfahren direkt gegenübergestellt.

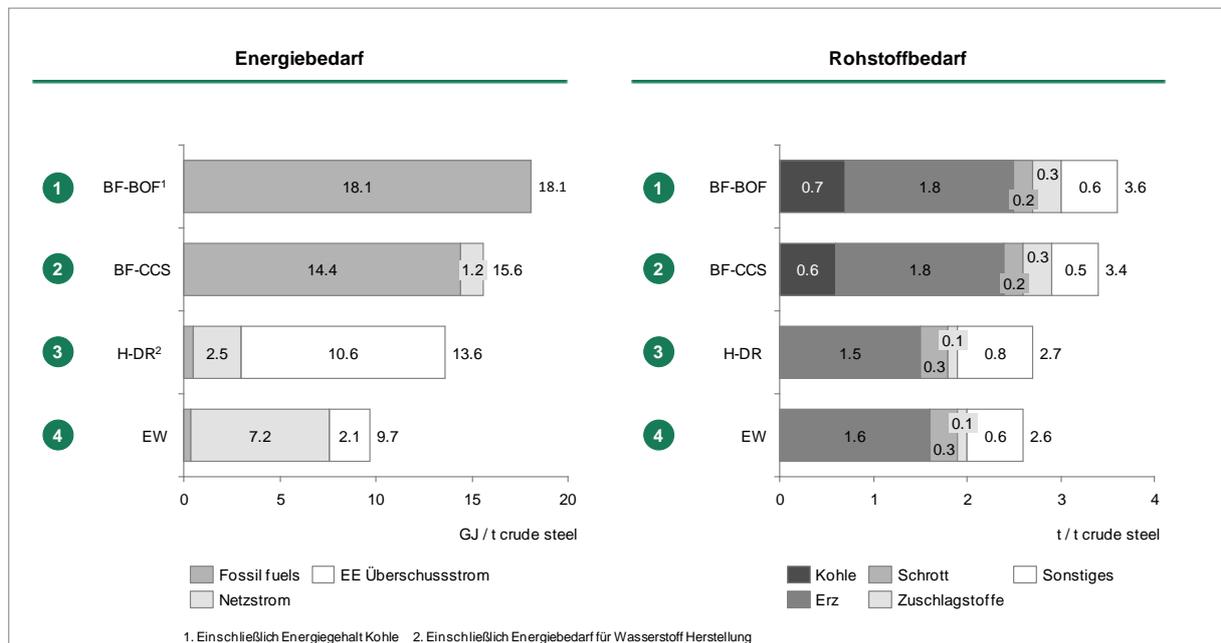


Abbildung 5-8: Vergleich zeitunabhängiger Ergebnisse (konstant in allen Szenarien)

Der Energiebedarf der Hochofenroute ist mit 18,1 GJ / t Rohstahl (inklusive Energie Kohle) der höchste. Wie in Abschnitt 5.5.2 dargestellt, ist dieses Herstellungsverfahren jedoch durch niedrige Betriebskosten das zurzeit profitabelste Verfahren. Das Verfahren mit CCS benötigt zwar für die Kohlendioxid-Abscheidung mehr elektrische Energie, weist aber durch die mehr als 20% Einsparungen beim Kohlebedarf insgesamt eine höhere Energieeffizienz auf. Das H-DR Verfahren ist mit 13,6 GJ / t Rohstahl deutlich energieeffizienter und verbraucht unter den getroffenen Annahmen zu 80% Überschussstrom. Das EW-Verfahren ist mit 9,7 GJ das energieeffizienteste Herstellungsverfahren, weil es einen sehr schlanken Produktionsablauf aufweist und keine Energie durch Umwandlungsschritte verloren geht. Wird hier durch Forschungsschritte die Energieeffizienz des Eisenerz-Elektrolyseurs weiter verbessert, ist auch eine noch höhere Energieeffizienz denkbar.

Beim Rohstoffbedarf schneiden die beiden Herstellungsszenarien, die Kohle als Reduktionsmittel verwenden, deutlich schlechter ab als die strom- bzw. wasserstoffbasierten Verfahren. Der geringere Bedarf an Eisenerzen für die H-DR und die Eisenerzelektrolyse lässt sich durch den höheren Eisengehalt der Feinerze und Konzentrate erklären, die hier verfahrensbedingt verwendet werden.

Nachdem die zeitunabhängigen Ergebnisse der Energie- und Massenbilanzen präsentiert wurden, werden im folgenden Abschnitt die Ergebnisse der Szenarioanalyse über den Betrachtungszeitraum bis 2070 vorgestellt.

5.5.2 Szenarioanalyse

In diesem Abschnitt wird die zeitliche Simulation der vier Herstellungsverfahren je Zukunftsszenario (*konservativ, moderat, ambitioniert*) miteinander verglichen. Als Indikatoren für die Wirtschaftlichkeit der Verfahren sind Umsatz, Betriebskosten (OPEX) und das operative Ergebnis (EBIT) entlang der Zeitachse aufgetragen. Die Absolutwerte sind ggfs. durch Unsicherheiten in den Modellannahmen insgesamt verschoben. Der relative Vergleich zwischen den Routen erlaubt es jedoch, technologische Wendepunkte und Zukunftspotenziale zu identifizieren.

Konservatives Szenario

Das konservative Szenario zeichnet sich durch eine verlangsamte Energiewende und damit zusammenhängend, langsamer steigende Preise für CO₂-Zertifikate und Schrott aus. Außerdem steigt der Strompreis langsamer (vgl. Abbildung 5-6) durch ein Abbremsen des Ausbaus von EE-Quellen, um dafür ab 2040 teurer zu werden als im Vergleich zu den anderen beiden Szenarien.

Im direkten Vergleich der vier Herstellungsverfahren (siehe Abbildung 5-9) ist zu erkennen, dass die Hochofenroute (BF-BOF) in den ersten Jahrzehnten des Betrachtungszeitraumes das profitabelste Verfahren darstellt. Sie profitiert trotz des Zukaufs von 100% CO₂-Zertifikaten von relativ niedrigen Preisen für CO₂, Schrott und fossil erzeugtem Strom. Das EBIT wird erst nach 2030 negativ (in Kombination mit CCS sogar erst 2050). Die höheren Energiekosten des BF-CCS-Verfahren, die 2020 zu einer geringeren Profitabilität als bei BF-BOF führen, reduzieren in den Folgejahren die stetig steigenden Abfallkosten für die CO₂-Emission und verlängern somit die wirtschaftliche Lebensdauer der kohlebasierten Verfahren. Langfristig werden durch steigende Betriebskosten beide hochofenbasierten Verfahren unprofitabel. Besonders die steigenden Kosten für CO₂-Emissionen und fossile Energieträger können ohne Fördermittel oder Ausnahmeregelungen durch die leicht steigenden Umsätze des Stahlverkaufs nicht kompensiert werden.

Zu Beginn des Betrachtungszeitraumes mit niedrigen Anteilen erneuerbarer Stromquellen und ohne günstigen Überschussstrom zur Wasserstoffherstellung oder Eisen-erzelektrolyse sind die beiden innovativen Herstellungsverfahren (H-DR und EW) hoch unprofitabel bis mindestens 2040. Trotz evtl. früherer Marktreife wäre im *konservativen* Szenario keine Grundlage für einen früheren Markteintritt gegeben. Ab 2040 sind die Betriebskosten für H-DR geringer als für BF-BOF, da günstiger Überschussstrom für die Wasserstoffherstellung zu Zeiten von Überangebot zur Verfügung steht. Durch die Möglichkeit selektiv Überschussstrom zu nutzen und in Form von Wasserstoff zwischen zu speichern hat das H-DR-Verfahren einen Kostenvorteil gegenüber dem energieeffizienteren EW-Verfahren und ist deshalb die profitabelste Herstellungsrouten in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Beide innovativen Verfahren sind zum Zeitpunkt ihrer erwarteten Marktreife jedoch noch deutlich unprofitabel, so dass mit einer Verlängerung der Betriebszeiten der konventionellen Routen zu rechnen ist.

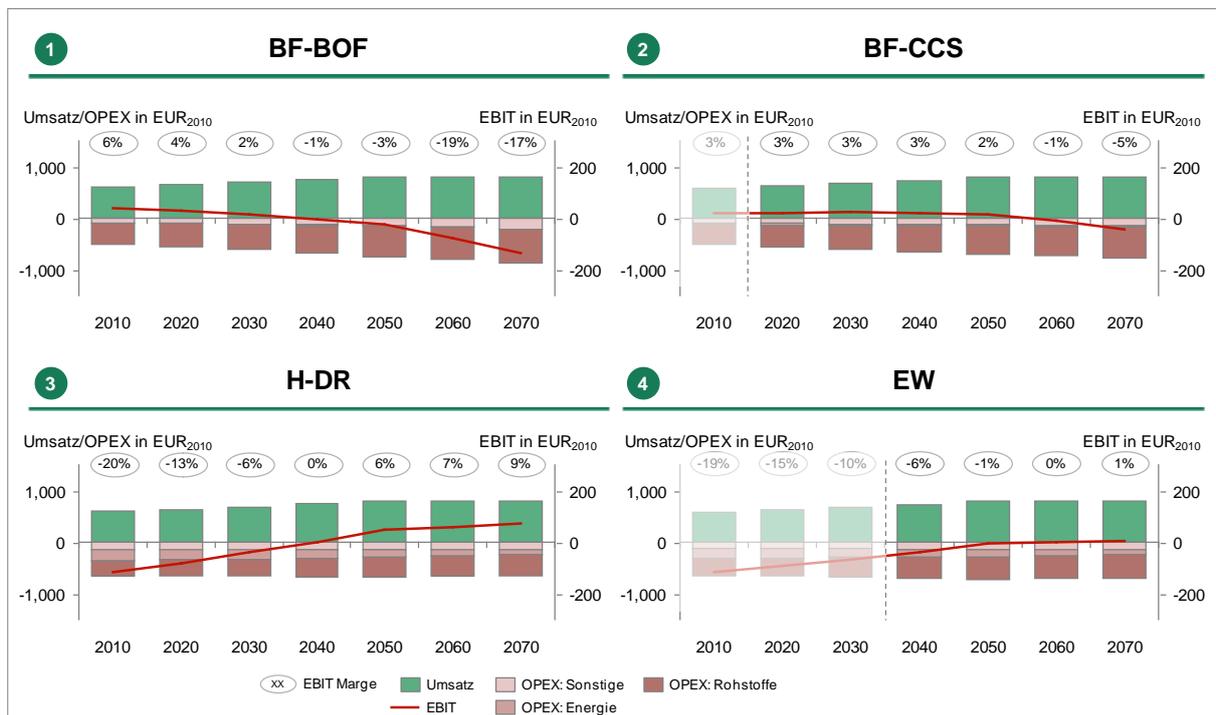


Abbildung 5-9: Szenarioanalyse im konservativen Szenario (Zeitspanne vor Marktreife ist ausgegraut)

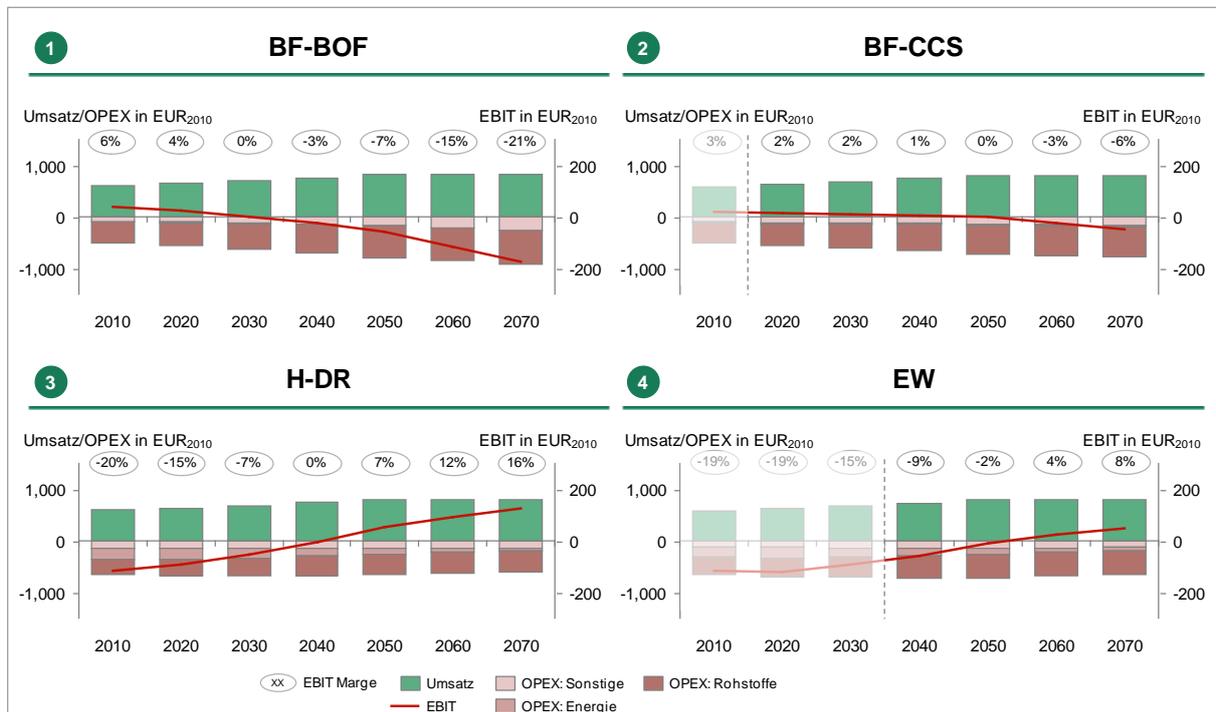


Abbildung 5-10: Szenarioanalyse im moderaten Szenario (Zeitspanne vor Marktreife ist ausgegraut)

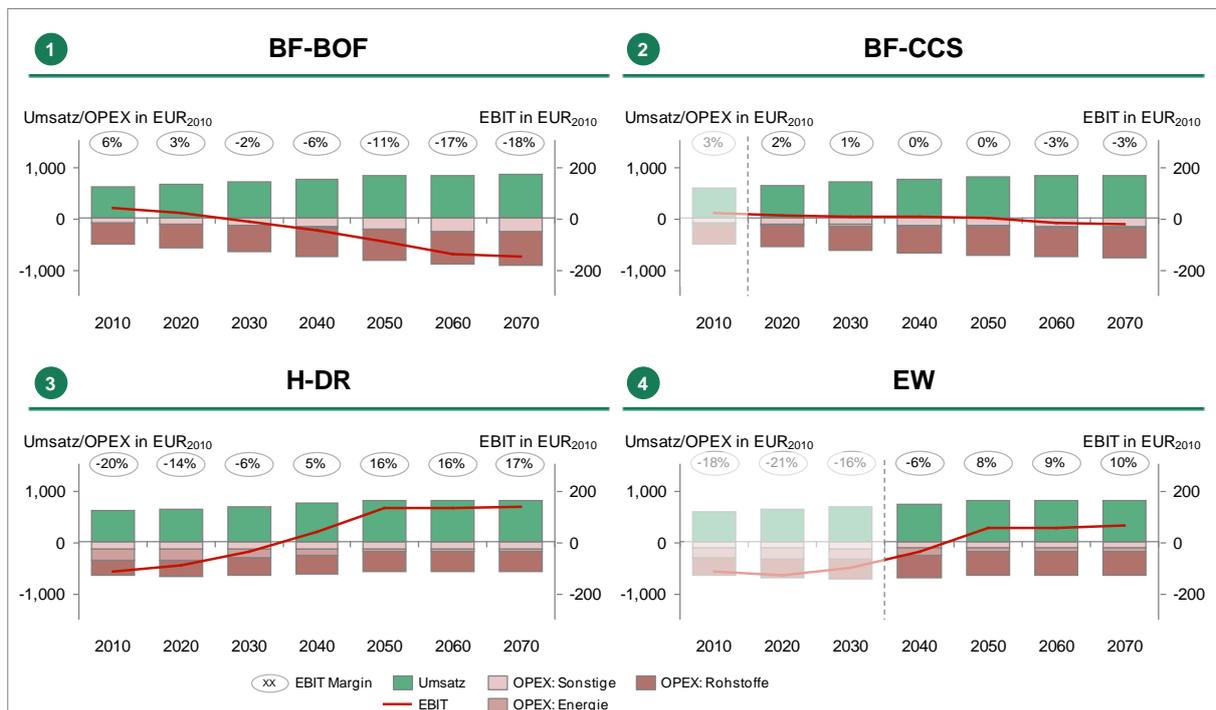


Abbildung 5-11: Szenarioanalyse im *ambitionierten* Szenario (Zeitspanne vor Marktreife ist ausgegraut)

Moderates Szenario

Im *moderaten* Szenario wird die Energiewende konsequent weiter umgesetzt, wodurch sich fossile Energieträger weiter verteuern, CO₂-Preise deutlich ansteigen und der Strompreis einen Höhepunkt in 2020-2030 durchläuft bevor er 2040 unter das heutige Niveau fällt.

BF-BOF und BF-CCS werden im *moderaten* Szenario durch den stärkeren Preisanstieg von CO₂-Zertifikaten, Erdgas und Schrott und die damit verbundenen höheren Produktionskosten etwa 10 Jahre früher unprofitabel als im *konservativen* Szenario. Das hohe Strompreinsniveau um 2030 verhindert einen früheren Markteintritt der innovativen Routen. Ab 2050 bleibt der Verkaufspreis für Warmbandstahl konstant, so dass steigende Produktionskosten nicht mehr an die Stahlkunden weiter gegeben werden können. Durch Überschussstrom zum Nulltarif und sehr geringe Mengen CO₂-Emission der innovativen Verfahren bleiben H-DR und EW profitabel. Durch den höheren Anteil von Überschussstrom am Strombedarf behält H-DR den Preisvorteil gegenüber EW bis zum Ende des Betrachtungszeitraums.

Ambitioniertes Szenario

Die beschleunigt umgesetzte Energiewende im *ambitionierten* Szenario führt konsequenterweise dazu, dass die hochofenbasierten Routen schon früher unprofitabel werden. Der Anstieg bei den Betriebskosten ist vor allem durch stark steigende Preise für CO₂-Zertifikate bis zum Maximalwert von € 100 / t CO₂ in 2060 bedingt. BF-BOF wird schon ab 2030 mit Betriebskosten von über € 650 / t Rohstahl belastet und 10 Jahre früher als im *konservativen* Szenario unprofitabel. BF-CCS, das robuster gegen-

über Szenariovariationen ist, bleibt über den gesamten Betrachtungszeitraum bei einem nahezu neutralen Betriebsergebnis. Mit Subventionen für den CCS Retrofit könnte dieses Verfahren eine mögliche Alternative sein, um den Zeitraum vom Ausstieg aus BF-BOF bis zur Marktreife von H-DR zu überbrücken (vgl. Abschnitt 6), vorausgesetzt bis dahin werden technisch und gesellschaftlich akzeptable Lösungen für CO₂-Transport und Lagerung gefunden. Dieser Unsicherheitsfaktor stellt nach wie vor ein hohes Risiko für den Markteintritt dar (Remus et al. 2013, S. 542).

Die strombasierten Verfahren (H-DR und EW) profitieren im Gegenzug vom günstigen Überschussstrom, der ab 2050 zu Zeiten von Überangebot zum Nulltarif verfügbar ist. H-DR mit 80% Überschussstrom-Anteil wird ab ca. 2030-2040 profitabel. EW als strompreis-sensitivstes Verfahren kann erst ab 2050 wirtschaftlich rentabel betrieben werden, wenn der durchschnittliche Industriekunden-Strompreis durch 100% EE-Quellen, auf den Minimalwert von € 40 / MWh abgesunken ist.

Nachdem die Ausprägungen der einzelnen Szenarien im Detail präsentiert wurden, sollen nun die Routen entlang einiger prägnanter Parameter direkt miteinander verglichen werden.

5.5.3 Technologievergleich

Als technischer Parameter wird in Abbildung 5-13 die spezifische CO₂-Emission der vier Herstellungsverfahren miteinander über den Betrachtungszeitraum verglichen. Als betriebswirtschaftlichen Indikator zeigt Abbildung 5-12 den Kapitalwert der Investition in die jeweiligen Anlagentypen aus Sicht des Betreibers.

Net present value (NPV)

Der NPV, auch Kapitalwert genannt, ist einer der wichtigsten betriebswirtschaftlichen Indikatoren für die Bewertung von Investitionsentscheidungen, wie z.B. die Investition in ein bestimmtes Stahlherstellungsverfahren. Der NPV repräsentiert, stark vereinfacht, die finanzielle Entscheidung eines Stahlherstellers, in welches Herstellungsverfahren er an einem neuen Standort investieren würde, ohne weitere externe Faktoren wie Wettbewerb, Firmenstrategie oder bestehender Infrastrukturen mit zu quantifizieren.

Der Kapitalwert (NPV) errechnet sich aus der Höhe der Startinvestition zu gegebenem Zeitpunkt und den abgezinsten Finanzströmen über die gesamte Lebensdauer. In den zugrundeliegenden Modellen wird der NPV nach folgender Formel berechnet, wobei t ein beliebiger Zeitpunkt innerhalb des Betrachtungszeitraumes darstellt, T der Lebenszyklus der Anlage von 20 Jahren, i der Kalkulationszinssatz von 6,8% (Inflationbereinigt) und $CF(t)$ der operative jährliche Finanzstrom:

$$NPV(t) = \sum_t^{t+T} (1+i)^{-T} * CF(t)$$

Der NPV in einem beliebigen Jahr ergibt sich also aus der Summe aus der Startinvestition im ersten Jahr und den abgezinsten Finanzströmen über die Lebensdauer von jeweils 20 Jahren ab Startjahr. Für die Berechnung des NPV zum Ende des Betrachtungszeitraumes wird der Finanzstrom aus 2070 als konstant fortgetragen.

Der direkte Vergleich der vier Verfahren gibt Aufschluss über technologische Wendepunkte, an denen etablierte Technologien durch innovative Technologien abgelöst werden könnten.

In Abbildung 5-12 ist der NPV für beliebige Investitionszeitpunkte in die vier Verfahren im *moderaten* Szenario über den gesamten Betrachtungszeitraum aufgetragen. Durch die Annahme der vollen Einrechnung von CO₂-Kosten weisen allen Verfahren bis 2050 ein negatives NPV auf. Ein wirtschaftlicher Betrieb wäre so nur für bereits beschriebene Anlagen oder aber mithilfe von Subventionen möglich. BF-BOF als etabliertes Verfahren weist zu Beginn des Betrachtungszeitraums den relativ höchsten NPV auf. Durch die hohen CO₂-Kosten, wird der NPV schon vor 2020 negativ. Verglichen mit den anderen Verfahren ist der NPV des BF-BOF-Verfahrens bis 2020 – 2030 deutlicher höher und bestätigt so, warum dieses Verfahren bis heute das bevorzugte Verfahren ist. Selbst bei CO₂-Preisen bis € 30 / t CO₂ ist BF-BOF bis 2020 die attraktivste Investition (im *konservativen* Szenario sogar bis 2030). Ab 2030 (im *ambitionierten* Szenario ab 2020) wird das BF-CCS-Verfahren attraktiver. Ab 2040, hauptsächlich durch hohe CO₂-Preise und günstige Überschussstrom-Verfügbarkeit, wird die Investition in eine H-DR Anlage attraktiver (im *ambitionierten* Szenario schon einige Jahre früher). Unter den verwendeten Annahmen über den Strommix, mit höheren Stromkosten für EW, bleibt H-DR bis zum Ende des Betrachtungszeitraums das attraktivste Stahlherstellungsverfahren; sogar ohne weitergehende potentielle Wasserstoff-Synergien mit anderen Bereichen zu quantifizieren.

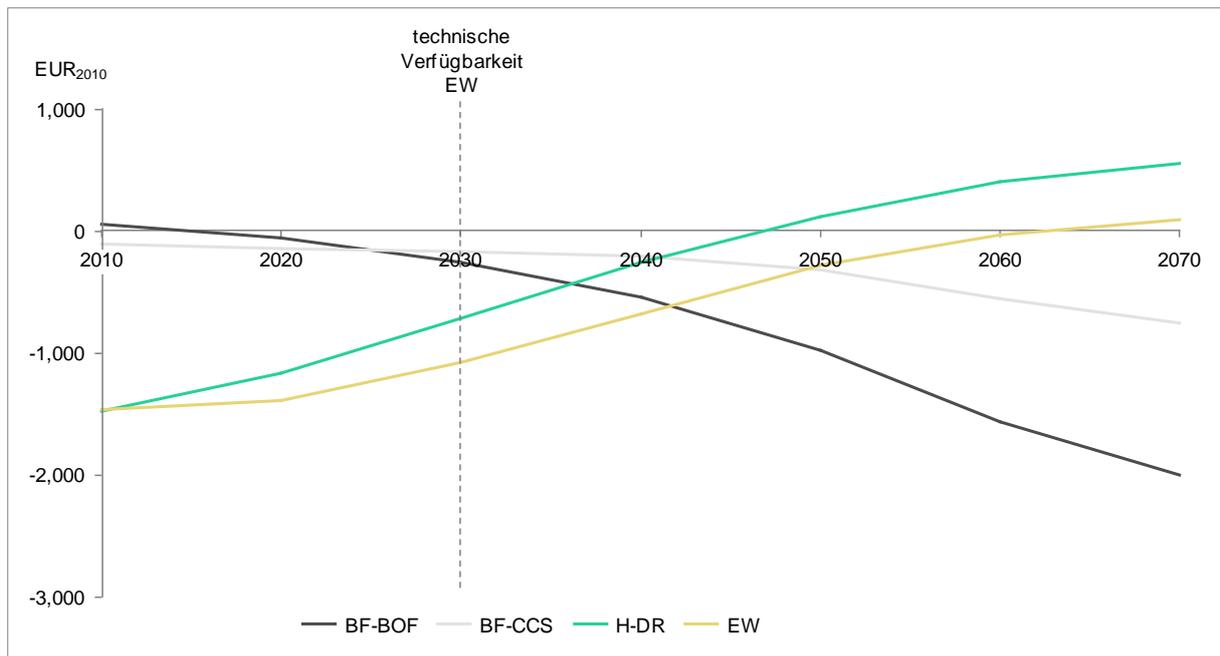


Abbildung 5-12: Wirtschaftlicher NPV Vergleich der Herstellungsverfahren im *moderaten* Szenario

CO₂-Emission

Abbildung 5-13 zeigt die CO₂-Emissionen der einzelnen Herstellungsverfahren über den Betrachtungszeitraum. Die CO₂-Emission für das *moderate* Szenario wird durch eine durchgezogene Linie gezeigt. Die Trajektorien des *konservativen* bzw. *ambitionierten* Szenarios sind als gestrichelte Linien dargestellt und stellen das Spektrum möglicher Zukunftsentwicklungen dar.

Da keine technische Verbesserung der einzelnen Verfahren simuliert wird, kann eine Emissionsreduktion nur von der Substitution fossiler Energieträger oder der Reduktion indirekter Emissionen resultieren.

BF-BOF ist das einzige Verfahren, mit steigender netto CO₂-Emission, durch reduzierte Gutschriften aus der Verstromung von Prozessgasen mit sinkendem Emissionsfaktor (EF) des Stromnetzes. BF-CCS mit einer relativ konstanten CO₂-Emission von 800 kg CO₂ / t Rohstahl reduziert die Emission gegenüber BF-BOF um ca. 50%. Selbst bei flächendeckender Umstellung auf die BF-CCS Route wäre das Klimaschutzziel von 80% Emissionsreduktion bis 2050⁵⁶ nicht zu erreichen.

Die CO₂-Emission der strombasierten Verfahren (H-DR und EW) hängen stark vom Emissionsfaktor des Stromnetzes ab. Wird der Strom wie im Referenzjahr 2010 größtenteils aus fossilen Brennstoffen erzeugt (EF von 455 kg CO₂ / MWh), so können diese Verfahren kaum zu einer CO₂-Reduktion beitragen. Wird der Strommix im Verlaufe des Betrachtungszeitraumes zunehmend regenerativ, so kann mit dem H-DR und der EW-Verfahren nahezu CO₂-freier Stahl produziert werden. Die Restemission von etwa

⁵⁶ Europäische Kommission 2011, S. 6

180 kg CO₂ / t Rohstahl resultiert aus Kohlenstoffzusätzen im Lichtbogenofen und von verbleibenden indirekten Emissionen.

H-DR spielt hierbei eine gewisse Sonderrolle. Durch die Entkopplung von Strombedarf und Energiebedarf der Direktreduktionsanlage über den sekundären Energieträger Wasserstoff kann gezielt überschüssiger erneuerbarer Überschussstrom eingesetzt werden (80% des Strombedarfs über Überschussstrom). Somit ist H-DR unabhängiger von der Transformation der Erzeugungstechnologien im Energiesektor. Zusätzlich kann Wasserstoff als Speichermedium und Puffer dienen, der das Stromnetz stabilisieren kann.

Mithilfe des H-DR oder EW-Verfahrens könnte das 80% Ziel in 2050 erreicht werden, jedoch nur wenn bis 2050 nahezu alle primären Stahlherstellungsanlagen auf die strombasierten Verfahren umgestellt hätten und auch nur im *ambitionierten* Zukunftsszenario. In allen anderen Szenarien wird das Ziel trotz des technologischen Durchbruchs nicht mehr erreicht.

Vielfältige Synergien von H-DR mit Wasserstoffanwendungen in anderen Branchen kann dieses Verfahren noch attraktiver machen und unterstreicht die wichtige Rolle, die H-DR für den Übergang zu einer CO₂-freien Stahlherstellung hat (vgl. Wörtler et al. 2013, S. 19).

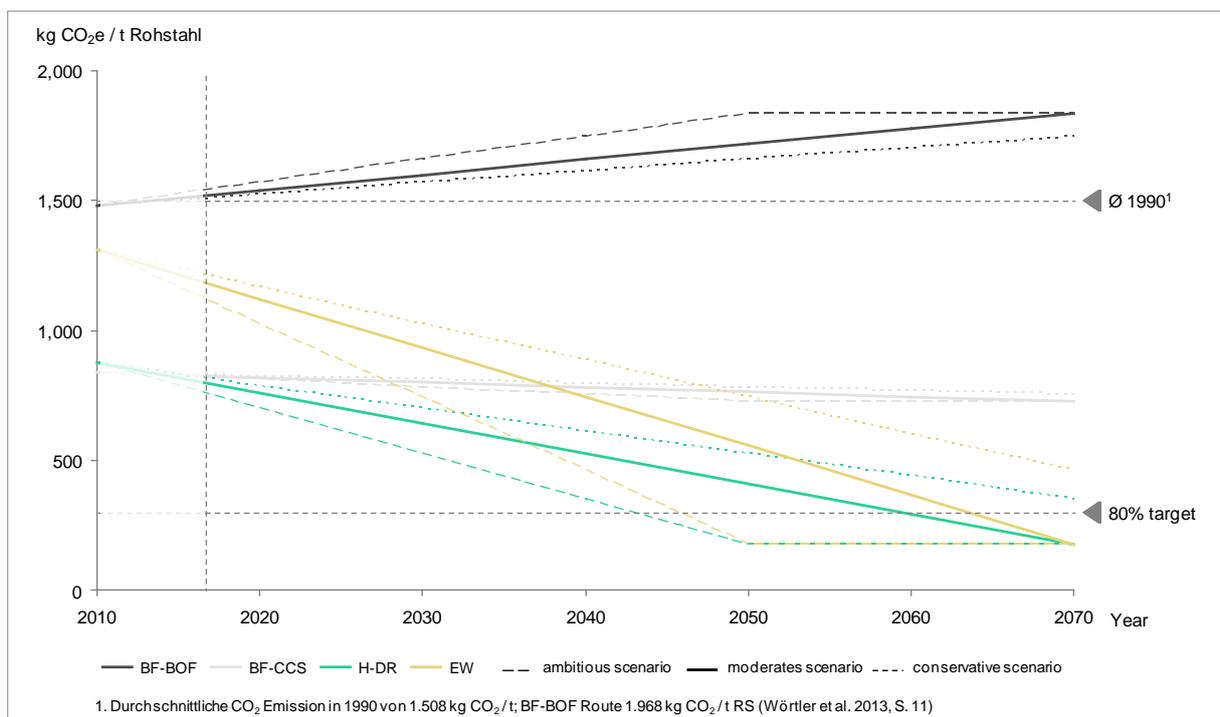


Abbildung 5-13: Vergleich CO₂-Emissionen der untersuchten Herstellungsverfahren

5.5.4 Sensitivitätsanalyse

Die Modellierung zukünftiger Entwicklungen impliziert immer ein hohes Maß an Unsicherheit. Sensitivitätsanalysen bewerten den Einfluss von Variationen in den Annahmen für die Simulationsergebnisse und helfen so, die Validität der Modellierung einzuschätzen (Zopounidis und Pardalos 2010, S. 158). Bei der Sensitivitätsanalyse wird eine Hauptannahme variiert während alle anderen Annahmen konstant belassen werden, um so den direkten Einfluss auf die Ergebnisse einschätzen zu können. Als Konvention werden in der vorliegenden Sensitivitätsanalyse für alle Annahmen, die nicht variiert werden, die Werte für das Jahr 2050 aus dem *moderaten* Szenario verwendet. Die Absolutwerte der Ergebnisse können sich geringfügig verändern, wenn ein anderes Basisjahr oder Szenario verwendet wird, die relative Sensitivität bleibt jedoch gleich. Im Folgenden werden drei Sensitivitätsanalysen für Annahmen vorgestellt, die eine hohe Unsicherheit und einen starken Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben.

Sensitivität CO₂-Preis

Der Preis für CO₂-Zertifikate hängt nicht ausschließlich von Angebot und Nachfrage ab, sondern wird maßgeblich von politischen Entscheidungen hinsichtlich eines international einheitlichen Handelssystems beeinflusst. Die Projektion dieses Eingangsparameters beinhaltet also eine hohe Unsicherheit. Für die Eisen- und Stahlindustrie mit hoher CO₂-Emission hängen die Produktionskosten stark von den Regularien des Emissionshandelssystems und den CO₂-Preisen ab. In den vorliegenden Modellen werden 100% der CO₂-Emissionen durch Zukauf von Zertifikaten kompensiert (um die verschiedenen Routen ökonomisch vergleichbar zu machen). In Abbildung 5-14 ist die Sensitivität gegenüber dem CO₂-Preis für die vier Herstellungsrouten dargestellt. Zunächst im Basisjahr für die Sensitivitätsanalyse 2050 im *moderaten* Szenario (links) und dann zum Vergleich noch im *ambitionierten* Szenario im Jahr 2030 (rechts), in dem mit einem Technologiewechsel zu rechnen ist.

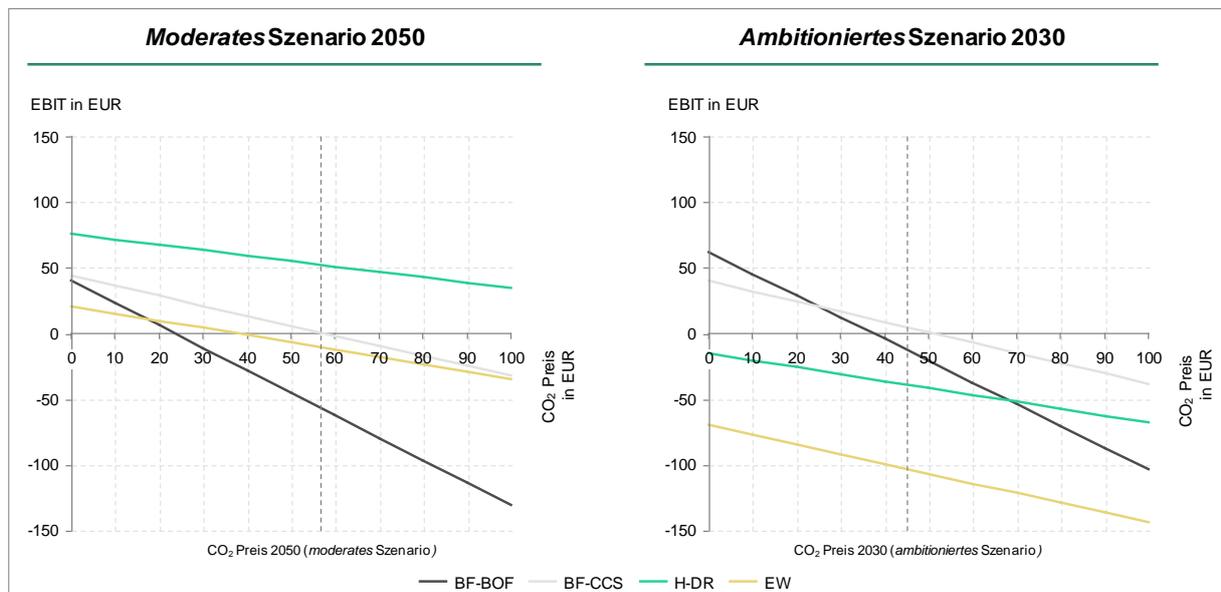


Abbildung 5-14: Sensitivitätsanalyse CO₂-Preis

Der EBIT, als Indikator für die operative Profitabilität, wird durch steigende CO₂-Preise grundsätzlich in allen vier Modellen negativ beeinflusst (siehe negative Steigungen in Abbildung 5-14). Das BF-BOF-Verfahren ist durch die höchste spezifische CO₂-Emission das sensitivste Verfahren (steilste Steigung). H-DR dagegen wird durch den hohen Anteil an erneuerbarem Strom am wenigsten von steigenden CO₂-Preisen beeinflusst (flachste Steigung). Ab 2050 ist H-DR, unabhängig vom CO₂-Preis das profitabelste Herstellungsverfahren. Selbst ohne Kosten für CO₂-Emission (CO₂-Preis = € 0) nimmt die Profitabilität von BF-BOF in der zweiten Hälfte des aktuellen Jahrhunderts durch Preissteigerungen für Kohle und Erdgas drastisch ab. Im *moderaten* Szenario 2050 hat der Netzstrom noch einen EF von 180 kg / MWh und verursacht dadurch für EW eine geringere Profitabilität durch höhere CO₂-Kosten im Vergleich zu den hochofenbasierten Verfahren. In 2030 wird H-DR bei CO₂-Preisen von € 45 / t CO₂ noch nicht wettbewerbsfähig sein. Bei CO₂-Preisen von über € 70 / t CO₂ hätte H-DR bereits in 2030 eine ähnliche Profitabilität (wenn auch auf negativem Niveau) wie die konventionelle Stahlherstellung (BF-BOF). Durch geeignete Subventionen könnte so ein fließender Übergang zu innovativen Herstellungsrouten ohne Brückentechnologien gelingen. Andererseits besteht ein Risiko, dass die deutsche Stahlindustrie bei CO₂-Preisen über € 25 / t CO₂⁵⁷ ins Ausland verlagert wird.

Sensitivität Emissionsfaktor Stromnetz

Der EF ist nicht direkt beeinflussbar sondern entwickelt sich aus der Modernisierung des Kraftwerksparks und neuen Herstellungstechnologien kontinuierlich. Für die vorliegenden Modellannahmen wird eine lineare Entwicklung des EF vom Wert des Jah-

⁵⁷ EUROFER 2013, S. 46

res 2010 (550 kg / MWh) auf einen Wert nahe Null, zu dem Zeitpunkt an dem Strom zu 100% aus EE-Quellen erzeugt wird, angenommen. Die Sensitivität der Simulationsergebnisse auf Veränderungen im EF ist in Abbildung 5-15 dargestellt. OPEX und CO₂-Emission sind jeweils gegen die linke vertikale Achse aufgetragen, EBIT gegen die rechte. Ähnlich wie in Abschnitt 5.5.2 zeigt BF-BOF eine umgekehrte Abhängigkeit vom EF als die anderen Verfahren. BF-BOF zeigt einen ansteigenden EBIT bei höherem EF, da hierdurch höhere Emissionsgutschriften für Prozessgase gegengerechnet werden können. Für alle anderen Verfahren, die netto Stromkonsumenten sind, verursacht ein höherer EF höhere indirekte CO₂-Emissionen und damit höhere Betriebskosten und geringere Profitabilität.

EW, mit dem höchsten Netzstrombedarf, ist das sensitivste Verfahren gegenüber dem EF und kann nur profitabel werden, wenn langfristig Strom ausschließlich aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird (EF gegen Null geht). Mit einem EF nahe Null erzielen beide innovativen Verfahren (H-DR und EW) Emissionsreduktionen von über 90% gegenüber 1990. Ab einem EF von 500 kg CO₂ / MWh (EF Wert von 2010 lag bei 550) ist H-DR im moderaten Szenario in 2050 das emissionsärmste Verfahren und macht somit aus rein umwelttechnischer Sicht CCS als Zwischentechnologie überflüssig. Bei einem EF von unter 300 kg CO₂ / MWh kann auch über EW Stahl emissionsärmer als über BF-CCS hergestellt werden.

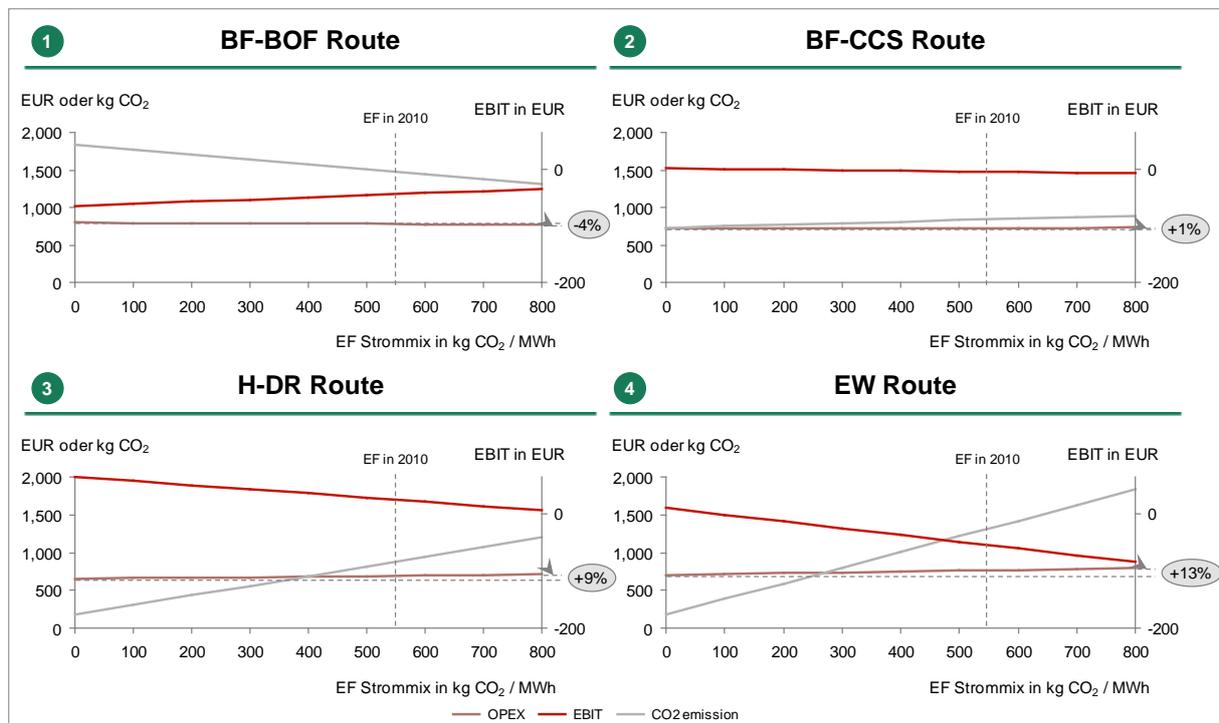


Abbildung 5-15: Sensitivitätsanalyse Emissionsfaktor Stromnetz im ambitionierten Szenario in 2050

Sensitivität Strompreis

Neben dem EF des Strommix, der starke Auswirkungen auf die CO₂-Emission der Verfahren zeigt, ist auch der Einfluss des Industriekunden-Strompreises groß. Gleichzeitig beinhaltet die Annahme über die zukünftige Entwicklung des Strompreises sehr hohe Unsicherheiten, weil dieser sehr komplex von vielen wirtschaftlichen wie politischen Faktoren abhängt. Aus dem Zusammenspiel von Stromgestehungskosten, Netzentgelten, Steuern und umgelegten Netzausbaukosten ergibt sich je Kundensegment ein spezifischer Strompreis (Koepp et al. 2014, S. 47–56). Die Eisen- und Stahlindustrie profitiert derzeit als privilegierte Kundengruppe von Entlastungen bei der EEG Umlage und Netzentgelten und bezieht Netzstrom zu deutlich günstigeren Preisen (-30% gegenüber Privatkundenpreis) (Koepp et al. 2014, S. 54–55). Veränderungen an diesen Ausnahmeregelungen und neue variable Preismechanismen im Rahmen eines Kapazitätsmarktes mit Nachfragesteuerung könnten einen starken Einfluss auf die zukünftigen Strompreise haben. Da der Strompreis gerade auf den zeitlichen Verlauf des Markteintritts neuartiger Stahlherstellungsverfahren einen großen Einfluss hat, wird im Folgenden die Profitabilität der vier Herstellungsverfahren in Abhängigkeit von vier unterschiedlichen Strompreisprojektionen über den Betrachtungszeitraum untersucht. Folgende Strompreisprojektionen wurden als Variationen zum Referenzverlauf aus dem *moderaten* Szenario ausgewählt und ggfs. bis 2070 extrapoliert:

- 1) (Koepp et al. 2014), Szenario A2
- 2) (International Energy Agency (IEA) 2013)
- 3) (Matthes et al. 2013) Szenario EWS
- 4) Eigene Annahme eines konstanten Strompreises

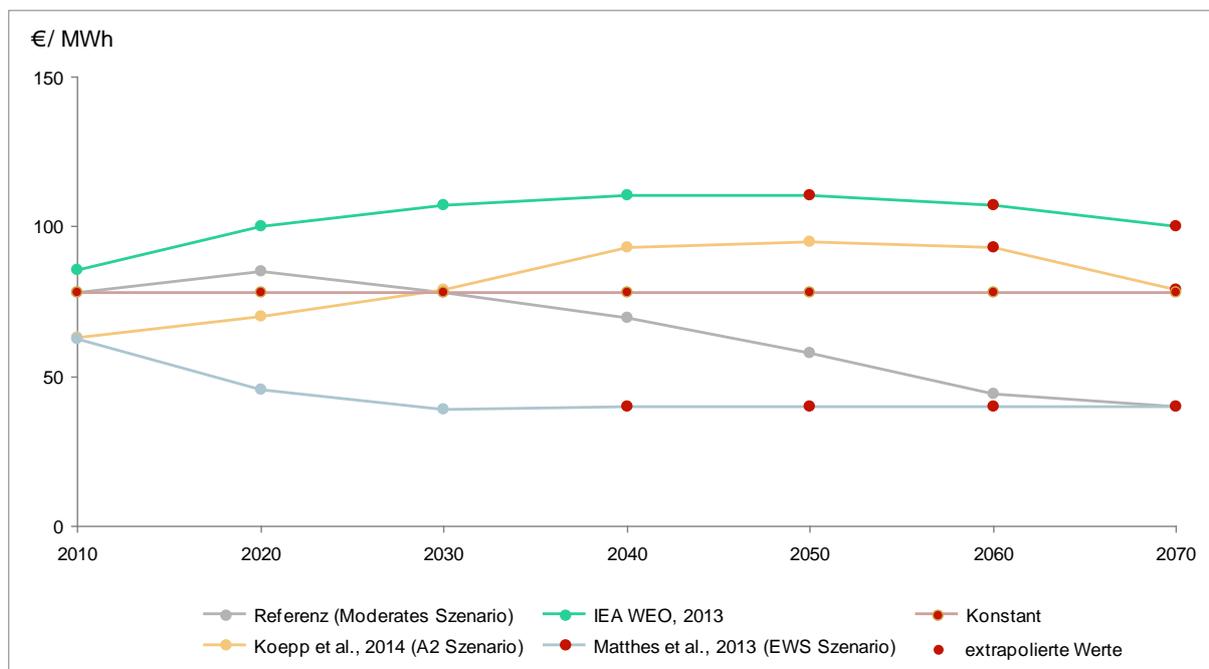


Abbildung 5-16: Varianten der Industriekunden-Strompreisprojektionen für Sensitivitätsanalyse

Schon an der Streuung beim historischen Wert für 2010 ist zu erkennen, wie schwer es ist unterschiedliche Literaturwerte zu vergleichen. Die Veröffentlichungen mitteln

über unterschiedliche Kundengruppen, nehmen andere Netzentgelte an und schätzen die Vergünstigungen der privilegierten Nutzer anders ab. Die Strompreisannahmen, die in den Modellen in Abschnitt 5 verwendet wurden, liegen im Vergleich mit anderen Literaturwerten eher am oberen Ende des Preisspektrums und fallen dann ab 2030 relativ stark ab, um sich dem Preisniveau von (Matthes et al. 2013) anzunähern. Literaturquellen wie (International Energy Agency (IEA) 2013) oder (Koepp et al. 2014) zeigen bis 2050 einen deutlichen Anstieg des Strompreises durch die Umlegung der Netzausbaukosten und Kosten für Netzregulierungskapazitäten. Die Annahmen eines konstanten realen Strompreises von € 78 / MWh bildet eine mittlere Variante im Spektrum der Strompreisvariationen.

In der Profitabilitätsbetrachtung der vier Herstellungsverfahren wirken sich die Strompreisvariationen wie folgt aus (siehe Abbildung 5-17).

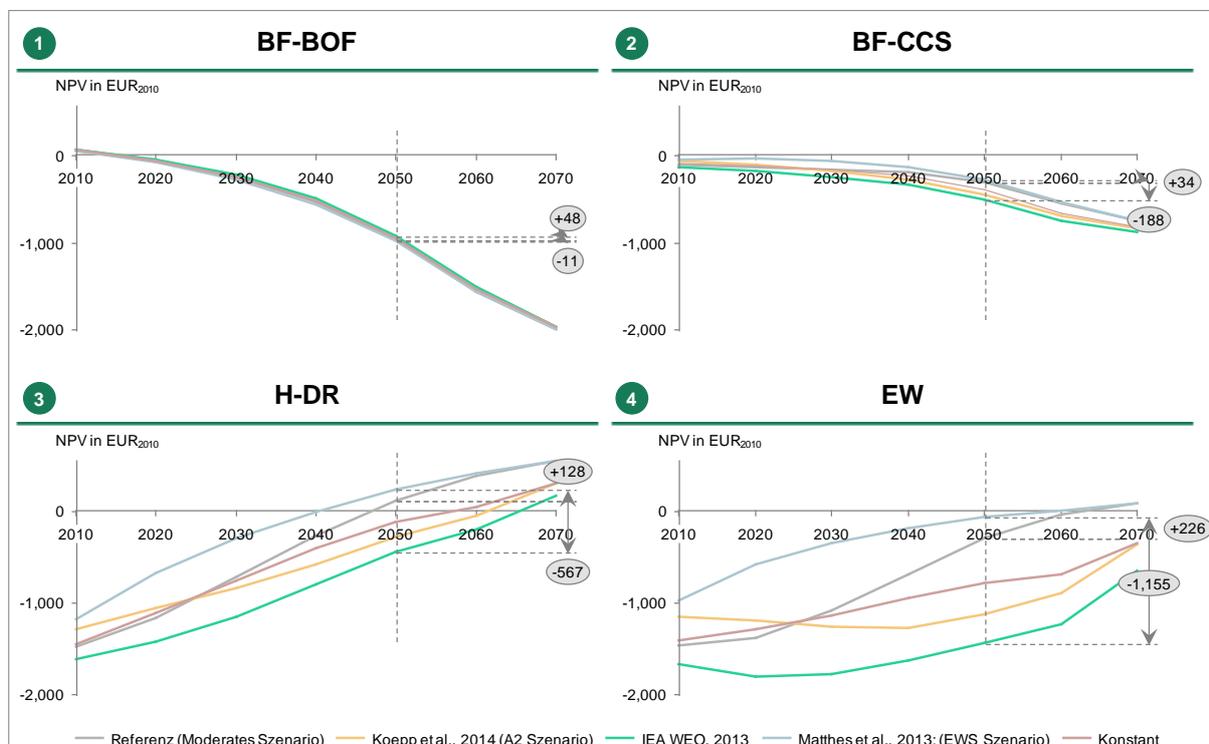


Abbildung 5-17: Sensitivitätsanalyse Industriekunden-Strompreis

Die grundsätzliche Strompreissensitivität lässt sich an der Streuung der NPV Verläufe deutlich erkennen. BF-BOF hat die geringste Strompreissensitivität, EW die höchste. Im Jahr 2050 mit den Ausgangsstrompreisen des *moderaten* Szenarios tragen die Stromkosten nur 0,1% zu den Betriebskosten der BF-BOF Anlage bei. Beim stromintensiven EW-Verfahren machen die Stromkosten dagegen knapp 17% der Betriebskosten aus (BF-CCS: 3% und H-DR: 11%).

In 2050 ist BF-CCS für jede Strompreisvariation profitabler als BF-BOF und würde unabhängig vom Strompreis das konventionelle Verfahren verdrängen. Mit der Variation nach (Matthes et al. 2013) wären in 2050 sowohl das H-DR-Verfahren als auch das EW-Verfahren profitabler als beide hochofenbasierten Verfahren. Das H-DR Verfahren, dass durch den hohen Anteil an lokal verfügbarem Überschussstrom, eine gerin-

gere Abhängigkeit vom Netzstrompreis hat, ist in 2050 für alle Variationen profitabler als BF-CCS und BF-BOF. EW, mit der stärksten Abhängigkeit vom Strompreis wird für alle Variationen außer nach (Matthes et al. 2013) bis 2070 nicht mehr profitabel und würde voraussichtlich nie zum Einsatz kommen. Hier ist zu erkennen, welcher verheerenden Einfluss hohe Strompreisniveaus auf die Umsetzbarkeit innovativer Stahlherstellungsverfahren haben können.

Der zeitliche Verlauf der verschiedenen Strompreisvariationen beeinflusst den Verlauf von Technologiewechseln. Im Referenzverlauf der Strompreise im *moderaten* Szenario aus Abschnitt 5 wurde BF-CCS ab 2030 profitabler als das konventionelle BF-BOF Verfahren. Ab ca. 2040-2050 war dann H-DR das profitabelste Verfahren, um Stahl herzustellen. EW war im gesamten Betrachtungszeitraum etwas weniger profitabel als H-DR aber auch ab spätestens ab 2060 eine wirtschaftlich vernünftige Option (vgl. Abschnitt 5.5.2.).

Verwendet man nun statt der Referenzstrompreise die Strompreisvariante nach (Matthes et al. 2013), die schnell auf ein niedriges Niveau abfällt (siehe Abbildung 5-16), so wäre aus wirtschaftlicher Sicht BF-CCS schon vor 2020 und H-DR ab 2030 – 2040 dem konventionellen Stahlherstellungsverfahren vorzuziehen. Insgesamt wäre mit dem Markteintritt der innovativen Stahlherstellungsverfahren ca. 10 Jahre früher als in der Referenzvariante zu rechnen.

Nutzt man die Strompreisvariation nach (International Energy Agency (IEA) 2013), die durchweg sehr hohe Strompreise annimmt, so wird der mögliche Technologiewechsel durch die hohen Betriebskosten der stromintensiven Verfahren um ca. 10 Jahre gegenüber der Referenzvariante verzögert. H-DR wäre erst ab ca. 2050 profitabler als die hochofenbasierten Verfahren und EW würde bis 2070 nicht profitabel werden.

Die Strompreisvariante nach (Koepp et al. 2014) hat bis 2030 niedrigere Strompreise als die Referenzvariante, danach steigen sie jedoch durch die Umlegung der Energie-wendekosten stärker an und liegen 2050 60% über den Referenzpreisen. Legt man diesen Preisverlauf den Modellrechnungen zu Grunde, so können die innovativen Verfahren kaum von den niedrigen Strompreisen vor 2030 profitieren, da gleichzeitig der hohe Netzstrom EF hohe CO₂-Kosten verursacht. Wenn dann die Strompreise ab 2030 steigen, wird der Markteintritt der innovativen Verfahren sogar noch verzögert, so dass H-DR erst ab 2050 zum Einsatz kommen könnte.

Durch die konstante Strompreisvariante wäre die etablierte Hochofenroute noch bis ca. 2025 das profitabelste Verfahren. Nach einer Zwischenphase mit BF-CCS als attraktivstem Herstellungsverfahren würde dann ab spätestens 2045 das H-DR-Verfahren übernehmen.

Unabhängig von den gewählten Strompreisvarianten werden die hochofenbasierten Routen zwischen 2030 und 2050 ihre prominente Rolle verlieren. Je nachdem wann welche Strompreisniveaus in Zukunft eintreten werden, wird sich der mögliche Markteintritt der innovativen Verfahren verschieben. Der grundsätzliche Trend des Technologiewechsels ist also sehr robust gegenüber Veränderungen in den Strompreisannahmen. Der genaue Zeitverlauf des Markteintritts der innovativen Verfahren

hängt jedoch empfindlich von den Strompreisniveaus zwischen 2030 und 2050 ab. Nur durch die frühe Verfügbarkeit von günstigem und auch CO₂-armem Strom, können die innovativen Stahlherstellungsverfahren früh genug zum Einsatz kommen, um noch nennenswert zum Erreichen der Klimaschutzziele in 2050 beizutragen.

Sensitivität CAPEX

Die Investitionskosten (engl. CAPEX) haben den größten Einfluss auf die NPV Projektionen. Mit CAPEX Annahmen wie in Anhang A ist der früheste Zeitpunkt im *moderaten* Szenario, zu dem H-DR eine attraktivere Investitionsoption darstellt als BF-BOF im Jahr 2040 (siehe Abschnitt 5.5.3). In 2030 ist der NPV noch deutlich niedriger als für die konventionellen Verfahren. Investitionskosten von unter € 465 / t Kapazität (Reduktion von knapp 50%) wären notwendig, damit H-DR schon in 2030 so attraktiv wäre wie BF-BOF und sofort für den Bau von Neuanlagen eingesetzt werden könnte. Im *ambitionierten* Szenario wäre eine CAPEX Reduktion von 10% ausreichend, um H-DR schon in 2030 finanziell attraktiv zu machen und somit den Bedarf einer Übergangstechnologie zu reduzieren. Eine 10%ige CAPEX Reduktion bis 2030 erscheint realistisch wenn weiter in Forschungsprogramme dieser innovativen Technologie investiert wird.

5.6 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die zuvor präsentierten Ergebnisse diskutiert und Schlussfolgerungen hinsichtlich des Zukunftspotenzials der einzelnen Verfahren basierend auf den Simulationsergebnissen gezogen.

Die Stahlherstellung ist ein sehr fortschrittlicher Industrieprozess, der über Jahrhunderte stetig weiterentwickelt wurde und sich an Änderungen in den verfügbaren Rohstoffen, Technologien, Kundenanforderungen und Marktzwängen angepasst hat. Eine starke Integration in die Energiewirtschaft und eine Vielzahl von sensiblen Abhängigkeiten zu weiteren Einflussfaktoren machen eine Zukunftsvorhersage über die Entwicklung der Stahlherstellung hoch anspruchsvoll, besonders zum heutigen Zeitpunkt inmitten einer einzigartigen Transformation der Energielandschaft Deutschlands.

Eine rein umwelttechnische Sicht lässt, basierend auf der vorliegenden Modellierung, einen langfristigen Technologiewandel hin zum energie- und rohstoffeffizientesten EW-Verfahren mit sehr geringer CO₂-Emission vermuten. Dies ist besonders unter der Annahme des *ambitionierten* Zukunftsszenarios mit einem ‚grünen‘, strombasierten Energiesystem der Fall.

Die Einbeziehung von ökonomischen Aspekten, wie Preisentwicklungen für Rohstoffe und Emissionen, verändert die Technologiebewertung. Wirtschaftlichkeit und Emissionsreduktion müssen abgewogen werden. Die vorliegenden Ergebnisse (Abschnitt 5.5.3) verdeutlichen die Wichtigkeit der innovativen Herstellungsverfahren H-DR und EW, die aufgrund ihres unsicheren Markteintrittszeitpunktes in Szenariostudien kaum berücksichtigt wurden. Beide Verfahren weisen, unter der Annahme einer 100% Einpreisung von CO₂-Kosten, ein hohes Potenzial auf wirtschaftlich vertretbare Emis-

sionsreduktionen entsprechend der Klimaschutzziele zu ermöglichen und somit eventuell in den kommenden 50 Jahren die konventionellen Stahlherstellungsverfahren komplett abzulösen. Eine Vorhersage über den genauen Transformationsverlauf wird dabei in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht getroffen.

Die Attraktivität des konventionellen BF-BOF-Verfahrens wird, nach der vorliegenden Bewertung, hauptsächlich durch steigende Kosten für fossile Energieträger und die politische Entscheidung für konsequente Klimaschutzmaßnahmen abnehmen. Im *konservativen* Szenario, in dem ein verlangsamter Verlauf der Energiewende und eine Verlängerung der Klimaziele vorausgesetzt wird, bleiben die kohlebasierten Verfahren (BF-BOF und BF-CCS) bis 2040 – 2050 die attraktivsten Investitionsoptionen für neue Stahlherstellungsanlagen. Auf der anderen Seite, im *ambitionierten* Szenario, dass eine beschleunigte Energiewende und hohe EE-Anteile im Strommix schon in den kommenden Jahrzehnten voraussetzt, überholen die innovativen die konventionellen Verfahren schon 2030 – 2040. Ab 2050 sind dann die konventionellen Verfahren selbst ohne Kosten für CO₂-Emissionen, alleine durch gestiegene Preise für fossile Energieträger und günstige Strompreise nicht mehr wettbewerbsfähig mit den innovativen Verfahren. Die Attraktivität der innovativen, strombasierten Verfahren kann nur zusammen mit einer weitestgehend erneuerbaren Stromerzeugung eintreten. Konventionelle fossile Stromerzeugung würde zusammen mit dem hohen Strombedarf der Verfahren die prozessbedingte Emissionsreduktion durch zusätzliche indirekte CO₂-Emission überkompensieren.

Die entscheidende Frage ist deshalb, wie schnell können innovative Verfahren vor dem Hintergrund anderer Transformationsprozesse industriell zum Einsatz kommen. Um in 2050 einen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz beizutragen, müssten quasi alle primären Stahlherstellungskapazitäten in Deutschland auf innovative Technologien umgestellt haben. Bei typischen Investitionszyklen von 20 Jahren wäre ein Markteintritt der innovativen Verfahren bis 2030 notwendig.

Nach den Simulationsergebnissen im *konservativen* Szenario könnten ab 2020/2030 neue Anlagen mit der CCS Technologie ausgestattet werden, um Stahl im BF-CCS-Verfahren herzustellen. Ab 2040/2050 bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes (2070) ist die attraktivste Option für eine neue Anlage H-DR. Im *moderaten* Szenario würde der Technologiewechsel ca. 5 Jahre früher eintreten. Im *ambitionierten* Szenario wäre BF-CCS schon ab 2020 profitabler als die Hochofenroute, H-DR ab ca. 2030. Durch die niedrigen Strompreise ab 2040 wäre auch EW eine mögliche Alternative, besonders dort wo nicht mit weiteren Synergien der Wasserstoffanwendung zu rechnen ist.

Wie in Abschnitt 5.5.4 erläutert, können ein höherer CO₂-Preis (ab € 70 / t CO₂) oder um 10% reduzierte Investitionskosten schon vor 2030 dazu führen, dass H-DR das profitabelste Verfahren würde und so keine Übergangstechnologien notwendig wären.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das 80% Reduktionsziel bis 2050 für die Eisen- und Stahlindustrie nur sehr schwer erreicht werden kann. Neben vielfältigen Maßnahmen in den Bereichen Energieeffizienz, Materialeffizienz und Nachfra-

gereduktion (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014a, S. 1128–1132) könnte ein früher technologischer Durchbruch hin zu emissionsarmen Herstellungsverfahren (z.B. H-DR und EW) einen wichtigen Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzziele darstellen. Kritisch ist jedoch der zeitliche Ablauf der Transformation durch die langen Vorlaufzeiten von Anlageninvestitionen und Restlaufzeiten bestehender Anlagen.

Einschränkungen

Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die vorliegenden ‚bottom-up‘ Modelle nicht auf Realdaten basieren, also nur beispielhafte Stahlwerke simulieren. Besonders für die innovativen Verfahren existieren nur wenige Erfahrungen im industriellen Maßstab, so dass Näherungen nach bestem Wissen verwendet wurden. Typisch für ‚bottom-up‘ Modelle werden auch in der vorliegenden Arbeit keine wechselseitigen Abhängigkeiten mit dem internationalen Stahl- oder Energiemarkt berücksichtigt. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die vier Verfahren durch die unterschiedlichen Prozessschritte und Technologien nicht ideal vergleichbar sind.

Zukunftsvorhersagen über derart lange Zeiträume beinhalten immer ein hohes Maß an Unsicherheiten, die in der vorliegenden Arbeit über drei Szenarien adressiert werden. Wie schon in (EUROFER 2013, S. 52) diskutiert, ist eine verlässliche Vorhersage, welche Technologie sich mit der höchsten Wahrscheinlichkeit durchsetzen wird nicht möglich. Gerade die Ergebnisse aus der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums sind eher als grobe Trends zu verstehen, obwohl die quantitativen Ergebnisse eine höhere Genauigkeit suggerieren.

Quantitative Aussagen über die Gesamtheit der Stahlindustrie in Deutschland oder am Standort NRW können mit den Anlagenmodellen nicht ohne weiteres getroffen werden. Weder die Veränderung des Verfahrensmixes in Deutschland, noch der Verlauf einer technologischen Transformation kann mit den Modellen abgebildet werden. Die Modelle von Beispielanlagen erlauben nur einen normierten Verfahrensvergleich, der Rückschlüsse über Stärken und Schwächen der jeweiligen Technologien zulässt.

Zur Reduktion der Komplexität wurden manche externe Faktoren, wie Pfadabhängigkeiten durch bestehende Infrastrukturen, nationaler und internationaler Wettbewerb, Sicherheitsrisiken, ‚Carbon Leakage‘ und die Unsicherheiten in der technologischen Weiterentwicklung vernachlässigt. Da bedeutende technologische Entscheidungsprozesse, wie in der Stahlindustrie, weitreichende gesellschaftliche Auswirkungen haben können, muss eine ganzheitliche Bewertung neben technischen und ökonomischen Parametern eine Vielzahl von weiteren qualitativen Kriterien mit berücksichtigen, so wie im folgenden Kapitel dargestellt.

6 Multi-kriterielle Analyse ausgewählter Stahlherstellungsverfahren

Nachdem im vorigen Abschnitt die ersten beiden Bewertungsschritte (techno-ökonomische Modelle und Szenarioanalysen) durchgeführt wurden, um die vier zukünftigen Herstellungsverfahren zu bewerten, wird diese Bewertung im Folgenden durch weitere Kriterien aus den Kategorien Technologie, Gesellschaft, Ökonomie, Sicherheit und Ökologie erweitert. Gerade bei hoch komplexen Technologieentscheidungen mit weitreichendem Einfluss für Industrie und Gesellschaft greifen rein technische oder wirtschaftliche Bewertungen oftmals zu kurz. Mithilfe einer multi-kriteriellen Analyse (MCA), die im Folgenden methodisch hergeleitet wird, können neben quantitativen Parametern auch weitere qualitative Parameter zu komplexen und multidimensionalen Fragestellungen in eine Gesamtbewertung integriert werden (Krüger 2013, S. 2).

6.1 Methodische Herleitung

6.1.1 Methodenanforderung

Wie schon in der Diskussion des Abschnitt 5 identifiziert, greift eine rein quantitative techno-ökonomische Bewertung zu kurz, um weitere Zusammenhänge, Pfadabhängigkeiten und Synergieeffekte der möglichen Stahlherstellungsverfahren mit anderen Branchen zu berücksichtigen. Um wie gewünscht eine ganzheitliche Bewertung zu erzielen, soll in diesem dritten Bewertungsschritt eine Methode verwendet werden, die folgenden Anforderungen genügt:

- Komplexe und multidimensionale Fragestellungen sollen behandelt werden
- Realitätsnahe Problemstellungen mit unvollständiger und schwieriger Datenlage sollen bewertbar sein
- Multidimensionalität der Problemstellung soll beibehalten werden
- Der Bewertungsprozess soll transparent und strukturiert sein
- Individuelle Perspektiven unterschiedlicher Akteure sollen abgebildet werden

6.1.2 Methodenbeschreibung

Unsere Politik steht vor dem Dilemma, dass die heutige Wirklichkeit zu komplex ist, um alle Aspekte einer Entscheidung abzusehen und mit zu berücksichtigen. Vereinfachende Entscheidungsmethoden, die eine bearbeitbare Komplexität repräsentieren, aber gleichzeitig viele Aspekte vereinfachen, werden häufig als Unterstützung herangezogen. Die multi-kriterielle Analyse, eine Methode aus der Planungsforschung für die Unterstützung hochkomplexer Entscheidungsprozesse (Merten et al. 2013, S. 49), (Zopounidis und Pardalos 2010, S. vii–viii), bietet sich für obige Anforderungen besonders an. Sie ermöglicht eine transparente und strukturierte Bewertung bei gleichzeitiger Beibehaltung der Multidimensionalität und Individualität der Problemstellung (Zeiss und Valentin 2011, S. 76). Gerade im Zusammenhang mit der Entwicklung Erneuerbarer Energien, stellt die MCA nach (Abu Taha und Daim 2013, S. 17–18) die

beliebteste Methode dar, um die große Anzahl von Bewertungsfacetten und Systemzusammenhängen mit zu berücksichtigen.

Die MCA besteht üblicherweise aus vier Schritten. Im ersten Schritt werden mögliche Lösungsalternativen erarbeitet. Dann wird ein Kriterienkatalog nach bestimmten Qualitätsstandards entwickelt, um damit im dritten Schritt die Verfahren zu bewerten. Im vierten und letzten Schritt werden die Einzelbewertungen mit festgelegten Gewichtungsfaktoren zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst.

In der vorliegenden MCA sind die, in Abschnitt 3.5 ausgewählten Stahlherstellungsverfahren am Standort NRW die zu bewertenden Alternativen. Im Folgenden soll nun die Entwicklung des Kriterienkatalogs beschrieben werden, auf Basis dessen anschließend die Bewertung vorgenommen wird.

6.1.3 Entwicklung Kriterienkatalog

Um eine aussagekräftige MCA durchzuführen, muss eine geeignete Auswahl an Kriterien getroffen werden. Die Kriterienanzahl sollte aus pragmatischen Gründen auf das notwendige reduziert werden, sollte aber trotzdem die Fragestellung in allen Aspekten abbilden können. Ein Katalog aus 10-20 Kriterien hat sich in der Praxis bewährt (Kühnapfel 2014, S. 7). Die Kriterien sollen dabei folgende Qualitätsanforderungen erfüllen (Krüger 2013, S. 3), (Kühnapfel 2014, S. 7–9), (Wang et al. 2009, S. 2269):

- Die Kriterien müssen die für die Beurteilung der Verfahren relevanten Charakteristika erfassen
- Die untersuchten Parameter müssen repräsentativ für das jeweilige Kriterium sein
- Jedes Kriterium muss relevant für die Bewertung der Verfahren sein
- Redundanzen oder inhaltliche Überschneidungen der Kriterien müssen vermieden werden
- Die Kriterien müssen einer gegenseitig ausschließenden und insgesamt erschöpfenden Struktur entsprechen (MECE)⁵⁸

In der vorliegenden Arbeit werden in Anlehnung an die drei Säulen der Nachhaltigkeit die Kategorien *Gesellschaft & Politik*, *Ökonomie* und *Ökologie* verwendet und durch die beiden Kategorien *Technologie* und *Sicherheit & Verletzlichkeit* ergänzt. Durch die Erweiterung der Nachhaltigkeitskategorien können weitere entscheidungsrelevante Kriterien in die Bewertung integriert werden, wie z.B. *Systemkompatibilität* oder *Sicherheitsrisiken*.

Anschließend werden dann zwei bis drei Kriterien pro Kategorie definiert, die die Kategorie einerseits gut repräsentieren und andererseits im Hinblick auf die zu beurteilenden Verfahren anwendbar sind. Hierbei werden stets die oben genannten Qualitätsstandards berücksichtigt und auch zwischen den Kategorien auf eine überschneidungsfreie Kriterienauswahl geachtet. Einige Kriterien, die sich noch nicht konkret bewerten lassen, werden weiter in Subkriterien zerlegt, denen dann konkrete Bewer-

⁵⁸ MECE = Mutually Exclusive and Collectively Exhaustive

tungsparameter zugeordnet werden können. So wird beispielsweise das Kriterium *Verletzlichkeit* noch aufgegliedert in die Subkriterien *Abhängigkeit von Rohstoffen* und *Flexibilität der Produktion*. Die Parameter, die hier für die Bewertung herangezogen werden sind die *Rohstoffintensität* bzw. die *Abschaltverzögerung* und *Skalierbarkeit* der Produktion.

Tabelle 6-1 zeigt die Gesamtübersicht der 12 Kriterien aus den fünf Kategorien mit ihren jeweiligen Subkriterien. Im Folgenden wird nun die Bewertung der vier Herstellungsverfahren hinsichtlich der einzelnen Kriterien vorgestellt und begründet.

Tabelle 6-1: Kriterienkatalog für multi-kriterielle Analyse (Details siehe Abschnitt 6.2)

Kategorie	Kriterium	Kategorie	Kriterium
Technologie		Ökonomie	
1	Systemkompatibilität	6	Profitabilität
1.1	Technologische Marktreife	7	Strategischer Vorteil
1.2	Verfügbarkeit Reduktionsmittel	7.1	Vorteil durch Pionierstrategie
1.3	Synergien / Konflikte mit anderen Bereichen	7.2	Exportpotenzial des Stahls
2	Umsetzungsintensität	Sicherheit und Verletzlichkeit	
3	Innovationspotenzial	8	Verletzlichkeit
Gesellschaft & Politik		8.1	Abhängigkeit von Rohstoffen
4	Beitrag zur regionalen Wertschöpfung	8.2	Flexibilität der Produktion
4.1	Auswirkung auf lokale Arbeitsplätze	9	Sicherheitsrisiken
4.2	Auswirkung auf regionale Wertschöpfungsschritte	9.1	Brand- und Explosionsgefahr
4.3	Potenzial zur Erhaltung von Industriestrukturen	9.2	Gesundheitsgefahr
5	Gesellschaftliche Akzeptanz	9.3	Risiko im Fehlerfall
		Ökologie	
		10	THG-Emission
		11	Sonstige Umweltbelastung
		12	Energieeffizienz

6.2 Ganzheitliche Bewertung der ausgewählten Herstellungsverfahren

Die Bewertung der Herstellungsverfahren entlang der Kriterien erfolgt vom Autor, basierend auf Literaturrecherchen, eigenen Simulationsergebnissen (aus Abschnitt 5.5), Experteneinschätzung und zum Teil eigenen Annahmen. Für Kriterien, die von einem zeitabhängigen Parameter abhängen, wird die Ausprägung zum Zeitpunkt 2050 im *moderaten* Szenario verwendet, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Da viele der Kriterien nur qualitativ bewertet werden, oder aber die quantitativen Bewertungen hohe Unsicherheiten aufweisen, wird auf eine detaillierte absolute Skala verzichtet. Stattdessen wird eine Rangskala von eins bis vier, entsprechend der vier zu bewertenden Verfahren genutzt. Das jeweilige Verfahren mit dem Rang 1, also der höchsten Bewertung, erhält 4 Punkte, Rang 2 erhält 3 Punkte, Rang 3 erhält 2 Punkte und der letzte Rang 4 erhält lediglich 1 Punkt. Liegen zwei Verfahren auf dem gleichen Rang, so erhalten beide den jeweils niedrigeren Rang und der höhere Rang wird ausgelassen. Durch diese einfache Rangskala ist die Bewertung robust gegenüber

kleineren Schwankungen und Unsicherheiten in der Bewertungsgrundlage. Anders als auf einer 10er oder 100er Intervallskala kann keine Spreizung der Bewertung vorgenommen werden, wodurch Bewertungsausreißer einen geringeren Einfluss haben. Bei der verwendeten Rangskala kann die maximale Punktedifferenz drei Punkte betragen und so leicht durch andere Kriterien wieder ausgeglichen werden. Die Bewertung ist also gegenüber Fehleinschätzungen in einzelnen Kriterien robuster.

Im Folgenden werden nun die Kriterien aus den fünf Kategorien im Detail beschrieben und die Bewertung der Verfahren entlang dieser Kategorien erläutert (Bewertungsübersicht siehe Tab-A 9).

6.2.1 Kategorie Technologie

Systemkompatibilität (1)

Das Kriterium *Systemkompatibilität* aus der Kategorie *Technologie* beinhaltet eine Vielzahl von Aspekten, die erfassen, wie gut ein bestimmtes Verfahren in das Gesamtsystem passt. Dabei müssen der technologische Reifeprozess genauso wie die Verfügbarkeit bestimmter notwendiger Rohstoffe als auch Konflikte und Synergien mit anderen Bereichen oder Branchen berücksichtigt werden.

Technologische Marktreife (1.1)

Zu welchem Zeitpunkt erreichen die vier Verfahren technische Marktreife im industriellen Maßstab? Der Parameter, der dieses Kriterium beschreibt, ist der Zeitpunkt der technischen Marktreife. Da im Hinblick auf die Erfüllung von Klimazielen die Zeit drängt, sind die Verfahren höher zu bewerten, die früher im industriellen Maßstab einsetzbar wären. Der geschätzte Zeitpunkt zu dem ein bestimmtes Verfahren marktreif ist, wird der Fachliteratur (EUROFER 2013, S. 42), (International Energy Agency (IEA) 2012b, S. 257), (Nuber et al. 2006) entnommen und in Gesprächen mit Experten einem Realitätscheck unterzogen (Kesseler 2014).

Das etablierte Verfahren BF-BOF erhält somit den ersten Rang und **4 Punkte** da es schon seit langem marktreif ist. Die Nachrüstung durch TGR und CCS Technologie wird um 2020 marktreif sein (Moya und Pardo 2013, S. 76) und erhält deshalb den dritten Rang und **2 Punkte**. H-DR ist technisch schon marktreif, wird aber weltweit erst in einer Anlage betrieben (Nuber et al. 2006) und wird vor einer flächendeckenden Anwendung sicherlich noch einen weiteren Reifeprozess durchlaufen (Rang 2, **3 Punkte**). Die Eisenerz Elektrolyse ist derzeit nur im Labormaßstab erprobt und die Erreichung der Marktreife ist nicht sicher, wird jedoch frühestens ab 2040 erwartet (Moya und Pardo 2013, S. 76) (Rang 4, **1 Punkt**).

Verfügbarkeit Reduktionsmittel (1.2)

Ist die Verfügbarkeit des Reduktionsmittels jederzeit (jährlich u. stündlich über den gesamten Betrachtungszeitraum) gesichert? Die kurzfristige Verfügbarkeit wird hier als die kurzfristige Reaktion auf Schwankungen in der Nachfrage im Stundenbereich

verstanden. Mit langfristigkeit ist die Verfügbarkeit des Reduktionsmittels auch auf jährlicher Basis über den gesamten Betrachtungszeitraum bis 2070 gemeint, je nachdem wie sich die Nachfragesituation entwickelt.

Für das konventionelle BF-BOF-Verfahren mit etablierten Lieferantenbeziehungen und langfristigen Verträgen kann die Kokskohle Verfügbarkeit kurz- und langfristig als sicher eingestuft werden. Laut der International Energy Agency (IEA) reichen, bei heutigen Produktionsniveaus, die Kohlevorräte noch für ca. 150 Jahre (International Energy Agency (IEA) 2010b, S. 207). Das einzige Risiko in der Verfügbarkeit des Reduktionsmittels besteht darin, dass Kohle nicht in ausreichend hoher Qualität (z.B. zu hoher Schwefelanteil) oder durch die Importabhängigkeit nur unter zu hohen Preisen verfügbar ist. BF-BOF liegt damit auf Rang 2 (**3 Punkte**).

Für das BF-CCS-Verfahren ist die Situation sehr ähnlich. Der einzige Unterschied ist die leicht reduzierte Abhängigkeit von Kokskohle, durch den höheren Anteil an direkt eingespritztem Kohlestaub (PCI), und den durch die Kuppelgas-Rezirkulierung (TGR) reduzierten Bedarf an Brennstoffen (Rang 1, **4 Punkte**).

Große Mengen Wasserstoff sind für das H-DR-Verfahren notwendig. Bei einer Jahreskapazität von 2 Mt Rohstahl wäre ein Elektrolyseur mit einer Leistung von 1000 MW_{el} notwendig, der im Jahr knapp 17.000 TJ H₂ produziert. Wasserstoff-Elektrolyseure dieser Größenordnung sind derzeit noch nicht verfügbar (Smolinka et al. 2011, S. 10). Zum jetzigen Zeitpunkt kann nicht mit Sicherheit prognostiziert werden, ob die kurz- oder langfristige Wasserstoffverfügbarkeit in 2050 gegeben sein wird (Rang 4, **1 Punkt**). Durch eine branchenübergreifende Anwendung von Wasserstofftechnologien wird die Wahrscheinlichkeit, die technologische Weiterentwicklung rechtzeitig zu erzielen, verbessert.

Der Strombedarf von 9,3 GJ / t Rohstahl für das EW-Verfahren mit dem Eisenerzelektrolyseur und anschließendem Lichtbogenofen ist aktuell schon verfügbar. Allerdings würde die Umstellung auf dieses Verfahren den Strombedarf deutlich erhöhen und beim derzeitigen Strommix zu hohen CO₂-Emissionen führen. Eine geeignete Verfügbarkeit des Reduktionsmittels ist erst bei einem hohen Anteil erneuerbar erzeugter Elektrizität gegeben (Rang 3, **2 Punkte**).

Synergien / Konflikte mit anderen Bereichen (1.3)

Nach (Allwood und Cullen 2012, S. 145) setzt sich nicht in jedem Fall die beste Technologie durch. Der Erfolg einer Technologie hängt immer vom Kontext ab. Der Kontext selber wird wiederum durch die Technologie beeinflusst. Die Abhängigkeit der Verfahren mit dem Kontext, also Entwicklungen in anderen Bereichen außerhalb der Stahlindustrie, spielt eine wichtige Rolle. In diesem Kriterium soll also der Frage nachgegangen werden, ob es Synergien oder Konflikte mit Entwicklungen in anderen Bereichen oder Branchen gibt.

Zur Beurteilung wird je Verfahren nach möglichen Konflikten und Synergien gesucht. Die Rangfolge der Konflikte wird dann mit der Rangfolge basierend auf den Synergie addiert und so eine Gesamtrangfolge errechnet. Konflikte durch Emission von Treib-

hausgasen oder weiteren Umweltbelastungen werden hier nicht berücksichtigt, da sie in der Kategorie *Ökologie* genauer betrachtet werden.

BF-BOF zeigt als etabliertes Verfahren keine signifikanten Konflikte. Standortkonflikte treten bei dem bereits bestehenden Verfahren nicht mehr auf, da die Produktion auch in Zukunft innerhalb der bestehenden Anlagengrenzen erfolgen könnte. Nutzungskonkurrenzen sind ebenso wenig festzustellen. Lediglich die Markteinführung innovativer Stahlherstellungstechnologien wird eventuell verlangsamt, solange günstiger Stahl über das konventionelle Verfahren hergestellt werden kann (Rang 2, **3 Punkte**). Bei BF-CCS ergeben sich mögliche Konflikte durch den CO₂-Transport und die unterirdische Lagerung. Die möglichen Lagerstätten (z.B. alte Salzkavernen) könnten in Zukunft auch als Energiespeicher (Druckluft, Methan, Wasserstoff) gebraucht werden, so dass es zu potentiellen Nutzungskonflikten kommen könnte. Außerdem sind hohe Infrastrukturkosten für die CCS Technologie notwendig, die ggfs. für Infrastrukturinvestitionen in eine Wasserstoffwirtschaft fehlen könnten (Rang 4, **1 Punkt**). Das H-DR-Verfahren weist keine erkennbaren Konflikte mit anderen Bereichen auf (Rang 1, **4 Punkte**). EW führt durch den direkten Verbrauch von Netzstrom zu einer erhöhten Netzbelastung. Der Bedarf an Netzausbauten und Netzausgleichskapazität wird erhöht (Rang 3, **2 Punkte**).

Betrachtet man nun gesondert nur die Synergien, die durch die Anwendung der jeweiligen Verfahren entstehen, ergibt sich ein anderes Bild. BF-BOF als etablierte Herstellungsrouten ist mit verschiedenen anderen Branchen stark integriert. So werden Abfallprodukte wie Schlacke in der Zementindustrie oder Prozessgase in der Stromerzeugung genutzt. Dadurch wird nicht nur die Energie- und Emissionseffizienz in der Stahlherstellung verbessert, sondern es werden wichtige Wertschöpfungsschritte über die Branchengrenzen hinaus unterstützt (Rang 2, **3 Punkte**). Bei BF-CCS wird die Menge an Prozessgasen deutlich reduziert. Die Hochofenschlacke kann für die Zementproduktion nicht mehr verwendet werden, so dass die Hauptsynergien stark reduziert sind (Rang 3, **2 Punkte**). H-DR zeigt einige vielversprechende Synergiepotenziale, hauptsächlich mit allen H₂-affinen Branchen (siehe Abbildung 4-9) die während des Wasserstoff-Technologiescreenings identifiziert wurden. So könnte die Wasserstoffherstellung aus Überschussstrom und Speicherung für die H-DR-Anlage Branchen mit Wasserstoff Anwendungsfunktionen mit H₂ versorgen (siehe Abschnitt 4.2). Dies werden in 2050 vor allem der Energiesektor (Speicherung von Energie und Erzeugung von Elektrizität und Wärme in Brennstoffzellen), der Transportsektor (Wasserstofftankstellen) und viele produzierende Industrien, die H₂ als Brennstoff für die eigene dezentrale Energieversorgung nutzen, sein. Für das Stromnetz mit einem hohen Anteil volatiler Energiequellen wirkt die Wasserstoffherzeugung und -speicherung netzstabilisierend und spielt somit im Nachfragemanagement des ‚Smart-Grids‘ eine wichtige Rolle. Am Standort NRW, an dem bereits eine Wasserstoffpipeline⁵⁹ der Evonik Degussa GmbH besteht und Wasserstoffüberschüsse aus der ansässigen Chemieindustrie anderen Anwendern zur Verfügung stehen, lägen die Synergieeffekte auch ohne hohe Infrastrukturinvestitionen auf der Hand (*Smolinka et al. 2011, S. 26*)

⁵⁹ Klaus et al. 2010, S. 44

(Rang 1, **4 Punkte**). Das EW-Verfahren, das nur als Stromverbraucher agiert, zeigt keine nennenswerten Synergien mit anderen Bereichen (Rang 4, **1 Punkt**).

Insgesamt ergibt sich also Rang 1 (**4 Punkte**) für H-DR, Rang 2 (**3 Punkte**) für BF-BOF und punktgleich für BF-CCS und EW Rang 4 (**1 Punkt**).

Umsetzungsintensität (2)

Wie stark sind die Veränderungen durch die Verfahren in der Eisen- und Stahlindustrie? Der repräsentative Parameter ist die Intensität von möglichen Veränderungen durch die Umsetzung der Verfahren. Nach (Fischedick 2008) ist Umsetzungsintensität die Tiefe und Breite der Intervention in das bestehende System (z.B. in Infrastruktur, Wissensanforderungen, Wettbewerb, Wertschöpfungskette, etc.).

BF-BOF ist das bestehende Herstellungsverfahren am Standort und setzt somit keine Veränderungen voraus. Die Eisen- und Stahlindustrie ist also keinem Umbruch ausgesetzt (Rang 1, **4 Punkte**). Für BF-CCS ergäben sich durch die zusätzliche CCS Technologie kleinere Änderungen am Hochofen durch Rezirkulierung und Kohlendioxid-Abscheidung. Andere vorgelagerte Wertschöpfungsschritte wären nicht betroffen (Rang 2, **3 Punkte**). Für die H-DR und EW-Verfahren träten starke Veränderungen durch ein neues Reduktionsmittel und somit ein neues Herstellungsverfahren auf. Am Standort NRW mit fast ausschließlich hochofenbasierter Primärstahlerzeugung, wäre die Breite der Umsetzung beträchtlich. Durch die neuen Technologien der Wasserstoffherzeugung und der Eisenerzelektrolyse fände eine Umstellung der gesamten Wertschöpfungskette, von Lieferantenbeziehungen bis zu Abnehmern statt. Neues Fachwissen wäre erforderlich und die Wettbewerbsanforderungen würden sich ändern. Die Intensität der Veränderung für die Eisen- und Stahlindustrie ist bei beiden Verfahren sehr hoch (beide Rang 4, **1 Punkt**).

Innovationspotenzial (3)

Wie hoch ist das Potenzial, dass sich die Verfahren innerhalb des Betrachtungszeitraums weiterentwickeln und verbessern (basierend auf Merten et al. 2013, S. 62–65)? Die Parameter im Fokus sind die Entwicklungsmöglichkeiten und die Wahrscheinlichkeiten, dass die Entwicklung umgesetzt wird.

BF-BOF ist bereits eine sehr ausgereifte Technologie, die nur noch geringes Verbesserungspotenzial hat, da sie schon nahe am theoretischen Optimum betrieben wird (EUROFER 2013), (Kirschen et al. 2011, S. 6148) (Rang 4, **1 Punkt**). BF-CCS hat nur im Bereich der Kohlendioxid-Abscheidung und –Speicherung einige Entwicklungsmöglichkeiten. Da die Kohleinfrastruktur nicht nur durch die Stahlindustrie genutzt, sondern zentral über Verbände oder die Öffentliche Hand betrieben werden würde, ist der direkte Kostendruck nicht so hoch, als dass jede mögliche technologische Erneuerung auch gleich umgesetzt werden müsste. BF-CCS erhält somit Rang 3 mit **2 Punkten**. H-DR als neue Technologie im Entwicklungsstadium hat sicherlich noch sehr viele Entwicklungsmöglichkeiten. Einige technologische Verbesserungen können aus der

bestehenden Direktreduktionstechnologie mit Erdgas übernommen werden. Gerade im Bereich der Wasserstoffherstellung, Speicherung und Anwendung im Reduktionsofen ist das Innovationspotenzial noch sehr groß. Durch den direkten internationalen Wettbewerb der Stahlindustrie ist damit zu rechnen, dass alle technologischen Neuerungen, die über die Laufzeit wirtschaftlich profitabel sind (z.B. Effizienzsteigerung, Kostensenkung) auch sehr frühzeitig umgesetzt werden (Rang 2, **3 Punkte**). EW als jüngste Technologie hat noch den weitesten Weg zur Marktreife vor sich, hat dafür aber auch den größten Entwicklungsspielraum. Gerade bei der theoretisch effizientesten Reduktionsform über die Elektrolyse werden noch große technologische Fortschritte erwartet (Nitsch et al. 2012, S. 9–10). Die Umsetzung von Innovationen ist auch hier durch den Wettbewerbsdruck sehr wahrscheinlich (Rang 1, **4 Punkte**).

6.2.2 Kategorie Gesellschaft & Politik

Beitrag zur regionalen Wertschöpfung (4)

Dieses Kriterium aus der Kategorie *Gesellschaft & Politik* lenkte den Blick auf das brisante Thema der Wechselwirkungen mit dem Produktionsstandort. Durch große Industriezweige und eine hohe regionale Wertschöpfung im Ruhrgebiet, wurde Arbeit für Millionen von Menschen geschaffen. Bei der Untersuchung von Stahlherstellungsverfahren, wie in der vorliegenden Arbeit, ist die Frage naheliegend, wo in Zukunft die Standorte und Hauptwertschöpfungsschritte dieser Industrie liegen. Führt die Umstellung auf eine neue Technologie unweigerlich zur Verlagerung der Produktionsstandorte, oder werden sogar bestehende Standorte mithilfe neuer Technologien zukunftstauglicher? Im Folgenden wird das Kriterium in drei Subkriterien zerlegt und im Detail bewertet.

Auswirkung auf lokale Arbeitsplätze (4.1)

Werden Arbeitsplätze am Produktionsstandort erhalten, abgebaut oder sogar zusätzliche geschaffen, beim Betrieb der jeweiligen Verfahren (basierend auf Merten et al. 2013)? Der Parameter, der hier untersucht wird, ist der spezifische Personalbedarf (in Mannstunden pro Tonne Rohstahl) je Verfahren am Produktionsstandort.

Beim Betrieb von BF-BOF bleibt die bestehende Stahlproduktion mit einer Personalintensität von ca. 0,5 Mannstunden / t Rohstahl (ECORYS SCS Group 2008, S. 62) für ein modernes Stahlwerk bestehen. D.h. bei gleichbleibender Stahlnachfrage bleiben die bestehenden Arbeitsplätze erhalten. Gegebenenfalls werden sie durch inkrementelle Modernisierungsmaßnahmen geringfügig reduziert. (Rang 4, **1 Punkt**). BF-CCS hat durch den zusätzlichen Arbeitsschritt der Kohlendioxid-Abscheidung einen erhöhten Personalbedarf (Rang 3, **2 Punkte**). Nach Experteneinschätzung wird der Personalbedarf für die beiden innovativen Herstellungsverfahren aufgrund der kleineren Anlagengrößen ca. 40% höher liegen (Kessler 2014). Bei H-DR käme durch die Wasserstoffherstellung und -lagerung innerhalb der Systemgrenzen noch zusätzlicher Personalbedarf hinzu (Rang 1, **4 Punkte**). EW erhält somit Rang 2 und **3 Punkte**.

Auswirkung auf regionale Wertschöpfungsschritte (4.2)

Werden durch die Umsetzung der Verfahren neue Wertschöpfungsschritte in die Region des Produktionsstandortes verlagert oder aus der Region verdrängt? Untersucht werden also die Veränderungen der Wertschöpfungsschritte der jeweiligen Verfahren.

Für das bestehende BF-BOF-Verfahren bleiben die etablierten Wertschöpfungsschritte (siehe Abschnitt 5.1) bestehen. Neue Wertschöpfungsschritte kommen jedoch nicht hinzu (Rang 3, **2 Punkt**). Für die Erweiterung durch CCS beim BF-CCS-Verfahren kommt die CO₂-Speicherung als Wertschöpfungsschritt neu hinzu. Alle bestehenden Wertschöpfungsschritte bleiben erhalten (Rang 2, **3 Punkte**). H-DR eliminiert den Wertschöpfungsschritt der Kokerei, bringt jedoch die Wertschöpfungsschritte Wasserstoffherstellung und –speicherung mit sich (Rang 1, **4 Punkte**). EW macht ebenfalls die Kokerei überflüssig, bringt aber keinen zusätzlichen Wertschöpfungsschritt mit sich und trägt so am wenigsten zur Schaffung neuer regionaler Wertschöpfungsschritte bei (Rang 4, **1 Punkt**).

Einfluss auf Industriestrukturen am Standort (4.3)

Wie stark beeinflussen die Verfahren den Erhalt bestehender oder die Schaffung neuer Industriestrukturen am Standort innerhalb des Betrachtungszeitraums (basierend auf Zeiss und Valentin 2011, S. 95)? Untersucht werden Zusammenhänge zwischen den Verfahren und anderen Industriezweigen am Produktionsstandort. So kann der Fortbestand bestimmter Stahlherstellungsverfahren den Erhalt bestimmter eng verbundener Industrien in der näheren Umgebung begünstigen. Neue Herstellungsverfahren können dagegen die Ansiedlung neuer Industriestruktur als Zulieferer, Abnehmer oder Dienstleister bewirken.

Das bestehende BF-BOF-Verfahren ist mit einer Vielzahl von Industriestrukturen am Standort NRW eng verbunden. Die Zulieferer, Logistiker und Abnehmer haben sich über die vergangenen 100 Jahre in der Umgebung der Stahlindustrie angesiedelt und insgesamt für die Region eine starke Industriestruktur geschaffen. Gerade die Bereiche Bauindustrie, Zementindustrie und Automobilindustrie profitieren von der räumlichen Nähe zur Stahlindustrie. Bei der Beibehaltung dieses Herstellungsverfahrens wird zunächst der Erhalt der bestehenden Industriestruktur gefördert. Wenn BF-BOF ab ca. 2050 jedoch unprofitabel würde, könnte dies zu einer starken Schwächung der weiteren Industriestruktur führen. Neue Industriestrukturen werden unter dem BF-BOF-Verfahren nicht geschaffen (Rang 4, **1 Punkt**). Die Situation gestaltet sich naturgemäß für BF-CCS nahezu identisch. Da die Stahlherstellung auch über 2050 hinaus profitabler bleibt, wird die bestehende Industriestruktur etwas länger erhalten. Das konzentrierte CO₂-Gas kann in der Öl- und Erdgasförderung genutzt werden. Die positiven Industriestruktureffekte würden jedoch erst an den Förderstandorten in der Nordsee auftreten, und hätten keinen direkten Effekt auf die Strukturen am Standort NRW (Rang 3, **2 Punkte**). Durch H-DR werden besonders Industriestrukturen erhalten, die sich auf die Verarbeitung von hochwertigem Stahl spezialisiert haben (z.B. Auto-

mobilindustrie), da dieser über den gesamten Betrachtungszeitraum wettbewerbsfähig am Standort NRW hergestellt werden könnte. Die Zement- und Bauindustrie, die auf kostengünstigen Hochofenstahl und Hochofenabfallprodukte angewiesen sind, würden ihre Vorteile durch die Nähe zur Stahlindustrie durch das H-DR-Verfahren weitestgehend verlieren. Durch die Wasserstoffherstellung, -speicherung und -verarbeitung werden jedoch neue zukunftsfähige Industriestrukturen geschaffen. Vielfältige Synergien des Energieträgers und Energiespeichers Wasserstoff bringen weitere Strukturen aus dem Bereich der Energiewirtschaft und des Verkehrs in die Nähe des Stahlstandortes und verursachen so einen positiven Einfluss auf die Industriestrukturen am Standort (Rang 1, **4 Punkte**). Durch EW wird der Schwerpunkt ebenfalls auf hochwertige Stähle gelegt. Strukturen der Automobilindustrie und das verarbeitende Gewerbe bleiben bestehen. Auch nach 2050 kann Stahl so am Standort wettbewerbsfähig hergestellt werden. Die Schaffung neuer Industriestrukturen wird jedoch durch dieses Verfahren nicht erwartet (Rang 2, **3 Punkte**).

Gesellschaftliche Akzeptanz (5)

Wie groß ist die zu erwartende Akzeptanz der Gesellschaft gegenüber der Umsetzung dieser Verfahren (basierend auf Zeiss und Valentin 2011, S. 97 und Merten et al. 2013, S. 80–83)? Bewertet wird die Höhe der lokalen und überregionalen Akzeptanz gegenüber dem jeweiligen Verfahren.

Für das BF-BOF-Verfahren ist die überregionale gesellschaftliche Akzeptanz generell hoch, da die Technologie seit mehreren Generationen im Einsatz ist. Die lokale Akzeptanz von Anwohnern ist durch Lärm und Staubemission etwas geringer. Durch den positiven Effekt auf die Beschäftigung wird diese aber zumeist ausgeglichen (Rang 1, **4 Punkte**). Durch die CCS Technologie ist die Akzeptanz für BF-CCS deutlich reduziert. Überregional besteht einige Skepsis, aber auch Chancen werden erkannt. Lokal fehlt zumeist die Akzeptanz, was an der hohen Anzahl von Bürgerinitiativen gegen CCS an potentiellen Standorten zu sehen ist (Rang 4, **1 Punkt**). Für H-DR ist die überregionale gesellschaftliche Akzeptanz sehr hoch, da ein 'grünes' Image populär ist. Die lokale Akzeptanz ist durch Sicherheitsbedenken im Zusammenhang mit Wasserstoffspeicherung und -anwendung nur gering (Wurster und Schmidtchen 2011, S. 10–11) (Rang 3, **2 Punkte**). EW kann ähnlich wie H-DR von dem „grünen“ Image profitieren, hat aber auch lokal eine hohe Akzeptanz, da kaum mit Beeinträchtigungen zu rechnen ist und lokale Arbeitsplätze geschaffen werden (Rang 2, **3 Punkte**).

6.2.3 Kategorie Ökonomie

Profitabilität (6)

Wie profitabel ist die Investition in eine Anlage des jeweiligen Verfahrens? Zur Bewertung wird der errechnete Kapitalwert (NPV) aus dem techno-ökonomischen Modell aus Abschnitt 5.5.3 für das *moderate* Szenario im Jahr 2050 als Vergleichswert verwendet (siehe auch Fishedick et al. 2014, S. 10). Im *moderaten* Szenario im Jahr 2050 hat BF-BOF den niedrigsten NPV durch dann zu erwartende hohe Kosten für

fossile Energieträger und Emissionszertifikate (Rang 4, **1 Punkt**). BF-CCS zeigt primär durch reduzierten Koksbedarf und geringere Kosten für Emissionszertifikate einen geringfügig höheren NPV (Rang 3, **2 Punkte**). Der höchste NPV, und damit die profitabelste Anlageninvestition, wird für H-DR errechnet. Der Kostenvorteil durch sehr geringe Emissionen und den Verbrauch von günstigem Überschussstrom zur Wasserstoffherstellung führt zur höchsten Profitabilität im Vergleich (Rang 1, **4 Punkte**). EW weist durch höhere Stromkosten einen etwas geringeren Kapitalwert auf, der in 2050 jedoch noch deutlich über dem Niveau des BF-CCS-Verfahrens liegt (Rang 2, **3 Punkte**).

Strategischer Vorteil (7)

Das Kriterium *Strategischer Vorteil* beschreibt die ökonomischen Vorteile, die ein Stahlhersteller durch den Betrieb der jeweiligen Verfahren in Zukunft erlangen könnte. Dabei wird der Effekt des ‚First mover advantage‘ als Pionier in einer neuen Technologie am heimischen Markt beurteilt. Außerdem wird die Veränderung im Exportpotenzial der Stahlprodukte untersucht. Derzeit befinden sich die Hauptabnehmer europäischen Stahls in Europa (ECORYS SCS Group 2008, S. ii).

Vorteil durch Pionierstrategie (7.1)

Wie hoch ist der strategische Vorteil für den Betreiber der Verfahren (z.B. Technologieführerschaft, Erfahrungskurve, Image Vorteile)? Verglichen wird also die Höhe der etwaigen strategischen Vorteile.

BF-BOF kann es als etablierter Technologie nicht mehr zu starken ‚First-mover‘ Vorteilen kommen. Bei einigen inkrementellen Modernisierungsmaßnahmen (TGR, PCI, Wärmerezirkulierung) kann jedoch ein gewisser strategischer Vorteil ausgemacht werden (Rang 3, **2 Punkte**). Für BF-CCS, das mit der CO₂-Speicherung eine sehr ungewisse Erweiterung beinhaltet, kann noch kein strategischer Vorteil abgesehen werden. Die Unsicherheiten bei der CO₂-Speicherung führen eher zu einem Nachteil für Pioniere dieser Technologie (Rang 4, **1 Punkt**), solange nicht geklärt ist, wie die Investitionslast in die notwendige Infrastruktur verteilt wird. Die innovativen Verfahren H-DR und EW bringen als neue Technologien eine Vielzahl von Pionievorteilen mit sich. Durch Lerneffekte und frühe Skaleneffekte können Kosten- und Profitabilitätsvorteile verstärkt werden. Im Falle der Wasserstoffanwendung bei H-DR sind diese Vorteile noch gewichtiger, da sie auf viele weitere Anwendungsfälle in anderen Branchen übertragen werden können (siehe Wasserstoff-Technologiescreening 4.2) (Rang 1, **4 Punkte**). Das EW-Verfahren liegt somit auf Rang 2 (**3 Punkte**).

Exportpotenzial des Stahls (7.2)

Wie hoch ist die globale Nachfrage nach Stahlprodukten aus den jeweiligen Verfahren in 2050? Untersucht werden Änderungen in der globalen Stahlnachfrage je Produkti-

onsverfahren. Derzeit wird der Großteil des europäischen Stahls in Europa verwendet (ECORYS SCS Group 2008, S. ii).

BF-BOF Stahl ist derzeit der günstigste Stahl vom deutschen Standort und hätte damit aktuell die besten Exportchancen. In 2050, wenn im *moderaten* Zukunftsszenario Preise für fossile Brennstoffe, Rohstoffe und Emissionszertifikate deutlich gestiegen sind, wird der deutsche Hochofenstahl voraussichtlich nicht mehr wettbewerbsfähig sein. Unter der Annahme, dass bis 2050 auf dem Weltmarkt viele wichtige Abnehmermärkte auch Emissionshandelssysteme ins Leben gerufen haben, kann die hohe CO₂-Bilanz (siehe Abschnitt 5.5.3) zu einer weiteren Verschlechterung der Exportchancen führen (Rang 4, **1 Punkt**). Stahl aus dem BF-CCS-Verfahren hat einen geringen Kostenvorteil und gleichzeitig eine günstigere CO₂-Bilanz, so dass das globale Exportpotenzial leicht erhöht ist (Rang 3, **2 Punkte**). Für die H-DR und EW-Verfahren, die voraussichtlich in 2050 Stahl zu wettbewerbsfähigen Preisen herstellen können, wird, begünstigt durch ein innovatives und grünes Image, mit einer hohen globalen Nachfrage gerechnet. Der so produzierte Stahl ist besonders durch den geringen Kohlenstoffanteil für die steigende Nachfrage an Spezialstählen geeignet. Beide Verfahren erhalten somit Rang 2 und **3 Punkte**.

6.2.4 Kategorie Sicherheit und Verletzlichkeit

Verletzlichkeit (8)

Das Kriterium *Verletzlichkeit* beschreibt die Anfälligkeit des jeweiligen Verfahrens gegenüber Schwankungen in der Wertschöpfungskette. Es werden die Abhängigkeiten von Rohstoffen und die Flexibilität der Produktion bewertet und damit die Möglichkeit untersucht, auf schwankende Nachfrage zu reagieren.

Abhängigkeit von Rohstoffen (8.1)

Wie hoch ist die Abhängigkeit dieses Verfahrens von Rohstoffen (basierend auf Nitsch et al. 2012)? Der zur Beurteilung verwendete Parameter ist die in Abschnitt 5 simulierte Rohstoffabhängigkeit (Anteil an rohstoffabhängigen Betriebskosten) aus dem techno-ökonomischen Modell.

Für BF-BOF und BF-CCS beträgt der Anteil rohstoffabhängiger Betriebskosten ca. 78%. Damit liegen beide Verfahren punktgleich auf Rang 3 und erhalten **2 Punkte**. H-DR hat mit 60% den geringsten Anteil rohstoffabhängiger Betriebskosten (Rang 1, 4 Punkte), gefolgt von EW mit 63% (Rang 2, **3 Punkte**).

Flexibilität der Produktion (8.2)

Wie flexibel kann die Produktion dieses Verfahrens an eine zeitlich veränderliche Nachfrage angepasst werden? Zur Bewertung werden die Abschaltverzögerung und die Skalierbarkeit der Anlage herangezogen. Aus Mangel an verfügbaren Literaturquellen wird die Einschätzung des Autors, unterstützt durch die Einschätzung eines anonymen Stahlexperten (Expert from steel industry 2014) herangezogen.

BF-BOF kann durch den Hochofenbetrieb nicht kurzfristig heruntergefahren werden. Sie wird fast das komplette Jahr über im Dauerbetrieb betrieben. Durch das große Hochofenvolumen, das für die Effizienz der Anlage notwendig ist, ist eine Skalierbarkeit kaum möglich. Durch das sehr breite Produktspektrum kann dieses Verfahren gut auf variable Nachfrage im Produkttyp reagieren (Rang 3, **2 Punkte**). Für BF-CCS wird durch die Gasrezirkulierung und den CO₂-Abscheidungsprozess die Flexibilität des Hochofens noch einmal verschlechtert (Rang 4, **1 Punkt**). Bei H-DR führen kleinere Anlagenmodule und die schnelleren Reaktionszeiten im Direktreduktionsofen zu einer hohen Flexibilität in der Produktionsmenge. Ein Teillastbetrieb ist auch hier nicht möglich. Die Skalierbarkeit ist durch die mögliche Kombination der kleineren Anlagen gegeben (Rang 1, **4 Punkte**). Der chemische Prozess von EW braucht lange zum Anfahren und kann deshalb nur schlecht gestoppt werden (Expert from steel industry 2014). Hohe Effizienz auch im Teillastbetrieb und variable Skalierbarkeit sorgen jedoch insgesamt für hohe Flexibilität (Schnurnberger et al. 2004, S. 53) (Rang 2, **3 Punkte**).

Sicherheitsrisiken (9)

Das Kriterium *Sicherheitsrisiken* bewertet allgemeine Sicherheitsaspekte für Menschen in der Umgebung der Anlage. Dabei wird unterteilt in die Subkriterien *Brand- und Explosionsgefahr*, *Gesundheitsgefahr* und *Risiko im Fehlerfall*. Zur Bewertung der ersten beiden Risiken werden je Verfahren die verwendeten Substanzen im Herstellungsverfahren untersucht. In Anlehnung an (Bunke und Graulich 2003, S. 3) werden je Substanz die R-Sätze aus den Sicherheitsdatenblättern herangezogen und mithilfe des Spaltenmodells nach (Smola 2001) in ein fünfstufiges Bewertungsschema übersetzt. Die Summe der Einstufungen aller Substanz ergibt dann den Gesamtwert für das jeweilige Verfahren (siehe Tabelle 6-2). Zusätzlich wird noch das *Risiko im Fehlerfall* je Verfahren abgeschätzt, indem die Wahrscheinlichkeit eines größten anzunehmenden Unfalls (GAU) zusammen mit dem potentiellen Ausmaß eines Fehlerfalles bewertet wird.

Brand- und Explosionsgefahr (9.1)

Wie hoch ist die Brand- und Explosionsgefahr entlang der Prozessschritte innerhalb der Systemgrenze dieses Verfahrens? Der untersuchte Parameter ist Gesamtbewertung der Brand- und Explosionsgefahr nach dem oben erwähnten fünfstufigen Spaltenmodell nach (Smola 2001).

BF-BOF und BF-CCS erhalten den Punktwert 11 für die Brand- und Explosionsgefahr (siehe Tabelle 6-2) und liegen damit beide auf Rang 4 (**1 Punkt**). Die gefährlichsten Substanzen sind Erdgas und Kohlenstoffmonoxid, die beide leicht entzündlich sind. Die CO₂-Abscheidung und Speicherung hat keinen negativen Einfluss auf die Brandgefahr. H-DR erhält einen Punktwert von 7, da nur Wasserstoff und Sauerstoff eine erhöhte Brandgefahr aufweisen (Rang 2, **3 Punkte**). Kohlenstoffmonoxid kommt nur in

vernachlässigbaren Mengen vor. Auf Rang 1 liegt das EW-Verfahren, mit einer kumulativen Brandgefahr von 3 (**4 Punkte**), da es keine entzündlichen Substanzen aufweist.

Gesundheitsgefahr (9.2)

Wie hoch ist etwaige Toxizität im Zusammenhang mit austretenden Stoffen dieses Verfahrens? Der untersuchte Parameter ist Gesamtbewertung der Gesundheitsgefahr nach dem oben erwähnten fünfstufigen Spaltenmodell nach (Smola 2001).

BF-BOF erhält insbesondere durch das hoch toxische Kohlenstoffmonoxid (CO) eine Gesundheitsgefährdung von 10 Punkten (Rang 3, **2 Punkte**). BF-CCS erhält einen Punktwert von 13 für die erhöhte Gesundheitsgefahr durch die unterirdische CO₂-Lagerung (Metz 2005, S. 13) und den CO₂-Transport, wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben (Rang 4, **1 Punkt**). H-DR und EW, mit vernachlässigbar geringen Mengen an CO₂ und CO Gas, erhalten mit einem Punktwert von 4 bzw. 5 die geringste Gesundheitsgefahr und somit Rang 1 (**4 Punkte**) und Rang 2 (**3 Punkte**). Gegenüber H-DR ist EW durch die Verätzungsgefahr der Natronlauge nur leicht erhöht.

Tabelle 6-2: Bewertung von Brand- und Explosionsgefahren und Gesundheitsgefahren basierend auf Spaltenmodell nach (Smola 2001)

Gefahrenstoffe	Einstufung nach Richtlinie EG 67/548	Brand- und Explosionsgefahren	Punkte	Gesundheitsgefahren	Punkte
BF-BOF					
Erdgas	R12	sehr hoch	4	mittel	2
Sauerstoff	R8	hoch	3	vernachlässigbar	0
Kohlendioxid	keine	vernachlässigbar	0	mittel	2
Kohlenmonoxid	R12; Repr. Cat. 1; R61; R23-R48	sehr hoch	4	sehr hoch	4
Stickstoff	keine	vernachlässigbar	0	mittel	2
Summe			11		10
BF-CCS					
Erdgas	R12	sehr hoch	4	mittel	2
Sauerstoff	R8	hoch	3	vernachlässigbar	0
Kohlendioxid - gasförmig	keine	vernachlässigbar	0	mittel	2
Kohlendioxid - unterirdisch gelöst	keine	vernachlässigbar	0	hoch	3
Kohlenmonoxid	R12; Repr. Cat. 1; R61; R23-R48	sehr hoch	4	sehr hoch	4
Stickstoff		vernachlässigbar	0	mittel	2
Summe			11		13
H-DR					
Wasserstoff	R12	sehr hoch	4	mittel	2
Sauerstoff	R8	hoch	3	vernachlässigbar	0
Stickstoff	keine	vernachlässigbar	0	mittel	2
Vernachlässigbare Mengen Kohlenstoffmonoxid und -dioxid aus Zuschlagstoffen im Lichtbogenofen					
Summe			7		4
EW					
Natriumhydroxid	R35	vernachlässigbar	0	hoch	3
Sauerstoff	R8	hoch	3	vernachlässigbar	0
Stickstoff	keine	vernachlässigbar	0	mittel	2
Vernachlässigbare Mengen Kohlenstoffmonoxid und -dioxid aus Zuschlagstoffen im Lichtbogenofen					
Summe			3		5

Risiko im Fehlerfall (9.3)

Welches Risiko besteht in diesem Verfahren für Leib und Leben im Falle eines größten anzunehmenden Unfalls (GAU) (basierend auf Merten et al. 2013, S. 111–113)? Bewertet werden die Wahrscheinlichkeit und das potentielle Ausmaß eines GAUs.

BF-BOF hat ein geringes Risiko für einen GAU, wie z.B. die Explosion des Hochofens. Das Ausmaß eines solchen Fehlerfalls ist im Nahbereich (bis 30m) jedoch sehr hoch und meist tödlich (Health and Safety Executive 2001) (Rang 2, **3 Punkte**). Fehlerfälle

dieser Art haben in der Vergangenheit oft Menschenleben gekostet. Ursachen sind zumeist das Eindringen von Kühlwasser mit explosionsartiger Dampfungwicklung oder Kohlenstaubexplosionen (Health and Safety Executive 2001). Für BF-CCS ist das Risiko durch die gleiche Anlage identisch. Ein zusätzliches Risiko entsteht durch CO₂-Transport und Speicherung. Das komprimierte Gas kann explosionsartig austreten (Bersten) und Menschen verletzen, oder zu Erstickungen führen (Rang 4, **1 Punkt**). Bei H-DR ist der größte anzunehmende Unfall die Explosion des H₂-Direktreduktionsofen oder des Wasserstoffspeichers. Die Wahrscheinlichkeit hierfür wird als gering eingestuft. Das Ausmaß wäre jedoch im Nahbereich sehr hoch und mindestens vergleichbar mit einer Hochofenexplosion (Rang 3, **2 Punkte**). Für EW wird das Bersten des Elektrolyseurs als GAU angenommen. Das Auftreten gilt als sehr unwahrscheinlich und nur mit moderatem Ausmaß, da keine Druckwelle auftritt. Es kann jedoch zu Verätzungen durch Natronlauge kommen (Rang 1, **4 Punkte**).

6.2.5 Kategorie Ökologie

Die Kategorie *Ökologie* ist gerade in Anbetracht der Klimaproblematik eine sehr wichtige Bewertungsdimension und rundet den ganzheitlichen Bewertungsansatz der vorliegenden MCA ab. Die Kriterien *Treibhausgas-Emission (THG-Emission)*, *Sonstige Umweltbelastungen* und *Energieeffizienz* werden im Detail betrachtet. Der Aspekt der Rohstoffeffizienz ist schon im Kriterium *Abhängigkeit von Rohstoffen (8.1)* enthalten und wird an dieser Stelle nicht erneut berücksichtigt.

THG-Emission (10)

Wie hoch ist die spezifische THG-Emission pro Tonne Rohstahl des jeweiligen Verfahrens? Die mithilfe des techno-ökonomischen Modells (siehe Abschnitt 5.5.3) simulierte spezifische THG-Emission im *moderaten* Szenario im Jahre 2050, inklusive der berücksichtigten indirekten Effekte wird als Bewertungsgrundlage verwendet.

Für BF-BOF wird die höchste spezifische THG-Emission von 1700 kg CO₂ / t Rohstahl berechnet (Rang 4, **1 Punkt**). BF-CCS kann die THG-Emission durch die CCS Technologie auf 760 kg CO₂ / t Rohstahl reduzieren (Rang 3, **2 Punkte**). H-DR hat durch den höchsten Anteil an erneuerbarem Strom die geringste spezifische THG-Emission von 410 kg CO₂ / t Rohstahl (Rang 1, **4 Punkte**). EW, das in 2050 nach wie vor indirekte CO₂-Emissionen durch den Verbrauch von Netzstrom verursacht, hat eine spezifische Emission von 560 kg CO₂ / t Rohstahl und liegt damit auf Rang 2 mit **3 Punkten**.

Sonstige Umweltbelastungen (11)

Wie hoch sind sonstige Umweltbelastungen durch das jeweiligen Verfahren außer THG-Emission (basierend auf (Merten et al. 2013, S. 103–111)? Untersucht werden weitere Umweltbelastungen wie Feinstaub, weitere Schadstoffe und besondere Lärmbelastung. Da die Anlagen jedes untersuchten Verfahrens auf den Flächen bestehender Industrieanlagen entstehen würden, muss eine Umweltbelastung durch die Lebensraumzerstörung eines „greenfield“ Neubaus nicht berücksichtigt werden. Für die vorliegende Bewertung werden je Verfahren jeweils nur die prominentesten

Umweltbelastungen berücksichtigt, die dieses Verfahren ausmacht. Übliche Belastungen, durch Lärm, Staub, Verkehr usw. werden nicht jeweils neu bewertet, da diese für die vier Verfahren ähnlich sind.

BF-BOF weist die höchste Feinstaubbelastung aller Verfahren auf (Remus et al. 2013, S. 305). Diese resultiert vom Hochofen, von der Kokerei und der Pelletieranlage (Rang 3, **2 Punkte**). BF-CCS hat durch die Kuppelgasrezirkulierung eine geringere Feinstaubemission. Die CO₂-Speicherung führt jedoch zu weiteren Umweltbelastungen, die derzeit nur schwer abschätzbar sind (Metz 2005, S. 12–14) (Rang 4, **1 Punkt**). H-DR weist keine besondere Umweltbelastung auf. Die Wasserstoffherstellung und Verbrennung ist nicht umweltschädlich (Rang 1, **4 Punkte**). Auch EW weist wenige Umweltbelastungen auf. Feinstaub kann nur im Lichtbogenofen entstehen. Bei einer Leckage des Elektrolyseurs kann jedoch Grundwasser durch die Natronlauge verschmutzt werden (Rang 2, **3 Punkte**).

Energieeffizienz (12)

Wie viel Energie (einschließlich Reduktionsmittelherstellung) wird in dem jeweiligen Verfahren pro Tonne Rohstahl verbraucht? Für die Beurteilung dieses Kriteriums wird erneut auf die Simulationsergebnisse des techno-ökonomischen Modells aus Abschnitt 5.5.1 zurückgegriffen.

Für BF-BOF wird mit 18,1 GJ / t Rohstahl der höchste spezifische Energiebedarf berechnet (Rang 4, **1 Punkt**). BF-CCS weist trotz erhöhtem Strombedarf für die CO₂-Abscheidung einen insgesamt niedrigeren Energiebedarf von 15,6 GJ / t Rohstahl auf (Rang 3, **2 Punkte**). Grund hierfür sind die Einsparungen am Koksbedarf durch die Kuppelgasrezirkulierung. Durch die Wasserstoffherstellung weist H-DR einen höheren Energiebedarf als EW auf, liegt jedoch durch die effiziente Direktreduktionstechnologie mit 13,6 GJ / t Rohstahl deutlich unter den beiden vorigen Verfahren (Rang 2, **3 Punkte**). EW ist das energieeffizienteste Verfahren mit einem spezifischen Energiebedarf von 9,7 GJ / t Rohstahl (Rang 1, **4 Punkte**).

Nachdem die vier Herstellungsverfahren entlang der 12 Kriterien und Subkriterien bewertet wurden, muss im Folgenden die Gewichtung festgelegt werden, mit der jedes Kriterium zum Gesamtergebnis beiträgt.

6.3 Gewichtung

Es gibt verschiedene Methoden, um die Gewichtung der Kriterien festzulegen. Nach (Merten et al. 2013, S. 50) sind die zwei häufigsten die ‚Weighted Sum‘ Methode und der ‚Analytical Hierarchy Process‘. Bei der ‚Weighted Sum‘ werden die Kriterien durch den Analysten oder Entscheidungsträger gewichtet, indem eine begrenzte Punktzahl auf alle Kriterien verteilt wird. Beim ‚Analytical Hierarchy Process‘ wird ein mathematisches Verfahren zur Berechnung der Gewichtungen herangezogen. Alle Kriterien werden per Kreuzvergleich mit allen Kriterien verglichen. Aus der entstandenen Relevanzmatrix wird über die Eigenvektorberechnung die Gewichtung der Kriterien abgeleitet (Merten et al. 2013, S. 50–53). In der vorliegenden Arbeit wird die

„Weighted Sum“ Methode gewählt, da sie sehr intuitiv durchführbar ist und gut geeignet ist, um die Auswirkungen verschiedener Einschätzungen sichtbar zu machen und zurück zu verfolgen. Gerade im Bereich von EE-Szenarien hat sich die gleichverteilte Gewichtung der Kriterien als häufigste Methode etabliert (Wang et al. 2009, S. 2263). Als neutrale Referenzgewichtung wird die Gleichverteilung der Gewichtungsfaktoren gewählt. 100% Gewichtung wird dabei gleichmäßig auf die fünf Kategorien aufgeteilt, zu je 20%. Innerhalb jeder Kategorie werden die 20% wieder gleichmäßig auf die Kriterien und dann weiter auf die Subkriterien verteilt. In diese Gleichverteilung geht kein subjektiver Einfluss mit ein, weshalb sie als Referenzwert der MCA Bewertung verwendet wird. Um die Auswirkung verschiedener Einschätzungen sichtbar zu machen, werden beispielhaft drei Experten um ihre individuelle Einschätzung der Gewichtung gebeten.

Diese Einschätzung ist nicht repräsentativ und soll lediglich eine exemplarische Stichprobe verschiedener Perspektiven und deren Auswirkung auf die Gewichtung geben. In Abbildung 6-1 sind die beispielhaften Gewichtungen jeweils eines Akteurs aus der Stahlindustrie, aus der Landesregierung und aus einer Umweltorganisation zu sehen. Diese Beispiele werden gewählt, weil die unterschiedlichen Hintergründe der Akteure auch unterschiedliche Perspektiven auf die Kriteriengewichtung vermuten lassen. Als Referenzlinie ist die gleichverteilte Gewichtung mit 20% je Kategorie eingezeichnet. Abweichungen von diesem neutralen Level repräsentieren die individuellen Perspektiven der Beispielsakteure.

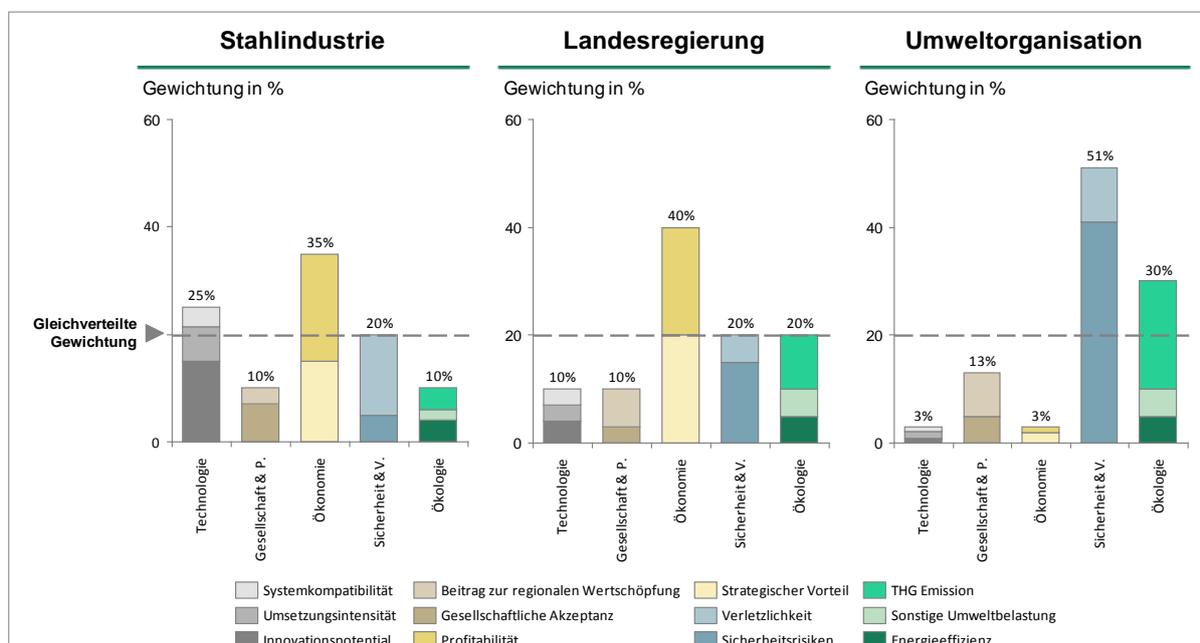


Abbildung 6-1: Beispielhafte Gewichtung von Akteuren mit unterschiedlichen Perspektiven

Der Akteur aus der Stahlindustrie weist die gleichmäßigste Gewichtung über alle Kriterien auf. Die wichtigsten Kategorien aus seiner Perspektive sind, mit knappem Vorsprung, die wirtschaftliche und technologische Kategorie, was aus Sicht der Stahlin-

dustrie auch verständlich ist. Die Kategorien *Gesellschaft* und *Ökologie* werden jeweils mit 10% am niedrigsten gewichtet.

Aus der beispielhaften Perspektive der Landesregierung gehen die wirtschaftlichen Aspekte mit der höchsten Gewichtung hervor. Nachhaltiger Wohlstand und Beschäftigung können nur durch Rentabilität der industriellen Prozesse erreicht werden (Vertreter aus Landesregierung NRW 2014). Statt der technologischen Kategorie wird die ökologische Kategorie aus dieser Perspektive höher gewichtet, was wegen der politischen Schwerpunkte zur Senkung der THG-Emissionen nicht verwundert. Mit jeweils 10% Gewichtung schneiden die Kategorien *Technologie* und *Gesellschaft* am schwächsten ab. Das Kriterium *Gesellschaftliche Akzeptanz* erhält interessanterweise im Vergleich zu den anderen beiden Akteuren die niedrigste Gewichtung.

Aus der Perspektive der Umweltorganisation geht eine sehr akzentuierte Gewichtung hervor. Nur die Kriterien in den Kategorien *Sicherheit* und *Ökologie* spielen eine bedeutende Rolle. Über 50% der Gewichtung liegt in der Kategorie *Sicherheit & Verletzlichkeit*. Das Kriterium *Sicherheitsrisiken* stellt hierbei ein KO-Kriterium für den befragten Akteur aus der Umweltorganisation dar. Wenn es ein erhebliches Sicherheitsrisiko für die menschliche Gesundheit oder Leben gibt, wäre eine Technologie nie akzeptabel (Vertreter aus beispielhafter Umweltorganisation 2014). Die hohe Gewichtung der ökologischen Kategorie verwundert aus Sicht der Umweltorganisation nicht. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der spezifischen Treibhausgasemission der verschiedenen Verfahren. Die Kategorien *Technologie* und *Ökonomie* haben mit jeweils 3% die niedrigste Gewichtung.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der neutralen Bewertung der vier Verfahren vorgestellt. Im Anschluss wird dann die Auswirkung der beispielhaften Gewichtungen auf die MCA Bewertung untersucht.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Gleichverteilte Gewichtung

Die Bewertung der vier Herstellungsverfahren aus Abschnitt 6.2 geht zunächst gleichmäßig gewichtet in die Gesamtbewertung mit ein. Hierzu wird, wie beschrieben, jede Kategorie mit 20% und innerhalb der Kategorien jedes Kriterium gleichmäßig gewichtet. Abbildung 6-2 zeigt die Ausprägung der Bewertung der vier Verfahren. Die rot gestrichelte Linie zeigt die Gesamtbewertung je Verfahren an. Den einzelnen Balken kann die zugrunde liegende Bewertung der fünf Einzelkategorien entnommen werden. In Tab-A 9 im Anhang C können die detaillierten Bewertungen der Einzelkriterien und Subkriterien eingesehen werden.

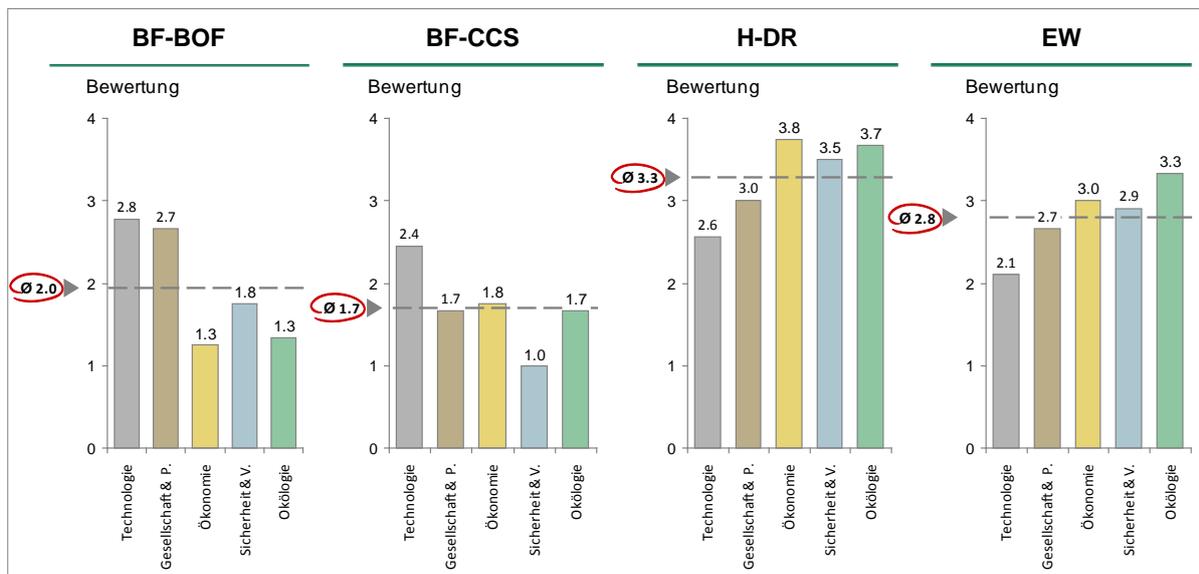


Abbildung 6-2: Multi-kriterielle Bewertung der ausgewählten Stahlherstellungsverfahren (gleichmäßige Gewichtung)

Die beiden innovativen Herstellungsverfahren H-DR und EW werden insgesamt deutlich höher bewertet als die hochofenbasierten Verfahren BF-BOF und BF-CCS. In den technologischen Kriterien (einschließlich *Systemkompatibilität* und *Umsetzungsintensität*) erhält das etablierte BF-BOF-Verfahren eine höhere Bewertung, da bereits in das bestehende System integriert ist, ohne dass es zu starken Umbrüchen kommt. Die *Systemkompatibilität* von H-DR ist durch die vielfältigen Synergien mit Wasserstoffanwendungen in andere Branchen für ein junges Verfahren sehr hoch. EW als mögliche Zukunftstechnologie bekommt dagegen die höchste Bewertung im Kriterium *Innovationspotenzial*, da sie auch nach Markteinführung ein hohes weiteres Entwicklungspotenzial hat.

In der Kategorie *Gesellschaft & Politik* ist die Bewertung relativ ausgeglichen. Lediglich BF-CCS fällt durch die geringste gesellschaftliche Akzeptanz etwas zurück. Trotz ebenfalls geringer gesellschaftlicher Akzeptanz durch Skepsis gegenüber der Wasserstofftechnologie bekommt H-DR besonders im Bereich der lokalen Wertschöpfung hohe Punktzahlen, da sie die Zukunftsfähigkeit bestehender Standorte verbessern könnte. Besonders in der zweiten Hälfte des aktuellen Jahrhunderts, wenn die günstige Wasserstoffherstellung eine international wettbewerbsfähige Stahlproduktion ermöglicht, könnte H-DR ein wichtiger Anker für den Fortbestand von Industriestrukturen in Deutschland sein.

Die in 2050 deutlich höhere *Profitabilität* für die innovativen Verfahren haben einen hohen Anteil an der besseren Gesamtbewertung dieser neuartigen Technologien. Der Vorsprung von H-DR gegenüber EW in dieser Kategorie resultiert aus dem Kostenvorteil eines deutlich höheren Anteils an günstigem Überschussstrom. Durch die Möglichkeit, selektiv günstigen Überschussstrom zu verbrauchen und diesen dann in Form von Wasserstoff chemisch speicherbar zu machen, verbraucht H-DR nur ca. 20% Netzstrom zu höheren Marktpreisen. In 2050, wenn möglicherweise weltweit Emissi-

onshandelssysteme etabliert sind, wäre das weltweite Exportpotenzial des CO₂-neutralen Qualitätsstahls aus einer H-DR oder EW-Anlage sehr groß.

EW erhält die höchste Bewertung für *Sicherheit* und *Unabhängigkeit* von Rohstoffen. Durch Elektrizität als Reduktionsmittel entfällt der Umgang mit brennbaren Gasen wie Wasserstoff oder Kohlenmonoxid und durch den geringen Verbrauch von Rohstoffen ist dieses Herstellungsverfahren unabhängiger von Rohstoffengpässen als die drei anderen Verfahren. Besonders durch die *Sicherheitsrisiken* der CCS Technologie schneidet BF-CCS in dieser Kategorie schlecht ab.

In der Kategorie *Ökologie* liegen naturgemäß die CO₂-ärmeren und kohlenstofffreien Verfahren deutlich vorne. Durch den höheren Netzstromanteil hat EW eine höhere indirekte CO₂-Emission im Jahre 2050 im *moderaten* Szenario aufgrund des nicht hundertprozentig erneuerbaren Strommixes. Im Bereich der Energieeffizienz erhält es dafür die höchste Bewertung aller Verfahren. Das BF-BOF-Verfahren schneidet in der Kategorie *Ökologie* genau wie schon in der Kategorie *Ökonomie* am schwächsten ab. Genau an diesen beiden Bewertungen wird der Handlungsbedarf deutlich, in Zukunft Stahl über andere Herstellungsverfahren zu produzieren. Ökologische Gründe und bei konsequenter Klimaschutzpolitik zwangsläufig auch ökonomische Gründe machen einen Technologiewechsel unausweichlich.

6.4.2 Beispielhafte Gewichtungsperspektiven

Im Folgenden werden nun die Auswirkungen der drei vorgestellten exemplarischen Perspektiven auf die Bewertung der Herstellungsverfahren vorgestellt. In Abbildung 6-3 wird das Ergebnis der gleichgewichteten MCA aus Abschnitt 6.4.1 mit den drei MCA Ergebnissen, basierend auf den Gewichtungsfaktoren der drei exemplarischen Akteure, verglichen. Die jeweils linke Säule zeigt die gleichgewichtete Bewertung als Referenz. Die drei weiteren Säulen repräsentieren die Bewertung basierend auf den unterschiedlichen Gewichtungsbeispielen.

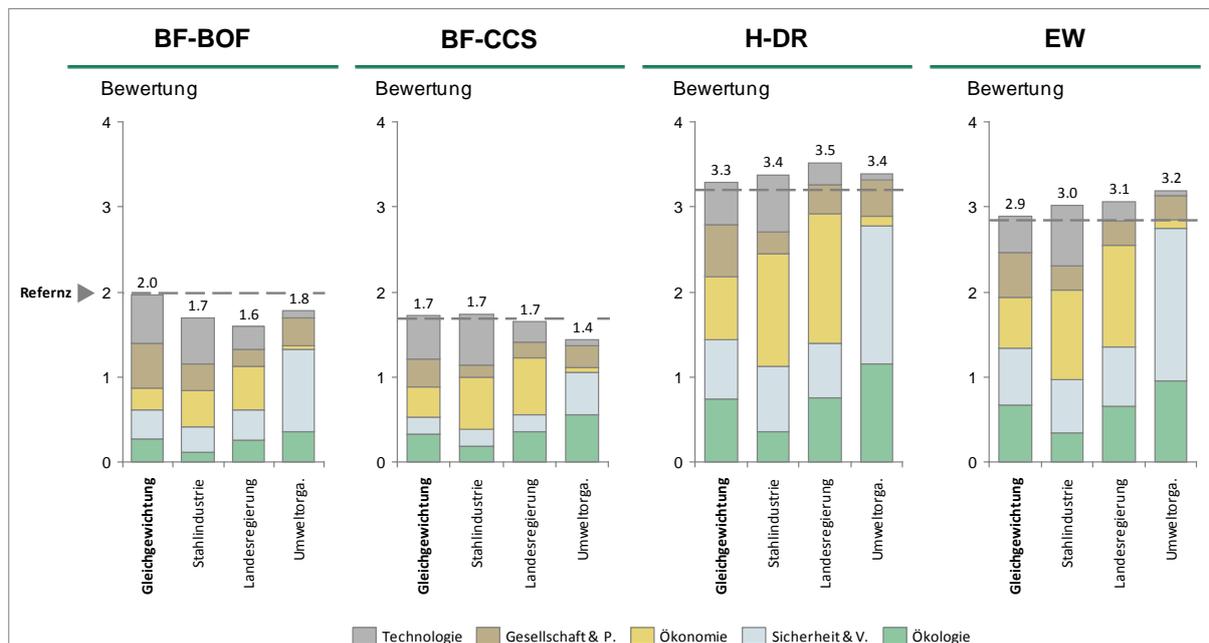


Abbildung 6-3: Vergleich der Auswirkung beispielhafter Gewichtungen auf ganzheitlich Bewertung

Der deutliche Unterschied in der Bewertung der hochofenbasierten Verfahren auf der einen und der innovativen Verfahren auf der anderen Seite wird durch die Gewichtungen aller drei Akteure noch verstärkt. Da schon die gleichgewichtete Bewertung recht homogen über alle Kriterien verteilt war, liegen auch hier die Bewertungen mit den drei unterschiedlichen Gewichtungen je Verfahren recht nahe beieinander (maximale Spreizung von 15%). Die ganzheitliche Bewertung ist also relativ robust gegenüber unterschiedlichen Akteursperspektiven. Aus der beispielhaften Perspektive der Stahlindustrie und der Landesregierung ist BF-CCS geringfügig besser bewertet als BF-BOF. Offensichtlich werden in diesem Falle die Unsicherheiten bezüglich der CCS Technologie nicht so schwer gewichtet. Im *moderaten* Szenario und zum Zeitpunkt der Bewertung im Jahre 2050 ist aus der Perspektive der Stahlindustrie wie auch der Landesregierung H-DR das präferierte Verfahren. Aus der Perspektive der Umweltschutzorganisation überwiegt bei BF-CCS die Skepsis bezüglich möglicher Sicherheitsrisiken und Umweltgefahren, so dass dieses Verfahren insgesamt am niedrigsten bewertet wird.

6.5 Diskussion

6.5.1 Zwischenfazit Bewertungsmethode

Als dritten Bewertungsschritt des ganzheitlichen Bewertungsansatzes ergibt die MCA eine sehr umfassende Bewertung der vier zukünftigen Stahlherstellungsverfahren. Sowohl die techno-ökonomischen Simulationsergebnisse aus Abschnitt 5.5, als auch weitere Kriterien aus den Bereichen Technologie, Gesellschaft & Politik, Ökonomie, Sicherheit & Verletzlichkeit, sowie Ökologie können berücksichtigt werden und in einer Gesamtbewertung zusammengefasst werden. Somit repräsentiert die Bewertung mehr als nur eine klassisch betriebswirtschaftliche Sicht auf die Technologieauswahl,

sondern vielmehr die ganzheitliche Eignung eines Herstellungsverfahrens für die Zukunft. Die verwendete dreischrittige Bewertungsmethode erscheint für eine ganzheitliche Bewertung geeignet. Im Abschnitt 7 wird die entwickelte Bewertungsmethode im Rahmen von Fallbeispielen an drei weiteren exemplarischen Standorten durchgeführt.

6.5.2 Ganzheitliche Bewertung

Die Aussagen der techno-ökonomischen Modellierung (Abschnitt 5) werden durch die Ergebnisse der MCA Bewertung weiter unterstützt. So erhalten auch hier die beiden innovativen Stahlherstellungsverfahren Eisenerzelektrolyse (EW) und vor allem Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR) eine deutlich höhere ganzheitliche Bewertung als die beiden hochofenbasierten Verfahren. Unter der Prämisse der getroffenen Annahmen ermöglichen nur H-DR und EW wirtschaftlich realisierbare Emissionsreduktionen in der primären Stahlherstellung in Übereinstimmung mit Klimaschutzzielen bis 2050.

Die konventionelle Hochofenroute offenbart gerade am Standort NRW einige Nachteile. Die hohe *Abhängigkeit von Rohstoffen* kann im Binnenland nur durch aufwendige Logistik bewältigt werden und belastet somit die Wettbewerbsfähigkeit gerade gegenüber Ländern mit großem inländischen Rohstoffvorkommen (siehe Abschnitt 7). Industrieländer wie Deutschland werden langfristig ein hohes Angebot von Stahlschrott haben, so dass ein zunehmender Anteil des Stahlbedarfs über Stahlschrottreycling abgedeckt werden könnte. Bei Verfahren, über den Lichtbogenofen (H-DR und EW), kann beliebig viel Stahlschrott beigemischt werden und so flexibel auf die Stahlschrott-Verfügbarkeit reagiert werden.

Außer den Vorteilen in der ökonomischen und ökologischen Kategorie zeigt gerade H-DR auch eine hohe Bewertung im Bereich der regionalen Wertschöpfung. Diese Zukunftstechnologie basierend auf Wasserstoffherstellung und Wasserstoffspeicherung könnte durch die Schaffung neuer und Erhaltung bestehender Wertschöpfungsschritte Industriestrukturen an Stahlstandorten in Deutschland erhalten. Gerade langfristig, wenn weltweit mit strengeren Umweltauflagen zu rechnen ist, ist emissionsarmer Qualitätsstahl aus Deutschland nicht nur wettbewerbsfähig, sondern hat ein deutlich gesteigertes globales Exportpotenzial.

Wie schon das Wasserstoff-Technologiescreening in Abschnitt 4 erkennen ließ, besteht zukünftig ein sehr hohes branchenübergreifendes Synergiepotenzial, sofern es zur Etablierung einer übergreifenden Wasserstoffwirtschaft kommt. Besonders die Funktionen Wasserstoffherstellung, -speicherung und Energieerzeugung werden voraussichtlich in fast allen Branchen zur Anwendung kommen (vgl. Abbildung 4-5) und erklären somit die zentrale Rolle der Wasserstoff-Direktreduktion im Energiesystem der Zukunft. Wirtschaftliche Aspekte durch branchenübergreifende Synergien werden in der vorliegenden Bewertung nicht quantifiziert, könnten aber zu einer höheren Profitabilität dieses Verfahrens beitragen.

Im Kontrast zu Schlussfolgerungen anderer Autoren (z.B. Moya und Pardo 2013, S. 81), gehen basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit H-DR und EW als Stahlherstellungsverfahren der Zukunft am Standort NRW hervor. Wichtige Annah-

men hierfür sind jedoch die Einbindung der Eisen- und Stahlindustrie in das Emissionshandelssystem und das konsequente Abbauen von Ausnahmenregelungen. Erst durch das obligatorische Ausgleichen aller CO₂-Emissionen durch den Kauf von Emissionszertifikaten wird die Grundlage für eine frühe Weichenstellung hin zu emissionsärmeren Verfahren geschaffen.

Die Einbeziehung beispielhafter Akteursperspektiven auf die Gewichtung der MCA hat die Robustheit der ganzheitlichen Bewertung verdeutlicht. Trotz deutlich unterschiedlicher Gewichtungen einzelner Kriterien ist die Gesamtbewertung der vier primären Stahlherstellungsverfahren sehr ähnlich. Der Vergleich der unterschiedlichen Perspektiven lässt vermuten, dass es bei der Frage nach den Zukunftsstrategien der Stahlindustrie ein gewisses Konsenspotenzial gibt.

6.5.3 Implikationen

Im Anbetracht der dringend notwendigen klaren Orientierungshilfen für eine langfristig planende Eisen- und Stahlindustrie wären ein gemeinsamer Fahrplan und die gebündelte Förderung einiger weniger vielversprechender Zukunftstechnologien wichtig. Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit könnte eine solche Schwerpunkttechnologie die Wasserstoff-Direktreduktion oder falls es nicht zur breiten Wasserstoffanwendung kommt, die Eisenerzelektrolyse sein.

Förderprogramme, die die Last von Forschung und Entwicklung nicht alleine bei der Stahlindustrie belassen (Moya und Pardo 2013, S. 81), könnten die innovativen Technologien gezielt fördern und die Zeit bis zur flächendeckenden Markteinführung verkürzen, was im Anbetracht der Klimaschutzziele besonders wichtig wäre.

Politische Rahmenbedingungen müssen konsequent und eindeutig den Transformationsprozess in Richtung des gewünschten Zukunftszieles leiten, um den Betreibern die notwendige Planungssicherheit für frühzeitige Investitionsentscheidungen zu garantieren. Unsicherheiten und Spielräume verzögern diese notwendige Transformation und verursachen hohe Opportunitätskosten für die Stahlindustrie und die Gesellschaft.

6.5.4 Einschränkungen

Viele Unsicherheiten in der Entwicklung der Zukunftsszenarien und schlechte Datenverfügbarkeit gerade bei den innovativen Technologien führen zu einer gewissen Unsicherheit der Ergebnisse. Änderungen in der Einschätzung zukünftiger Entwicklungen in Deutschland und weltweit können zu anderen Beurteilungen der primären Herstellungsrouten führen. Auch wenn in der vorliegenden Bewertung H-DR als präferierte Zukunftstechnologie hervorgeht, kann im Einzelfall eines konkreten Stahlwerks oder eines bestimmten Betreibers auch in Zukunft ein anderes Verfahren geeigneter sein.

Trotz gewissenhafter Auswahl der Kriterien und Anwendung der Qualitätsanforderungen der MCA können gewisse Korrelationen der Einzelkriterien nicht ausgeschlossen werden, wodurch ggfs. bestimmte Aspekte überproportional hoch in die Ergeb-

nisse eingehen. Alleine durch die Auswahl eines bestimmten Kriterienkataloges werden die Ergebnisse beeinflusst.

Die MCA könnte zu jedem Zeitintervall innerhalb des Betrachtungszeitraumes zwischen 2010 und 2070 mit jeweils drei Szenarioausprägungen durchgeführt werden und würde sich durch eine Vielzahl von zeit- und szenarioabhängigen Einflussfaktoren auch jeweils leicht ändern. Um den Arbeitsaufwand zu reduzieren, wird in der vorliegenden Arbeit als Vergleichspunkt einheitlich die Ausprägung im *moderaten* Energie-wendeszzenario und das Jahr 2050, in dem die Klimaschutzziele erreicht werden sollen, ausgewählt.

Für den beispielhaften Vergleich der Einflüsse von unterschiedlichen Perspektiven auf die MCA Ergebnisse wurden stichprobenartig die Gewichtungsfaktoren von drei Akteuren verwendet. Die Stichprobe hat selbstverständlich keinerlei statistische Relevanz und repräsentiert auch nicht die Einschätzung der gesamten Akteursgruppe. Die Auswahl der Akteure ist nicht repräsentativ sondern soll lediglich beispielhaft die Auswirkung unterschiedlichen Perspektiven auf die Bewertung verdeutlichen. Die Vergabe der Gewichtungsfaktoren durch die befragten Akteure nach der ‚Weighted Sum‘ Methode kann eine gewisse Verzerrung beinhalten. Die Tendenz der Akteure, kein Kriterium unberücksichtigt zu lassen, könnte zu einer homogeneren Verteilung der Gewichtungsfaktoren über alle Kriterien geführt haben. Wäre nicht nur die Gewichtung, sondern auch die Bewertung von den Akteuren vorgenommen worden, wäre die Bewertung vermutlich deutlich heterogener ausgefallen.

Die Umstellung auf innovative Stahlherstellungsverfahren sind nur ein möglicher Ansatz zur Emissionsreduktion in der Eisen- und Stahlindustrie. Auch eine verbesserte Energie-, Emissions- oder Materialeffizienz in bestehenden Verfahren (siehe Abschnitt 3.3.1 Verbesserte Hochofenroute) oder reduzierter Produkt- bzw. Servicebedarf der zu einer insgesamt reduzierten Stahlnachfrage führen würde, könnten einen erheblichen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014a, S. 1133–1134). Um die Klimaschutzziele in 2050 zu erreichen muss eine Kombination verschiedenster Maßnahmen verfolgt werden (Milford et al. 2013).

7 Standortabhängige Bewertung primärer Stahlherstellungsverfahren

Die Stahlindustrie hat die höchste wirtschaftliche Hebelwirkung aller Branchen in Deutschland (Rotering et al. 2012, S. 7). Diese entsteht durch die stark integrierten und vernetzten Wertschöpfungsketten dieser Branche. In der Fachliteratur wird deshalb vom „Rückgrat“ der deutschen Industrie gesprochen (Rotering et al. 2012, S. 1). In Deutschland und Europa wird Stahl überwiegend regional vertrieben (ECORYS SCS Group 2008, S. ii). Trotzdem ist die Stahlindustrie wie kaum eine andere Branche von globalen Veränderungen und Trends betroffen (Immerthal und von der Gracht, Heiko 2013, S. 4). Steigende Lohn- und Energiekosten, Umweltauflagen, Rohstoffknappheit, intensiver Wettbewerb und Technologiewandel haben direkte und schwerwiegende Einflüsse. Wichtige strategische Entscheidungen müssen frühzeitig getroffen werden. Sehen wir eine Zukunft mit flexiblen und hochspezialisierten Stahlherstellern in Deutschland und Europa, oder wird Stahl in Zukunft nur noch in Ländern mit Rohstoffreichtum hergestellt werden?

Die deutsche Stahlindustrie hebt sich im Bereich qualitativ hochwertiger Stähle und innovativer Produkte vom internationalen Wettbewerb ab. Besonders die engen Kundenbeziehungen und der individuelle Kundenservice garantieren einen regionalen Absatzmarkt. In den 10 Jahren vor der Wirtschaftskrise in 2008 konnte die Stahlindustrie nur ein jährliches Wachstum von 0,4% verzeichnen (Stahlinstitut VDEh 2014, S. 13). Die mittelfristigen jährlichen Wachstumsprognosen fallen mit 1 - 2% (European Commission 2011, S. 156), (Morgan Stanley Research Global 2013, S. 5) ebenfalls eher gering aus. Durch den starken internationalen Wettbewerb auf der einen Seite und die starke Abhängigkeit von Rohstoffimporten auf der anderen Seite, schaut die deutsche Stahlindustrie einer herausfordernden Zukunft entgegen. Noch verstärkt durch möglicherweise asymmetrische Umweltauflagen in Deutschland (EEG-Ausgleichsregelung, Kosten für CO₂-Emissionen) gegenüber andern Produktionsstandorten.

Entscheidend für die strategische Standortfrage aus Sicht der Stahlhersteller sind vor allem folgende Parameter:

- Produktionskosten
 - Rohstoffkosten
 - Transportkosten
 - Emissionskosten
 - Energiekosten
 - Lohnkosten
 - Steuern
- Regionaler Absatzmarkt (Quantität / Qualität)
- Regionales Fachkräfteangebot
- Bestehende Infrastruktur
- Versorgungssicherheit
- Synergien entlang der Wertschöpfungsketten (Zulieferer, Dienstleister, etc.)
- Regionale Umweltauflagen

Nachdem in Abschnitt 5 und 6 primäre Stahlherstellungsverfahren beispielhaft am Standort Ruhrgebiet (NRW) ganzheitlich bewertet wurden, soll im Folgenden eine ganzheitliche Bewertung der Verfahren an drei exemplarischen Standorten erfolgen. Diese Alternativstandorte sind Friesland in Deutschland (FRI), Minas Gerais in Brasilien (BRA) und Guangdong Provinz in China (CHN). FRI soll, als ein möglicher innerdeutscher Alternativstandort, Aufschlüsse über das Zukunftspotential der deutschen Stahlindustrie geben. BRA und CHN sind als Schwellenmärkte mit hohem eigenen Rohstoffvorkommen strategisch interessante Zukunftsmärkte, die exemplarisch ausgewählt werden (ECORYS SCS Group 2008, S. v).

Die Bewertung erfolgt, wie für den Ausgangsstandort (NRW), in drei Schritten. Zunächst werden die techno-ökonomischen Modelle standortspezifisch modifiziert und dann je Standort über den Betrachtungszeitraum von 2010 bis 2070 prognostiziert. Aus pragmatischen Gründen wird auf drei verschiedene Zukunftsszenarien (wie in Abschnitt 5) verzichtet, sondern für die Modellannahmen nur eine Ausprägung vergleichbar mit dem *moderaten* Szenario verwendet. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird dann im dritten Schritt eine umfassendere Bewertung durch eine MCA mit identischen Kriterien zu Abschnitt 6 durchgeführt. Natürlich kann das vereinfachte Anlagenmodell nicht alle relevanten Charakteristika der Standorte und Entscheidungskriterien der Betreiber mit berücksichtigen, sondern ist auf die vereinfachten Annahmen beschränkt, die sich standortabhängig verändern. Die beschriebenen Regionen in Deutschland, Brasilien und China werden exemplarisch ausgewählt, um drei sehr unterschiedliche Standortcharakteristiken vergleichen zu können. Diese Beispiele erheben weder den Anspruch, die wahrscheinlichsten noch die geeignetsten Standorte zu repräsentieren. Weltweit gibt es noch eine Vielzahl von weiteren möglichen Standorten für die Stahlherstellung.

7.1 Standortabhängige Modellannahmen

Im Folgenden werden die Annahmen mit der stärksten Standortabhängigkeit ausgewählt und dann gezielt variiert, um Simulationsergebnisse für die Beispielstandorte FRI, BRA, CHN abzuleiten (siehe Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2).

Friesland (FRI)

Friesland an der Deutschen Nordseeküste könnte zukünftig eine Region sein, die im Falle innovativer Stahlherstellungsverfahren strategisch günstig liegt. Einerseits gibt es mehrere große Häfen für den Übersee Transport von Erz und Stahlprodukten, andererseits gibt es voraussichtlich durch Offshore Windparks ein regionales nachfrageabhängiges Stromüberangebot und damit ideale Voraussetzungen für eine Wasserstoffherstellung. Insbesondere das wasserstoffbasierte H-DR-Verfahren hätte hier einen großen Kostenvorteil.

Die Industrieinfrastruktur in Friesland ist nicht so ausgeprägt wie beispielsweise im Ruhrgebiet, so dass die klassischen Synergien mit anderen Branchen (Zement, Automobil, Energie) erschwert sind. Da in Friesland bisher keine Stahlproduktion existiert, müssten alle Anlagenelemente des Herstellungsverfahrens neu aufgebaut werden. Entsprechend hoch wäre dann der Einfluss auf die regionale Wertschöpfung und auf regionale Arbeitsplätze.

Obwohl vielfältige andere deutsche Standorte in Frage kämen, wird für den folgenden Standortvergleich die friesische Küstenregion als exemplarischer Standort in Deutschland gewählt.

Minas Gerais (BRA)

Der Brasilianische Markt gilt als Zukunftsmarkt für die Stahlindustrie (ECORYS SCS Group 2008). Brasilien ist eines der erreichsten Länder der Welt und befindet sich im wirtschaftlichen Aufschwung, so dass die eigene Stahlnachfrage auch in Zukunft noch weiter ansteigen wird. Es zeichnet sich durch die Verfügbarkeit von günstigem inländischen Eisenerz und einem sehr hohen erneuerbaren Anteil im Strommix durch Wasserkraft aus (International Energy Agency (IEA) 2013, S. 304). Der politische Druck zur Emissionsreduktion in der Industrie ist nicht besonders hoch, da die strombedingte Emissionsintensität weit unter dem internationalen Durchschnitt liegt. Erst ab 2030 wird mit strengeren Umweltauflagen gerechnet, die zu langsam wachsenden Kosten für CO₂-Emissionen führen. Der Industriekunden-Strompreis ist durch hohe Netzentgelte und Steuern ca. 10% über dem Strompreisniveau in Deutschland (International Energy Agency (IEA) 2013). Durch den hohen Anteil an Wasserkraft im Stromsystem gibt es wenig Volatilität, so dass es keine variablen Preismechanismen gibt, die zeitweise Überschussstrom zum Nulltarif anbieten.

Trotz eigener Kohlevorkommen wird mit einem Kokskohleimport gerechnet, da die inländische Kohle durch einen hohen Schwefelanteil nicht als Kokskohle geeignet ist (International Energy Agency (IEA) 2013, S. 394). Der Bundesstaat Minas Gerais weist einerseits das höchste Eisenerzvorkommen Brasiliens auf (Brazilian Mining Association (IBRAM) 2012, S. 32) und ist andererseits durch die Nähe zur Infrastruktur der Küstenmetropole Rio de Janeiro logistisch gut angebunden. Damit ist der Staat Minas Gerais ein prädestinierter Standort für den folgenden Standortvergleich.

Guangdong Provinz (CHN)

China (CHN) ist als weltweit größter Stahlproduzent gleichzeitig der Markt mit der höchsten Wachstumsprognose und deshalb trotz politischer Unwägbarkeiten ein hoch interessanter Alternativmarkt für Stahlhersteller.

Inländisches Eisenerz ist durch den geringen Eisengehalt und die wenig automatisierten Abbauverfahren nicht wettbewerbsfähig (Brazilian Mining Association (IBRAM) 2012, S. 37), so dass Stahlerzeuger Eisenerz zu Weltmarktkonditionen im Ausland beziehen. Durch hohe inländische Kohlevorkommen steht Kokskohle zu 50% des übli-

chen Weltmarktpreises (International Energy Agency (IEA) 2007, S. 341) regional zur Verfügung (Transportstrecken von ca. 300km) (Tse 2013, S. 9.3) und soll entsprechend der Strategie der chinesischen Regierung auch im Inland genutzt werden (KPMG 2011).

Die CO₂-Intensität des Stromsektors in China ist derzeit sehr hoch (Fridley et al. 2012, S. 69), wird aber durch das schnelle Wachstum der EE reduziert. In China sind eher Gründe wie Feinstaubbelastung und strategische Unabhängigkeit von Rohstoffen für den schnellen EE-Ausbau ausschlaggebend. Kosten für CO₂-Emissionen in China werden für die Modellierung erst ab 2030 angenommen und nehmen dann nur langsam zu.

Staatliche Industriesubventionen sorgen derzeit für niedrige Industriekunden-Strompreise, die jedoch in den kommenden 20 Jahren abgebaut werden. Danach wird mit einem gegenläufigen Trend durch den schnellen Ausbau der EE gerechnet. Ein hoher Wasserkraftanteil sorgt für eine geringe Volatilität und macht damit variable Preismechanismen unnötig.

Im aktuellen Fünfjahresplan 2010-2015 legt die Regierung fest, dass neue Stahlanlagen nur noch in einigen Schwerpunktregionen in südlicher Küstennähe gebaut werden dürfen (KPMG 2011, S. 3). Eine dieser Schwerpunktregionen ist beispielsweise die Guangdong Provinz, die im Folgenden als Beispielstandort für China gewählt wird.

Zum Vergleich der drei Beispielstandorte, werden die Modelle aus Abschnitt 5.2 standortabhängig verändert. Tabelle 7-1 zeigt die Variationen an einigen zeitlich konstanten Annahmen.

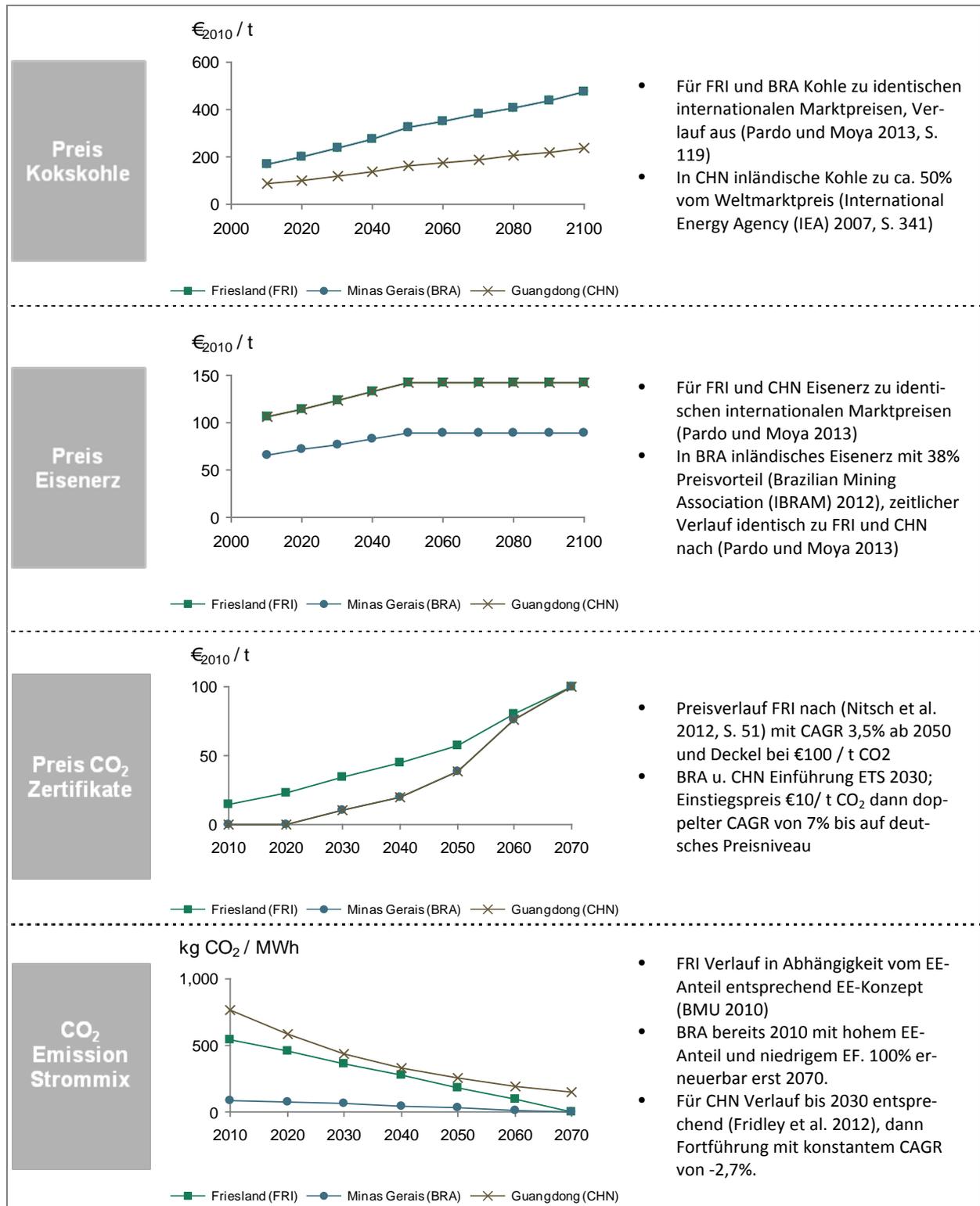
Tabelle 7-1: Änderung zeitlich konstanter Modellannahmen

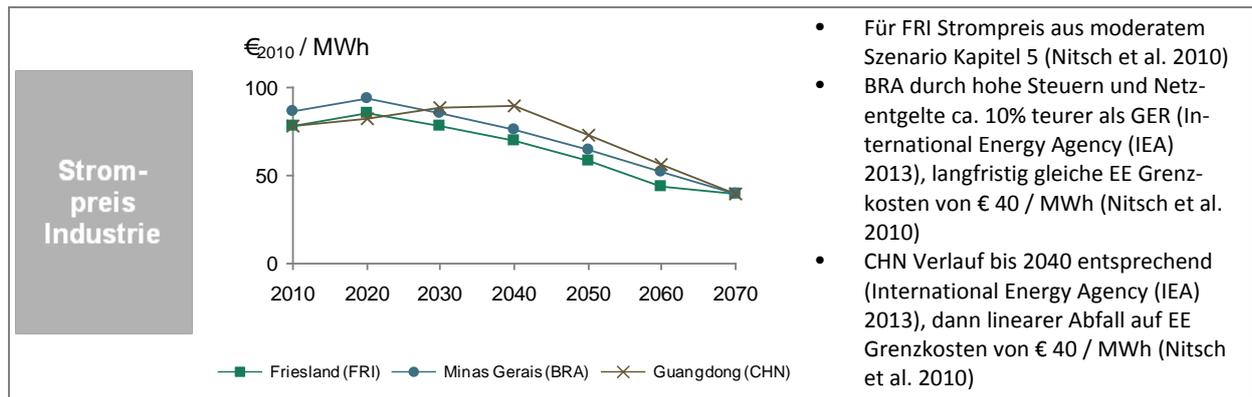
Annahmen	Friesland (Region Deutschland) - FRI	Minas Gerais (Bundesstaat Brasilien) - BRA	Guangdong (Provinz China) - CHN
Steuerlast Stahlerzeuger	25% (unverändert)	25% (unverändert)	19% (PKF International Tax Committee 2013)
Anteil günstiger Überschussstrom aus ‚Demand-side Management‘	H-DR: 100% (H ₂ -Speicher) EW: 50%	0%, nur Netzstrom	0%, nur Netzstrom
Lohnkosten	€ 38/t Rohstahl (unverändert)	-20% (€ 30/t Rohstahl)	- 50% (€ 19 / t Rohstahl)
Transportdistanz Reduktionsmittel	Kohle: unverändert H ₂ : keine Veränderung, H ₂ wird vor Ort erzeugt	Kohle: unverändert H ₂ : keine Veränderung, H ₂ wird vor Ort erzeugt	Kohle: 300 km Schienentransport H ₂ : keine Veränderung, H ₂ wird vor Ort erzeugt

Von den zeitabhängigen Modellannahmen aus Abschnitt 5.4.4 wird für den Standort Friesland das *moderate* Szenario herangezogen. Von den 11 Annahmen werden fünf standortabhängig variiert (siehe Tabelle 7-2). Für diese wird im Vergleich zum Standort FRI noch eine Ausprägung für die Standorte BRA und CHN entwickelt. Alle anderen Annahmen bleiben wie im Ausgangsmodell bestehen, da keine relevanten standortspezifischen Unterschiede erwartet werden. In Tabelle 7-2 werden für die fünf

standortabhängigen Annahmen die drei unterschiedlichen Verläufe (FRI, BRA, CHN) graphisch dargestellt.

Tabelle 7-2: Änderung zeitabhängiger Modellannahmen





7.2 Standortabhängige Modellergebnisse

Die techno-ökonomische Auswertung der Herstellungsmodelle wird basierend auf den veränderten Annahmen erneut durchgeführt. Die Ergebnisse werden für die vier ausgewählten Herstellungsverfahren (BF-BOF, BF-CCS, H-DR, EW) je Standort (FRI, BRA, CHN) für einige prägnante Zeitpunkte (2010, 2030, 2050, 2070) dargestellt (siehe Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2).

Profitabilität

Als Indikator für die Profitabilität wird der Kapitalwert (NPV) der Investition in eine der vier Anlagentechnologien herangezogen. In Abbildung 7-1 werden in den Horizontalen die NPVs zwischen den drei Beispielstandorten und in den Vertikalen die NPVs entlang der Zeitachse verglichen. Die Absolutwerte der NPVs sind weniger aussagekräftig, da sie durch Unsicherheiten in übergreifenden Modellannahmen (Kapitalkosten, Steuern, etc.) verschoben sein könnten. Der relative Unterschied der NPVs zwischen Herstellungsverfahren oder Standorten gibt jedoch wichtige Aufschlüsse über die Attraktivität der Verfahren.

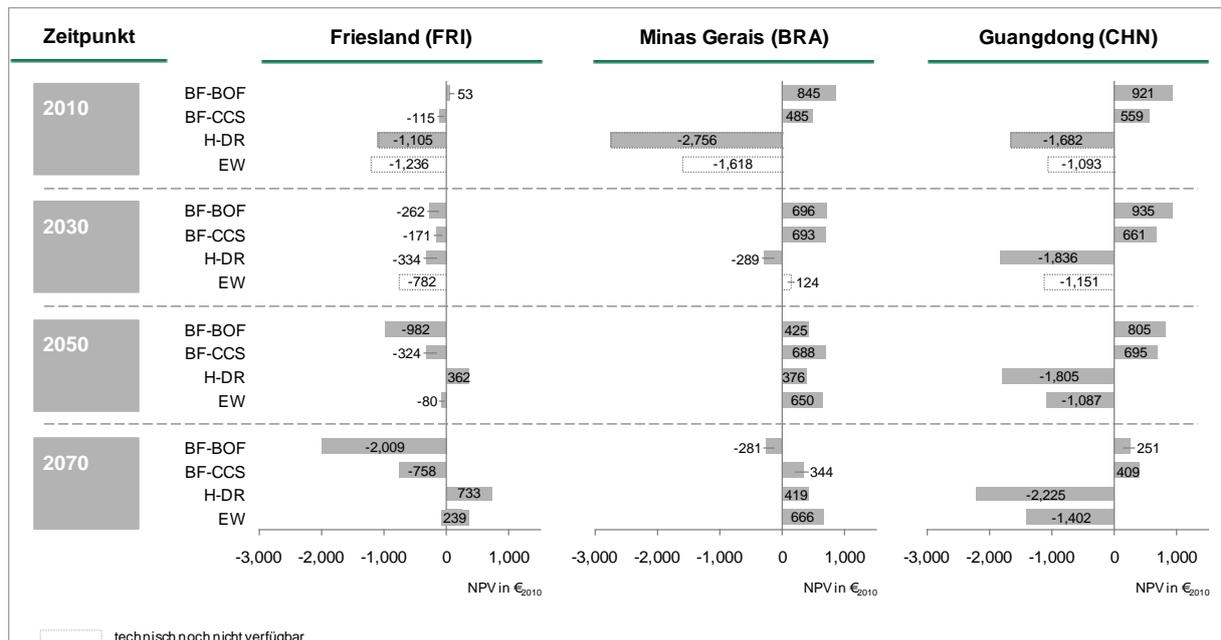


Abbildung 7-1: Verfahrenvergleich der Profitabilität (NPV) an drei Beispielstandorten

Unter den beschriebenen Annahmen ist im Referenzjahr 2010 die Profitabilität der hochofenbasierten Verfahren (BF-BOF und BF-CCS) in den BRIC⁶⁰ Ländern durch günstige Rohstoffpreise und fehlende Emissionsbeschränkungen deutlich höher als in FRI. H-DR kann durch den hohen Strombedarf nicht profitabel betrieben werden, da die angenommenen Strompreise zu hoch sind.

In 2030 könnte in FRI BF-CCS das profitabelste Verfahren sein. Der leicht negative NPV aller Verfahren lässt erkennen, dass die Stahlindustrie in Deutschland in dieser Übergangsphase auf Unterstützung angewiesen wäre, oder zumindest nicht 100% der Emissionskosten tragen könnte. H-DR wäre noch an allen Standorten deutlich unprofitabler als die hochofenbasierten Verfahren. An den beiden BRIC Standorten wären die hochofenbasierten Verfahren deutlich profitabler als in FRI. Hier wird das Risiko des Abwanderns der konventionellen Stahlerzeugung aus Deutschland deutlich.

In 2050, unter der Voraussetzung dass alle vier Herstellungsverfahren im industriellen Maßstab verfügbar sind, wäre in FRI H-DR das profitabelste Verfahren. In BRA wäre EW durch den hohen EE-Anteil im Strommix profitabler als H-DR. In 2050 wären hier alle vier Verfahren profitabel (NPV > 0), was die hohe Attraktivität von Brasilien als Standort für die Stahlherstellung verdeutlicht. In CHN wären weiterhin nur die hochofenbasierten Routen profitabel. Hier wird kein günstiger Überschussstrom oder Kostenvorteil durch Emissionsreduktion angenommen, der die beiden innovativen Verfahren (H-DR und EW) begünstigen würde.

In 2070 wäre unter dem angenommenen Verlauf der Transformation in FRI das H-DR und in BRA das EW-Verfahren die profitabelste Form, Stahl herzustellen. In CHN wür-

⁶⁰ BRIC = „Brasil – Russia – India – China“, Sammelbegriff für die wichtigsten Schwellenländer

den die hochofenbasierten Routen am profitabelsten bleiben. Die nach wie vor höheren indirekten Emissionen durch den hohen Stromverbrauch, würden CHN als Standort für die innovativen Herstellungsverfahren unattraktiver machen.

In der ersten Jahrhunderthälfte, in der die innovativen Herstellungsverfahren noch kaum profitabel sind, erscheinen die außereuropäischen Standorte BRA und CHN attraktiver. CHN durch eine hohe Profitabilität der hochofenbasierten Verfahren und BRA zusätzlich durch die CO₂-arme Elektrizität auch für die innovativen Verfahren H-DR und besonders EW. Hier ist die Gefahr der Abwanderung vom Standort Deutschland am höchsten. In der zweiten Jahrhunderthälfte übernehmen die innovativen Verfahren in FRI und BRA die höchste Profitabilität und sichern damit langfristig auch wieder die Attraktivität des Standortes Deutschland. Gerade über das H-DR-Verfahren könnte in Deutschland, mit einem hohen Anteil volatiler erneuerbarer Stromquellen, Stahl zu wettbewerbsfähigen Konditionen produziert werden.

Am Standort BRA wären die innovativen Verfahren früher profitabel (hoher EE-Anteil im Strommix) und die konventionellen Verfahren länger profitabel (weniger strenge Umweltauflagen), so dass Brasilien in der Übergangsphase um 2030-2050 der attraktivste Stahlstandort sein könnte.

Am Standort CHN bleiben unter den getroffenen Annahmen die hochofenbasierten Verfahren deutlich profitabler als die innovativen Verfahren. Bis zum Ende des Betrachtungszeitraums in 2070 könnte Stahl hier über die Hochofenroute wettbewerbsfähig produziert werden. Hier wird das hohe Risiko von „Carbon Leakage“ durch Abwanderung der emissionsintensiven Herstellungsverfahren nach China deutlich.

Treibhausgasemission

Als weiteres wesentliches Modellierungsergebnis werden im Folgenden die THG-Emissionen der Herstellungsverfahren betrachtet (siehe Abbildung 7-2). Die direkten prozessualen CO₂-Emissionen der jeweiligen Anlage werden in den Modellen konstant gehalten. Die zeitliche Veränderung der Emissionen resultiert aus indirekten Emissionen, größtenteils durch den Stromverbrauch und Emissionsgutschriften.

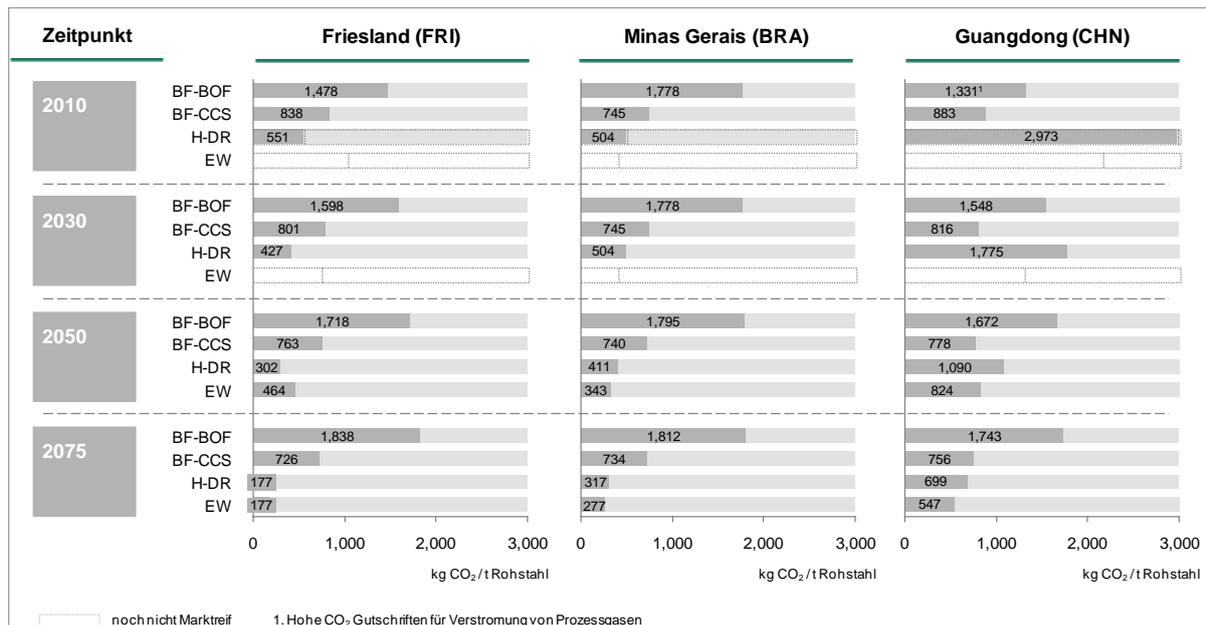


Abbildung 7-2: Verfahrenvergleich der CO₂-Emission an drei Beispielstandorten

Da Brasilien aktuell schon einen EE-Anteil von ca. 85% (International Energy Agency (IEA) 2013, S. 304) hat, haben Gutschriften für die Verstromung von Prozessgasen den geringsten Effekt. Rechnerisch hat deshalb die konventionelle Hochofenroute am Standort BRA die höchste CO₂-Emission. Der umgekehrte Effekt tritt dagegen in China auf. Durch die geringe Emissionseffizienz chinesischer Kraftwerke wird durch die Verbrennung von Prozessgasen aus der Hochofenroute Emission erheblich reduziert.

BF-CCS hat trotz des erhöhten Strombedarfs zur CO₂-Abscheidung am Standort BRA, wegen des hohen EE-Anteils, die größte Emissionsreduktion (bis 2050).

Unter den getroffenen Annahmen über die CO₂-Intensität der Stromerzeugung in CHN, würden die beiden innovativen Verfahren H-DR und EW bis 2030 die höchsten CO₂-Emissionen verursachen, da der hohe Strombedarf hohe indirekte Emissionen verursacht. Aktuell würde H-DR in China ca. zweimal so viel CO₂ emittieren wie das BF-BOF-Verfahren. Wie am Beispiel CHN zu sehen ist, kann ein technologischer Wandel also nur in Kombination mit erneuerbarer Stromerzeugung auch zu Emissionsreduktionen führen.

Unter der Voraussetzung der Verfügbarkeit von Überschussstrom am Standort FRI, wäre H-DR ab 2030 das emissionsärmste Stahlherstellungsverfahren weltweit und verdeutlicht so die große Chance für den Standort FRI als Pionier der CO₂-armen Stahlherstellung.

Am Standort BRA wäre EW, ab Marktreife in 2040, das emissionsärmste Verfahren, da der verbrauchte Netzstrom durchweg zu einem hohen Anteil aus erneuerbaren Stromquellen gewonnen wird und keine Kohle zu Weltmarktpreisen importiert werden muss. Der Effizienzvorteil der Elektrolyse gegenüber H-DR würde an diesem

Standort den Kostenvorteil durch günstigen Wasserstoff aus Überschussstrom überwiegen.

Der Vergleich der Profitabilität und der CO₂-Emission an den Beispielstandorten lässt schon erste Vor- und Nachteile der Standorte erkennen. Die Ergebnisse sind jedoch nur eingeschränkt aussagekräftig. Zu den Unsicherheiten der Annahmeprojektionen kommen noch weitere Unsicherheiten durch Annahmen aus verschiedenen Standorten hinzu. Sowohl die Datenverfügbarkeit als auch die Anzahl an Szenariostudien, die zum Vergleich herangezogen werden können, ist für die Standorte BRA und CHN deutlich reduziert.

Die Standortwahl hat eine Vielzahl von Einflüssen auf die Modellannahmen, die nicht alle berücksichtigt werden können. So werden in der vorliegenden Arbeit diejenigen Annahmen geändert, die die höchste Standortabhängigkeit haben. Wie schon in Abschnitt 5.1 bei der Beschreibung der Modellgrenzen erläutert, wird die Wertschöpfungskette des Reduktionsmittels mit berücksichtigt (Kohle, Wasserstoff, Strom). Die Wertschöpfungsschritte des Eisenerzes jedoch werden nicht mit berücksichtigt. Gerade beim Standort BRA, an dem regionales Eisenerz ohne große Transportwege verfügbar ist, kann der entstehende Emissionsvorteil so nicht komplett abgebildet werden. Der Kostenvorteil wird über die Annahme von vergünstigten inländischen Eisenerzpreisen berücksichtigt (siehe Tabelle 7-2).

Wie schon in der Diskussion der Ergebnisse der Ausgangsmodelle am Standort NRW beschrieben (siehe Abschnitt 6.5), ist die Bewertung aus einem quantitativen techno-ökonomischen Modell nicht sehr umfassend. Auch in diesem standortabhängigen Vergleich soll der Bewertungshorizont durch die Verwendung einer MCA erweitert werden. So werden die identischen Kriterien der MCA aus Abschnitt 6 verwendet (siehe Tabelle 6-1), um im Folgenden eine ganzheitliche Bewertung auf Grundlage der drei exemplarischen Standorte durchzuführen.

7.3 Standortabhängige MCA

Von den 12 MCA Kriterien werden im Folgenden nur die Kriterien diskutiert, bei denen durch die alternativen Standorte eine veränderte Bewertung zu erwarten ist. Die veränderten Rangfolgen gegenüber dem Ausgangsstandort NRW werden in Abbildung 7-3 gegenüber gestellt. Im Folgenden werden die Hintergründe der veränderten Bewertungen beschrieben.

	NRW	FRI	BRA	CHN
Verfügbarkeit Reduktionsmittel (1.2)	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-CCS 2 BF-BOF 3 EW 4 H-DR 	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 EW 3 BF-CCS 4 BF-BOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1 EW 2 BF-CCS 3 BF-BOF 4 H-DR 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-CCS 2 BF-BOF 3 EW 4 H-DR
Synergien/ Konflikte mit anderen Bereichen (1.3)	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 BF-BOF 3 --- 4 EW, BF-CCS 	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 BF-BOF 3 --- 4 EW, BF-CCS 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-BOF 2 --- 3 BF-CCS, H-DR 4 EW 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-BOF 2 BF-CCS 3 H-DR 4 EW
Umsetzungs-intensität (2)	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-BOF 2 BF-CCS 3 H-DR 4 EW 	<ol style="list-style-type: none"> 1 --- 2 BF-BOF, H-DR 3 --- 4 BF-CCS, EW 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-BOF 2 BF-CCS 3 H-DR 4 EW 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-BOF 2 BF-CCS 3 H-DR 4 EW
Einfluss auf Industriestrukturen am Standort (4.3)	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 EW 3 BF-CCS 4 BF-BOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 EW 3 BF-CCS 4 BF-BOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-CCS 2 BF-BOF 3 EW 4 H-DR 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-CCS 2 BF-BOF 3 EW 4 H-DR
Gesellschaftliche Akzeptanz (5)	<ol style="list-style-type: none"> 1 EW 2 H-DR 3 BF-BOF 4 BF-CCS 	<ol style="list-style-type: none"> 1 EW 2 H-DR 3 BF-BOF 4 BF-CCS 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-CCS 2 BF-BOF 3 EW 4 H-DR 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-CCS 2 BF-BOF 3 EW 4 H-DR
Profitabilität (6)	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 EW 3 BF-CCS 4 BF-BOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 EW 3 BF-CCS 4 BF-BOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-CCS 2 EW 3 BF-BOF 4 H-DR 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-BOF 2 BF-CCS 3 EW 4 H-DR
THG-Emission (10)	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 EW 3 BF-CCS 4 BF-BOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1 H-DR 2 EW 3 BF-CCS 4 BF-BOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1 EW 2 H-DR 3 BF-CCS 4 BF-BOF 	<ol style="list-style-type: none"> 1 BF-CCS 2 EW 3 H-DR 4 BF-BOF

Abbildung 7-3: Änderung der standortabhängigen MCA Bewertung (nur Kriterien mit Änderung gegenüber Ausgangsmodell am Standort NRW)

Verfügbarkeit Reduktionsmittel (1.2)

Am Standort FRI wird die Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms zur Erzeugung von Wasserstoff am höchsten angenommen. Durch die Volatilität der lokalen Windkraftanlagen ist der erneuerbare Strom sehr günstig verfügbar (H-DR: Rang 1). Von diesen niedrigen Strompreisen profitiert auch das EW-Verfahren. Die hochofenbasierten Verfahren könnten über die Seehäfen am Standort mit Kohle beliefert werden. Die Abhängigkeit von ausländischer Kohle ist jedoch ein Risiko für die Verfügbarkeit (BF-BOF: Rang 4).

In BRA sind durch einen hohen Anteil von Wasserkraft im Strommix variable Preismechanismen nicht notwendig, so dass kein günstiger Überschussstrom angenommen wird (H-DR: Rang 4). Der Dauerbetrieb der Eisenerzelektrolyseure mit erneuerbarem Netzstrom wäre am Standort BRA ideal möglich (EW: Rang 1). Kokskohle wird am Standort BRA importiert, da inländische Kohle einen zu hohen Schwefelanteil für die Kokerei hat und zusätzlich ökologisch problematische Schwefeloxidemissionen verursacht. Im Notfall von Importengpässen könnte durch aufwendige Aufbereitung auch inländische Kokskohle verwendet werden (BF-CCS: Rang 2; BF-BOF: Rang 3).

In CHN mit den weltweiten größten Kohlevorkommen ist die Verfügbarkeit für die hochofenbasierten Routen ideal (BF-CCS: Rang 1). Die kontinuierliche Stromerzeugung aus Wasserkraft und Kohlekraftwerken erschwert die günstige Wasserstoffherstellung aus Überschussstrom (H-DR: Rang 4).

Synergien / Konflikte mit anderen Bereichen (1.3)

Am Standort FRI würden die Synergien der konventionellen Verfahren (BF-BOF) durch den innerdeutschen Standortwechsel verloren gehen, oder werden durch größere Transportdistanzen zumindest geschwächt. Die grundsätzliche Rangfolge ändert sich gegenüber Standort NRW jedoch nicht.

Am Standort BRA ist ohne große Stromvolatilität die Wahrscheinlichkeit einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft deutlich geringer. Die wichtigen Synergieeffekte des H-DR-Verfahrens entfallen somit. Gleichzeitig treten Synergien der hochofenbasierten Verfahren mit anderen Branchen in Brasilien auf (Automobilindustrie, Zementindustrie, Energiesektor) (BF-BOF: Rang 1).

Am Standort CHN sieht die Situation ähnlich wie am Standort BRA aus. Lediglich die Konflikte durch Investitionen für die CCS Technologie würden in einem zentralistischen Land der Größe von China gemildert auftreten (BF-CCS: Rang 2).

Umsetzungsintensität (2)

Im Vergleich zum bestehenden Standort NRW hätte ein Standortwechsel an sich schon eine erhöhte Umsetzungsintensität. Die Rangfolge der Verfahren ändert sich als solches jedoch mit der Ausnahme für den Standort FRI nicht.

Am Standort FRI, mit einer bestehenden Direktreduktionsanlage in Hamburg (Wörtler et al. 2013, S. 8) und der Expertise für die innovativen Technologien ergäbe sich für die beiden innovativen Verfahren eine etwas geringere Umsetzungsintensität als an den anderen Standorten. Durch die innerdeutsche Umsiedelung der großen Anlagen des BF-BOF-Verfahrens ergibt sich eine ähnlich hohe Umsetzungsintensität wie für die Neuansiedlung der neuartigen aber kleineren Verfahren H-DR (BF-BOF u. H-DR: Rang 2). Durch die Technologieführerschaft und die Expertise in Deutschland werden die Umsetzungsintensitäten der innovativen Verfahren als leicht reduziert angenommen. Durch die CCS Technologie im BF-CCS-Verfahren und durch den erhöhten Flächenbedarf der Eisenerzelektrolyseure im EW-Verfahren ist die Umsetzungsintensität dieser beiden Verfahren etwas höher (BF-CCS u. EW: Rang 4).

Auswirkung auf regionale Wertschöpfungsschritte (4.2)

Dieses Kriterium hat eine sinnvolle Bewertung zwischen den etablierten und neuartigen Verfahren am bestehende Stahlstandort NRW ermöglicht. Für den Vergleich der drei alternativen Stahlstandorte müssen für alle Herstellungsverfahren alle Wertschöpfungsschritte am Standort neu aufgebaut werden, so dass alle Verfahren denselben Rang bekämen. Eine Differenzierung ist durch dieses Kriterium also nicht mehr gegeben, so dass es für die standortabhängige MCA nicht weiter berücksichtigt wird.

Einfluss auf Industriestrukturen am Standort (4.3)

Am Standort FRI ist die Rangfolge identisch zum Referenzstandort NRW. Langfristig betrachtet wird für die beiden innovativen Verfahren H-DR und EW der positivere Einfluss auf Industriestrukturen am Standort angenommen. Zwar weist das etablierte Verfahren mehr gegenseitige Abhängigkeiten mit anderen Industrien auf, spätestens ab 2050 wäre BF-BOF aber nicht mehr wettbewerbsfähig, so dass dann auch andere Industriestrukturen in Mitleidenschaft gezogen würden, falls es keinen Ersatz gäbe (BF-BOF: Rang 4).

Am Standort BRA und CHN könnten über den gesamten Betrachtungszeitraum BF-CCS (und bis auf BRA in 2070 auch BF-BOF) wettbewerbsfähig betrieben werden. Durch das breite Spektrum an Stahlqualitäten würden die Strukturen verschiedenster Industrien in Standortnähe begünstigt. Für die innovativen Verfahren gäbe es zwar am Standort BRA auch profitable Betriebsbedingungen, die Interdependenzen zu anderen Industrien sind jedoch geringer (H-DR: Rang 4).

Gesellschaftliche Akzeptanz (5)

Am Standort FRI ist die Rangfolge der gesellschaftlichen Akzeptanz identisch zum Referenzstandort NRW.

Da die Popularität einer umweltfreundlichen Technologie in BRA und besonders in CHN als weniger hoch als in Deutschland angenommen wird, werden die etablierten Verfahren in den BRIC Standorten höher eingestuft (BF-BOF: Rang 1). Sicherheitsaspekte werden jedoch an allen Standorten berücksichtigt, so dass die Risiken im Zusammenhang mit CCS und H₂-Anwendung zu einer leicht geringeren Akzeptanz führen (H-DR: Rang 4).

Profitabilität (6)

Die Rangfolge der Profitabilität in 2050 am Standort FRI entspricht der Rangfolge des Referenzstandortes NRW im moderaten Szenario (siehe Abbildung 7-1). Durch die Annahmen der hohen Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom belegt H-DR klar Rang 1. Die hochofenbasierten Verfahren wären durch hohe Kosten für CO₂-Emissionen und fossile Energieträger unprofitabel.

Am Standort BRA sind unter den getroffenen Annahmen in 2050 alle Verfahren profitabel. Die hochofenbasierten Verfahren profitieren von niedrigen Kosten für Emissionszertifikate und die innovativen Verfahren vom niedrigen Emissionsfaktor des Strommix. Mit leichtem Vorsprung hat BF-CCS die höchste Profitabilität, da der erneuerbare Strommix zu einer deutlichen Emissionsreduktion führt (Rang 1). EW, im Dauerbetrieb mit erneuerbarem Strommix, liegt nur knapp dahinter auf Rang 2 und scheint für Brasilien langfristig das attraktivste Verfahren zu sein. BF-BOF und H-DR liegen auf Rang 3 und 4.

Am Standort CHN ist auch in 2050 noch das etablierte BF-BOF-Verfahren das profitabelste Verfahren (BF-BOF: Rang 1), dicht gefolgt von BF-CCS, das im Fünfjahresplan der Landesregierung einen wichtigen Stellenwert hat (KPMG 2011). Die beiden innovativen Verfahren sind durch höhere Strompreise und höhere indirekte Emissionen aus dem höheren Strombedarf unprofitabler (H-DR: Rang 4).

THG-Emission (10)

Im Jahr 2050 ist die Rangfolge der Emissionseffizienz der Verfahren am Standort FRI identisch zum Referenzstandort NRW (siehe Abbildung 7-2). Die Verwendung von erneuerbarem Überschussstrom in der Nähe der Quelle führt zu einer nochmals verbesserten Emissionseffizienz von H-DR (H-DR: Rang 1), dicht gefolgt von EW. Die höchste Emissionsintensität zeigt BF-BOF (BF-BOF: Rang 4).

Am Standort BRA ist die Emissionsintensität der innovativen Verfahren durch den geringen Emissionsfaktor des Strommix sehr gering. Durch den höheren Strombedarf von H-DR liegt das EW-Verfahren auf Rang 1. Durch die CCS Technologie werden die Emissionen der hochofenbasierten Verfahren etwas reduziert (BF-BOF: Rang 4).

Am Standort CHN in 2050 hat BF-BOF die höchste CO₂-Emission (BF-BOF Rang 4). Die indirekten Emissionen des stromintensiven H-DR-Verfahrens sind höher als die des EW-Verfahrens (H-DR: Rang 3; EW: Rang 2). Die geringste Emission weist BF-CCS auf. (BF-CCS: Rang 1).

Die veränderten Bewertungen der standortabhängigen Kriterien geht nun in das gleichgewichtete MCA Gesamtergebnis mit ein und ist in Abbildung 7-4 bis Abbildung 7-7 dargestellt. In folgender Ergebnisbeschreibung wird nur auf die relativen Veränderungen gegenüber der Ausgangsbewertung am Standort NRW eingegangen.

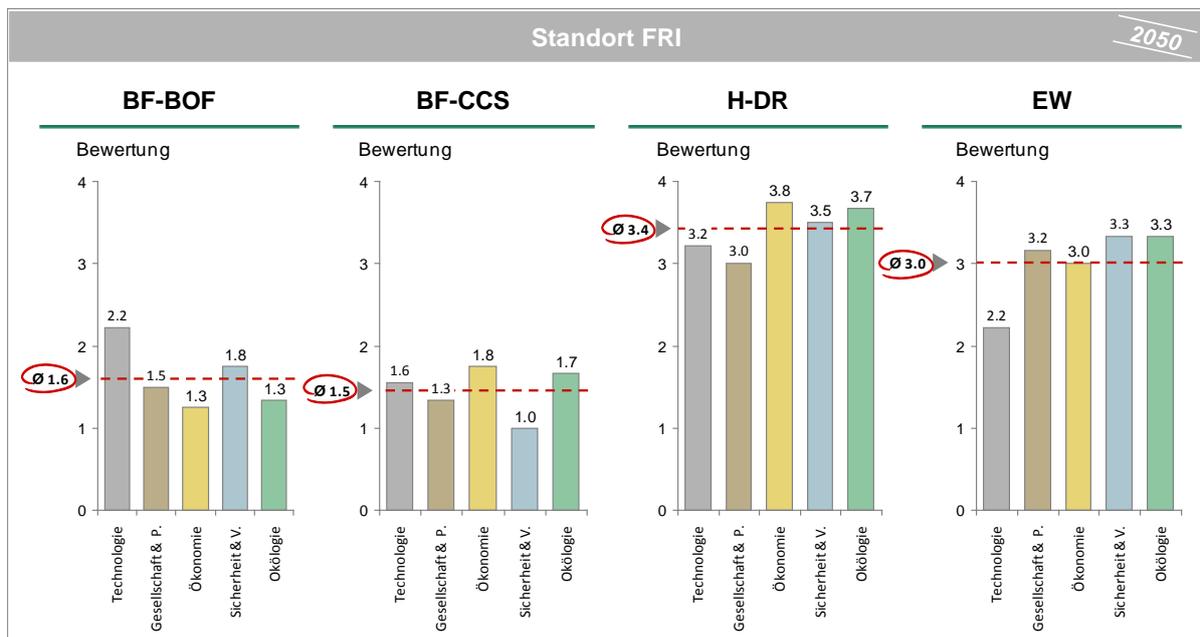


Abbildung 7-4: MCA Ergebnisse am Standort FRI

Im Vergleich zu den MCA Ergebnissen für den Ausgangsstandort NRW in Abschnitt 6.4, zeigen die hochofenbasierten Verfahren am alternativen innerdeutschen Standort FRI eine reduzierte *Systemkompatibilität* und einen reduzierten *Beitrag zur regionalen Wertschöpfung* (siehe Abbildung 7-4). Die relativen Vorteile des etablierten Verfahrens BF-BOF gehen am neuen Standort verloren und die innovativen Verfahren werden höher bewertet. Das H-DR-Verfahren wird durch die angenommene lokale Überschussstrom-Verfügbarkeit am Standort FRI weiter bevorzugt. Die höhere Bewertung von H-DR resultiert aus dem Strompreisvorteil durch die selektive Überschussstrom-Nutzung und die weitreichenden Synergien durch die Wasserstoffanwendung (Energiespeicher, Kraftstoff für Transport).

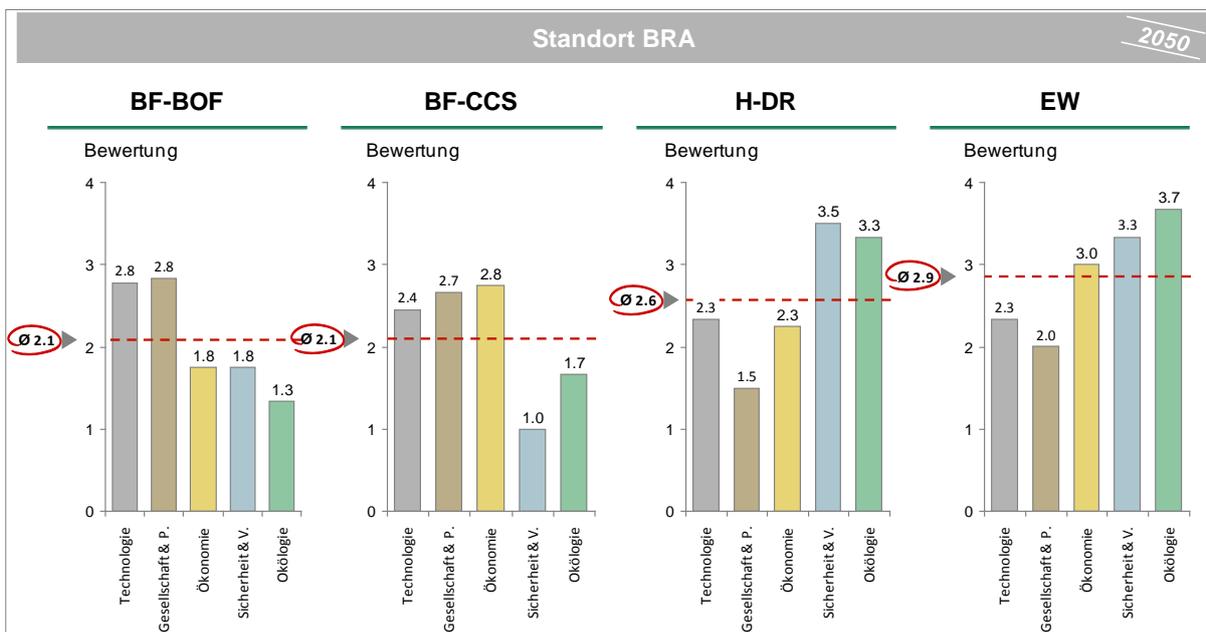


Abbildung 7-5: MCA Ergebnisse am Standort BRA

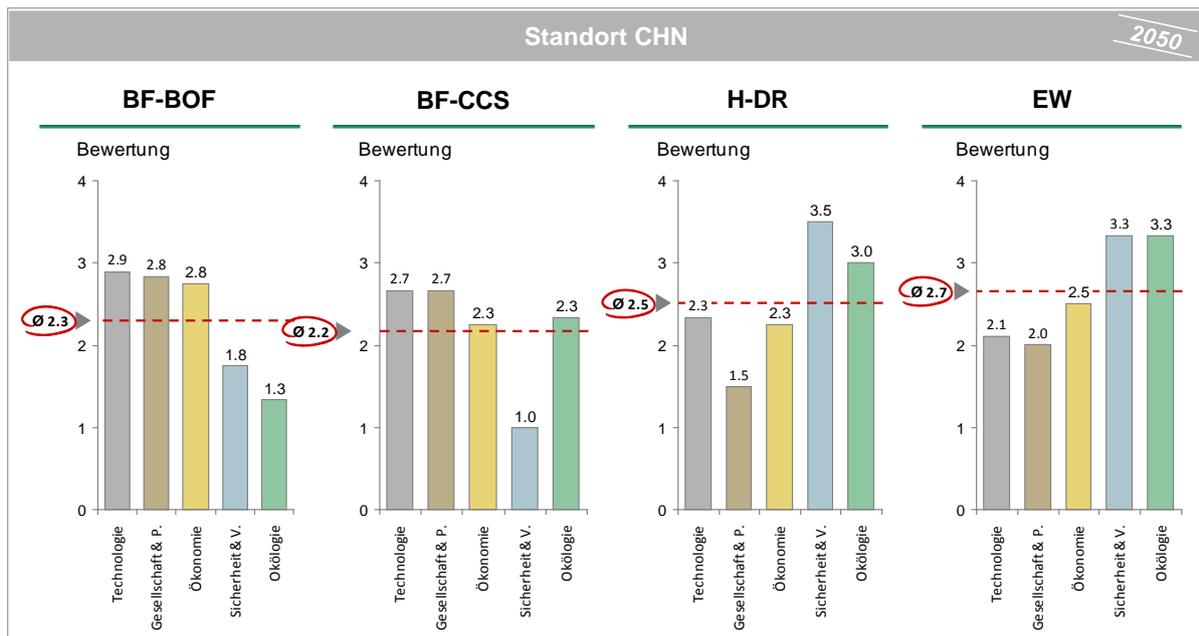


Abbildung 7-6: MCA Ergebnisse am Standort CHN

Am Standort BRA ist die Bewertung der Verfahren etwas ausgeglichener (siehe Abbildung 7-5). Auch die hochofenbasierten Verfahren schneiden in den Kategorien *Technologie* und *Gesellschaft & Politik* gut ab. Sie haben durch eine längere Profitabilität einen wichtigen Beitrag zu Erhaltung von Industriestrukturen und eine hohe Systemkompatibilität. Einerseits ist die Verfügbarkeit von Rohstoffen am Standort BRA besser und andererseits sind die CO₂-Kosten durch weniger strikte Klimaschutzmaßnahmen deutlich geringer. Durch den sehr hohen EE-Anteil im Strommix ist EW das höchstbewertete Verfahren, sofern es technologisch verfügbar sein sollte.

Am Standort CHN sind alle Verfahren sehr ähnlich bewertet. Die höchste Bewertung erhält mit knappem Vorsprung EW vor dem H-DR-Verfahren. Die beiden anderen Verfahren liegen max. 15% darunter. Ähnlich wie am Standort BRA werden die hochofenbasierten Verfahren durch die hohe Rohstoffverfügbarkeit und geringe CO₂-Kosten im Vergleich zum Ausgangsstandort NRW sehr hoch bewertet. Umwelt- und besonders die Sicherheitskriterien führen zu hohen Bewertungen bei den innovativen Verfahren.

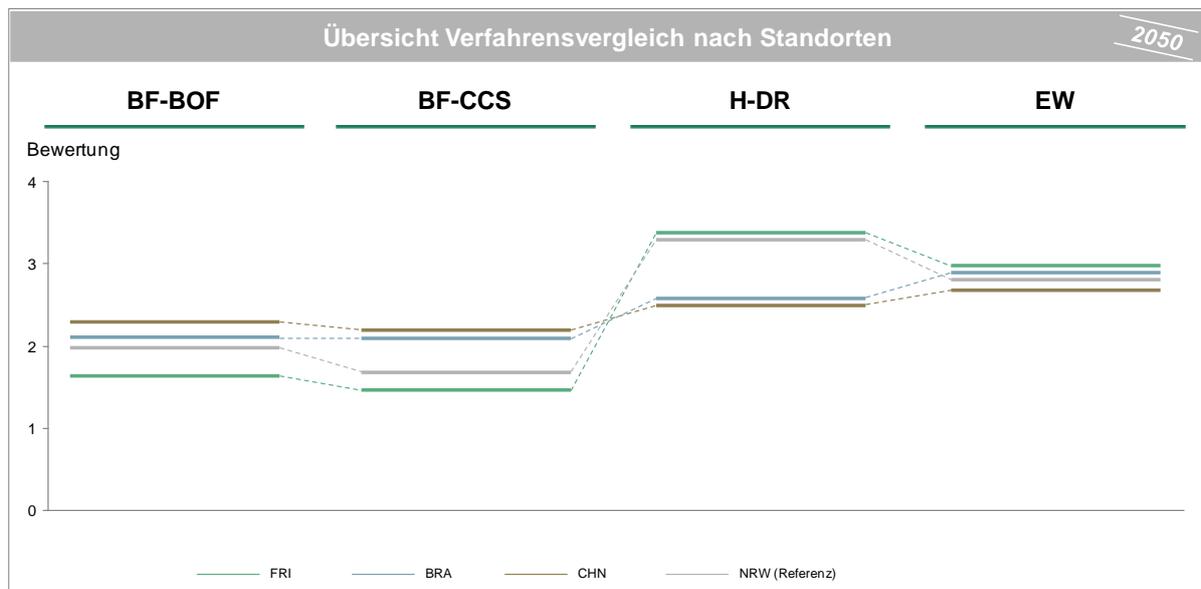


Abbildung 7-7: MCA Standort-Direktvergleich

Zusammenfassend sind die standortspezifischen Bewertungsprofile der MCA in Abbildung 7-7 gegenübergestellt.

Wie durch die grüne Linie dargestellt, erhalten am Standort FRI die innovativen Verfahren (insbesondere H-DR) die höchsten Bewertungen. Durch die Annahmen über die Abhängigkeit von ausländischen Rohstoffen und vor allem die politischen Entscheidungen zu einer konsequenten Klimaschutzpolitik, wird voraussichtlich bis 2050 das Umfeld für innovative Stahlherstellungsverfahren geschaffen sein. Wie in Abschnitt 7.2 identifiziert wurde, liegt genau hierin eine große Chance für den Standort FRI Weltmarktführer für die CO₂-arme Herstellung von Spezialstählen zu werden.

Wie durch die blaue Linie dargestellt, ist BRA unter den getroffenen Annahmen, durch die hohen inländischen Eisenerzvorkommen als Stahlstandort besonders geeignet. Der hohe EE-Anteil (besonders Wasserkraft und Biomasse) im Strommix führt zu einer hohen Bewertung des EW-Verfahrens. Durch die Annahme weniger strikter Emissionsrichtlinien sind auch die hochofenbasierten Verfahren in BRA deutlich höher als am Standort FRI bewertet.

Das braune Bewertungsprofil vom Standort CHN zeigt für die hochofenbasierten wie auch die innovativen Verfahren eine ähnlich hohe Bewertung. Ideale Rohstoffverfügbarkeit und die Annahme weniger strenger Umweltauflagen führen zu einer hohen Bewertung der hochofenbasierten Verfahren. Hohe Wachstumsraten beim Ausbau erneuerbarer Energieerzeugung und geringere Sicherheitsrisiken und Luftverschmutzung führen zu einer hohen Bewertung von EW, etwas höher als bei H-DR. Der Standort CHN ermöglicht als einziger in diesem Vergleich auch langfristig noch den Betrieb der hochofenbasierten Verfahren. Die Annahme günstiger lokaler Verfügbarkeit von Kohle und geringerer Kosten für CO₂-Emissionen reduzieren den Druck einen Technologiewechsel anzustreben.

7.4 Quo vadis Stahlindustrie?

Die klassische deutsche Stahlindustrie, die einen wesentlichen Anteil am industriellen Aufschwung des vergangenen Jahrhunderts hatte, wird es unter ambitionierten Klimaschutzbedingungen mittelfristig nicht mehr geben. Unter der Annahme der konsequenten Umsetzung der geplanten Energiewende bahnt sich unweigerlich ein radikaler Wandel an. Entweder adaptiert sich die Stahlindustrie durch Einführung innovativer emissionsarmer Technologien an Klimaschutzziele der BRD und der EU, oder die Stahlindustrie, zumindest aber die Rohstahlherstellung, wandert in weniger reguliertes Ausland mit hohem Rohstoffvorkommen, wie z.B. BRA oder CHN ab (ECORYS SCS Group 2008, S. v). Die Wachstumsmärkte mit hoher Stahlnachfrage liegen ohnehin in BRIC Ländern (Immerthal und von der Gracht, Heiko 2013, S. 11–12).

Das Abwandern würde nicht nur schwerwiegende Effekte für die gesamte Industrie- und Arbeitsmarktsituation in Deutschland haben, sondern auf globaler Ebene eher zu einer Steigerung der CO₂-Emissionen führen (Carbon-Leakage) (Baeza 2008, S. 1) und damit den Klimaschutzziele der EU zuwider laufen.

Schafft es jedoch die deutsche Stahlindustrie, unterstützt durch Förderprogramme und Forschungsk Kooperationen, rechtzeitig auf innovative Herstellungsverfahren umzustellen, so bleibt Deutschland ein wichtiger Produktionsstandort, speziell für hochwertige Spezialstähle, die in kleinen dezentralen Anlagen z.B. an Standorten wie Friesland individuell und flexibel auf Kundenanforderungen maßgeschneiderte Stähle produzieren.

Wichtig für die Erreichung von Klimaschutzziele bis 2050 ist die frühe Markteinführung innovativer Verfahren. Mit langen Lebensdauern der konventionellen Anlagen von 20 – 40 Jahren (Stahlinstitut VDEh 2013), (Hasan 2011, S. VI) ist eine frühe Umstellung auf zukunftsfähige Verfahren nötig um bis 2050 spürbare Effekte zu erzielen.

Als Pionier der CO₂-armen Stahlherstellung hätte Deutschland zusätzlich eine gute Ausgangsposition im internationalen Wettbewerb. Unter dem angenommenen Verlauf der Energiewende sind der Wettbewerbsdruck und das Risiko des Abwanderns in der Übergangsphase (2020-2040) besonders hoch. Zu diesem Zeitpunkt würde die konventionelle Stahlherstellung einseitig durch Umweltgesetzgebung benachteiligt, innovative Stahlherstellungstechnologien wären jedoch noch nicht wirtschaftlich einsetzbar. Hier müsste über Subventionen, Ausnahmeregelungen und übergreifende Forschungsprogramme die Investitionslast verteilt werden. Ab 2040-2050 könnte Deutschland mithilfe des H-DR-Verfahrens wieder ein attraktiver Stahlstandort werden.

8 Exkurse

8.1 Alternativverfahren Methan-Direktreduktion

Wie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben, lässt sich die Direktreduktion von festem Feinerz anstelle von Wasserstoff auch mit Methan betreiben. Durch die Verbrennung von fossilem Methan (Erdgas) entsteht CO₂-Emission. Wird jedoch Methan vorher aus EE unter Bindung von CO₂ synthetisiert, so ist die Emissionsbilanz nach der Verwendung im Direktreduktionsofen wieder neutral.

Durch Elektrolyse erzeugter ‚grüner‘ Wasserstoff wird unter Bindung von CO und CO₂ nach folgenden Reaktionsgleichungen methanisiert (Klaus et al. 2010, S. 44):



Das so erzeugte synthetische Methan kann in Direktreduktionsöfen verwendet werden. Für die Methanisierung wird 20% des Energiegehaltes des Wasserstoffes verbraucht (Nitsch et al. 2012, S. 30). Für die Umwandlungskette von EE-Strom in Wasserstoff, weiter in Methan und wieder zu Strom bleibt nur ca. 60% des Energiegehalts bestehen. Aus einer reinen Effizienz Sicht wäre die Wasserstoff-Direktreduktion zu präferieren, wie sich auch aus den Simulationsergebnissen ableiten lässt (siehe Abschnitt 5.5 und 6.4). Letztendlich gilt es abzuwägen, ob die Vorteile durch eine höhere Energieeffizienz (Wasserstoffwirtschaft) oder die schon vorhandene Erdgasinfrastruktur höher wiegen. Über den sachlichen Kosten-Nutzen-Vergleich hinaus spielt in der Bevölkerung evtl. noch das vermeintlich höhere Sicherheitsrisiko im Umgang mit Wasserstoff eine Rolle (Wurster und Schmidtchen 2011, S. 10–11).

Ähnlich wie es beim Wasserstoff durch eine flächendeckende Wasserstoffwirtschaft zu starken Synergieeffekten kommen kann, müssen auch beim Methan Synergien mit anderen Branchen berücksichtigt werden. Besonders hervorzuheben ist hier die Rolle von Methan als chemischem Energiespeicher durch seine unproblematische Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz, wie in der Szenariostudie (Nitsch et al. 2012, S. 16) im Szenario 2011 B geschildert. Wasserstoff kann ebenfalls, jedoch nur in geringen Mengen, dem Erdgasnetz beigemischt werden; erneuerbar hergestelltes Methan jedoch zu 100%. Durch das in Deutschland weit verbreitete Erdgasnetz ergäbe sich eine Speicherkapazität von 220 TWh, dem Verbrauch von mehreren Monaten. In einem komplett erneuerbarem Stromnetz wäre nur eine Speicherkapazität von ca. 20–40 TWh erforderlich, um Schwankungen auszugleichen (Rieke 2010, S. 71). Mit der flächendeckenden Umsetzung einer Methanwirtschaft wäre die Speicherproblematik der Energiewende gelöst und gleichzeitig wären keine immensen Infrastrukturinvestitionen, wie für ein Wasserstoffnetzwerk, nötig.

Wenn es im Zuge der Energiewende nicht zu einer branchenübergreifenden Anwendung von Wasserstoff mit Wasserstoffnetzwerk kommt, sondern Einzellösungen für jede Branche und jede Anwendungssituation entwickelt werden, dann ermöglicht die Methan-Direktreduktion die Benutzung des bestehenden Gasnetzes ohne hohe Infrastrukturinvestitionen. Nur bei einer branchenübergreifenden Wasserstoffwirtschaft

kann die Investitionslast für ein Wasserstoff-Pipelinennetzwerk auf viele Akteure aufgeteilt werden und so der Effizienzvorteil vom Energieträger Wasserstoff überwiegen.

In der Anlagentechnik der Stahlproduktion unterscheiden sich die beiden Direktreduktionsverfahren nur wenig. Beide Gase als Reduktionsmittel werden schon im industriellen Maßstab eingesetzt. Durch die unterschiedliche Energiedichte der jeweiligen Gase müssen die Ofenperipherie und die Schritte der Gasvorbereitung anders ausgelegt sein (Kessler 2014). Durch den Kohlenstoffgehalt des Methans wird in geringen Mengen Kohlenstoff in den Eisenschwamm eingetragen und muss ggfs. im folgenden Prozessschritt, dem Lichtbogenofen, durch die Reaktion mit Sauerstoff wieder reduziert werden. Bei der Wasserstoff-Direktreduktion dagegen wird kohlenstofffreier Eisenschwamm hergestellt, der dann im Lichtbogenofen durch Zugabe von geringen Mengen Kohlenstoff nachträglich carburiert wird.

In der vorliegenden Arbeit wird wegen der Ähnlichkeit der beiden Stahlherstellungsverfahren nur das Verfahren der Wasserstoff-Direktreduktion simuliert. Unter oben genannten Voraussetzungen kann die Methan-Direktreduktion zu ähnlichen Simulationsergebnissen führen. Die Energieeffizienz fällt allerdings um ca. 20% geringer aus. Damit ist ein Kostennachteil verbunden, der mit zunehmend günstigem erneuerbarem Überschussstrom jedoch weitestgehend schwindet.

Nachdem die bisherigen Abschnitte auf die Innovation von Stahlherstellungsverfahren fokussierten, soll im Rahmen des folgenden Exkurses ein kurzer Überblick über Alternativen zu Stahl gegeben werden. Durch eine Substitution des Werkstoffes Stahl mit einem umweltschonender herstellbaren Werkstoffes könnte ebenfalls ein großer Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden.

8.2 Alternativmaterialien für Stahl

Stahl ist einer der wichtigsten Werkstoffe des industriellen Zeitalters. Er vereint wie kaum ein anderer Werkstoff gute Verformbarkeit und gleichzeitig Festigkeit und findet in einer Vielzahl von Bereichen Anwendung (siehe Abbildung 8-1). Besonders durch die große Vielseitigkeit von Stahl gibt es derzeit keine vollwertige Alternative (Allwood und Cullen 2012, S. 47), (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014a, S. 22). Durch Variationen in der Stahlzusammensetzung (Legierungen, Kohlenstoffanteil, etc.) und der Verarbeitungsweise (kaltgewalzt, warmgewalzt, etc.) lassen sich unterschiedlichste Eigenschaften erzielen, so dass es in Europa mittlerweile fast 2500 unterschiedliche Stahlsorten gibt, die stetig weiter entwickelt werden (Stahlinstitut VDEh 2013). Kein Nicht-Metall hat eine so hohe Variabilität in der Anwendung. In den einzelnen Anwendungsbereichen des Stahls sind Alternativmaterialien möglich. In einigen Bereichen gibt es günstigere nichtmetallische Alternativen oder teurere Alternativen mit einer besseren Leistung. Im Automobilbereich z.B. gibt es die leichteren Alternativen Aluminium und Plastik; in der Bauindustrie die Alternativen Beton, Holz und Aluminium (U.S. Geological Survey 2011, S. 79). Ein relativ neuer und ebenfalls vielseitiger Werkstoff sind die Faserverbundwerkstoffe. Durch vielfältigste Kombinationsmöglichkeiten aus einer bettenden Matrix mit verstärkenden Fasern lassen sich Materialien für spezielle Anforderungssituationen entwickeln. In Faser-

richtung weisen diese Verbundstoffe eine hohe Festigkeit auf. Üblich sind Glas- oder Kohlefasern in Kombination mit Kunststoffen, Zement, Metallen oder Keramik.

Die Sinnhaftigkeit der Alternativmaterialien muss auf Fallbasis geprüft werden. Hierzu ist eine Vielzahl von Gesichtspunkten zu berücksichtigen: Kosten, ökologische Verträglichkeit entlang des Produktzyklus, Erfüllungsgrad des Produktservice, Haltbarkeit, usw. Neben der Substitution des Werkstoffes Stahl kann ebenfalls der Stahlbedarf reduziert werden, durch Materialeffizienz und Reduzierung der Produkt- oder Servicenachfrage.

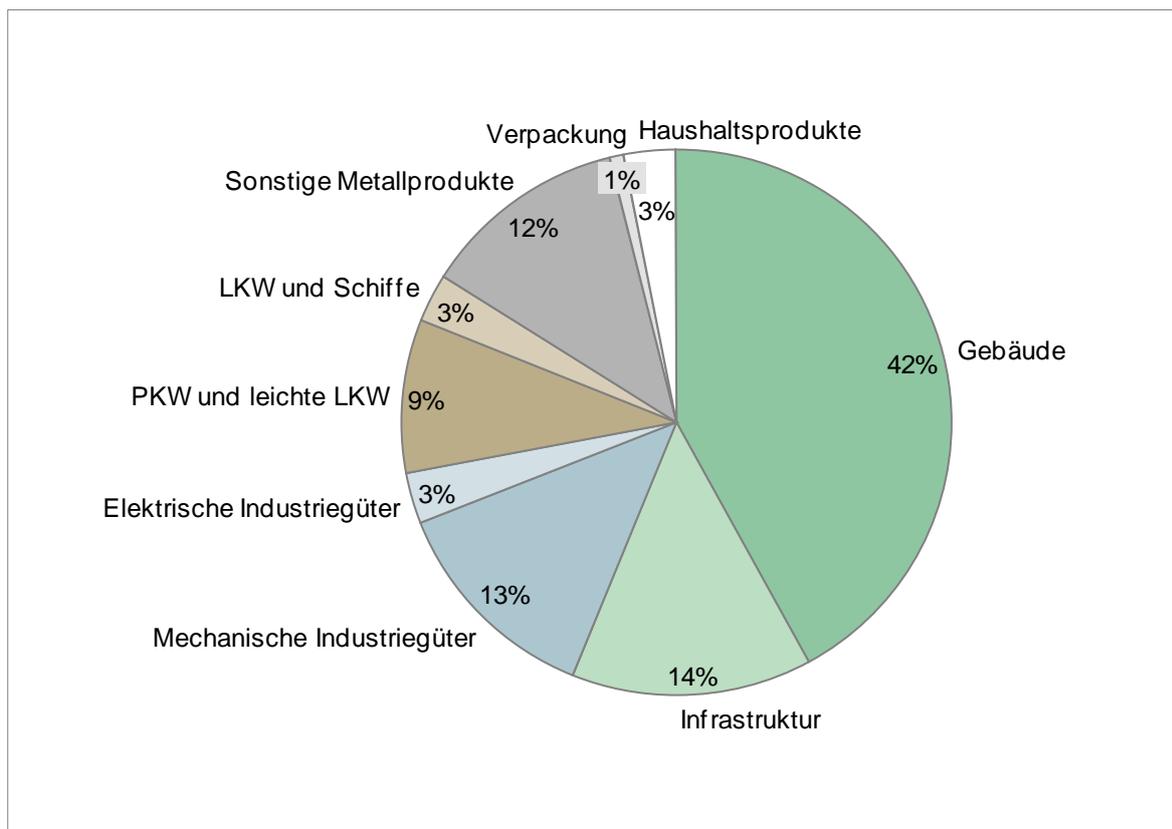


Abbildung 8-1: Hauptanwendungsgebiete von Stahl weltweit (Datenbasis aus Allwood und Cullen 2012, S. 30–31, World Steel Association 2014)

Im Folgenden sollen einige beispielhafte Alternativmaterialien in den Hauptanwendungsbereichen von Stahl vorgestellt werden.

Bauindustrie (Gebäude und Infrastruktur)

56% des weltweit produzierten Stahls wird in der Bauindustrie verbraucht. Dabei wird der größte Anteil als Verstärkung in Betonstrukturen, dem sogenannten Bewehrungsstahl verwendet. Stahl bindet gut mit Zement und hat eine ähnliche thermische Ausdehnung. Außerdem kann der Bewehrungsstahl kostengünstig hergestellt werden. Diese besondere Eignung schränkt die Anzahl möglicher Alternativmaterialien ein. Holz und Aluminium können nicht als Bewehrungselemente verwendet werden, finden aber in Trägern, Fassaden und Rahmen Anwendung. Ein vollwertiges Stahlsubsti-

tut in der Bauindustrie müsste besonders für die Anwendung als Bewehrung im Beton funktionieren. Hierfür gibt es einige Ansätze mit faserverstärktem Beton, die jedoch noch im Forschungsstadium sind (Curbach und Ortlepp 2011). Besonders die Bewehrung durch Gewebe aus Glas- oder Karbonfasern erhöht die Zugfestigkeit gegenüber Stahlbeton um ein Vielfaches und weist keine Probleme mit Korrosion auf (Hegger et al. 2011, S. 65). Ob sich durch neue Verbundstoffe der Stahlbedarf in der Bauindustrie in Zukunft signifikant reduzieren lässt, ist noch nicht abzuschätzen.

Industriegüter (Mechanische und elektrische Industriegüter)

16% des weltweit produzierten Stahls wird für elektrische und mechanische Industriegüter verwendet, wie Transformatoren, elektrische Motoren, Werkzeuge und industrielle Anlagen. In den unterschiedlichen Anwendungsfällen gibt es jeweils Alternativmaterialien, die bestimmte Eigenschaften sogar besser erfüllen als Stahl. Kupfer ist in vielen elektrischen Komponenten durch seine gute Leitfähigkeit besser geeignet, jedoch deutlich teurer. Im Maschinenbau können an besonders belasteten Stellen auch härtere Metalle, wie z.B. Titan, eingesetzt werden. Überall wo eine Gewichtsreduktion gewünscht ist kann Aluminium eine gute Alternative darstellen. Ist die mechanische Belastung nicht zu hoch, so können vielfach auch Kunststoffe oder Kohlefaserverbundwerkstoffe eingesetzt werden. Trotz möglicher Substitute in verschiedenen Anwendungsfällen ist auch in Zukunft nicht mit einem alternativen übergreifenden Werkstoff wie Stahl zu rechnen, der eine so hohe Eignung zu günstigen Herstellungskosten ermöglicht (Allwood und Cullen 2012, S. 47).

Automobilindustrie (PKW, LKW, Schiffe)

In der Automobilindustrie ist Stahl der am meisten verwendete Werkstoff (Massenanteil von ca. 60% im PKW Bereich Rotering et al. 2012, S. 4). Besonders hochwertige kaltgewalzte Bleche werden für Karosserieteile verwendet. Auch der Motorblock und das Getriebe werden überwiegend aus Stahl gefertigt. Gerade in der Karosserie und der Innenverkleidung konnten in der jüngeren Vergangenheit erfolgreich Kunststoffe und Kohlefaserverbundstoffe Stahl substituieren (Brück 2007). Die damit verbundene Gewichtsersparnis wirkt sich gleichzeitig positiv auf den Kraftstoffverbrauch und die Beschleunigung des Fahrzeuges aus. Sicherheitsanforderungen müssen natürlich trotzdem gewährleistet sein. Aluminium wird aktuell vermehrt in Karosserie, Motor und Getriebe verwendet und bewirkt eine ähnliche Gewichtsersparnis und ist ebenfalls deutlich korrosionsbeständiger als Stahl, ist aber mit deutlich höheren Materialkosten verbunden (Allwood und Cullen 2012, S. 32). Die hohen Anforderungen an die Abriebfestigkeit, Temperaturbeständigkeit und hohe Präzision von Bauteilen im Motor können derzeit weder durch Kunststoffe noch durch Verbundstoffe erfüllt werden. Lediglich Motorblöcke aus besonders gehärtetem Aluminium sind derzeit in Forschung, müssen aber vor der Serientauglichkeit speziell in punkto Kosten noch wettbewerbsfähig werden (Brück 2007, S. 17). Im Transportsystem der Zukunft wird es stark auf Effizienz durch Leichtbauweisen ankommen, so dass mit dem verstärkten

Einsatz von Verbundstoffen zu rechnen ist. Aluminium wird durch die energieaufwendige Herstellung auch in Zukunft nur sehr selektiv verwendet werden.

Sonstige Stahlgüter (Sonstige Metallprodukte, Verpackung, Haushaltsprodukte)

Als Universalwerkstoff findet Stahl eine breite Anwendung in Endprodukten wie Möbeln, Konsumgütern, Haushaltsgeräten und Verpackungen. Besonders Kunststoff hat in vielen Bereichen schon Stahl als Werkstoff, wegen der kostengünstigeren Serienproduktion und teilweise Gewichtsvorteilen, abgelöst. Im Verpackungsbereich, in dem Stahl hauptsächlich in Zinnbeschichtung für Konservendosen verwendet wird, ergeben sich Alternativen evtl. durch eine bessere Wiederverwendbarkeit. Die Trennung von Zinn und Stahl beim Recycling ist energieaufwendig. Evtl. kommt es hier in Zukunft zu einer ‚Renaissance‘ von Glas als perfekt wiederverwertbarem Werkstoff (100% recyclebar) (Mahr 2009).

Obwohl es in einigen Anwendungsbereichen von Stahl vielversprechende Alternativmaterialien gibt, ist nicht damit zu rechnen, dass Stahl in diesem Jahrhundert seine Bedeutung verlieren wird. Umso wichtiger ist es, emissionsärmere Herstellungsverfahren zu identifizieren und früh zu fördern.

9 Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Beantwortung der Leitfragen (siehe Abschnitt 2.1), welches primäre Stahlherstellungsverfahren zur Erreichung der Klimaschutzziele der Stahlindustrie beitragen kann und wie es aus ganzheitlicher Sicht zu bewerten ist. Außerdem sollte überprüft werden, welche Rolle die Wasserstoff-Direktreduktion unter der Voraussetzung branchenübergreifender Wasserstoffanwendung dabei spielen könnte.

Um diese Leitfragen beantworten zu können, wurden nach einem ausführlichen Überblick über die Verfahren der Stahlindustrie und branchenübergreifende Wasserstofftechnologien vier Verfahren (BF-BOF, BF-CCS, H-DR, EW) ausgewählt. Diese wurden mithilfe eines eigens entwickelten dreischrittigen Bewertungsverfahrens ganzheitlich bewertet. Im ersten Schritt konnten die untersuchten Verfahren durch techno-ökonomische Anlagenmodelle charakterisiert werden. Im zweiten Schritt wurden diese durch eine Szenarioanalyse unter sich ändernden Rahmenbedingungen durch die Energietransformation bis 2070 simuliert. Hauptbewertungsdimensionen waren Energie- und Rohstoffverbrauch, CO₂-Emission und die Profitabilität. Im dritten Bewertungsschritt wurde die ganzheitliche Bewertung mithilfe einer multi-kriteriellen-Analyse vervollständigt, die Kriterien aus den Bereichen Technologie, Gesellschaft, Ökonomie, Sicherheit und Ökologie in einer Gesamtbewertung vereinte. Abschließend wurde das entwickelte Bewertungsverfahren, das sich am Standort NRW als zweckmäßig herausstellte, auf drei weitere Beispielstandorte exemplarisch angewendet.

Wasserstoff, ein potentieller Energieträger der Zukunft, wird heutzutage hauptsächlich in chemischen Prozessen und der damit zusammenhängenden Erzeugungs- und Speicherungslogistik angewendet (vgl. Abschnitt 4.2.2). Anwendungsbereiche in Zukunft dagegen umfassen besonders Technologien der Energieerzeugung, Wasserstoffherstellung und -speicherung, also klassische Funktionen eines Energieträgers. Als zukünftige Branchen mit hoher Wasserstoffanwendung wurden neben der Energiebranche vor allem der Transportsektor und je nach Verfahren auch die Stahlindustrie identifiziert. Durch die breite Anwendung ergäben sich vielfältige Synergien zwischen Branchen mit Wasserstoffanwendungen, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung der Stahlherstellungsverfahren mit berücksichtigt wurden.

Zunächst verdeutlicht die techno-ökonomische Analyse der vier modellierten Stahlherstellungsverfahren, dass je nach Verlauf der Energiewende in Deutschland zwischen 2030 und 2050 die Wasserstoff-Direktreduktion das profitabelste und CO₂-ärmste Herstellungsverfahren werden könnte (vgl. Abschnitt 5.5). Je schneller die Energietransformation durch konsequente politische Maßnahmen vorangetrieben wird, desto schneller würde die konventionelle Hochofenroute an Attraktivität verlieren und neue Verfahren könnten rechtzeitig in den Markt eintreten. So könnte die Stahlindustrie noch vor 2050 einen signifikanten Beitrag zur Emissionsreduktion leisten.

Aus einer ganzheitlichen Bewertungsperspektive verstärkt sich die Attraktivität der innovativen Verfahren nochmals (vgl. Abschnitt 6.4). Nicht nur die langfristige Profi-

tabilität und minimale Emissionen, sondern auch die positiven Einflüsse auf den Wirtschaftsstandort Deutschland und die höhere Versorgungssicherheit führten zu einer hohen Bewertung des EW- und vor allem des H-DR-Verfahrens. Im Vergleich mit anderen internationalen Standorten wäre am Standort Friesland das H-DR Verfahren besonders geeignet, um dem starken Wettbewerb zum Trotz auch langfristig hochwertigen Stahl zu wettbewerbsfähigen Preisen zu produzieren. Wenn im Zuge der Energiewende in Deutschland Wasserstoff eine Schlüsselrolle als Energiespeicher, Kraftstoff im Verkehr und flächendeckendem Energieträger einnehmen würde, könnte das H-DR Verfahren durch günstige Systemzusammenhänge besonders attraktiv werden.

Voraussetzung hierfür sind konsequente und nach Möglichkeit international abgestimmte Klima- und Umweltschutzmaßnahmen. Einseitige Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland führen zu keinerlei Reduzierung der weltweiten Emissionen, eher im Gegenteil (Flassbeck 2014, S. 166). Stabile und verlässliche politische Rahmenbedingungen ermöglichen, dass zukunftsgerichtete Entscheidungen, hin zu einer CO₂-ärmeren Stahlindustrie, frühzeitig getroffen werden können. Klimafreundlichkeit muss zunehmend als Kernparameter mit in wirtschaftliche wie politische Entscheidungsprozesse eingebunden werden. Im Anbetracht der Dringlichkeit des Klimaschutzes müssen politische Regulierungen mit geeigneten Fördermaßnahmen Hand in Hand gehen. Eine schnelle Umsetzung kann zudem nur gelingen, wenn die hohe Investitionslast für klimafreundliche Technologien verteilt wird und so die Belastung für den einzelnen Betreiber nicht zu hoch wird.

Die vorliegende Arbeit zeigt Möglichkeiten auf, wie eine der CO₂-intensivsten Branchen in Deutschland nicht nur einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten könnte, sondern sich auch durch technologische Innovation am Standort Deutschland im internationalen Wettbewerb behaupten könnte. Da technologische Innovation nicht isoliert verläuft, sondern immer im komplexen Zusammenspiel verschiedener systemischer Abhängigkeiten, leistet die MCA einen wichtigen Beitrag zu einer ganzheitlichen Bewertung der technologischen Alternativen in der Stahlindustrie. Politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsträgern kann so eine ausgewogene Beurteilung an die Hand geben werden, die der Multidimensionalität der Problemstellung Rechnung trägt. Bei veränderten Rahmenbedingungen und Annahmen kann die vorliegende Bewertung aktualisiert werden und so direkt Auswirkungen verdeutlichen. Somit ermöglicht diese Bewertungsmethodik eine hohe Flexibilität und kann durch aktualisierte Bewertungen einen Transformationsprozess kontinuierlich zu begleiten.

Durch das schnelle Wachstum der Schwellenmärkte wird sich ein Großteil der industriellen Produktion langfristig in diese Regionen mit der höchsten Nachfrage verlagern und eine mehr oder weniger starke Deindustrialisierung der entwickelten Länder verursachen. Nur als Pionier neuer Technologien und in Spezialmärkten, wie der Herstellung hochwertige Spezialstähle, wird sich die deutsche Eisen- und Stahlindustrie in Zukunft behaupten können (vgl. ECORYS SCS Group 2008).

Eine Transformation, wie die des deutschen Energiesystems, ist in der Geschichte der Industrialisierung einzigartig und birgt sowohl Risiken als auch große Chancen. Aus

der Verantwortung heutiger Generationen, Rohstoffe, Umwelt- und Klimabedingungen auch für zukünftige Generationen zu erhalten, ist diese Transformation unausweichlich. Die Alternative zur frühzeitigen Umstellung auf klimafreundliche Technologien, wie z.B. dem H-DR Verfahren, ist nur die strikte Nachfragereduzierung mit unweigerlichen Einschränkungen des derzeitigen Lebensstandards. Aus diesem zwingenden Handlungsbedarf heraus muss klar sein, dass alle wirtschaftlichen sowie gesellschaftlichen Bereiche die Kosten der Energiewende mit tragen müssen. Eine politische Führung, die mit Weitsicht einen zukunftsweisenden Weg beschreitet und diesen auch in der Öffentlichkeit zu vertreten weiß, wäre von fundamentaler Wichtigkeit.

Der Versuch langfristige und komplexe Entwicklungen vorherzusehen und zu bewerten impliziert ein hohes Maß an Unsicherheiten. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der vorliegenden Arbeit sind immer unter den angenommenen Rahmenbedingungen zu verstehen. Änderungen an wesentlichen Einflussfaktoren, die bei einer Zeitdauer von über 50 Jahren sehr wahrscheinlich auftreten, können zu Abweichungen von den präsentierten Ergebnissen führen. Eine wesentliche Verbesserung der Simulationsreliabilität wäre die Integration der techno-ökonomischen Anlagenmodelle in ein übergreifendes Energiesystem-Modell und damit die wechselseitige Rückkopplung von Entwicklungsparametern. Große Branchen wie die Eisen- und Stahlindustrie und der Energiesektor beeinflussen sich in Realität natürlich wechselseitig. Zukünftig interessant könnten repräsentative Experteninterviews sein, die die verschiedenen Positionen der unterschiedlichen Akteursgruppen gerade im Bezug auf eine gemeinsame Zukunftsstrategie verdeutlichen. Im Rahmen von Expertenworkshops könnte dann, basierend auf identifizierten Schnittmengen, ein gemeinsamer Fahrplan entwickelt werden. Um ein besseres Verständnis von der zeitlichen Dringlichkeit zu bekommen, wäre ein ‚backcasting‘ Szenario hilfreich, welches von den Klimazielen in 2050 rückwärts den Transformationspfad der Deutschen Stahlindustrie bis heute beschreibt.

Neben den vielen Ergebnissen, Schlussfolgerungen und Anregungen, die sich aus der vorliegenden Arbeit ableiten lassen, bleibt auch eine Reihe von Fragen ungeklärt. Wie genau sieht beispielsweise der Transformationspfad für die Stahlindustrie aus, sobald eine Zukunftstechnologie identifiziert ist? Wo und im Ausgleich zu welchen bestehenden Anlagen werden neue Anlagen gebaut? Im Anbetracht der aktuellen Herausforderungen der Energiewende wäre die Frage nach einem ‚Fallback Szenario‘, also einem Zukunftsplan, der eine deutlich verspätete oder nicht umgesetzte Energiewende berücksichtigt, hoch interessant. Der Einfluss eines international verbindlichen Klimaschutzabkommens oder aber einer CO₂-Steuer, wie im fünften IPCC Bericht vorgeschlagen (Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2014c) wäre auf die Industrie enorm hoch. Ob dieses Ziel auf der nächsten Klimakonferenz in Paris (COP 21) erreicht wird ist unklar. Die Auswirkungen dieser weltweiten Klimaschutzmaßnahmen speziell auf die Zukunft der Stahlindustrie wäre ein bedeutender zukünftiger Forschungsbereich.

10 Anhang

A. Modellparameter

Tab-A 1: Zeitlich konstante Annahmen Hochofenroute

Größe	Wert	Einheit	Kommentar	Quelle
Betriebswirtschaftliche Annahmen				
CAPEX	442	EUR / t Kapazität	Neubau 'greenfield'	(Wörtler et al. 2013)
Preis Schlacke	16	EUR / t		(Pardo und Moya 2013)
Verkaufspreis Prozessgase	90	%	von Erdgaspreis	(Kessler 2014)
Verkaufspreis Strom	90	%	von Industriekunden Einkaufspreis Strom	Eigene Annahme
Kohleabbau und Transport				
Elektrizität Input-Intensität	50	MJ / t Kohle		(Weißbach et al. 2013)
Kraftstoff Input-Intensität	10	MJ / t Kohle	Flüssige Kraftstoffe und Öl (ca. 270ml)	(Weißbach et al. 2013)
Kohle Verluste bei Transport	5	%		(Spath et al. 1999)
Primärenergieaufwand Hochseetransport	0,12	MJ / tkm	hauptsächlich Dieseldieselkraftstoffe	(Schwaiger 1996)
Primärenergieaufwand Schienenverkehr	0,7	MJ / tkm	hauptsächlich Dieseldieselkraftstoffe	(Schwaiger 1996)
Transportstrecke Hochsee	10.000	km	z.B. USA - Deutschland	Eigene Annahme
Transportstrecke Schiene	300	km	z.B. Rotterdam Duisburg	Eigene Annahme
Sinteranlage				
Elektrizität Input-Intensität	120	MJ / t Sinter		(Worrell et al. 2008)
Eisenerz Input-Intensität	1.200	kg / t Sinter	Erz, erzhaltige Stäube und Abfallstoffe	(Remus et al. 2013)
Zuschlagstoffe Input-Intensität	170	kg / t Sinter		(Remus et al. 2013)
Kokereigas Input-Intensität	60	MJ / t Sinter		(Remus et al. 2013)
Koks Input-Intensität	50	kg / t Sinter		(Remus et al. 2013)
Wasser Input Intensität	180	kg / t Sinter		(Remus et al. 2013)
CO ₂ -Output Intensität	300	kg CO ₂ /t Sinter		(Remus et al. 2013)
Abgas Output-Intensität	2.100	Nm ³ / t Sinter		(Remus et al. 2013)
Abwasser Output-Intensität	45	kg / t Sinter		(Remus et al. 2013)
Sonstiger Abfall Output-Intensität	4	kg / t Sinter	Schlamm und Staub	(Remus et al. 2013)
Wasserdampf Output-Intensität	340	MJ / t Sinter	Abwärme Recycling Sinter Kühler	(Remus et al. 2013)
Kokerei				
Kohle Input-Intensität	1.333	kg / t Koks		(Remus et al. 2013)

Kokereigas Output-Intensität	8.100	MJ / t Koks		(Remus et al. 2013)
Kokereigas Input-Intensität	3.500	MJ / t Koks		(Remus et al. 2013)
Elektrizität Input-Intensität	50	MJ / t Koks		(Remus et al. 2013)
Wasserdampf Input-Intensität	400	MJ / t Koks		(Remus et al. 2013)
Wasser Input-Intensität	700	kg / t Koks		(Remus et al. 2013)
Wasserdampf Output-Intensität	3.000	MJ / t Koks	Wasserdampf aus Kokstro- ckenkühlung	(Remus et al. 2013) (Worrell et al. 2008)
CO ₂ -Output-Intensität	400	kg / t Koks	Emissionen durch Befüllung und Entladung der Batterie	(Remus et al. 2013)
Wasser Output-Intensität	300	kg / t Koks		(Remus et al. 2013)
Hochofen				
Sinter Input-Intensität	1.100	kg / t Roheisen		(Remus et al. 2013)
Eisenerz Input-Intensität	550	kg / t Roheisen		(Remus et al. 2013)
Koks Input-Intensität	360	kg / t Roheisen		(Remus et al. 2013)
Zuschlagstoffe Input-Intensität	30	kg / t Roheisen		(Remus et al. 2013)
Kohle Input-Intensität	160	kg / t Roheisen	Kohlenstaubeinblasen	(Remus et al. 2013)
O ₂ Input-Intensität	100	kg / t Roheisen		(Remus et al. 2013)
Kokereigas Input-Intensität	280	MJ / t Rohei- sen	für Winderhitzer	(Remus et al. 2013)
Erdgas Input-Intensität	170	MJ / t Rohei- sen	für Winderhitzer	(Remus et al. 2013)
Konvertergas Input-Intensität	210	MJ / t Rohei- sen	für Winderhitzer	(Remus et al. 2013)
Elektrizität Input-Intensität	270	MJ / t Rohei- sen		(Remus et al. 2013)
Gichtgas Output-Intensität	4.700	MJ / t Rohei- sen		(Remus et al. 2013)
Gichtgas Input-Bedarf	1.500	MJ / t Rohei- sen	für Winderhitzer	(Remus et al. 2013)
Staub Output-Intensität	16	kg / t Roheisen		(Remus et al. 2013)
CO ₂ -Output-Intensität	1.200	kg / t Roheisen		(Remus et al. 2013)
Schlacke Output-Intensität	250	kg / t Roheisen		(Remus et al. 2013)
Effizienz Entspannungstur- bine	30	%		(Remus et al. 2013)
Oxygenkonverter				
Roheisen Input-Intensität	950	kg / t Rohstahl	von Hochofen	(Remus et al. 2013)
Schrott Input-Intensität	190	kg / t Rohstahl	(1-X%) Roheisen	(Remus et al. 2013)
Zuschlagstoffe Input-Intensität	63	kg / t Rohstahl	90% Kalk und 10% Kalk- stein	(Remus et al. 2013)
Legierungen Input-Intensität	17	kg / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)
Sauerstoff Input-Intensität	85	kg / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)

Kokereigas Input-Intensität	400	MJ / t Rohstahl	von Kokerei	(Remus et al. 2013)
Erdgas Input-Intensität	390	MJ / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)
Elektrizität Input-Intensität	130	MJ / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)
Konvertergas Output-Intensität	660	MJ / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)
Konverter Schlacke Output-Intensität	125	kg / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)
Sonstige Abfallstoffe Intensität	200	kg / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)

Tab-A 2: Zusätzliche Annahmen Hochofenroute mit CCS (BF-CCS)

Größe	Wert	Einheit	Kommentar	Quelle
CCS				
CAPEX	566	EUR / t Kapazität	Neubau 'greenfield'	(Wörtler et al. 2013)
Elektrizität Input-Intensität CCS	1.120	MJ / t CO ₂		(Wörtler et al. 2013)
Effizienz CO ₂ -Abscheidung	92	%		(Wörtler et al. 2013)
Volumenanteil CO ₂ im Gichtgas	24	%		(Wörtler et al. 2013)
CO ₂ -Dichte Gichtgas	450	g CO ₂ / Nm ³		(Remus et al. 2013)
CO-Dichte Gichtgas	350	g CO / Nm ³		(Remus et al. 2013)
Hochofen (nur veränderte Werte)				
Koks Input-Intensität	270	kg / t Roheisen	-25% durch TGR gegenüber Modell BF-BOF	(Remus et al. 2013)
Kohle Input-Intensität	120	kg / t Roheisen	PCI -25% durch TGR gegenüber Modell BF-BOF	(Remus et al. 2013)

Tab-A 3: Zeitlich konstante Annahmen Herstellungsrouten Wasserstoff-Direktreduktion (H-DR)

Größe	Wert	Einheit	Kommentar	Quelle
Betriebswirtschaftliche Betrachtung				
CAPEX (Neubauinvestition)	874	EUR / t Kapazität	CAPEX DRI-EAF €414 / t zusätzlich € 450 / t für H ₂ Elektrolyseur (€ 650 / kWel [212]) u. ca. € 10 / t Rohstahl für Wasserstoffspeicherung in unterirdischem Speicher (Kapazität für 14 Tagen mit CAPEX € 0,09 / kWh [212])	(Wörtler et al. 2013) (Smolinka et al. 2011) (Nitsch et al. 2010) (Töpler und Lehmann 2014) (Kesseler 2014)
Preiszuschlag Überschussstrom-Transport	12	%	Netzentgelt Industriekunden für Transport des Überschussstroms von Quelle zu Stahlwerk	(Bundesnetzagentur 2010)

Anteil Überschussstrom für Elektrolyseur	80	%	80% des Elektrolysestrombedarfs wird über günstigen Überschussstrom abgedeckt	Eigene Annahme
Verkaufspreis Sauerstoff	60	%	von Einkaufspreis	Eigene Annahme
Lohnkosten Zuwachs gegenüber BF-BOF	40	%	Durch geringere Kapazitäten steigt der relative Anteil der Lohnkosten an	(Kesseler 2014)
Preiszuschlag Eisenerz	10	%	Eisenerz mit mind. 68% Fe-Anteil	(Kesseler 2014)
Wasserstoffherstellung				
EE-Elektrizität Input-Intensität	1,25	MJ / MJ H ₂		(Pregger et al. 2008)
Wasser Input-Bedarf	10	kg / kg H ₂		(Töpler und Lehmann 2014)
O ₂ Output-Intensität	8	kg O ₂ / kg H ₂		chemische Reaktionsgleichung
Direktreduktion				
Elektrizität Input-Intensität	450	MJ / t HBI		(Nuber et al. 2006)
Eisenerz Input Intensität	1.490	kg / t HBI	nur Feinerze und Konzentrate mit hohem Fe-Anteil	(Nuber et al. 2006)
Wasserstoff Input-Intensität	8.700	MJ / t HBI		(Ahman et al. 2012)
Lichtbogenofen				
Eisenschwamm (DRI) Input-Intensität	975	kg / t Rohstahl	Annahme: 75% DRI, 25% Schrott	(Remus et al. 2013)
Schrott Input-Intensität	325	kg / t Rohstahl	Annahme: 75% DRI, 25% Schrott	(Remus et al. 2013)
Zuschlagstoffe Input-Intensität	80	kg / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)
Sauerstoff Input-Intensität	50	kg / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)
Elektrizität Input-Intensität	2.028	MJ / t Rohstahl	erhöhter Strombedarf um 15% durch hohen DRI Anteil	(Worrell et al. 2008)
Legierungen Input-Intensität	17	kg / t Rohstahl	für Karbonstahl, einschließlich geringer Kohlenstoffzugabe	(Remus et al. 2013)
Kohle Input-Intensität	17	kg / t Rohstahl		(Birat et al. 2008)
Abgas Output-Intensität	9.000	Nm ³ / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)
CO ₂ Output-Intensität	70	kg / t Rohstahl	CO ₂ und CO	(Germeshuizen und Blom 2013)
Schlacke Output-Intensität	210	kg / t Rohstahl		(Remus et al. 2013)

Tab-A 4: Zeitlich konstante Annahmen Herstellungsrouten Eisenerzelektrolyse (EW)

Größe	Wert	Einheit	Kommentar	Quelle
Betriebswirtschaftliche Betrachtung				
CAPEX	639	EUR / t Kapazität	EAF: € 184 [107], EW: € 455 (Annahme: CAPEX EW = H2 Elektrolyseur [212] + 100%)	"(Wörtler et al. 2013) (Smolinka et al. 2011) (Töpler und Lehmann 2014)"
Verkaufspreis Sauerstoff	60	%	von Einkaufspreis	Eigene Annahme
Preiszuschlag Überschussstrom Transport	12	%	Annahme: Netzentgelt Industriekunden für Transport des Überschussstroms von Quelle zu Stahlwerk (z.B. Wilhelmshafen nach Duisburg)	(Bundesnetzagentur 2010)
Preiszuschlag Eisenerz	10	%	Eisenerz mit mind. 68% Fe-Anteil	(Kesseler 2014)
Lohnkosten Zuwachs gegenüber BF-BOF	40	%	Durch geringere Kapazitäten steigt der relative Anteil der Lohnkosten an	(Kesseler 2014)
Anteil Überschussstrom für Elektrolyseur	25	%	Anteil des Elektrolyseurstrombedarfs, der über günstigen Überschussstrom abgedeckt wird	Eigene Annahme
Preis Natriumhydroxid	198	EUR / t	€ 329 - 40% für Großabnehmer	(Alibaba.com 2014)
Eisenerzelektrolyse				
Elektrizität Input Elektrolyse	7.380	MJ / t HBI	2,05 MWh / t HBI	(Birat et al. 2008)
Natriumhydroxid Input-Intensität	130	kg / t HBI	zur Herstellung der alkalischen Lauge	(Birat et al. 2008)
Elektrizität Input-Intensität Erzzerkleinerung	40	MJ / t HBI		(Worrell et al. 2008)
Eisenerz Input-Intensität	1.700	kg / t HBI		(Birat et al. 2008)
Sauerstoff Output-Intensität	0,4	kg / kg HBI		Chemische Gleichung
Lichtbogenofen				
Siehe Annahmen in Tab-A 3				

B. Masse- und Energiebilanzen

Tab-A 5: Ergebnisse Material- und Energiefluss Hochofen (Bezugsgröße 1 Tonne Rohstahl)

Input (von Extern)			Output (nach Extern)		
Größe	Wert	Einheit	Größe	Wert	Einheit
Energie	595	MJ	Produkt	1.000	kg
Erdgas	552	MJ	Rohstahl	1.000	kg
Elektrizität	36	MJ	Energie	3.306	MJ
Kraftstoff	8	MJ	Kokereigas	1.085	MJ
Reduktionsmittel	712	kg	Konvertergas	461	MJ
Kohle	712	kg	Wasserdampf	1.380	MJ
			Elektrizität	380	MJ
Rohstoffe	2.897	kg	Abfallstoffe	1.112	kg
Eisenerz	1.777	kg	Prozessbedingte CO ₂ -Emissionen	528	kg
Schrott	190	kg	Indirekte CO ₂ -Emissionen	Zeit- abhängig	kg
Zuschlagstoffe	286	kg	Wasser	165	kg
Wasser	464	kg	Schlacke	238	kg
Sauerstoff	180	kg	Sonstiger Abfall	180	kg
			Sonstige Abgase	2.195	Nm³
Gesamt Energiebedarf	18.100	MJ	(einschließlich Energie Reduktionsmittel)		
Gesamt Rohstoffbedarf	3.600	kg			
Gesamt Abfall	1.100	kg	(außer indirekter CO ₂ -Emission)		

Tab-A 6: Ergebnisse Material- und Energiefluss Hochofen mit CCS (Bezugsgröße 1 Tonne Rohstahl)

Input (von Extern)			Output (nach Extern)		
Größe	Wert	Einheit	Größe	Wert	Einheit
Energie	1.752	MJ	Produkt	1.000	kg
Erdgas	552	MJ	Rohstahl	1.000	kg
Elektrizität	1.194	MJ	Energie	2.310	MJ
Kraftstoff	6	MJ	Kokereigas	692	MJ
Reduktionsmittel	552	kg	Gichtgas	0	MJ
Kohle	552	kg	Konvertergas	461	MJ
Rohstoffe	2.854	kg	Wasserdampf	1.158	MJ
Eisenerz	1.777	kg	Abfallstoffe	1.719	kg
Schrott	190	kg	Prozessbedingte CO ₂ -Emissionen	567	kg
Zuschlagstoffe	286	kg	Indirekte CO ₂ -Emissionen	Zeit- abhängig	kg
Wasser	404	kg	CO ₂ flüssig an Lagerung	571	kg
Sauerstoff	180	kg	Wasser	140	kg
Legierungen	17	kg	Schlacke	238	kg
			Sonstiger Abfall	205	kg
			Sonstige Abgase	2.195	Nm³
Gesamt Energiebedarf	15.600	MJ	(einschließlich Energie Reduktionsmittel)		
Gesamt Rohstoffbedarf	3.400	kg			
Gesamt Abfall	1.700	kg	(außer indirekter CO ₂ -Emission)		

Tab-A 7: Ergebnisse Material- und Energiefluss Wasserstoff-Direktreduktion (Bezugsgröße 1 Tonne Rohstahl)

Input (von Extern)			Output (nach Extern)		
Größe	Wert	Einheit	Größe	Wert	Einheit
Energie	13.070	MJ	Produkt	1.000	kg
Elektrizität Elektrolyseur	10.603	MJ	Rohstahl	1.000	kg
Allg. Elektrizität	2.467	MJ	Abfallstoffe	796	kg
Reduktionsmittel	8.483	MJ	Prozessbedingte CO ₂ -Emissionen	130	kg
Wasserstoff	8.483	MJ	Indirekte CO ₂ -Emissionen	Zeit- abhängig	kg
Rohstoffe	2.599	kg	Schlacke	210	kg
Eisenerz	1.453	kg	Sauerstoff	516	kg
Schrott	325	kg	Sonstige Abgase	9.000	Nm³
Zuschlagstoffe	80	kg			
Legierungen	17	kg			
Wasser	707	kg			
Kohle	17	kg			
Energiebedarf	13.600 MJ		(einschließlich Energie für Herstellung Wasserstoff)		
Rohstoffbedarf	2.700 kg				
Abfall	800 kg		(außer indirekter CO ₂ -Emission)		

Tab-A 8: Ergebnisse Material- und Energiefluss Eisenerzelektrolyse (Bezugsgröße 1 Tonne Rohstahl)

Input (von Extern)			Output (nach Extern)		
Größe	Wert	Einheit	Größe	Wert	Einheit
Elektrizität	9.263	MJ	Produkt	1.000	kg
Elektrizität Elektrolyseur	7.196	MJ	Rohstahl	1.000	kg
Allg. Elektrizität	2.067	MJ	Abfallstoffe	648	kg
Rohstoffe	2.223	kg	Prozessbedingte CO ₂ -Emissionen	70	kg
Eisenerz	1.658	kg	Indirekte CO ₂ -Emissionen	Zeit- abhängig	kg
Schrott	325	kg	Schlacke	210	kg
Zuschlagstoffe		kg	Sauerstoff	368	kg
Sauerstoff	80	kg	Sonstige Abgase	9.000	Nm³
Legierungen	17	kg			
Kohle	17	kg			
Natriumhydroxid	127	kg			
Energiebedarf	9.700 MJ		(gerundete Werte)		
Rohstoffbedarf	2.200 kg				
Abfall	600 kg		(außer indirekter CO ₂ -Emission)		

C. MCA

Tab-A 9: Bewertung und Gewichtung der vier ausgewählten Stahlherstellungsverfahren

Kategorie	Kriterien / Subkriterien	Bewertung				Gewichtung			
		BF-BOF	BF-CCS	H-DR	EW	Gleich-verteilt	Stahl-Ind.	Landes-Reg.	Umwelt-Orga.
Technologie		2,8	2,4	2,6	2,1	20%	25%	10%	3%
1	Systemkompatibilität	3,3	2,3	2,7	1,3	5,0%	3,5%	3,0%	0,8%
1.1	Technologische Marktreife	4	2	3	1	1,7%	1,5%	1,0%	0,3%
1.2	Verfügbarkeit Reduktionsmittel	3	4	1	2	1,7%	1,5%	1,0%	0,3%
1.3	Synergien / Konflikte mit anderen Bereichen	3	1	4	1	1,7%	0,5%	1,0%	0,3%
2	Umsetzungsintensität	4	3	2	1	8,4%	6,5%	3,0%	1,3%
3	Innovationspotenzial	1	2	3	4	6,7%	15,0%	4,0%	1,0%
Gesellschaft & Politik		2,7	1,7	3,0	2,7	20,0%	10,0%	10,0%	13,0%
4	Beitrag zur regionalen Wertschöpfung	1,2	2,3	4,0	2,3	10,0%	3,0%	7,0%	8,0%
4.1	Auswirkung auf lokale Arbeitsplätze	2	3	4	1	3,3%	1,0%	2,0%	3,0%
4.2	Auswirkung auf regionale Wertschöpfungsschritte	2	3	4	1	3,3%	1,0%	1,0%	5,0%
4.3	Potenzial zur Erhaltung von Industriestrukturen	1	2	4	3	3,3%	1,0%	4,0%	0,0%
5	Gesellschaftliche Akzeptanz	4	1	2	3	10,0%	7,0%	3,0%	5,0%
Ökonomie		1,3	1,8	3,8	3,0	20,0%	35,0%	40,0%	3,0%
6	Profitabilität	1	2	4	3	10,0%	20,0%	20,0%	1,0%
7	Strategischer Vorteil	1,5	1,5	3,5	3,0	10,0%	15,0%	20,0%	2,0%
7.1	Vorteil durch Pionierstrategie	2	1	4	3	5,0%	8,0%	12,0%	1,0%
7.2	Exportpotenzial des Stahls	1	2	3	3	5,0%	7,0%	8,0%	1,0%
Sicherheit und Verletzlichkeit		1,8	1,0	3,5	2,9	20,0%	20,0%	20,0%	51,0%
8	Verletzlichkeit	1,5	1,0	4,0	3,0	10,0%	15,0%	5,0%	10,0%
8.1	Abhängigkeit von Rohstoffen	1	1	4	3	5,0%	10,0%	4,0%	5,0%
8.2	Flexibilität der Produktion	2	1	4	3	5,0%	5,0%	1,0%	5,0%
9	Sicherheitsrisiken	2,0	1,0	2,0	3,7	10,0%	5,0%	15,0%	41,0%
9.1	Brand- und Explosionsgefahr	1	1	3	4	3,3%	2,0%	5,0%	13,7%
9.2	Gesundheitsgefahr	2	1	4	3	3,3%	2,0%	5,0%	13,7%
9.3	Risiko im Fehlerfall	3	1	2	4	3,3%	1,0%	5,0%	13,7%
Ökologie		1,3	1,7	3,7	3,3	20,0%	10,0%	20,0%	30,0%
10	THG-Emission	1	2	4	3	6,7%	4,0%	10,0%	20,0%
11	Sonstige Umweltbelastung	2	1	4	3	6,7%	2,0%	5,0%	5,0%
12	Energieeffizienz	1	2	3	4	6,7%	4,0%	5,0%	5,0%
Gesamtbewertung		2,0	1,7	3,2	2,8	100%	100%	100%	100%

11 Literatur

- Abu Taha, Rimal; Daim, Tugrul (2013): Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review. In: Tugrul Daim, Terry Oliver und Jisun Kim (Hg.): *Research and Technology Management in the Electricity Industry*. London: Springer London (Green Energy and Technology), S. 17–30.
- Ahman, Max; Nikoleris, Alexandra; Nilsson, Lard (2012): Decarbonising industry in Sweden. an assessment of possibilities and policy needs. Report No. 77. Hg. v. Lund University. Lund.
- Aichinger, H. M.; Steffen, R. (2006): Maßnahmen zur CO₂-Minderung bei der Stahlerzeugung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 78 (4), S. 397–406. DOI: 10.1002/cite.200600008.
- Alibaba.com (2014): Online Business-to-Business-Marktplatz. Online verfügbar unter <http://german.alibaba.com/>, zuletzt geprüft am 9/23/2014.
- Allwood, Julian M.; Cullen, Jonathan M. (2012): Sustainable Materials. With both eyes open. Unter Mitarbeit von Mark A. Carruth, Daniel R. Cooper, Martin McBrien, Rachel L. Milford, Muiris C. Moynihan und Alexandra C. H. Patel. Cambridge: UIT Cambridge Ltd.
- Allwood, Julian M.; Cullen, Jonathan M.; Milford, Rachel L. (2010): Options for Achieving a 50% Cut in Industrial Carbon Emissions by 2050. In: *Environ. Sci. Technol.* 44 (6), S. 1888–1894. DOI: 10.1021/es902909k.
- Amara, R. (1991): Views on futures research methodology. In: *futures* July/August 1991, S. 645–649.
- American Iron and Steel Institute (2010): Technology Roadmap Research Program for the Steel Industry. Final Report. Hg. v. United States Department of Energy (DOE). Oak Ridge.
- Arens, Marlene; Worrell, Ernst; Schleich, Joachim (2012): Energy intensity development of the German iron and steel industry between 1991 and 2007. In: *Energy* 45 (1), S. 786–797. DOI: 10.1016/j.energy.2012.07.012.
- Avgoustinov, Nikolay (2007): Modelling in mechanical engineering and mechatronics. Towards autonomous intelligent software models. In: *Springer e-books*.
- Babies, Hans-Georg; Buchholz, Peter; Homberg-Heumann, Doris; Huy, Dieter; Messner, Jürgen; Neumann, Wolfgang (2010): Deutschland Rohstoffsituation 2010. Hannover (Deutschland Rohstoffsituation).
- Baeza, Ramón (2008): Assessment of the impact of the 2013-2020 ETS Proposal on the European Cement Industry. Unter Mitarbeit von Ivan Marten, Rafael Rilo, Magin Yanez und Lorenzo Wittum. Hg. v. The Boston Consulting Group (BCG).

- Barbir, Frano (2013): Future of Fuel Cells and Hydrogen. In: Frano Barbir (Hg.): PEM Fuel Cells: Elsevier, S. 469–508.
- Bättig, Michèle; Büsser, Sybille; Frischknecht, Rolf; Klingler, Georg; Küttel, Philip; Schulthess, Reto von (2011): Vergleich verschiedener Entsorgungswege des Klärschlammes aus der Region Luzern mittels Multikriterienanalyse und Ökobilanzen. Hg. v. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Luzern.
- Bibliographisches Institut GmbH (2014): Definition ganzheitlich. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/ganzheitlich>, zuletzt aktualisiert am 2013, zuletzt geprüft am 10/25/2014.
- Birat, Jean-Pierre (2009): Steel and CO₂ – the ULCOS Program, CCS and Mineral Carbonation using Steelmaking Slag. Hg. v. Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS).
- Birat, Jean-Pierre (2010): Steel Sector Report. Contribution to the UNIDO roadmap on CCS. 5th draft. Maizières-lès-Metz.
- Birat, Jean-Pierre; Borlée, Jean (2008): ULCOS Program: a progress report. Hg. v. Jean-Pierre Birat, Jean Borlée, Bernd Korthas, Jan Stel und Koen Meijer. MEFOS – Metallurgical Research Institute AB. Luleå, Sweden.
- Birat, Jean-Pierre; Lorrain, Jean-Paul; Lassat, Yann de (2008): The "CO₂ Tool": CO₂ Emissions & Energy Consumption of Existing & Breakthrough Steelmaking Routes. 4th ULCOS Seminar. ULCOS. Luxemburg, 2008.
- Birol, Fatih; Cozzi, Laura; Gül, Timur (2013): World Energy Outlook Special Report. Redrawing The Energy-Climate Map. Unter Mitarbeit von Dan Dorner, Marco Baroni, Chris Besson, Christina Hood, Fabian Kesicki, Pawel Olejarnik et al. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Paris.
- Blass, Eckhart (1997): Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse. Unter Mitarbeit von Manfred Hampe, Klaus Müller und Johann Stichlmair. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- BMU (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Online verfügbar unter http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- Böhme, Dieter; Dürschmidt, Wolfhart; van Mark, Michael (2011): Erneuerbare Energien 2010. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik.
- Brazilian Mining Association (IBRAM) (Hg.) (2012): Information and Analyses on the Brazilian Mineral Economy. 7th Edition. Brasilia.
- Brown, Tamaryn; Gambhir, ajay; Florin, Nicholas; Fennell, Paul (2012): Reducing CO₂ emissions from heavy industry: a review of technologies and considerations for

- policy makers. Briefing paper No 7. Hg. v. Imperial College London. Grantham Institute for Climate Change. London.
- Brück, Jürgen (2007): Klimaschutz durch Werkstoffinnovationen im Automobilbau. Hochleistungswerkstoffe zur Reduzierung der CO₂-Emissionen Erste Ergebnisse im Werkstoffprogramm des BMBF. Unter Mitarbeit von Madeleine Dietrich und Birgit Scheibner. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Bonn, Berlin.
- Bullinger, Hans-Jörg (2008): Fokus Technologie. Chancen erkennen - Leistungen entwickeln. München: Hanser.
- Bundesministerium der Justiz (BMJ) (9/26/2011): Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas- Emissionsberechtigungen in der Handelsperiode 2013 bis 2020. (Zuteilungsverordnung 2020 - ZuV 2020).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2013): Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung. Referant III C3. Berlin.
- Bundesnetzagentur (2010): Markt und Wettbewerb Energie. Kennzahlen 2010. Bonn.
- Bunke, Dirk; Graulich, Kathrin (2003): Ein Indikator für den Einsatz gefährlicher Stoffe in Produkten und Prozessen: Monoethylenglykol-Aquivalente. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff Forschung* 15 (2), S. 106–114.
- Capros, P.; Mantzos, L.; Papandreou, V.; Tasios, N. (2010): European Energy and Transport Trends to 2030. Update 2009. Hg. v. European Commission. Directorate-General for Energy. Brüssel.
- Choi, Moo Eob (2010): Suspension Hydrogen Reduction of Iron Ore. Dissertation. University of Utah, Utah. Department of Metallurgical Engineering. Online verfügbar unter <http://content.lib.utah.edu/utis/getfile/collection/etd3/id/411/filename/482.pdf>, zuletzt geprüft am 8/22/2013.
- Croezen, Harry; Korteland, Marisa (2010): Technological developments in Europe. A long-term view of CO₂ efficient manufacturing in the European region. Hg. v. CE Delft. Delft.
- Curbach, Manfred; Ortlepp, Regine (Hg.) (2011): Textilbeton in Theorie und Praxis. 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6). Berlin, 19.9.2011. Technische Universität Dresden.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) DVGW G 260, 2013: Gasbeschaffenheit.
- Deutsches Institut für Normung DIN EN 1325-1, 1996: Value Management, Wertanalyse, Funktionenanalyse Wörterbuch.

- Deutsches Institut für Normung DIN EN 10020, 2000: Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle.
- Deutsches Institut für Normung DIN EN ISO 14051, 2011: Umweltmanagement- Materialflusskostenrechnung - Allgemeine Rahmenbedingungen.
- Di Valdalbero, Domenico Rosetti (2006): World Energy Technology Outlook 2050-WETO H2. Hg. v. European Commission. Directorate-General for Energy. Brüssel.
- Diczfalusy, Bo (2012): Tracking Clean Energy Progress. Energy Technology Perspectives 2012 excerpt as IEA input to the Clean Energy Ministerial. Unter Mitarbeit von Markus Wråke, Antonia Gawel, Cecilia Tam und Kevin Breen. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Directorate of Sustainable Energy Policy and Technology, Paris.
- Ecofys (Hg.) (2009): Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Sector report for the iron and steel industry. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (FhG-ISI); Öko-Institut. Utrecht.
- ECORYS SCS Group (Hg.) (2008): Study on the Competitiveness of the European Steel Sector. Within the Framework Contract of Sectoral Competitiveness Studies – ENTR/06/054. Directorate-General Enterprise & Industry. Rotterdam.
- EUROFER (2013): A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050. Brüssel.
- Europäische Kommission (2010): Staatliche Beihilfe N 450/2009 – Deutschland TGR-Projekt – Beihilfe an ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/eu_law/state_aids/comp-2009/n450-09.pdf, zuletzt geprüft am 1/5/2014.
- Europäische Kommission (2011): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050.
- Europäische Union: Beschluss der Kommission zur Festlegung eines Verzeichnisses der Sektoren und Teilspektoren, von denen angenommen wird, dass sie einem erheblichen Risiko einer Verlagerung von CO₂-Emissionen ausgesetzt sind, gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.
- European Commission (2011): SET-Plan: 2011 Technology Map. Technology Description. European Commission.
- European Commission (JRC) (2010): Technology Innovations for Energy Efficiency and Greenhouse Gas (GHG) emissions reduction in the Iron and Steel Industries in the EU27 up to 2030. Final Report of the SET-Plan workshop.
- Expert from steel industry (2014): Interview about technical specifications of innovative steelmaking technologies, 5/7/2014 an Max Weigel.

- Feck, Thomas; Steinberger-Wilckens, Robert; Stolzenberg, Klaus (2002): Wasserstoff - Zündschlüssel für den nachhaltigen Verkehr? In: *Sonne Wind und Wärme*, 2002 (4), S. 43–45.
- Fischedick, Manfred (2008): Angewandte Systemanalyse. FernUniversität in Hagen, Hagen.
- Fischedick, Manfred; Marzinkowski, Joachim; Winzer, Petra; Weigel, Max (2014): Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. In: *Journal of Cleaner Production* (in press). DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.063.
- Fischedick, Manfred; Nitsch, Joachim; Viebahn, Peter; Bandi, Andreas; Zuberbühler, Ulrich; Edenhofer, Ottmar (2007): Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS). Endbericht. Unter Mitarbeit von Andrea Esken, Andreas Pastowski, Dietmar Schüwer und Nikolaus Supersberger. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW); Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Wuppertal.
- Flassbeck, Heiner (2014): 66 starke Thesen zum Euro, zur Wirtschaftspolitik und zum deutschen Wesen. Frankfurt am Main: Westend-Verl. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/878056118>.
- Forsberg, C. (2007): Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (4), S. 431–439. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.06.059.
- Fridley, David; Zheng, Nina; Zhou, Nan; Ke, Jing; Hasanbeigi, Ali; Morrow, Bill; Price, Lynn (2012): China Energy and Emissions Paths to 2030. 2nd Edition. Hg. v. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Fruehan, R. J. (2009): Research on Sustainable Steelmaking. In: *Metallurgical and Materials Transactions B* 40B (2), S. 123–133. DOI: 10.1007/s11663-008-9223-x.
- Garza, Carlos (2006): HYL Direct Reduction. In: *Raw Material and Ironmaking*, S. 43–45.
- Germeshuizen, L.M; Blom, P.W.E (2013): A techno-economic evaluation of the use of hydrogen in a steel production process, utilizing nuclear process heat. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (25), S. 10671–10682. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.06.076.
- Gerspacher, Andreas; Arens, Marlene; Eichhammer, Wolfgang (2011): Zukunftsmarkt Energieeffiziente Stahlherstellung. Fallstudie im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (FhG-ISI).

Prognos AG; GWS; Zentrum für Erneuerbare Energie (ZEE); orangequadrat; IfnE. Karlsruhe.

Hasan, Ali (2011): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen von industriellen Branchentechnologien durch Prozessoptimierung und Einführung neuer Verfahrenstechniken. Schlussbericht. Unter Mitarbeit von Barbara Schlomann, Tobias Fleiter, Simon Hirzel, Marlene Arens, Clemens Rohde, Wolfgang Eichhammer et al. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (FhG-ISI). IREES GmbH. Berlin.

Health and Safety Executive (2001): The explosion of No. 5 Blast Furnace, Corus UK Ltd, Port Talbot. In: *Health and Safety Executive* 09/08. Online verfügbar unter <http://www.hse.gov.uk/pubns/web34.pdf>.

Hegger, Josef; Goralski, Claus; Kulas, Christian (2011): Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2), S. 64–71. DOI: 10.1002/best.201000081.

Hermann, Hauke; Matthes, Felix Christian; Athmann, Uwe (2012): Potenziale und Chancen der Technologie zur CO₂-Abtrennung und –Ablagerung (CCS) für industrielle Prozessemissionen. Kurzstudie für die Umweltstiftung WWF Deutschland. Hg. v. Öko-Institut. dezentec; WWF.

Heubach, Daniel (2008): Eine funktionsbasierte Analyse der Technologierelevanz von Nanotechnologie in der Produktplanung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/600462599>.

Hinkelmann, Reinhard (2005): Efficient numerical methods and information-processing techniques for modeling hydro and environmental systems. 1st ed. Berlin, New York: Springer (Lecture notes in applied and computational mechanics, 21).

HyWays-IPHE (2008): Benchmarking of the European Hydrogen Energy Road-map. Hg. v. European Commission.

Icha, Petra (2013): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012. Unter Mitarbeit von Marion Dreher. Hg. v. Umweltbundesamt. Fachgebiet I 2.5 Energieversorgung und -daten. Dessau-Roßlau (Climate Change).

Immerthal, Lars; von der Gracht, Heiko (2013): Stahl 2020. Szenarien der globalen Entwicklung. Hg. v. KPMG. BrainNet. Berlin.

Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (2007a): Climate Change 2007: Impact, Adaption and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the 4th Assessment Report of the IPCC. Unter Mitarbeit von Martin Parry, Osvaldo Canziani, Jean Palutikof, van der Linden, Paul und Clair Hanson. Hg. v. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

- Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (2007b): Climate Change 2007: Synthesis report. Unter Mitarbeit von Lenny Bernstein, Peter Bosch, Osvaldo Canziani, Zenlin Chen und Renate Christ. Hg. v. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (2011): Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Unter Mitarbeit von Ottmar Edenhofer und Ramón Pichs-Madruga. Hg. v. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (2014a): Climate Change 2014. Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Unter Mitarbeit von Manfred Fischedick und Joyashree Roy. Hg. v. Cambridge University Press. Cambridge.
- Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (2014b): Climate Change 2014: Synthesis Report. Summary for Policymakers.
- Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (2014c): Climate Change 2014: Synthesis Report. IPCC Fifth Assessment Synthesis Report (AR5).
- International Energy Agency (IEA) (2007): World Energy Outlook 2007. China and India Insights. Paris.
- International Energy Agency (IEA) (2010a): Energy Technologie Perspectives. Scenario & Strategies to 2050. Paris.
- International Energy Agency (IEA) (2010b): World Energy Outlook 2010. Hg. v. IEA Publications. Paris.
- International Energy Agency (IEA) (2012a): CO₂ Emission from Fuel Combustion. Highlights. Paris (IEA Statistics, Edition 2012).
- International Energy Agency (IEA) (2012b): Energy technology perspectives 2012. Pathways to a clean energy system. International Energy Agency. Paris. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/817964303>.
- International Energy Agency (IEA) (2013): World Energy Outlook 2013. Paris.
- Jordan, Thomas (2008): Skript zur Vorlesung über Wasserstofftechnologie. Institut für Kern- und Energietechnik Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Karlsruhe, 2008.
- Jordan, Thomas (2009): Safety of Hydrogen as an Energy Carrier. Final Activity Report. Hg. v. HySafe. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- Kessler, Klaus, Thyssen Krupp Steel Europe AG, Manager Environmental Affairs (2014): Fachdiskussion zu Potentialen innovativer Stahlherstellungsverfahren. Duisburg, 2/21/2014. Mündlich an Max Weigel.
- Kirchner, Almut; Matthes, Felix Christian (2009): Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Hg. v. World Wildlife Fund (WWF) Deutschland. Prognos AG; Öko-Institut. Basel/Berlin.

- Kirschen, Marcus; Badr, Karim; Pfeifer, Herbert (2011): Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. In: *Energy* 36 (10), S. 6146–6155. DOI: 10.1016/j.energy.2011.07.050.
- Klaus, Thomas; Vollmer, Carla; Werner, Kathrin; Lehmann, Harry; Müschen, Klaus (2010): Energieziel 2050. 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Klemm, A. (2011): Die Schlüsselrolle der Kryotechnik in der Wasserstoff-Energiewirtschaft. TU Dresden, Professur für Kälte- und Kryotechnik. Dresden. Online verfügbar unter <http://tu-dresden.de>, zuletzt geprüft am 9/2/2013.
- Koepf, Marcus; Ackermann, Thomas; Lehr, Ulrike; Tietz, Hans-Peter (2014): Entwicklung und Durchführung einer Impactanalyse für den Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen. Vorläufiger Endbericht. Prognos AG; Energynautics GmbH; GWS mbH.
- Koroneos, C. (2004): Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 29 (14), S. 1443–1450. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2004.01.016.
- KPMG (2011): China's 12th Five Year Plan: Iron and Steel. KPMG China.
- Krüger, Christine (2013): Nachhaltiger Umgang mit überschüssigen Windstromanteilen. In: *Solarzeitalter* 01/2013, S. 26–32.
- Krupp, Ralf (2010): Geologische Kurzstudie zu den Bedingungen und möglichen Auswirkungen der dauerhaften Lagerung von CO₂ im Untergrund. Hg. v. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). Berlin. Online verfügbar unter http://www.bund-brandenburg.de/fileadmin/bundgruppen/lvbrandenburg/Klimaschutz_Energie/20101118_klima_energie_ccs_studie.pdf.
- Kühnapfel, Jörg B. (2014): Das Vorgehen bei der Nutzwertanalyse. In: Jörg B. Kühnapfel (Hg.): Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (essentials), S. 5–20.
- Larsson; Henrik (2011): Comparing Life Cycle Assessment of Li-ion batteries and fuel cells in chargers for small electronic applications. A comparison of the environmental impact of portable cell phone chargers. Chalmers University of Technology, Göteborg. Division of Energy Technology.
- Latscha, Hans Peter; Klein, Helmut Alfons (2007): Anorganische Chemie. Chemie-Basiswissen I. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lechtenböhmer, Stefan (2008): Zur Qualität nationaler Energie- und Emissionsprojektionen. Eine quantitative und hypothesenbasierte Analyse ihrer Genauigkeit am Beispiel der US-Energienachfrage- und Emissionsprojektionen der Jahre 1983 bis

2004. Dissertation. Universität Flensburg, Flensburg. Institut für Internationales Management.
- Lelong, Christian; Layton, Max; Currie, Jeffrey; Yuan, Roger; Cai, Amber (2014): Mining commodities outlook for 2014 and beyond. Hg. v. Goldman Sachs (Commodities Research).
- Lindroos, Tomi J. (2009): Sectoral approaches in the case of the iron and steel industry. Espoo (VTT working papers).
- Mahr, Matthias (2009): Klares Votum für Glas. In: *neu verpackung* 6.2009 (6), S. 40–41. Online verfügbar unter http://www.neue-verpackung.de/wp-content/uploads/migrated/docs/1795_9863.pdf, zuletzt geprüft am 7/17/2014.
- Matthes, Felix Christian; Busche, Julia; Döring, Ulrike; Emele, Lukas; Gores, Sabine; Harthan, Ralph et al. (2013): Politikszenerarien für den Klimaschutz VI. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Hg. v. Umweltbundesamt. Öko-Institut; Institut für Angewandte Ökologie; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin); Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (FhG-ISI). Dessau-Roßlau, Deutschland. Online verfügbar unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4412.html>.
- Mazloomi, Kaveh; Gomes, Chandima (2012): Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (5), S. 3024–3033. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.028.
- Merten, Frank; Krüger, Christine; Nebel, Arjuna; Samadi, Sascha; Soukop, Ole (2013): Nachhaltiger Umgang mit überschüssigen Windstromanteilen (Vorstudie). Endbericht an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Unter Mitarbeit von Daniel Hilker. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI). Wuppertal.
- Metz, Bert (2005): IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC). Cambridge.
- Midrex (2013): World Direct Reduction Statistics 2013. Unter Mitarbeit von Sponge Iron Manufacturers Association – India, Tenova HYL – Mexico, World Steel Association – Belgium und All Individual MIDREX® Direct Reduction Plants. Hg. v. Midrex Technologies. Englewood Cliffs, USA.
- Midrex Technologies, Inc (2014a): Shaft Furnace Technologies. Solutions for Steelmakers. Online verfügbar unter <http://www.midrex.com/uploads/documents/MIDREXShaftBrochure.pdf>, zuletzt geprüft am 9/17/2014.
- Midrex Technologies, Inc (2014b): The World of Direct Reduction. Midrex Technologies, Inc. Online verfügbar unter <http://www.midrex.com/>, zuletzt geprüft am 9/23/2014.

- Milford, Rachel L.; Pauliuk, Stefan; Allwood, Julian M.; Müller, Daniel B. (2013): The Roles of Energy and Material Efficiency in Meeting Steel Industry CO₂ Targets. In: *Environ. Sci. Technol.* 47 (7), S. 3455–3462. DOI: 10.1021/es3031424.
- Morfeldt, Johannes; Nijs, Wouter; Silveira, Semida (2014): The impact of climate targets on future steel production – an analysis based on a global energy system model. In: *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.04.045.
- Morgan Stanley Research Global (2013): Global Steel. Steeling for oversupply. Unter Mitarbeit von Alexander A Haissle, Dmitriy Kolomytsyn, Evan Kurtz, Carlos de Alba, Harunobu Goroh, Rachel Zhang et al. Hg. v. Morgan Stanley alpha wise. New York (Morgan Stanley Blue Paper).
- Moya, J. A.; Pardo, N. (2013): The potential for improvements in energy efficiency and CO₂ emissions in the EU27 iron and steel industry under different payback periods. In: *Journal of Cleaner Production* 52, S. 71–83.
- Neelis, Maarten; Patel, Martin (2006): Long-term production, energy consumption and CO₂ emission scenarios for the worldwide iron and steel industry. Hg. v. Netherlands' Environment Assessment Agency (MNP). Copernicus Institute. Uetrecht.
- Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Naegler, Tobias (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Leitstudie 2010. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE). Stuttgart, Kassel, Teltow.
- Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Naegler, Tobias (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht Leitstudie. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE). Stuttgart, Kassel, Teltow.
- Nuber, Dirk; Eichberger, Heinz; Rollinger, Bernt (2006): Circored fine ore direct reduction. In: *Millenium Steel* 2006, S. 37–40. Online verfügbar unter <http://www.millennium-steel.com/articles/pdf/2006/pp37-40%20MS06.pdf>, zuletzt geprüft am 8/22/2013.
- OECD (2010): Iron and Steel in Industry 2009. OECD Statistics on Measuring Globalisation. Excel Table. Online verfügbar unter 10.1787/data-00372-en, zuletzt aktualisiert am 4/13/2010, zuletzt geprüft am 6/4/2014.
- Oei, Pao-Yu; Herold, Johannes; Tissen, Andreas (2011): CO₂ Speicherung in Deutschland: Eine Brückentechnologie als Klimailösung? In: *Z Energiewirtschaft* 35 (4), S. 263–273. DOI: 10.1007/s12398-011-0061-1.

- Pardo, N.; Moya, J. A. (2013): Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the European Iron & Steel industry. In: *Energy* 54, S. 113–128. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.015>.
- Pardo, N.; Moya, J. A.; Vatopoulos, K. (2012): Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the EU iron & steel industry. Hg. v. European Commission - JRC. Institute for Energy and Transport. Luxemburg.
- Pauliuk, Stefan; Milford, Rachel L.; Müller, Daniel B.; Allwood, Julian M. (2013): The Steel Scrap Age. In: *Environ. Sci. Technol.*, S. 130307142353004. DOI: 10.1021/es303149z.
- Pehnt, Martin (2001): Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik, Düsseldorf.
- PKF International Tax Committee (Hg.) (2013): Worldwide Tax Guide.
- Pregger, Thomas; Graf, Daniela; Krewitt, Wolfram; Sattler, Christian; Möller, Stephan (2008): Perspektiven solarthermischer Verfahren zu Wasserstoffherstellung. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Institut für Technische Thermodynamik. Stuttgart.
- Ramming, Horst (2003): Studie zu den Wasser - und Abwasserkosten. Hg. v. IHK für Oberfranken Bayreuth.
- Remus, Rainer; Roudier, Serge; Aguado-Monsonet, Miguel; Aguado-Monsonet, Miguel A.; Delgado Sancho, Luis (2013): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production // Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) // Industrial emissions directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control. Hg. v. European Commission - JRC. Institute for prospective technological studies. Luxemburg. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/847463021>.
- Rieke, Stephan (2010): Das Erdgasnetz als Systemintegrator zur Verstärkung von Wind- und Solarstrom. In: *Energie/Wasser - Praxis* 09/2010, S. 66–72. Online verfügbar unter http://www.gat-dvgw.de/fileadmin/gat/newsletter/pdf/pdf_2010/03_2010/ewp_0910_66-72_Rieke.pdf, zuletzt geprüft am 7/18/2014.
- Rigas, F.; Sklavounos, S. (2005): Evaluation of hazards associated with hydrogen storage facilities. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (13-14), S. 1501–1510. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2005.06.004.
- Ropohl, Günter (2009): Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. In: *Allgemeine Technologie*.

- Rotering, Joachim; Hochberg, Peter von; Naujok, Nils; Schmidt-Brockhoff, Timo (2012): Die Stahlindustrie in Deutschland. „Rückgrat des Industriestandorts Deutschland“. Booz and Company. Deutschland.
- Schenk, Johannes Leopold (2011): Recent status of fluidized bed technologies for producing iron input materials for steelmaking. In: *Particuology* 9 (1), S. 14–23. DOI: 10.1016/j.partic.2010.08.011.
- Schindler, Jörg; Schmidt, Patrick (2004): Brennstoffzellen und Wasserstoff-Technologien als wirtschaftliche Chance für Hamburg. Endbericht. 1.1. Aufl. Unter Mitarbeit von Werner Weindorf, Reinhold Wurster und Martin Zerta. Hg. v. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH.
- Schinko, Thomas; Bednar-Friedl, Birgit; Steininger, Karl W.; Grossmann, Wolf D. (2014): Switching to carbon-free production processes: Implications for carbon leakage and border carbon adjustment. In: *Energy Policy* 67, S. 818–831. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.11.077.
- Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Dr. Lutz, Christian (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Prognos AG; EWI; GWS. Basel/Köln/Osnabrück.
- Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Dr. Lutz, Christian (2011): Energieszenarien 2011. Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Prognos AG; EWI; GWS. Basel/Köln/Osnabrück.
- Schnurnberger, Werner; Janßen, Holger; Wittstadt, Ursula (2004): Wasserspaltung mit Strom und Wärme. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) (FVS Themen 2004). Online verfügbar unter http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004_03_01.pdf, zuletzt geprüft am 3/10/2013.
- Schreck, Bettina; Trudeau, Nathalie (2011): Technology Roadmap. Carbon Capture and Storage in Industrial Applications. Hg. v. International Energy Agency (IEA) und United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Paris.
- Schwaiger, K. (1996): Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE). Hg. v. Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V. Forschungsstelle für Energiewirtschaft. München.
- Smola, Thomas (2001): Das Spaltenmodell. Eine Hilfestellung zur Gefahrenermittlung und Ersatzstoffprüfung nach § 16 Gefahrstoffverordnung. Hg. v. Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit. Sankt Augustin.
- Smolinka, Tom; Günther, Martin; Garche, Jürgen (2011): „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“. Kurzfassung des Abschlussberichts. Hg. v. Nationale Organisation Was-

- serstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW). Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). Berlin.
- Sondeijker, Saartje (2009): *Imagining sustainability. Methodological building blocks for transition scenarios = Verbeelden van duurzaamheid*. Rotterdam: Erasmus Univ.
- Spath, Dieter (Hg.) (2010): *Technologiemonitoring. Technologien identifizieren, beobachten und bewerten*. Unter Mitarbeit von Sven Schimpf und Claus Lang-Koetz. Fraunhofer IAO, zuletzt geprüft am 1/11/2013.
- Spath, Pamela L.; Mann, Margaret K.; Kerr, Dawn R. (1999): *Life cycle assessment of coal-fired power production*. Golden, Colo. (1617 Cole Blvd., Golden 880401-3393).
- Stahlinstitut VDEh (2013): *Zahlen und Fakten*. Hg. v. Stahlinstitut VDEh. Online verfügbar unter http://www.stahl-online.de/Deutsch/Linke_Navigation/Stahl_in_Zahlen/index.php, zuletzt aktualisiert am 3/23/2013, zuletzt geprüft am 3/23/2013.
- Stahlinstitut VDEh (2014): *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2013/2014*. Unter Mitarbeit von Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf.
- Stahlinstitut VDEh; Wirtschaftsvereinigung Stahl; The Boston Consulting Group (BCG) (Hg.) (2010): *CO₂-Bilanz Stahl. Ein Beitrag zum Klimaschutz*.
- Statistisches Bundesamt (2007): *Klassifikation der Wirtschaftszweige. WZ 2008, vom Ausgabe 2008*. Online verfügbar unter www.destatis.de.
- Statistisches Bundesamt (2012): *Außenhandel. Zusammenfassende Übersichten für den Außenhandel (endgültige Ergebnisse)*. Hg. v. DESTATIS. Wiesbaden (Fachserie 7 Reihe 1).
- Statistisches Bundesamt (2013): *Umweltnutzung und Wirtschaft. Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Teil 2: Energie und Teil 3: Luftemissionen*. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2014): *Umweltnutzung und Wirtschaft. Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen Teil 2: Vorbericht Energie*. Wiesbaden.
- Steelonthenet.com (2014): *WORLD STEEL INDUSTRY NEWS, PRICE INFORMATION, CONTACTS & EXPERT CONSULTING SUPPORT*. Online verfügbar unter <http://www.steelonthenet.com/>, zuletzt geprüft am 9/23/2014.
- Steinmüller, Karlheinz (1997): *Grundlagen und Methoden der Zukunftsforschung. Szenarien, Delphi, Technikvorschau. Werkstattbericht 21*. Gelsenkirchen: Sekretariat für Zukunftsforschung.
- ThyssenKrupp AG (2014): *Die Chroniken. 20.11.1811 Gründung der Gusstahlfabrik durch Friedrich Krupp*. Online verfügbar unter

http://www.thyssenkrupp.com/de/konzern/geschichte_chronik_k1811.html, zuletzt aktualisiert am 9/23/2014, zuletzt geprüft am 8/26/2013.

Töpler, Johannes; Lehmann, Jochen (Hg.) (2014): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/864451428>.

Tse, Pui-Kwan (2013): The Mineral Industry of China in 2011. USGS National Minerals Information Center, zuletzt geprüft am 7/29/2014.

Tzimas, Evangelos (2009): 2009 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan). Part I: Technology Description. Hg. v. European Commission - JRC. SETIS. Luxemburg.

U.S. Geological Survey (2011): Mineral commodity summaries 2011. Unter Mitarbeit von Ken Salazar und Marcia Mc Nutt. Hg. v. U.S. Geological Survey. Reston, USA.

Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS) (Hg.) (2013): Steel. Online verfügbar unter <http://www.ulcos.org/de/steel/home.php>, zuletzt aktualisiert am 3/23/2013, zuletzt geprüft am 3/23/2013.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) VDI 2803, 1996: Funktionenanalyse.

Vertreter aus beispielhafter Umweltorganisation (2014): Interview zum Thema MCA Gewichtungsfaktoren. Berlin, 5/6/2014 an Max Weigel.

Vertreter aus Landesregierung NRW (2014): Interview zum Thema MCA Gewichtungsfaktoren. Düsseldorf, 5/7/2014 an Max Weigel.

Voigt, Nicole; Schmidt, Torben, The Boston Consulting Group (BCG) (2014): Fachdiskussion über Modellannahmen für Szenarien der Eisen und Stahlindustrie. Sylt, Göttingen, 2/7/2014. Telefonat an Max Weigel.

Wang, Jiang-Jiang; Jing, You-Yin; Zhang, Chun-Fa; Zhao, Jun-Hong (2009): Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. In: *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS* 13 (9), S. 2263–2278. DOI: 10.1016/j.rser.2009.06.021.

Wang, Ke; Wang, Can; Lu, Xuedu; Chen, Jining (2007): Scenario analysis on CO₂ emissions reduction potential in China's iron and steel industry. In: *Energy Policy* 35 (4), S. 2320–2335. DOI: 10.1016/j.enpol.2006.08.007.

Weißbach, D.; Ruprecht, G.; Huke, A.; Czerski, K.; Gottlieb, S.; Hussein, A. (2013): Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. In: *Energy* 52, S. 210–221. DOI: 10.1016/j.energy.2013.01.029.

World Meteorological Organization (2013): WMO Greenhouse Gas Bulletin.

World Steel Association (2012): Sustainable steel. At the core of a green economy. Hg. v. World Steel Association. Brüssel. Online verfügbar unter

<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/Sustainable-steel-at-the-core-of-a-green-economy/document/Sustainable-steel-at-the-core-of-a-green-economy.pdf>.

World Steel Association (2013a): Steel Statistical Yearbook 2013. Brüssel.

World Steel Association (2013b): World Steel in Figures 2013. Hg. v. World Steel Association. Brüssel.

World Steel Association (2014): World Steel in Figures 2014. World Steel Association. Brüssel. Online verfügbar unter <http://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2014/World-Steel-in-Figures-2014-is-available-online.html>, zuletzt geprüft am 6/30/2014.

Worrell, Ernst; Price, Lynn; Neelis, Maarten; Galitsky, Christina; Nan, Zhou (2008): World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors. Rev. 2. Hg. v. Ernst Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Environmental Energy Technologies Division. Berkeley.

Wörtler, Martin; Schuler, Felix; Voigt, Nicole; Schmidt, Torben; Dahlmann, Peter; Lungen, Hans Bodo; Ghenda, Jean-Theo (2013): Steel's contribution to a low carbon Europe 2050. Technical and economic analysis of the sectors CO₂ abatement potential. Hg. v. The Boston Consulting Group (BCG). Steel Institute (VDEh). Boston.

Wurster, Reinhold; Schmidtchen, Ulrich (2011): DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium. Unter Mitarbeit von Reinhold Wurster und Ulrich Schmidtchen. Hg. v. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV). Karlsruhe.

Yuan, Boyan; Haarberg, Geir Martin (2008): Electrowinning of Iron in Aqueous Alkaline Solution Using Rotating Disk Electrode. Hg. v. Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS). Norwegian University of Science and Technology Trondheim. Trondheim.

Zeiss, Christoph; Valentin, Daniel (2011): Klimaschutz NRW 2020+ (2050). Handlungsoptionen und Handlungsnotwendigkeiten. Im Auftrag des Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz (MKULNV) des Landes Nordrhein-Westfalen. Unter Mitarbeit von Claus Barthel, Carmen Dienst, Ulrich Jansen, Stefan Lechtenböhmer, Hans-Jochen Luhmann, Andreas Pastowski et al. Hg. v. Wuppertal Institut. Wuppertal.

Zopounidis, Constantin; Pardalos, Panos M. (2010): Handbook of Multicriteria Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (103).

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

