

CLIMATE CHANGE

05/2024

Teilbericht

Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarbInd)

AP 1: Ganzheitliches Bewertungsschema für Technologien

von:

Peter Viebahn, Dietmar Schüwer, Georg Holtz, Andreas Pastowski, Jacqueline Klingen, Sören Steger
Wuppertal Institut, Wuppertal

Ali Aydemir
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Herausgeber:
Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 05/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 41 303 0
FB001167

Teilbericht

Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarInd)

AP 1: Ganzheitliches Bewertungsschema für
Technologien

von

Peter Viebahn, Dietmar Schüwer, Georg Holtz, Andreas
Pastowski, Jacqueline Klingen, Sören Steger
Wuppertal Institut, Wuppertal

Ali Aydemir
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Fraunhofer ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

In Zusammenarbeit mit:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal

Abschlussdatum:

Juli 2022

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie Christian Lehmann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Januar 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Ganzheitliches Bewertungsschema für Technologien, entwickelt in Dekarbld

Zur Erreichung der Pariser Klimaziele ist es notwendig, die industrielle Produktion auf klimaneutrale Prozesse umzustellen. Hierfür werden gegenwärtig eine Reihe von Technologien erforscht oder bereits getestet. Auf dem Weg vom Labor- zum Demonstrationsmaßstab wurden diese bisher überwiegend anhand von techno-ökonomischen Kriterien bewertet. Für eine nachhaltige Entwicklung sind jedoch auch zahlreiche andere Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte relevant, wie in den seit 2015 weltweit gültigen Sustainable Development Goals (UN 2019) zum Ausdruck kommt. Deshalb ist eine ganzheitliche Betrachtung angebracht, bei der neben techno-ökonomischen Kriterien auch ökologische, soziale und systemische Aspekte berücksichtigt werden. Im nachfolgenden Bericht wird hierfür eine Methode entwickelt, die in drei Schritten angewandt wird. Ihr Kernstück ist ein Kriterienraster mit zugehörigen Indikatoren. Abschließend wird die Methode beispielhaft für Technologien im Stahl- und Zementsektor getestet, sie ist jedoch auch auf andere Technologien übertragbar.

Abstract: Holistic evaluation framework for technologies, developed in Dekarbld

To achieve Paris climate goals, it is necessary to change industrial production towards climate-neutral production. For this, a number of technologies are under research or already being tested. On their way from laboratory to demonstration scale, these have been assessed mainly on the basis of techno-economic criteria so far. However, for sustainable development, numerous other environmental and sustainability aspects are relevant as well, as reflected in the Sustainable Development Goals (UN 2019), valid worldwide since 2015. Therefore, a holistic view is appropriate, considering not only techno-economic criteria but also ecological, social and systemic aspects. For this a method is developed in the following report, which is applied in three steps. Key to the method is a criteria framework with associated indicators. Finally, the method is tested exemplarily for technologies in the steel and cement sector, although its application can also be transferred to other technologies.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	14
Zusammenfassung.....	16
Summary	19
1 Zielsetzung und methodischer Hintergrund	21
1.1 Zielsetzung der Bewertung	21
1.2 Ableitung der Bewertungsmethodik.....	22
2 Durchführen der Bewertung.....	28
2.1 Vorbemerkung	28
2.2 Beschreibung der Technologien (Entwicklungsstand).....	28
2.3 Drei Bewertungsschritte	29
3 Bewertungsleitfaden.....	40
3.1 Kriterium 1: Technische Verfügbarkeit	40
3.2 Kriterium 2: Energieeffizienz.....	43
3.3 Kriterium 3: Treibhausgas-Effizienz	46
3.4 Kriterium 4: Kosteneffizienz.....	49
3.5 Kriterium 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten.....	52
3.6 Kriterium 6: Risiken für die Minderung der THG-Emissionen.....	55
3.7 Kriterium 7: Regionale Abhängigkeiten	58
3.8 Kriterium 8: Notwendige Rahmenbedingungen	61
3.9 Kriterium 9: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft.....	64
3.10 Kriterium 10: Infrastrukturabhängigkeit.....	73
3.11 Kriterium 11: Anlagensicherheit	77
3.12 Kriterium 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen	81
3.13 Zusammenführung aller Kriterien pro Technologiegruppe	84
4 Verlauf und Ergebnis der Präsentation des Bewertungstools	85
5 Quellenverzeichnis.....	87
A Anhang: Muster des Excel-Tools zum Eintragen der Werte pro Technologie	88
B Anhang: Exemplarischer Test des Bewertungsschemas für die Zementindustrie: Vergleichende Bewertung von Optionen zur Bereitstellung thermischer Energie für die Klinkerproduktion	89

B.1	Festlegung von Bezugsgrößen und einheitlichen Annahmen zu Rahmenparametern für alle bewerteten Technologien	89
B.2	Zusammenfassende Erkenntnisse aus der multikriteriellen Bewertung	91
B.3	Vorbemerkungen zu den Optionen	93
B.4	Bewertung der Optionen	96
C	Anhang: Exemplarischer Test des Bewertungsschemas für die Stahlindustrie: Vergleichende Bewertung von Optionen zur kohlefreien Herstellung von Stahl	126
C.1	Systemgrenzen.....	126
C.2	Zusammenfassende Erkenntnisse.....	128
C.3	Bewertung der Optionen	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Exemplarische Technologiegruppen für die Erstellung von Technologie-Roadmaps zur Dekarbonisierung der Stahl- und/oder Zementindustrie	23
Abbildung 2:	Bewertungsdimensionen und ihre Kriterien für eine multikriterielle Bewertung von Low-Carbon-Technologien der Grundstoffindustrie in Dekarbld	24
Abbildung 3:	Zwei Bewertungsebenen in Dekarbld: (1) bezogen auf den Standort der Technologien (Unternehmen) und (2) die Unternehmensumwelt	26
Abbildung 4:	Beispielhafte vergleichende Einschätzung einer fiktiven Technologiegruppe	38
Abbildung 5:	Zusammenfassende Bewertung der vier Energieträger-Optionen nach Farbschema.....	91
Abbildung 6:	Systemgrenzen zur Berechnung der Energieindikatoren	127
Abbildung 7:	Zusammenfassende Bewertung der Optionen nach Farbschema.	128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kriterien und Indikatoren der Bewertungsmethode.....	17
Tabelle 2:	Criteria and indicators of the evaluation method	20
Tabelle 3:	Kriterien und Bewertungsebenen	27
Tabelle 4:	Indikatoren sowie Zuordnung zu einer „Vergleichsebene“	29
Tabelle 5:	Übersicht Kriterieneinschätzung der Kriterien in Bewertungsblock 2	31
Tabelle 6:	Vergleich der Bewertung verschiedener Technologien einer Gruppe hinsichtlich Indikator X	32
Tabelle 7:	Beispiel: Fiktiver Vergleich der Energieeffizienz dreier Technologien einer Gruppe	32
Tabelle 8:	Darstellung des Wertebereichs der beispielhaften fiktiven Darstellung der Energieeffizienz.....	33
Tabelle 9:	Übersicht Kriterieneinschätzung der Kriterien in Bewertungsblock 3	34
Tabelle 10:	Beispiel: Fiktiver Vergleich der Pfadabhängigkeit dreier Technologien einer Gruppe	34
Tabelle 11:	Übersicht Kriterieneinschätzung der Kriterien in Bewertungsblock 4	36
Tabelle 12:	Übersicht Farbbewertung der Kriterien in Block 4.....	37
Tabelle 13:	Beispiel: Fiktiver Vergleich der Anlagensicherheit zweier Technologien	37
Tabelle 14:	Überblick zu Kriterium 1: Technische Verfügbarkeit.....	40

Tabelle 15:	TRL-Definition für Zwecke der Bewertung von dekarbonisierten industriellen Technologien	41
Tabelle 16:	Bewertungsskala für die technische Verfügbarkeit der betrachteten Technologie	42
Tabelle 17:	Vergleich der technischen Verfügbarkeit verschiedener Technologien einer Gruppe	42
Tabelle 18:	Überblick zu Kriterium 2: Energieeffizienz	43
Tabelle 19:	Bewertung der Energieeffizienz der betrachteten Technologie im Zeitablauf.....	45
Tabelle 20:	Vergleich der Energieeffizienz verschiedener Technologien einer Gruppe.....	46
Tabelle 21:	Überblick zu Kriterium 2: Treibhausgas-Effizienz	46
Tabelle 22:	Bewertung der THG-Effizienz der betrachteten Technologie im Zeitablauf.....	47
Tabelle 23:	Vergleich der THG-Effizienz verschiedener Technologien einer Gruppe.....	48
Tabelle 24:	Überblick zu Kriterium 4: Kosteneffizienz	49
Tabelle 25:	Bewertung der Kosteneffizienz der betrachteten Technologie im Zeitablauf.....	51
Tabelle 26:	Vergleich der Kosteneffizienz verschiedener Technologien einer Gruppe.....	52
Tabelle 27:	Überblick zu Kriterium 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten	52
Tabelle 28:	Bewertungsskala 1-6 für die semi-quantitative Bewertung der Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten der betrachteten Technologie	54
Tabelle 29:	Semi-quantitative Bewertung der Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten der betrachteten Technologie	54
Tabelle 30:	Vergleich der Stärke der Pfadabhängigkeit verschiedener Technologien einer Gruppe.....	55
Tabelle 31:	Überblick zu Kriterium 6: Risiken für die Minderung der THG-Emissionen.....	55
Tabelle 32:	Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der Risiken für die Minderung der THG-Emissionen durch die betrachtete Technologie	57
Tabelle 33:	Vergleich der Stärke der Risiken für die Minderung der THG-Emissionen verschiedener Technologien einer Gruppe.....	58
Tabelle 34:	Überblick zu Kriterium 7: Regionale Abhängigkeiten.....	58
Tabelle 35:	Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der möglichen regionalen Abhängigkeiten durch die betrachtete Technologie	60

Tabelle 36:	Vergleich der Stärke der möglichen regionalen Abhängigkeiten durch verschiedene Technologien einer Gruppe61
Tabelle 37:	Überblick zu Kriterium 8: Notwendige Rahmenbedingungen..61
Tabelle 38:	Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der möglichen notwendigen Rahmenbedingungen für die betrachtete Technologie63
Tabelle 39:	Vergleich der Bedeutung der notwendigen Rahmenbedingungen für verschiedene Technologien einer Gruppe64
Tabelle 40:	Überblick zu Kriterium Nr. 9: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft.....64
Tabelle 41:	Übersicht kritischer Rohstoffe.....70
Tabelle 42:	Skala für die semi-quantitative Bewertung der Veränderung von Stoffströmen und den Grad der Kreislaufwirtschaft, die bei der betrachteten Technologie erreicht werden72
Tabelle 43:	Vergleich der Veränderung von Stoffströmen und des Grades der Kreislaufwirtschaft verschiedener Technologien einer Gruppe73
Tabelle 44:	Überblick zu Kriterium 10: Infrastrukturabhängigkeit73
Tabelle 45:	Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der Infrastrukturabhängigkeiten der betrachteten Technologie ...75
Tabelle 46:	Vergleich der Stärke des Potenzials zur Verbesserung oder Verschlechterung von Infrastrukturabhängigkeiten verschiedener Technologien einer Gruppe77
Tabelle 47:	Überblick zu Kriterium Nr. 11: Anlagensicherheit.....77
Tabelle 48:	Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der Anlagensicherheit der betrachteten Technologie.....80
Tabelle 49:	Vergleich der Anlagensicherheit verschiedener Technologien einer Gruppe.....81
Tabelle 50:	Überblick zu Kriterium 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen81
Tabelle 51:	Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung des Potenzials zur Verbesserung oder Verschlechterung des Immissionsschutzes und Abfallaufkommens der betrachteten Technologie83
Tabelle 52:	Vergleich der Stärke des Potenzials zur Verbesserung oder Verschlechterung bei Immissionsschutz und Abfallaufkommen verschiedener Technologien einer Gruppe84
Tabelle 53:	Angenommene Strom- und CO ₂ -Preise, Primärenergie- und Emissionsfaktoren (plausible Schätzwerte).....90
Tabelle 54:	Indikator 2.1: Energieeffizienz: Spezifischer Energiebedarf* ...97
Tabelle 55:	Indikator 2.2: Energieeffizienz: Spezifischer Energiebedarf* ...98
Tabelle 56:	Indikator 3: Treibhausgas-Effizienz*99

Tabelle 57:	Indikator 4: Spezifische Kosten*.....	100
Tabelle 58:	Indikator 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten*	102
Tabelle 59:	Indikator 6: Grad der zukünftigen Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen*	103
Tabelle 60:	Indikator 7: Grad der regionalen Abhängigkeiten.....	104
Tabelle 61:	Indikator 8: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen*	105
Tabelle 62:	Indikator 9.1a: Veränderung von Stoffströmen: Intersektorale Rückwirkungen*	106
Tabelle 63:	Indikator 9.1b: Veränderung von Stoffströmen: Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen.....	108
Tabelle 64:	Indikator 9.1c: Veränderung von Stoffströmen: Verwendung kritischer Rohstoffe	109
Tabelle 65:	Indikator 9.2a: Grad der Kreislaufwirtschaft: Sektorale Abfallintensität	110
Tabelle 66:	Indikator 9.2b: Grad der Kreislaufwirtschaft: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen.....	111
Tabelle 67:	Indikator 9.2c: Grad der Kreislaufwirtschaft: EOL-RQ (End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe)	112
Tabelle 68:	Indikator 10.1: Infrastrukturabhängigkeit: Leitungsnetze für Elektrizität.....	113
Tabelle 69:	Indikator 10.2: Infrastrukturabhängigkeit: Leitungsnetze für Stofftransport	114
Tabelle 70:	Indikator 10.3: Infrastrukturabhängigkeit: Sonstige Infrastruktur	115
Tabelle 71:	Indikator 11.1a: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Humantoxizität.....	116
Tabelle 72:	Indikator 11.1b: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Ökotoxizität.....	117
Tabelle 73:	Indikator 11.1c: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko niedriger Flammpunkt.....	118
Tabelle 74:	Indikator 11.1d: I: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Bildung zündfähiger Gemische.....	119
Tabelle 75:	Indikator 11.1e: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko sonstige heftige Reaktionen.....	120
Tabelle 76:	Indikator 11.2a: Anlagensicherheit: Prozessbezogene Risiken: Risiken durch hohe Temperaturen.....	121
Tabelle 77:	Indikator 11.2b: Anlagensicherheit: Prozessbezogene Risiken: Risiken durch hohe Drücke*	122

Tabelle 78:	Indikator 12.1: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Gasförmige Emissionen (z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide, Quecksilber)123
Tabelle 79:	Indikator 12.2: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Abwässer (z. B. Säuren, Laugen).....124
Tabelle 80:	Indikator 12.3: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Feste Abfallstoffe (z. B. Aschen, Filterstäube)125
Tabelle 81:	Angenommene Strom- und CO ₂ -Preise, Primärenergie- und Emissionsfaktoren (plausible Schätzwerte).....127
Tabelle 82:	Indikator 1: Technische Verfügbarkeit: Jahr, in dem TRL 9 erreicht ist*130
Tabelle 83:	Indikator 2.1: Energieeffizienz: Spezifischer Energiebedarf (exklusive Rohstoffaufbereitung) *131
Tabelle 84:	Indikator 2.2: Energieeffizienz: Spezifischer Energiebedarf* .132
Tabelle 85:	Indikator 3: Treibhausgas-Effizienz*133
Tabelle 86:	Indikator 4: Spezifische Kosten*134
Tabelle 87:	Indikator 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten *135
Tabelle 88:	Indikator 6: Grad der zukünftigen Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen*138
Tabelle 89:	Indikator 7: Grad der regionalen Abhängigkeiten*139
Tabelle 90:	Indikator 8: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen*140
Tabelle 91:	Indikator 9.1a: Veränderung von Stoffströmen: Intersektorale Rückwirkungen*141
Tabelle 92:	Indikator 9.1b: Veränderung von Stoffströmen: Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen *142
Tabelle 93:	Indikator 9.1c: Veränderung von Stoffströmen: Verwendung kritischer Rohstoffe *143
Tabelle 94:	Indikator 9.2a: Grad der Kreislaufwirtschaft: Sektorale Abfallintensität *144
Tabelle 95:	Indikator 9.2b: Grad der Kreislaufwirtschaft: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen *145
Tabelle 96:	Indikator 9.2c: Grad der Kreislaufwirtschaft: EOL-RQ (End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe) *146
Tabelle 97:	Indikator 10.1: Infrastrukturabhängigkeit: Leitungsnetze für Elektrizität*147
Tabelle 98:	Indikator 10.2: Infrastrukturabhängigkeit: Leitungsnetze für Stofftransport*148
Tabelle 99:	Indikator 10.3: Infrastrukturabhängigkeit: Sonstige Infrastruktur *149

Tabelle 100:	Indikator 11.1a: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Humantoxizität.....	151
Tabelle 101:	Indikator 11.1b: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Ökotoxizität *	152
Tabelle 102:	Indikator 11.1c: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko niedriger Flammpunkt *	153
Tabelle 103:	Indikator 11.1d: I: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Bildung zündfähiger Gemische *	154
Tabelle 104:	Indikator 11.1e: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko sonstige heftige Reaktionen *	155
Tabelle 105:	Indikator 11.2a: Anlagensicherheit: Prozessbezogene Risiken: Risiken durch hohe Temperaturen *	156
Tabelle 106:	Indikator 11.2b: Anlagensicherheit: Prozessbezogene Risiken: Risiken durch hohe Drücke*	157
Tabelle 107:	Indikator 12.1: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Gasförmige Emissionen (z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide, Quecksilber)	158
Tabelle 108:	Indikator 12.2: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Abwässer (z. B. Säuren, Laugen).....	159
Tabelle 109:	Indikator 12.3: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Feste Abfallstoffe (z. B. Aschen, Filterstäube)	160

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
%	Prozent
€	Euro
a	anno
AP	Arbeitspaket
Äq	Äquivalent
BAUA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BG RCI	Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BREF	Best Available Techniques Reference
BVT	Besten Verfügbaren Techniken
bzw.	beziehungsweise
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)
CCS	Carbon Capture and Storage (deutsch: CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
CH ₄	Methan
CSH	Calciumsilikathydrate
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Dekarblind	Projekt „Dekarbonisierung der industriellen Produktion“
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DERec	Inländische, direkte Ressourcenschonungseffekte (korrespondierend zum Inländischen Materialeinsatz, Direct Material Input, DMI)
DIERec	Inländische und globale, direkte und indirekte Ressourcenschonungseffekte (korrespondierend zum Raw Material Input, RMI)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMI	Inländischer Materialeinsatz
DR	Direct Reduced
DRI	Direct Reduced Iron
EAF	Elektrolichtbogenofen (engl. Electric Arc Furnace)
EEA	Europäische Umweltagentur
EOL-RQ	End-of-life-Recyclingquote
EU	Europa
EUR	Euro
ggf.	gegebenenfalls
GHG	Greenhouse Gas
GJ	Giga Joule
H ₂	Wasserstoff
i. d. R.	in der Regel

Abkürzung	Bedeutung
INFOSIS	Informationssystem zum Stand der Sicherheitstechnik
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
K	Kosten
kg	Kilogramm
KRA	kumulierten Rohstoffaufwand
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LC³	Limestone Calcined Clay Cement
LCA	Lebenszyklusanalyse (engl. life cycle assessment)
LCOO	Levelised Cost of Output
MC(D)A	Multicriteria (Decision) Analysis
Mio.	Millionen
O₂	molekularer Sauerstoff
OPEX	Operational Expenditures (Betriebskosten)
R-Zement	CO ₂ -arme Herstellung des Klinkerminerals Dicalciumsilikat aus Recycling - Baustoffen
RMI	Raw Material Input
SWOT	Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken)
t	Tonne
TAB	Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readyness Level
u. a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
VCI	Verband der Chemischen Industrie
z. B.	zum Beispiel

Zusammenfassung

Zur Erreichung der Pariser Klimaziele ist es notwendig, die industrielle Produktion auf klimaneutrale Prozesse umzustellen. Hierfür werden laufend neue Technologien erforscht oder bereits getestet¹. Auf dem Weg vom Labor- zum Demonstrationsmaßstab werden diese bisher vor allem nach technisch-ökonomischen Kriterien bewertet². Für eine nachhaltige Entwicklung sind jedoch auch zahlreiche andere Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte relevant, wie in den seit 2015 weltweit gültigen Sustainable Development Goals (UN 2019) zum Ausdruck kommt. Deshalb ist eine ganzheitliche Betrachtung angebracht, bei der neben techno-ökonomischen Kriterien auch ökologische, soziale und systemische Aspekte berücksichtigt werden. Hierfür wurde im Rahmen des DekarbInd-Projekts eine entsprechende Methode entwickelt und in ein Excel-Tool implementiert, die in diesem Bericht dargestellt wird. Neben der Höhe der Treibhausgaseinsparungen wurden elf weitere Kriterien definiert, die dabei helfen, Technologien in einem frühen Planungs- und Entwicklungsstadium ganzheitlich zu bewerten. Die Methode ist also kein Entscheidungsinstrument im klassischen Sinne. Vielmehr dient sie dazu, langfristige Entwicklungen zu berücksichtigen und mögliche Einschränkungen und Konflikte frühzeitig zu erkennen, indem diese aus einer ganzheitlichen Perspektive betrachtet werden. Im Anhang wird die Methode beispielhaft für Technologien im Stahl- und Zementsektor getestet; sie kann und sollte aber auch auf andere Technologien angewendet werden.

Methodenkern

Kernstück der Methode ist ein Kriterienraster mit zugehörigen Indikatoren, anhand derer eine vergleichende Bewertung für Technologien durchgeführt wird. Das Kriterienraster ist in vier Bewertungsblöcke unterteilt.

- ▶ Der erste Block dient der Bewertung des Einsatzhorizonts einer Technologie. Dementsprechend wird das Kriterium der technischen Verfügbarkeit mit quantitativen Indikatoren zur technologischen Reife (TRL) beschrieben.
- ▶ Der zweite Block enthält Effizienzkriterien, deren zugehörige quantitative Indikatoren jeweils mit einer Formel erfasst und mit einem konkreten Wert versehen werden.
- ▶ Der dritte und vierte Block enthält Kriterien, deren zugehörige Indikatoren semi-quantitativ erfasst werden, d. h. die Bewerter vergeben einen Wert auf einer Skala von 1 - 6 im Sinne einer Schulnote.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Kriterien und ihre Indikatoren.

Anwendung

Die Methode wird in drei Schritten angewendet.

- ▶ (1) Im ersten Schritt werden die zuvor vorgestellten Kriterien für einzelne Technologien und/oder technische Maßnahmen erfasst.
- ▶ (2) Der zweite Schritt ist dann ein Vergleich für mehrere Technologien innerhalb einer abgrenzbaren Gruppe (z.B. „CO₂-arme Technologien zur Erzeugung von Dampf“). Für einen visuellen Vergleich wird ein Ampelschema mit den Farben grün, gelb oder rot verwendet. Die Arithmetik für die Zuweisung einer Farbe hängt von der Art des Indikators ab und ist im

¹ Vgl. z. B. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019)

² Viebahn und Chappin (2018) haben dies z. B. für CCS-Technologien mittels einer bibliografischen Analyse wissenschaftlicher Artikel gezeigt.

Bericht näher erläutert. Dieser Schritt ermöglicht es, erste Erkenntnisse aus den Unterschieden der Werte abzuleiten.

- ▶ (3) Im dritten Schritt werden die Ergebnisse interpretiert. Dazu werden die Gesamtergebnisse eingeordnet, visualisiert und interpretiert, um positive und problematische Aspekte der betrachteten Technologien zu identifizieren. Daraus lassen sich dann Maßnahmen und/oder weitere Schritte ableiten. Beispiel: Technologie A ist sehr effizient und schneidet bei vielen Indikatoren gut ab, aber der technologische Reifegrad ist niedrig. Eine mögliche Maßnahme wäre dann, die F&E-Aktivitäten zu intensivieren, um den Reifegrad schneller zu erhöhen; dafür könnten z. B. Fördermittel bereitgestellt werden.

Tabelle 1: Kriterien und Indikatoren der Bewertungsmethode

Nr.	Kriterium	Indikator(en)	Indikatortyp	Vergleichsebene
1	Technische Verfügbarkeit	Jahr, in dem TRL 9 erreicht wird	Quantitativ	Bewertungsblock 1: Alleinstehend
2	Energieeffizienz	- Spezifischer Energiebedarf (Endenergie) - Spezifischer Energiebedarf (Primärenergie)	Quantitativ	Bewertungsblock 2: Arithmetisches Mittel (über den Zeitraum zwischen dem Jahr der technischen Verfügbarkeit und 2050)
3	THG-Effizienz	Spezifische THG-Emissionen		
4	Kosteneffizienz	Spezifische Kosten (LCOO)		
5	Erzeugung von Pfadabhängigkeiten	Grad der prospektiven Pfadabhängigkeit	Semi-Quantitativ	
6	Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen	Grad der zukünftigen Risiken		Bewertungsblock 3: Skalenaufteilung
7	Regionale Abhängigkeiten	Grad der regionalen Abhängigkeiten		
8	Notwenige Rahmenbedingungen	Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen		
9	Stoffströme und Kreislaufwirtschaft	- Veränderung von Stoffströmen - Grad Kreislaufwirtschaft	Semi-Quantitativ	
10	Infrastrukturabhängigkeit	Aufwand für Infrastruktur		Bewertungsblock 4: Skalenaufteilung mit Berücksichtigung von Extremwerten
11	Anlagensicherheit	- Stoffbezogene Risiken - Prozessbezogene Risiken		
12	Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen	- Gasförmige Emissionen - Abwässer - Feste Abfallstoffe		

LCOO: Levelised Cost of Output

Darstellung und Daten

Für die Darstellung der Bewertung eignen sich „Steckbriefe“ und/oder Kurzberichte, wobei die betrachtete Technologie zu Beginn kurz beschrieben werden sollte, einschließlich ihres Entwicklungsstandes und erforderlicher Grundinformationen. Dabei ist zu beachten, dass das Kriterienraster ein Idealkonzept ist und nicht immer eins zu eins angewendet werden kann und muss. Je nach Kontext kann sich die Anwendung im Detail quasi nach dem „form-follows-function“-Prinzip unterscheiden und/oder einzelne Kriterien aus gutem Grund unberücksichtigt lassen. Die im Anhang vorgestellten Tests für Technologien im Stahl- und Zementbereich vermitteln einen Eindruck davon, da sie sich in Anwendung und Kontext durchaus unterscheiden.

Wichtig ist, die Datengrundlage und die Gründe, warum welche Indikatoren wie bewertet werden, detailliert und nachvollziehbar zu dokumentieren. Die Grundlage dafür bilden eine Literaturanalyse und Expertenwissen. Bei vielen Kriterien ist es zudem notwendig, das Expertenwissen in eine Expertenbewertung umzusetzen, z. B. durch die Vergabe einer Note. Bei der Interpretation der Bewertungsergebnisse sollte daher stets bedacht werden, dass die subjektiven Einschätzungen der Bewerterinnen und Bewerter einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben, was aber auch erwünscht ist, da sich die Methode in erster Linie an Experten richtet.

Summary

To achieve Paris climate goals, it is necessary to change industrial production towards climate-neutral production. For this, a number of technologies are under research or already being tested. On their way from laboratory to demonstration scale, these have been assessed mostly on the basis of techno-economic criteria so far. However, for sustainable development, numerous other environmental and sustainability aspects are relevant as well, as reflected in the Sustainable Development Goals (UN 2019), valid worldwide since 2015. Therefore, a holistic view is appropriate, considering not only techno-economic criteria but also ecological, social and systemic aspects. For this, a method was developed in the DekarbInd project and implemented in an Excel tool, which is presented in this report. Apart from greenhouse gas savings, eleven other criteria were defined that help to evaluate technologies holistically at an early stage of planning and development. Thus, the method is not a decision-making tool in the classical sense. Instead, it serves to take long-term developments into account and to identify possible limitations and conflicts at an early stage by considering them from a holistic perspective. In the appendix, the method is tested as an example for technologies in the steel and cement sectors; however, it can and should also be applied to other technologies.

Essence of method

Essence of the method is a criteria matrix with corresponding indicators, which are used to carry out a comparative assessment for technologies. The matrix is divided into four assessment units.

- ▶ The first unit is used to assess the application horizon of a technology. Consequently, the criterion of technical availability is described with quantitative indicators of technological readiness (TRL).
- ▶ The second unit contains efficiency criteria whose associated quantitative indicators are calculated using a formula and given a specific value.
- ▶ The third and fourth units contain criteria whose associated indicators are assessed semi-quantitatively, i.e. the evaluators assign a score on a scale of 1 - 6 like a school grade.

An overview of the criteria and their indicators is given in the table 2.

Application

The method is applied in three steps.

- ▶ (1) In the first step, the criteria presented before are assessed for individual technologies.
- ▶ (2) The second step is then to compare several technologies within a separable group (e.g. "low CO2 technologies for the generation of steam"). For a visual comparison, a traffic light scheme with green, yellow or red colours is used. The arithmetic for assigning a colour depends on the type of indicator and is explained more detailed in the report. This step facilitates initial findings from the differences found in the scores.
- ▶ (3) The third step is to interpret the results. For this purpose, the total results are sorted, visualised and interpreted to identify positive and critical issues of the technologies assessed. From this, actions and/or further steps can be derived. Example: Technology A is very efficient and scores well on many indicators, but the technological maturity level is low. A possible measure would then be to intensify R&D activities in order to increase the maturity level more quickly; funding could be provided for this purpose, for example.

Tabelle 2: Criteria and indicators of the evaluation method

Nr.	Criteria	Indicator(s)	Type of indicator
1	Technical availability	Year in which TRL 9 is reached	Quantitative
2	Energy efficiency	Specific energy demand (final and primary energy)	Quantitative
3	Greenhouse (GHG) gas efficiency	Specific GHG emissions	Quantitative
4	Cost efficiency	Specific costs (LCOO)	Quantitative
5	Creation of path dependencies	Level of prospective path dependency	Semi-Quantitative
6	Risks for minimising GHG emissions	Level of future risks	
7	Regional dependencies	Level of regional dependencies	
8	Necessary framework conditions	Scope of necessary framework conditions	
9	Material flows and circular economy	- Change in material flows, - Grade for circular economy	Semi-Quantitative
10	Infrastructure dependency	Effort for infrastructure	
11	Plant safety	- Substance-related risks - Process-related risks	
12	Effects on immission control and waste generation	- Gaseous emissions - Waste water - Solid waste	

LCOO: Levelised Cost of Output

Presentation and data

For the presentation of the assessment, fact-sheets and/or short reports are suitable, whereby the technology under consideration should be briefly described at the beginning, including its stage of development and necessary basic information. Please note that the criteria framework does not always have to be applied one-to-one. Depending on the context, the application may differ in detail quasi in line with the "form-follows-function" principle, which means that individual criteria may be disregarded for good reason. The tests presented in the appendix for technologies in the steel and cement sectors give an impression on this, as they certainly differ in application and context.

Documenting the data basis and the reasons why which indicators are assessed in what way in a detailed and comprehensible way is important. The basis for this should come from literature analysis and expert knowledge. For many criteria, it is also necessary to translate expert knowledge into an expert assessment, e.g. by assigning a grade. Thus, when interpreting the assessment results, it should always be kept in mind that subjective assessments of the assessors will have a considerable influence on the results, which is, however, also desirable, as the method is primarily aimed at experts.

1 Zielsetzung und methodischer Hintergrund

Autoren: Peter Viebahn, Ali Aydemir

1.1 Zielsetzung der Bewertung

Im Rahmen der Dekarbonisierung der Grundstoffindustrie ist eine Reihe von technischen Maßnahmen in Erforschung oder bereits in Erprobung, mit denen, wie es der Name schon andeutet, die CO₂-Emissionen des Industriesektors vermieden oder zumindest erheblich gesenkt werden sollen³. Überlicherweise werden diese im Zuge der Entwicklung von Labor- zu Demonstrationsmaßstab nur mit techno-ökonomischen Kriterien bewertet⁴. Im Rahmen einer Nachhaltigen Entwicklung, die z. B. durch die seit 2015 weltweit gültigen Sustainable Development Goals (UN 2019) oder die Nachhaltigkeitsanforderungen der Bundesregierung (Bundesregierung 2018) ausgedrückt wird, sind jedoch auch eine Vielzahl anderer Umwelt- und Nachhaltigkeitswirkungen zu beachten. Es bedarf daher einer ganzheitlichen Bewertung unter Beachtung technologischer, ökonomischer, ökologischer, sozialer und gesamtsystemarer Folgen.

Dies gilt um so mehr für in Entwicklung befindliche Technologien, die – wie im Industriesektor – angesichts langer Re-Investitionszyklen erst nach und nach in einem länger dauernden Transformationsprozess umgesetzt werden. Hier sollte frühzeitig eine ganzheitliche Bewertung durchgeführt werden, um mögliche kritische Auswirkungen einzelner Technologien zu erkennen und ggf. schon im technischen Entwicklungsprozess gegensteuern zu können. Aber auch für die Entwicklung von Technologie-Roadmaps zur Umsetzung der Dekarbonisierungsmaßnahmen ist eine ganzheitliche Bewertung zukünftiger Technologien hilfreich, um die optimalen Technologien kombinieren zu können.

Dabei kommt es nicht darauf an, Technologien gegeneinander zu gewichten und möglicherweise auszuschließen, sondern es sollen ihre Vor- und Nachteile sowie ihre Chancen und Risiken dargestellt werden.

In diesem Arbeitspaket wird daher eine einfach anzuwendende, branchenübergreifende Methodik zur Bewertung von Dekarbonisierungsmaßnahmen und -techniken in der Grundstoffindustrie erarbeitet. Ausgehend vom primären Untersuchungszweck – der Dekarbonisierung, gemessen an der Höhe der Treibhausgas(THG)-Einsparung – werden eine Reihe weiterer Kriterien und Indikatoren definiert, die die (zukünftige) Performance der Technologien aus ökologischer, ökonomischer, technischer und systemarer Sicht abbilden können.⁵

Der Anforderungsgrad zur Anwendung der Methodik orientiert sich dabei an Personen, die Politikmaßnahmen im Themenbereich „Industrielle Transformation“ entwickeln und evaluieren. Das ausgearbeitete Bewertungsschema hat zwei Zielgruppen:

- ▶ Es wird primär zur Bewertung potenzieller Dekarbonisierungsmaßnahmen und -techniken für die Stahl- und Zementindustrie entwickelt, wo es im Laufe des Projekts in den entsprechenden AP 2 und AP 3 angewendet wird.
- ▶ Darüber hinaus soll es dem Auftraggeber ermöglichen, im Anschluss an das laufende Projekt auch Dekarbonisierungsmaßnahmen anderer Branchen der Grundstoffindustrie zu bewerten. Dementsprechend wird das Bewertungskonzept so allgemein wie möglich

³ Beispiele zeigen z. B. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019).

⁴ Viebahn und Chappin (2018) haben dies z. B. für CCS-Technologien mittels einer bibliografischen Analyse wissenschaftlicher Artikel gezeigt.

⁵ Die Bewertung sozialer Kriterien ist in diesem Vorhaben dagegen nicht vorgesehen.

gehalten, ohne dabei die Aussagekraft der zentralen Kriterien und Indikatoren zu sehr einzuschränken.

1.2 Ableitung der Bewertungsmethodik

1.2.1 Bewertungsgegenstand

In diesem Projekt stehen zunächst Dekarbonisierungs-Technologien im Stahl- und Zementsektor im Vordergrund. Vor der in den AP 2 und 3 stattfindenden Erarbeitung von Eckpunkten möglicher Roadmaps werden Technologien aus diesen Sektoren mit dem Kriterienraster bewertet. Bei der Entwicklung des Rasters wurde jedoch berücksichtigt, dass es – wie oben beschrieben – auch auf andere Technologien angewendet werden soll.

Abbildung 1 zeigt eine Liste von Dekarbonisierungstechnologien, die mit dem vorliegenden Schema untersucht werden könnten, um Technologie-Roadmaps für die Dekarbonisierung der Stahl- und/oder Zementindustrie zu erstellen. Dabei werden die dargestellten Basistechnologien weiter nach der Art des möglichen Energiebezugs differenziert. So kann die Stahlproduktion mit der wasserstoffbetriebenen DRI-Methode den benötigten Wasserstoff entweder von externen Anbietern einkaufen oder den Wasserstoff vor Ort (im Stahlwerk) selber herstellen, wofür Strom oder Erdgas bezogen werden müsste. Je nach Standpunkt liegt der Energieverbrauch somit innerhalb oder außerhalb einer gewählten Systemgrenze. In der Abbildung ist dies beispielhaft bei den Technologien „1.1.2 Einsatz von Wasserstoff“ oder „1.2.1 Externer Erdgasbezug“ dargestellt.

1.2.2 Ableitung der Bewertungskriterien

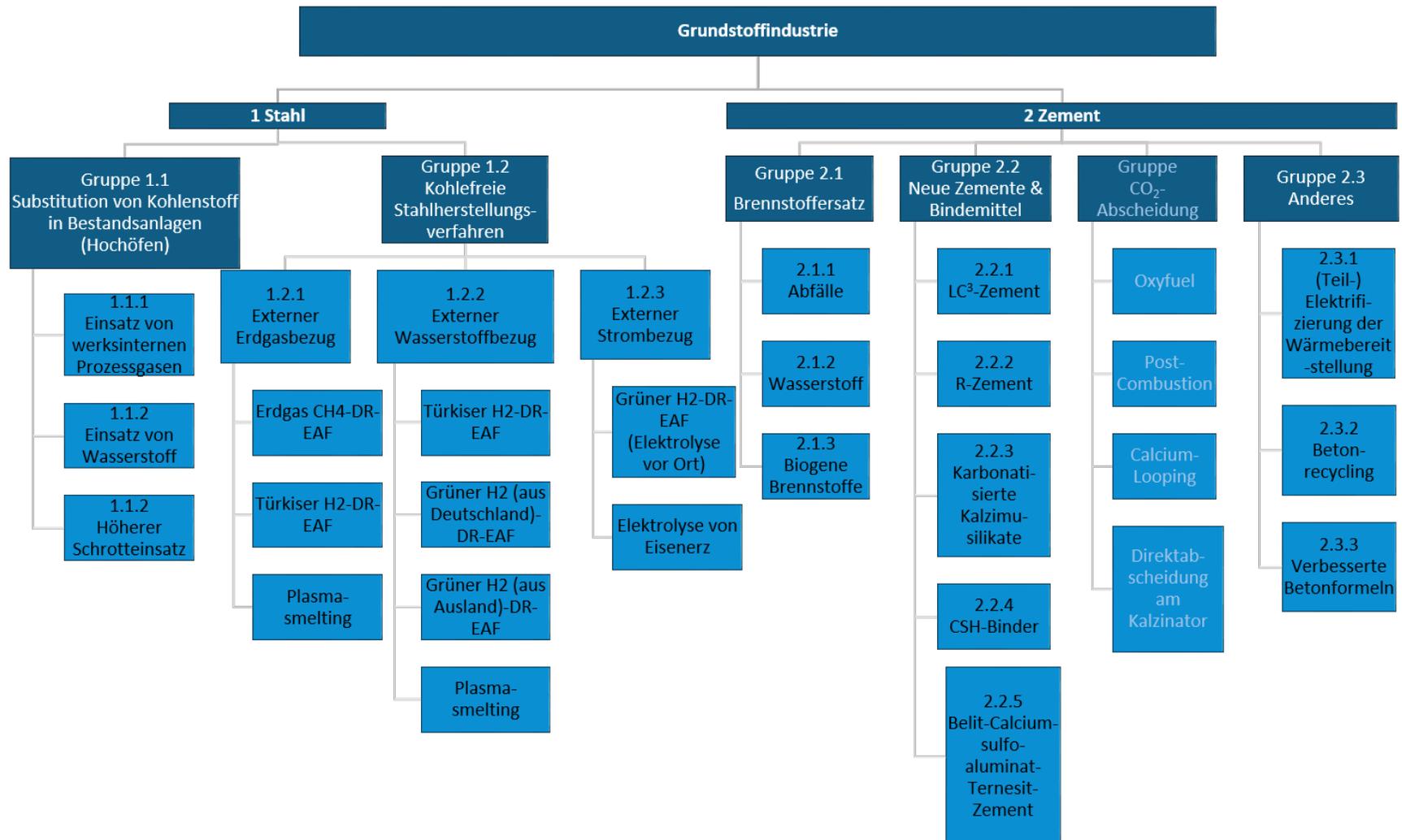
Zur Bewertung von Technologien gibt es verschiedene Methoden, z. B. die Durchführung von SWOT-Analysen⁶ oder eine „reine“ MC(D)A (Multicriteria (Decision) Analysis), in der Technologien mittels gewichteter Indikatoren bewertet und anschließend nach Priorität sortiert werden.

Diese oder ähnliche Methoden werden für das hier zu entwickelnde Bewertungsverfahren außen vor gelassen, da sich die hier betrachteten Technologien noch weitgehend in der Entwicklung befinden. Es wird daher nicht für sinnvoll und auch nicht für praktikabel (Datenverfügbarkeit) gehalten, in diesem frühen Stadium schon eine Reihenfolge von zu bevorzugenden Technologien vorzugeben und damit gewisse Technologien auszuschließen.

Vielmehr soll eine technologieoffene Bewertung ermöglicht werden, indem für die hier in Frage kommenden Technologien ihre Vor- und Nachteile sowie ihre möglichen Chancen und Risiken dargestellt werden. Dadurch, dass eine möglicherweise eher schlecht bewertete Technologie nicht direkt ausgeschlossen wird, sondern nachvollziehbar die Gründe für ihr schlechteres Abschneiden aufgezeigt werden, besteht die Möglichkeit, Entwicklungsprozesse zu ihrer Verbesserung anzustoßen. Es wird daher eine „vergleichende multikriterielle Bewertung“ durchgeführt, mittels derer die Technologien mit den im Folgenden dargestellten Kriterien und ihren Indikatoren bewertet und in ihren jeweiligen Gruppen miteinander verglichen werden. Mit einem ausgeklügelten „Ampelsystem“ wird anschließend visualisiert, wie die Technologien hinsichtlich welcher Kriterien im Vergleich abschneiden, so dass eine direkte Einschätzung „auf den ersten Blick“ möglich wird.

⁶ SWOT = Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken)

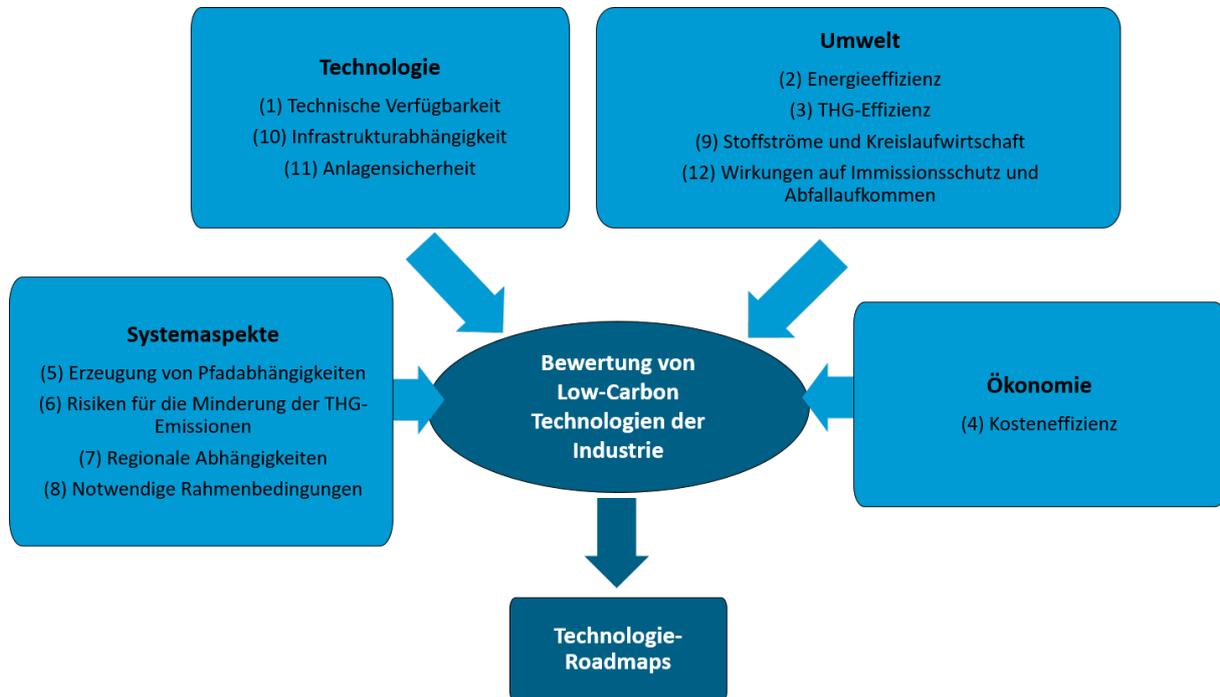
Abbildung 1: Exemplarische Technologiegruppen für die Erstellung von Technologie-Roadmaps zur Dekarbonisierung der Stahl- und/oder Zementindustrie



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Das entwickelte Kriterienset besteht aus den vier Dimensionen „Technologie“, „Umwelt“, „Ökonomie“ und „Systemaspekte“ und umfasst insgesamt 12 Bewertungskriterien (Abbildung 2). Diese werden im nachfolgenden Kapitel 3 detailliert vorgestellt.

Abbildung 2: Bewertungsdimensionen und ihre Kriterien für eine multikriterielle Bewertung von Low-Carbon-Technologien der Grundstoffindustrie in DekarBlnd



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

In die Ableitung der Kriterien (und der nachfolgend gezeigten Indikatoren) sind die Anforderungen des Auftraggebers, die Erfahrung des Projektteams, Bewertungen von Technologien in anderen Forschungsprojekten sowie insbesondere die Charakteristiken der hier im Vordergrund stehenden Verfahren und Prozesse der Grundstoffindustrie eingegangen. Zudem soll das Verfahren einfach anwendbar sein und eine schnelle Ersteinschätzung ermöglichen.

1.2.3 Bewertungsebenen

Bei der Durchführung der Bewertung muss beachtet werden, mit welcher Systemgrenze gearbeitet wird. Wird z. B. nur der Betrieb betrachtet, wo die betrachtete Technologie installiert wird, wäre der Energieverbrauch in Kilowattstunden Endenergie (z. B. Wasserstoff, Strom oder Wärme) zu bilanzieren. Wird jedoch auch die Vorkette, d. h. die Herstellung der bezogenen Energie, betrachtet, wäre die Bezugsgröße die Primärenergie, was bei grünem Wasserstoff oder Ökostrom der Einsatz erneuerbarer Energien wäre.

Die Definition dieser Ebenen erfolgt in Anlehnung an die Vorgaben der internationalen GHG Protocol Initiative für die Bilanzierung von THG-Emissionen (Greenhouse Gas Protocol 2020). Der „GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard“⁷ legt Anforderungen und Richtlinien für Unternehmen und andere Organisationen fest, die ein unternehmensweites

⁷ Siehe <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>

Treibhausgas-Emissionsinventar erstellen. Dabei werden die THG-Emissionen in drei Bereiche unterteilt, die sogenannten Scopes 1, 2 und 3:

- ▶ **Scope 1** (GHG Protocol) umfasst *direkte* THG-Emissionen, die aus Quellen entstehen, die sich im Besitz oder unter der Kontrolle des Unternehmens befinden, z. B. Emissionen aus der Verbrennung in eigenen oder kontrollierten Kesseln, Öfen, Fahrzeugen usw.; Emissionen aus der chemischen Produktion in eigenen oder kontrollierten Prozessanlagen usw.
- ▶ **Scope 2** (GHG Protocol) umfasst *indirekte* THG-Emissionen, die aus gekauftem Strom, der vom Unternehmen verbraucht wird, entstehen. Gekaufter Strom ist dabei definiert als Elektrizität, die gekauft oder anderweitig in die organisatorischen Grenzen des Unternehmens gebracht wird. Die Scope-2-Emissionen treten physisch in der Anlage auf, in der Strom erzeugt wird (also z. B. dem Kraftwerk).
- ▶ **Scope 3** (GHG Protocol) umfasst *alle anderen indirekten* THG-Emissionen. Scope-3-Emissionen sind eine Folge der Aktivitäten des Unternehmens, entstehen aber aus Quellen, die nicht im Besitz oder unter der Kontrolle des Unternehmens sind. Einige Beispiele für Scope-3-Aktivitäten sind die Gewinnung und Produktion von eingekauften Materialien, der Transport von eingekauften Brennstoffen und die Verwendung von verkauften Produkten und Dienstleistungen.

Zur Technologiebewertung in diesem Projekt werden hieraus zwei Bewertungsebenen abgeleitet (Abbildung 3):

- ▶ *Bewertungsebene 1*: Analog zu Scope 1 berücksichtigt die Ebene 1 nur den Ort der Installation selber, d. h. ein Stahlwerk oder ein Zementwerk. Es werden also die bezogene Endenergie, die durch die Technologie im Unternehmen entstehenden THG-Emissionen oder die Anlagensicherheit im Unternehmen bewertet.
- ▶ *Bewertungsebene 2*: Analog zu Scope 2 umfasst die Ebene 2 indirekte Wirkungen, die durch den Bezug der Endenergie verursacht werden. Hier werden somit die benötigte Primärenergie oder die durch den Bezug der Endenergie verursachten THG-Emissionen bilanziert. Aber auch eine Reihe weiterer Kriterien bezieht sich auf diese Ebene außerhalb des Unternehmens. Im Unterschied zu der ursprünglichen Bedeutung von Scope 2 umfasst die Bewertungsebene 2 zusätzlich auch die Bewertungsebene 1. Letztere ist also eine Teilmenge dieser.

Abbildung 3: Zwei Bewertungsebenen in Dekarblind: (1) bezogen auf den Standort der Technologien (Unternehmen) und (2) die Unternehmensumwelt



Quelle: Eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Tabelle 3 zeigt, welche der hier betrachteten Kriterien für welche Ebene bewertet werden. In der rechten Spalte ist zudem angegeben, ob die Indikatoren statisch sind oder – wenn möglich – bis zum Jahr 2050 (Werte 2020, 2030, 2040, 2050) fortgeschrieben werden sollen.

Tabelle 3: Kriterien und Bewertungsebenen

Nr.	Kriterium	Bewertungs- ebene 1	Bewertungs- ebene 2	Fortschreibung bis 2050
1	Technische Verfügbarkeit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Energieeffizienz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	THG-Effizienz	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Kosteneffizienz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Erzeugung von Pfadabhängigkeiten	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Regionale Abhängigkeiten	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Notwenige Rahmenbedingungen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Stoffströme und Kreislaufwirtschaft	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Infrastrukturabhängigkeit	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Anlagensicherheit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2 Durchführen der Bewertung

Autoren und Autorinnen: Jacqueline Klingen, Peter Viebahn

2.1 Vorbemerkung

Im Folgenden wird dargestellt, in welchen Schritten die Bearbeiter und Bearbeiterinnen die Technologiebewertung durchführen und anschließend visualisieren sollten. Den Kern der Bewertung bildet dabei das in Kapitel 3 beschriebene Kriterienraster.

Die einzelnen Bewertungsschritte sollen für jede Technologiegruppe und die in ihr enthaltenen Technologien in einem „Steckbrief“ (oder Kurzbericht) dargestellt werden. Insbesondere ist hier die Datengrundlage detailliert und nachvollziehbar zu dokumentieren, die zu den jeweiligen Bewertungsergebnissen führt.

Bei der Beschreibung des Kriterienrasters sollte beachtet werden, dass dieses ein Idealkonzept darstellt, das nicht immer ein zu eins angewendet werden kann:

- ▶ Gerade bei neuen, in der Entwicklung befindlichen Technologien kann es vorkommen, dass bestimmte Daten nicht vorhanden sind, so dass ggf. einzelne Kriterien nicht bearbeitet werden können. Dies ist jeweils darzustellen.
- ▶ Auch kann es vorkommen, dass Indikatoren nur für den Ist-Zustand („Status im Jahr 2020“) vorhanden sind, aber nicht auf die nachfolgenden Jahrzehnte fortgeschrieben werden können. Hier sind dann konstante Werte anzusetzen.
- ▶ Da zumindest in dieser Studie nur ein begrenztes Zeitbudget für die Bewerter und Bewerterinnen zur Verfügung steht, werden keine tiefgreifenden Teilstudien für einzelne Kriterien durchgeführt werden können (z. B. hinsichtlich der Ermittlung der spezifischen Kosten „nach Lehrbuch“ oder der Berechnung von Risiken). Je nach Datenverfügbarkeit müssen ggf. grobe Abschätzungen getroffen werden. In diesen Fällen sollte gleichzeitig dargestellt werden, welche Detailstudien zur genaueren Bewertung benötigt werden.
- ▶ Im Wesentlichen wird eine Literaturanalyse und eigenes Expertenwissen, ergänzt um Diskussionen mit Fachexperten (z. B. in den Kerngruppen), die Grundlage für die Bewertung bilden.

Das Vorgehen erfolgt in zwei Abschnitten

1. Abschnitt: Beschreibung der betrachteten Technologien (Entwicklungsstand)
2. Abschnitt: Bewertung der betrachteten Technologien

2.2 Beschreibung der Technologien (Entwicklungsstand)

Zu Beginn jedes Steckbriefs oder Kurzberichts sollte die betrachtete Technologie kurz beschrieben werden. Dabei soll neben ihrer grundlegenden Funktionsweise insbesondere ihr Entwicklungsstand (Status) erläutert und anhand des Technology Readiness Levels (TRL) eingestuft werden (zur Definition des TRL siehe Tabelle 15 in der Beschreibung des Kriteriums 1). Ebenso sollten grundlegende Informationen bereitgestellt werden, die für die Bewertung mittels der nachfolgend beschriebenen Kriterien benötigt werden.

2.3 Drei Bewertungsschritte

Die Bewertung erfolgt in drei Schritten, die nachfolgend beschrieben werden:

- ▶ **Bewertungsschritt 1: Bewertung einer einzelnen Technologie mit den jeweiligen Kriterien**
Die Konzentration auf einzelne Kriterien ermöglicht ein strukturiertes Arbeiten und eine transparente Anwendung des Kriteriums auf die jeweilige Technologie.
- ▶ **Bewertungsschritt 2: Vergleich der Technologien einer Gruppe mit Visualisierung**
Die kombinierte Darstellung mehrerer Technologien einer Gruppe ermöglicht einen Vergleich hinsichtlich des jeweiligen Indikators und die Diskussion möglicher Abweichungen innerhalb einer Technologiegruppe.
- ▶ **Bewertungsschritt 3: Einordnung der Gesamtergebnisse mit Visualisierung und Interpretation**
Die Kombination der Kriterien ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung. Durch die Darstellung in einem Gesamtschema wird ein schnelles Erkennen von positiven und von eher problematischen Aspekten innerhalb einer Technologiegruppe möglich.

2.3.1 Bewertungsschritt 1: Bewertung einer einzelnen Technologie

In diesem ersten Bewertungsschritt erfolgt die eigentliche Technologiebewertung mit den in Abbildung 2 genannten Kriterien. Jedem Kriterium sind ein oder mehrere Indikatoren zugeordnet, die von den Bearbeitenden systematisch erfasst werden. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise für jedes Kriterium findet sich in Kapitel 3.

Die Kriterien und Indikatoren sind vier Bewertungsblöcken zugeteilt (Tabelle 4). Diese Unterteilung ist die Basis für die nachfolgende Visualisierung, die je nach Bewertungstyp spezifisch aufgebaut wird.

- ▶ In Bewertungsblock 1 wird die (groß)technische Verfügbarkeit mit einer Jahreszahl erfasst.
- ▶ Bewertungsblock 2 enthält quantitative Kriterien, die jeweils mit einer Formel beschrieben werden.
- ▶ Die Kriterien der Bewertungsblöcke 3 und 4 werden semi-quantitativ erfasst, d. h. die Bearbeitenden vergeben jeweils einen Wert auf einer Skala von 1 – 6 im Sinne einer Schulnote.

Im Anschluss an die Bewertung werden die ermittelten Werte für jede Technologie in das bereitgestellte Excel-Tool eingetragen. Dieses ist Voraussetzung zur automatisierten Ermittlung der Farbskala (Ampelschema).

Tabelle 4: Indikatoren sowie Zuordnung zu einer „Vergleichsebene“

Nr.	Kriterium	Indikator(en)	Indikatortyp	Vergleichsebene
1	Technische Verfügbarkeit	Jahr, in dem TRL 9 erreicht wird	Quantitativ	Bewertungsblock 1: Alleinstehend
2	Energieeffizienz	- Spezifischer Energiebedarf (Endenergie) - Spezifischer Energiebedarf (Primärenergie)	Quantitativ	Bewertungsblock 2: Arithmetisches Mittel (über den Zeitraum zwischen

Nr.	Kriterium	Indikator(en)	Indikatortyp	Vergleichsebene
3	THG-Effizienz	Spezifische THG-Emissionen		dem Jahr der technischen Verfügbarkeit und 2050)
4	Kosteneffizienz	Spezifische Kosten (LCOO)		
5	Erzeugung von Pfadabhängigkeiten	Grad der prospektiven Pfadabhängigkeit	Semi-Quantitativ	Bewertungsblock 3: Skalenaufteilung
6	Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen	Grad der zukünftigen Risiken		
7	Regionale Abhängigkeiten	Grad der regionalen Abhängigkeiten		
8	Notwenige Rahmenbedingungen	Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen		
9	Stoffströme und Kreislaufwirtschaft	- Veränderung von Stoffströmen - Grad Kreislaufwirtschaft	Semi-Quantitativ	Bewertungsblock 4: Skalenaufteilung mit Berücksichtigung von Extremwerten
10	Infrastrukturabhängigkeit	Aufwand für Infrastruktur		
11	Anlagensicherheit	- Stoffbezogene Risiken - Prozessbezogene Risiken		
12	Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen	- Gasförmige Emissionen - Abwässer - Feste Abfallstoffe		

LCOO: Levelised Cost of Output (annuitätisch nivellierte Kosten pro Outputeinheit)

2.3.2 Bewertungsschritt 2: Vergleich der Technologien einer Gruppe

Im zweiten Bewertungsschritt werden die Technologien hinsichtlich der jeweiligen Kriterien miteinander verglichen. Dies ist jedoch nur innerhalb einer Technologiegruppe möglich, da nur Technologien verglichen werden können, die gegeneinander austauschbar sind.

Je nach Bewertungsblock (Tabelle 4) erfolgt die vergleichende Bewertung und Visualisierung nach unterschiedlichen Regeln, die im Folgenden beschrieben werden. Hierfür wird eine Methode verwendet, die im Projekt *MENA-Fuels* entwickelt (Zelt et al. 2020) und für die Zwecke von DekarbInd erweitert wurde.

Die Visualisierung wird in dem erwähnten Excel-Tool vollautomatisch geschehen, so dass die nachfolgende Beschreibung mehr zur Information als zur eigenen Durchführung dient.

2.3.2.1 Vorgehen Bewertungsblock 1: Einschätzung des Einsatzhorizontes anhand Kriterium 1

Der 1. Block besteht nur aus dem Kriterium 1. Dieses dient keinem „besser-schlechter-Vergleich“, sondern soll – ausgehend vom aktuellen Status der betrachteten Technologie – aufzeigen, wann die Technologie einsatzbereit ist im Sinne von „großskalig kommerziell verfügbar“. Das Kriterium ist also ein zentrales Kriterium für die Berücksichtigung in den Roadmaps der nachfolgenden AP 2 und 3, es wird aber auch zur Auswertung im 2. Bewertungsblock benötigt.

Der Indikatorwert (Jahr der großskaligen kommerziellen Verfügbarkeit) wird als Jahreszahl ausgewiesen.

2.3.2.2 Vorgehen Bewertungsblock 2: Quantitative Kriterien 2-4

Der zweite Block beinhaltet solche Kriterien, mit denen eine Technologie quantitativ bewertet werden kann:

- ▶ Kriterium 2: Energieeffizienz
- ▶ Kriterium 3: THG-Effizienz
- ▶ Kriterium 4: Kosteneffizienz

Im Idealfall sollten die Werte für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 ermittelt werden. Liegen keine solchen Werte vor und sind auch nicht mit vertretbarem Aufwand ermittelbar, wird der aktuelle Wert für 2020 verwendet und konstant gehalten.

Die vier Werte pro Technologie werden jeweils im Format *Einheit / t Output* ermittelt. Um die Technologien miteinander vergleichen zu können, wird pro Kriterium ein Gesamtwert pro Technologie gebildet. Hierzu wird das arithmetische Mittel aus den Jahreswerten bis zum Jahr 2050 gebildet. Dabei wird aber nur ab demjenigen Jahr gezählt, ab dem die Technologie großtechnisch und kommerziell verfügbar ist (ermittelt im Kriterium 1).

Der somit ermittelte Gesamtwert wird innerhalb der vergleichenden Darstellung pro Kriterium in eine farbliche Ampelbewertung überführt. Hierzu wird pro Kriterium der Wertebereich aller Technologien in drei Drittel unterteilt. Die untere Grenze des Wertebereichs für jedes Kriterium bildet der jeweils niedrigste Wert, die obere Grenze der jeweils höchste Wert der miteinander im Vergleich stehenden Technologien.

Werte, die im *unteren Drittel* des Wertebereichs liegen, werden grün, Werte innerhalb des *mittleren Drittels* gelb und Werte innerhalb des *oberen Drittels* rot dargestellt. Auf diese Weise sind gute Mittelwerte (bspw. die geringsten Kosten) grün und schlechte Mittelwerte (bspw. die höchsten THG-Emissionen) rot dargestellt. **Eine Vergleichbarkeit der Werte ist somit nur innerhalb der jeweiligen Technologiegruppe möglich.**

Um zu vermeiden, dass *geringfügige Unterschiede* zwischen den Gesamtwerten der Technologien innerhalb eines Kriteriums die Darstellungsweise verzerren, werden entsprechende Werte blau markiert. Es wird von einem geringfügigen Unterschied ausgegangen, wenn die obere Grenze des Wertebereichs weniger als 10 % über der unteren Grenze des Wertebereichs liegt. Ist dies der Fall, werden alle Technologiewerte des entsprechenden Kriteriums blau markiert.

Eine Ausnahme bildet der Fall, dass für Technologien *keine Werte* vorliegen bzw. *keine Vergleichbarkeit* gegeben ist. In diesem Fall wird das entsprechende Feld des Kriteriums für die Technologie grau eingefärbt und nicht innerhalb der Farbbewertung berücksichtigt. Ein Beispiel wäre, dass für eine Technologie kein Wert für die Höhe der spezifischen Kosten vorliegt (graue Einfärbung). In diesem Fall würden nur die spezifischen Kosten der anderen Technologien der Technologiegruppe in die vergleichende Darstellung eingehen. Hierbei ist anzumerken, dass auf diese Weise ein fehlender Wert die farbliche Einschätzung der anderen Technologien des Kriteriums verzerren kann. Da dieser Fall jedoch nie auszuschließen ist, wird dies im Weiteren als bekannte Unsicherheit behandelt.

Tabelle 5 fasst die Charakteristika bei der Bewertung in diesem Block zusammen.

Tabelle 5: Übersicht Kriterieneinschätzung der Kriterien in Bewertungsblock 2

Kriterium / Attribut	2 Energieeffizienz	3 THG-Effizienz	4 Kosteneffizienz
Indikator	Spezifischer Energiebedarf	Spezifische THG-Emissionen	Spezifische Kosten (LCOO)
Optimum	Minimum	Minimum	Minimum
Berechnung	Mittel der Werte ab dem Jahr der Erreichung von TRL 9 bis 2050		
Farbliche Einstufung	Abgrenzung		
Grün	Mittelwert im unteren Drittel des Wertebereichs		
Gelb	Mittelwert im mittleren Drittel des Wertebereichs		
Rot	Mittelwert im oberen Drittel des Wertebereichs		
Blau	Nur geringfügige Unterschiede (obere Grenze des Wertebereichs weniger als 10 % über unterer Grenze)		
Grau	Kein Vergleich möglich / keine Angabe		

Zum Schluss der Bewertung wird die ermittelte Einstufung (als Farbe) in eine vergleichende Tabelle eingetragen (Tabelle 6) (im automatisierten Excel-Tool wird dies automatisch erfolgen).

Tabelle 6: Vergleich der Bewertung verschiedener Technologien einer Gruppe hinsichtlich Indikator X

Indikator	Bezug	Einheit Skala	Arithm. Mittel	Einstufung (farblich)
X	Bewertungsebene Y	Technologie 1		
		Technologie 2		
		Technologie ...		

Bewertungsbeispiel

In Tabelle 7 drei fiktive Technologien betrachtet, deren Bewertung mittels des quantitativen Kriteriums Energieeffizienz erfolgt ist. Die Technologien sind im Jahr 2020, 2040 und 2030 großtechnisch und kommerziell verfügbar ist (TRL = 9, Werte fett markiert).

Tabelle 7: Beispiel: Fiktiver Vergleich der Energieeffizienz dreier Technologien einer Gruppe

Indikator	Bezug	Einheit GJ/t Output	TRL 9 ab	Wert 2020	2030	2040	2050	Arithm. Mittel	Einstufung (farblich)
2.1	Bewertungs- ebene 1 (Endenergie)	Technologie 1	2020	20	18	17	16	17,75	Grün
		Technologie 2	2040	30	20	20	15	17,5	
		Technologie 3	2030	30	25	21	20	22	Rot

Die Berechnungen für das Farbschema der in Tabelle 7 erwähnten Technologien ergibt sich aus den folgenden Teilschritten:

3. Berechnung des arithmetischen Mittels pro Technologie

$$\text{Technologie 1: } \frac{20 + 18 + 17 + 16}{4} = 17,75$$

$$\text{Technologie 2: } \frac{20 + 15}{2} = 17,5$$

$$\text{Technologie 3: } \frac{25 + 21 + 20}{3} = 22$$

Der jeweilige Mittelwert bildet auf diese Weise den Gesamtwert einer Technologie.

4. Festlegung des Wertebereichs

Die obere Grenze des Wertebereichs wird durch Technologie 3 (Wert: 22) und die untere Grenze durch Technologie 2 (Wert: 17,5) festgelegt. Der Wertebereich umfasst somit die Zahlenspanne 17,5 bis 22.

5. Prüfung einer möglichen geringfügigen Unterscheidung der Werte innerhalb des Wertebereichs

Nachdem der Wertebereich festgelegt ist, wird im nächsten Schritt geprüft, ob dieser in eine farbliche Ampelbewertung überführt wird oder ob die Werte nur eine geringfügige Unterscheidung aufweisen (blaue Markierung). Hierzu wird errechnet, um wie viel Prozent die obere Grenze des Wertebereichs von der unteren Grenze des Wertebereichs abweicht. Sind es mehr als 10 %, werden die Technologien in eine Ampelbewertung überführt.

$$\text{Rechnung: } \frac{22 - 17,5}{17,5} \approx 0,257$$

In diesem Fall liegt die obere Grenze ca. 25,7 % über der unteren Grenze, somit kann eine Farbeinschätzung vorgenommen werden.

6. Festlegung der Drittel des Wertebereichs zur Farbeinschätzung

Der Wertebereich wird für die folgende Farbeinschätzung in Drittel unterteilt.

$$\text{Nebenrechnung: } \frac{22 - 17,5}{3} = 1,5$$

Errechnung des Mittleren Drittels: $17,5 + 1,5 = 19$ und $22 - 1,5 = 20,5$.

Auf Grundlage des mittleren Drittels des Wertebereichs kann die Einteilung des Farbschemas erfolgen. Die Drittel- und die entsprechende Farbeinschätzung sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Darstellung des Wertebereichs der beispielhaften fiktiven Darstellung der Energieeffizienz

Bezeichnung	Wertebereich 17,5 bis 22	Farbe	Resultierende Technologieeinschätzung
Unteres Drittel	< 19		Technologie 2 – Wert: 17,5 Technologie 1 – Wert: 17,75
Mittleres Drittel	19 bis 20,5		-
Oberes Drittel	> 20,5		Technologie 3 – Wert: 22

2.3.2.3 Vorgehen Bewertungsblock 3: Semi-quantitative Kriterien 5 – 8

Der dritte Block beinhaltet solche Kriterien, mit denen eine Technologie semi-quantitativ bewertet werden kann:

- ▶ Kriterium 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten (statisch)
- ▶ Kriterium 6: Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen (statisch)
- ▶ Kriterium 7: Regionale Abhängigkeiten (statisch)
- ▶ Kriterium 8: Notwendige Rahmenbedingungen (statisch)

Die Kriterien 5 bis 8 werden jeweils *semi-quantitativ* auf einer Bewertungsskala von 1 bis 6 (angelehnt an Schulnoten) eingeschätzt. Die Optimierungsrichtung der Bewertungsskalen ist so gewählt, dass die Bewertung 1 die Erreichung des jeweiligen Optimums bedeutet, während die Bewertung 6 eine absolute Abweichung vom jeweiligen Optimum darstellt. Beispielsweise wird eine Technologie beim Kriterium 5 *Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten* mit 1 bewertet, wenn sie das Optimum erreicht, indem die Technologie *zukünftig keine oder nur sehr geringe Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte aufweist*. Sie wird hingegen mit einer 6 bewertet, wenn sie zukünftig *sehr hohe Pfadabhängigkeiten* aufweist.

Die *semi-quantitativ* eingeschätzten Kriterien werden anschließend farblich entsprechend ihrer Wertung auf der Bewertungsskala markiert. Gute Skalenwerte (1 & 2) werden **grün**, mittlere Skalenwerte (3 & 4) **gelb** und schlechte Skalenwerte (5 & 6) **rot** markiert.

Tabelle 9 fasst die Charakteristika bei der Bewertung in diesem Block zusammen.

Tabelle 9: Übersicht Kriterieneinschätzung der Kriterien in Bewertungsblock 3

Kriterium / Attribut	Kriterium 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten	Kriterium 6: Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen	Kriterium 7: Regionale Abhängigkeiten	Kriterium 8: Notwendige Rahmenbedingungen
Bewertung	Skalenbewertung 1 bis 6			
Optimum	1			
Skala	1 (keine) – 6 (sehr hoch)	1 (keine) – 6 (viele/sehr hohe)	1 (keine) – 6 (sehr hoch)	1 (keine) – 6 (sehr viele)
Grün	Skalenwert 1 & 2			
Gelb	Skalenwert 3 & 4			
Rot	Skalenwert 5 & 6			

Bewertungsbeispiel

In Tabelle 10 werden drei fiktive Technologien betrachtet, deren Bewertung mittels des semi-quantitativen Kriteriums 5 *Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten* erfolgt ist.

Tabelle 10: Beispiel: Fiktiver Vergleich der Pfadabhängigkeit dreier Technologien einer Gruppe

Indikator	Bezug	Einheit Skala	Wert	Einstufung (farblich)
5		Technologie 1	5	
		Technologie 2	2	

Indikator	Bezug	Einheit Skala	Wert	Einstufung (farblich)
	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 3	3	

2.3.2.4 Vorgehen Bewertungsblock 4: Semi-quantitative Kriterien 9 – 12

Schließlich beinhaltet der vierte Block solche Kriterien, mit denen eine Technologie zwar auch semi-quantitativ bewertet werden kann, die aber aus mehreren Indikatoren bestehen.

- ▶ Kriterium 9: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft (statisch)
- ▶ Kriterium 10: Infrastrukturabhängigkeit (statisch)
- ▶ Kriterium 11: Anlagensicherheit (statisch)
- ▶ Kriterium 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen (statisch)

Die Kriterien 9 bis 12 werden grundsätzlich, wie auch bereits die Kriterien 5 – 8, semi-quantitativ auf der Bewertungsskala (1 – 6) eingeschätzt. Jedoch werden sie im *ersten Schritt* nicht selbst auf der Bewertungsskala eingeschätzt, sondern es werden jeweils mehrere Indikatoren betrachtet. So wird beispielsweise bei Kriterium 11 *Anlagensicherheit* nicht die Anlagensicherheit direkt bewertet, sondern die beiden Indikatoren 11.1 und 11.2 mit ihren jeweiligen Sub-Indikatoren. Die Charakteristika bei der Bewertung in diesem Block sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

In einem *zweiten Schritt* wird anhand der einzelnen Indikatoren-Bewertungen eine farbliche Gesamteinschätzung des Kriteriums vorgenommen. Bei dieser Farbeinschätzung wurde von einer generellen Durchschnittsbildung der Skalenwerte abgesehen, da auf diese Weise gute und schlechte Indikatoren einander ausgleichen könnten. So könnte ein sehr hohes Risiko bei einem Indikator durch ein niedriges Risiko bei einem anderen Indikator im Durchschnitt in ein mittleres Risiko übergehen.

Dies wurde vermieden, indem die Farbgebung an unterschiedliche Bedingungen geknüpft wurde, wodurch Handlungsbedarfe stärker hervorgehoben und besonders kritische Einschätzungen einzelner Indikatoren auch in der Gesamtbewertung wiedergespiegelt werden. Die Grundlage für die Farbeinschätzung ist in Tabelle 12 dargestellt.

Diese Kenntlichmachung besonders kritischer Einstufungen stellt eine konstruktive Alternative zu einem möglichen Ausschluss einer Technologie dar. Durch die farbliche Hervorhebung werden in jedem Fall auf die kritischen Aspekte der Technologie deutlich hingewiesen, so dass individuell entschieden werden kann, ob eine Technologie trotz eines „Extremwertes“ bei einem Kriterium verwendet werden sollte. Alternativ könnte ein Kriterium als Ausschlusskriterium eingestuft werden, falls eine derart kritische Bewertung auftauchen würde.

Tabelle 11: Übersicht Kriterieneinschätzung der Kriterien in Bewertungsblock 4

Kriterium / Attribut	Kriterium 9: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft (statisch)	Kriterium 10: Infrastrukturabhängigkeit	Kriterium 11: Anlagensicherheit	Kriterium 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen
Indikatoren	9.1: Veränderung von Stoffströmen	10.1: Elektrizität	11.1: Stoffbezogene Risiken	12.1: Gasförmige Emissionen
	9.1a: Intersektorale Rückwirkungen	10.2: Netzgekoppelt	11.1a: Humantoxizität	12.2: Abwässer
	9.1b: Einsatz gefährlicher und umweltschädlicher Stoffe	10.3: Sonstige	11.1b: Ökotoxizität	12.3: Feste Abfallstoffe
	9.1c: Verwendung kritischer Rohstoffe		11.1c: Niedriger Flammpunkt	
	9.2: Grad Kreislaufwirtschaft		11.1d: Bildung zündfähiger Stoffe	
	9.2a: Sektorale Abfallintensität		11.1e: Sonstige heftige Reaktionen	
	9.2b: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen		11.2: Prozessbezogene Risiken	
	9.2c: EOL-RQ		11.2a: Hohe Temperaturen 11.2b: Hohe Drücke	
Bewertung	Indikatoren-Skalenbewertung (1 bis 6)			
Optimum	1			
Skala	1 – 6 (unterschiedliche Bedeutungen, siehe Text)	1 (kein Aufwand) – 6 (sehr hoher Aufwand)	1 (Kein Risiko) – 6 (Sehr hohes Risiko)	(1) Entfällt (2) Nimmt stark ab – (6) Nimmt stark zu

Tabelle 12: Übersicht Farbbewertung der Kriterien in Block 4

Farbe des Kriteriums	Bedingungen der farblichen Bewertung des Kriteriums anhand der jeweiligen Indikatoren
	Alle Indikator-Skalenwerte bestehen aus den Bewertungen 1, 2, 3, und das arithmetische Mittel der Indikator-Skalenwerte ist < 2.
	Entweder ist das arithmetische Mittel der Indikatorkalenwerte > 2, oder mindestens ein Indikator wurde mit dem Skalenwert 4 bewertet.
	Mindestens ein Indikator wurde mit den Skalenwerten 5 oder 6 bewertet.

Bewertungsbeispiel

In Tabelle 13 werden zwei fiktive Technologien betrachtet, deren Bewertung mittels des semi-quantitativen Kriteriums 11.1 *Anlagensicherheit (Stoffbezogene Indikatoren)* erfolgt ist.

Tabelle 13: Beispiel: Fiktiver Vergleich der Anlagensicherheit zweier Technologien

Indikator	Bezug	Skalenwert	Skalenwert 5 oder 6 liegt vor? (rot)	Skalenwert 4 liegt vor? (gelb)	Ausschließlich Skalenwerte 1 bis 3? -> Bildung des arith. Mittels	Einstufung (farblich)
Technologie 1, Kriterium 11.1						
11.1a	Bewertungsebene 1 (Standort)	1	nein	nein	Ja → 1,8	
11.1b		1				
11.1c		3				
11.1d		2				
11.1e		2				
Technologie 2, Kriterium 11.1						
11.1a	Bewertungsebene 1 (Standort)	1	ja	nein	nein	
11.1b		1				
11.1c		1				
11.1d		5				
11.1e		1				

2.3.3 Bewertungsschritt 3: Einordnung der Gesamtergebnisse

Schließlich erfolgt im 3. Bewertungsschritt eine vergleichende Gesamtbewertung aller Technologien einer Gruppe. Zu diesem Zwecke werden die im vorherigen Bewertungsschritt ermittelten Farbeinschätzungen in eine Gesamtdarstellung überführt. Eine fiktive Beispielbewertung ist in Abbildung 4 dargestellt.

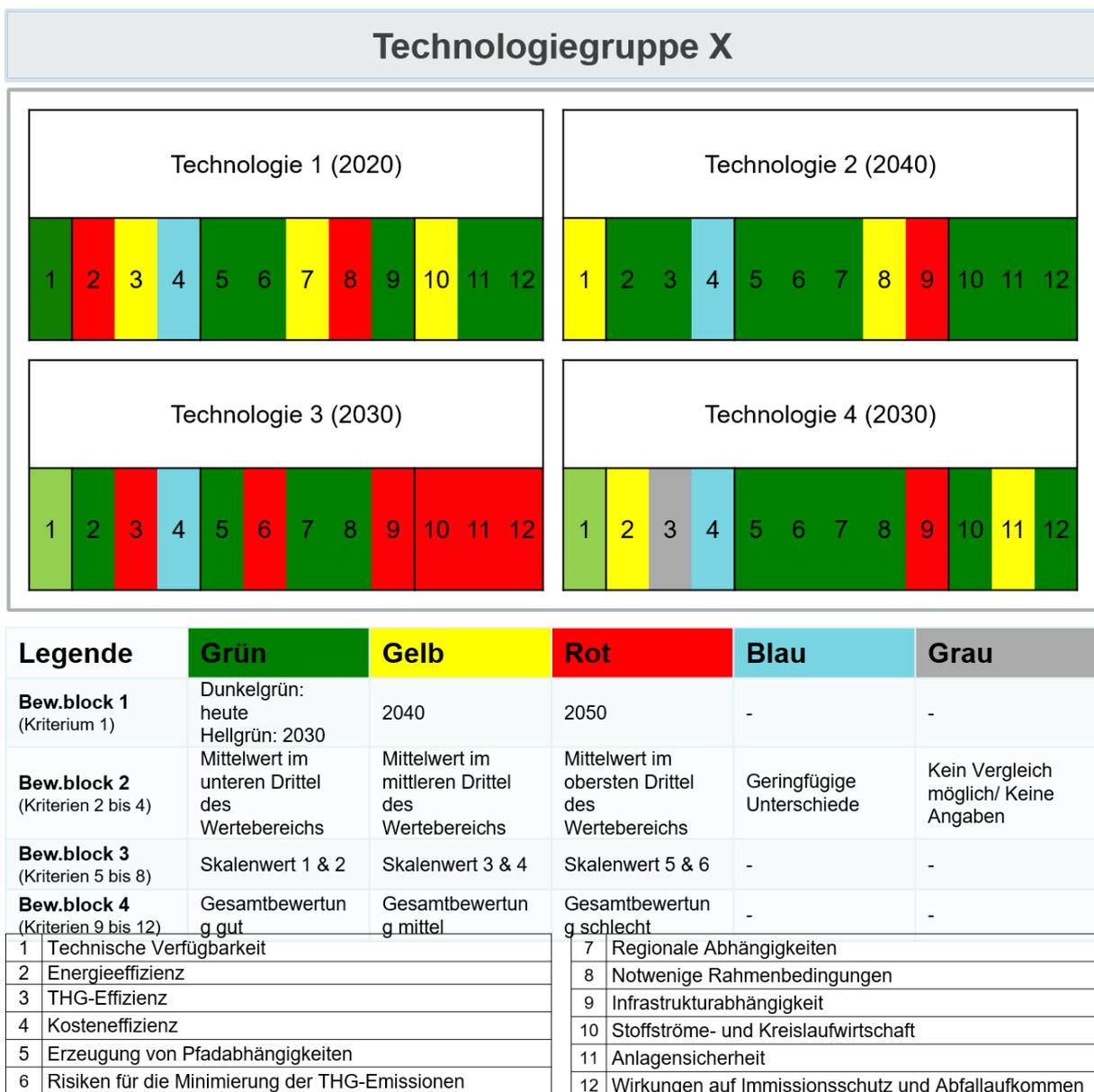
Mithilfe dieser zusammenfassenden Darstellung kann auf den ersten Blick gesehen werden, welche Technologien im Vergleich wie oft und bei welchem Kriterium wie abschneiden. Die Jahreszahl wird neben der Farbe des Kriteriums 1 auch gleichzeitig als Zahl wiedergegeben, da

sie zentral für die Einschätzung ist, wann eine Technologie für eine Roadmap eingesetzt werden könnte.

Im gezeigten Beispiel ist die Technologie 1 bereits einsatzfähig („2020“). Die Technologie 3, die ab dem Jahr 2030 einsatzfähig ist, unterscheidet sich deutlich hinsichtlich der Kriterien 6 und 9 bis 12. Die Technologie 2 wird erst 2040 einsatzfähig sein und wird in den meisten Fällen noch einmal besser als Technologie 2 eingeschätzt.

Eine mögliche Schlussfolgerung beim Entwickeln einer Roadmap könnte daher sein, dass zunächst (übergangsweise) Technologie 1 eingesetzt wird, die Technologien 3 und 4 übersprungen werden und ab 2040 die Technologie 4 als finale Technologie verwendet wird.

Abbildung 4: Beispielhafte vergleichende Einschätzung einer fiktiven Technologiegruppe



Quelle: eigene Darstellung, Wuppertal Institut

Eine andere Option könnte sein, anstatt der neuen Technologie 1 zunächst weiterhin die installierte konventionelle Technologie zu nutzen und im Jahr 2030 direkt die Technologie 4 einzusetzen. Bei Technologie 4 sind zwar „gelbe“ und „rote“ Einstufungen (Kriterien 2, 9 und 11)

vorhanden, aber ggf. wäre es in der verbleibenden Zeit (2020-2030) möglich, die Technologie in der Hinsicht weiterzuentwickeln, so dass auch hier „grüne“ Bewertungen erreicht werden können.

In jedem Fall müssen beim Roadmapping natürlich auch die Detailbewertungen aus dem Steckbrief / dem Kurzbericht zuhilfe genommen werden, so dass in kritischen Fällen die Gründe für die Einstufung nachvollzogen werden können.

3 Bewertungsleitfaden

Autoren: Peter Viebahn, Ali Aydemir, Andreas Pastowski, Sören Steger

3.1 Kriterium 1: Technische Verfügbarkeit

3.1.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 14: Überblick zu Kriterium 1: Technische Verfügbarkeit

Fragestellung	Kurzbeschreibung			
Kategorie	Technologie <input checked="" type="checkbox"/>	Ökonomie <input type="checkbox"/>	Umwelt <input type="checkbox"/>	Systemaspekte <input type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Die technische Verfügbarkeit besagt in diesem Vorhaben, wann eine der betrachteten Technologien großskalig und kommerziell verfügbar ist.			
Ziel des Kriteriums	Minimierung des Jahres der großskaligen, kommerziellen Verfügbarkeit.			
Kurzbeschreibung des Optimums	Die Technologie weist einen TRL 9 („Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz“) auf. Dies schließt ein, dass die Technologie bereits in ihrer vorgesehenen Betriebsumgebung genutzt wird und großskalig bzw. in der benötigten Leistungsklasse für einen flächendeckenden Einsatz verfügbar ist. Der Zeitpunkt sollte möglichst früh auf der Zeitachse liegen.			
Art des Kriteriums	Quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input type="checkbox"/>		
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>		
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>		
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung	
	1: Jahr, in dem TRL 9 erreicht ist.	2020 – 2050 in Zehnerschritten	Minimum	
Bewertungsebene	Ebene 1 <input checked="" type="checkbox"/>	Ebene 2 <input type="checkbox"/>		
Vorgehen	Erfassung des aktuellen Technologiestatus (TRL) und Abschätzung des Zeitpunkts der voraussichtlichen Erreichung von TRL 9.			

Bedeutung des Kriteriums

Dieses Kriterium bestimmt die Reihenfolge, in der die betrachteten Technologien innerhalb einer Roadmap eingesetzt werden können. So kann es auch möglich sein, zunächst eine bereits verfügbare und schon erheblich emissionsreduzierende (Übergangs-) Technologie einzusetzen und z. B. ab dem Jahr 2040 auf eine dann verfügbare, finale Technologie umzuschwenken.

Es wird davon ausgegangen, dass in dieser Studie nur Technologien betrachtet werden, deren technische Verfügbarkeit spätestens 2050 gegeben sein wird, daher ist „Ausschlusskriterium“ mit „Nein“ bewertet. In anderen Zusammenhängen könnte es aber durchaus auch als Ausschlusskriterium angesehen werden.

Beschreibung des Kriteriums

Dieses Kriterium zeigt auf, wann die betrachtete Technologie frühestens im Markt erhältlich ist – nicht als einzelne Demonstrationsanlage, sondern als einsatzbereite kommerzielle Anlage. Als Indikator wird daher das Jahr verwendet, indem die Technologie einen TRL von 9 erreicht hat.

Gemäß der hier verwendeten Definition des TRL (siehe unten) liegt ein TRL 9 vor, wenn die Technologie in ihrer finalen Form vorliegt (geeignete Leistungsklasse für den flächendeckenden Einsatz) und in ihrer vorgesehenen Betriebsumgebung eingesetzt wird. Die Einordnung als „großskalig verfügbar“ bezieht sich dabei auf die Größenklasse von Einzelanlagen, nicht aber auf die Erreichbarkeit hoher Ausbauziele. Ebenso ist mit „kommerzieller Verfügbarkeit“ hier nicht zwingend „wirtschaftlich ohne weitere Anreize“ gemeint. Vielmehr soll eine Anlage gekauft und bereits als Baustein eines kommerziellen (also auf Gewinnerzielung ausgerichteten) Anlagenverbands genutzt werden können.

Zu verwendende Indikator(en)

Als Indikator wird das Jahr verwendet, indem die betrachtete Technologie den TRL 9 („Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz“) erreichen wird.

Vorgehen

Einstufungen zum TRL sind ursprünglich von der NASA für Raumfahrtmissionen definiert worden (Mankins 2004). Das Konzept wird jedoch grundsätzlich auch für industrielle Prozesstechnologien genutzt. Im Rahmen des Projektes *Technologien für die Energiewende* wurde nachfolgende Klassifizierung verwendet, die vom Projektträger Jülich, aufbauend auf den Arbeiten der High-Level-Group der EU-Kommission, entwickelt wurde und die für die Zwecke von DekarBInd übernommen wird:

Tabelle 15: TRL-Definition für Zwecke der Bewertung von dekarbonisierten industriellen Technologien

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung (TRL-Level)	
Grundlagenforschung	TRL 1	Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar
	TRL 2	Beschreibung eines Technologiekonzeptes und/oder einer Anwendung
Technologieentwicklung	TRL 3	Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie
	TRL 4	Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor
	TRL 5	Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung
Demonstration	TRL 6	Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung
	TRL 7	Prototypentest in Betriebsumgebung
	TRL 8	Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung
Kommerzialisierung	TRL 9	Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz

Quelle: Viebahn et al. (2018b)

Die verschiedenen Stufen der technischen Verfügbarkeit ermöglichen eine recht präzise Einordnung des jeweils *aktuellen* technischen Entwicklungsstandes. Anspruchsvoller sind demgegenüber die hier erforderlichen Abschätzungen zur *weiteren* technischen Entwicklung sowie des jeweiligen Zeitbedarfes für solche Technologien, die aktuell unterhalb von TRL 9 eingestuft werden.

Für die Bewertung wird eine frühestmögliche Verfügbarkeit angestrebt, d. h. das Jahr des TRL 9 sollte minimiert werden.

Der Indikator wird für die *Bewertungsebene 1* erhoben, da die Funktionsfähigkeit der Anlage innerhalb eines Unternehmens im Vordergrund steht.

Tabelle 16: Bewertungsskala für die technische Verfügbarkeit der betrachteten Technologie

Indikator		Bezug	Jahr 2020	2030	2040	2050
1	Jahr, in dem TRL 9 erreicht ist.	Bewertungsebene 1 (Standort)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Querbezüge zu anderen Kriterien

Keine

Datenquellen

Der aktuelle Technologiestatus (TRL) und der Zeitpunkt der voraussichtlichen Erreichung des TRL 9 sollten bei der Beschreibung der jeweiligen Technologie erfasst werden.

3.1.2 Vergleich aller Technologien aus einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die Werte der einzelnen Technologien in folgende Tabelle eingetragen.

Tabelle 17: Vergleich der technischen Verfügbarkeit verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Technologie	Jahr 2020	2030	2040	2050
1	Jahr, in dem TRL 9 erreicht ist.	Bewertungsebene 1 (Standort)	Technologie 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Technologie 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Technologie ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3.2 Kriterium 2: Energieeffizienz

3.2.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 18: Überblick zu Kriterium 2: Energieeffizienz

Fragestellung	Kurzbeschreibung			
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/>	Ökonomie <input type="checkbox"/>	Umwelt <input checked="" type="checkbox"/>	Systemaspekte <input type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Energiebedarf einer Technologie für die Herstellung bestimmter Produkte. Dies betrifft sowohl die von der Anlage benötigte Endenergie als auch die zu deren Produktion benötigte Energie (Vorkette).			
Ziel des Kriteriums	Beschreibung der Energieeffizienz der betrachteten Technologie.			
Kurzbeschreibung des Optimums	Die Technologie verursacht innerhalb der Technologiegruppe den geringsten spezifischen Energieverbrauch.			
Art des Kriteriums	Quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input type="checkbox"/>		
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>		
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input checked="" type="checkbox"/>		
Indikator(en)	Indikator	Einheit	Optimierungsrichtung	
	2.1: Spezifischer Energiebedarf (Endenergie) 2.2: Spezifischer Energiebedarf (Primärenergie)	GJ/t Output	Minimum	
Bewertungsebene	Ebene 1 <input checked="" type="checkbox"/>	Ebene 2 <input checked="" type="checkbox"/>		
Vorgehen	Literaturrecherche, eigenes Expertenwissen, ggf. Experteninterview.			

Bedeutung des Kriteriums

Der Energiebedarf ist einer der wesentlichen Bestimmungsfaktoren der THG-Emissionen des Sektors Industrie. Entsprechend sind die Verwendung von Energieträgern und die Energieeffizienz von industriellen Prozessen entscheidende Hebel, um den Verbrauch fossiler Energie in der Industrie und damit die THG-Emissionen abzusenken.

Beschreibung des Kriteriums

Das Kriterium Energieeffizienz beschreibt den Energiebedarf der betrachteten treibhausgasarmen Technologien. Ziel ist es, diesen mit der Energieeffizienz bestehender Technologien zu vergleichen, um mögliche konkurrierende Entwicklungen (Senkung der Treibhausgasemissionen, aber Anstieg des Energieverbrauchs) bei der Erstellung der Roadmaps berücksichtigen zu können.

Zu verwendende Indikator(en)

Die Energieeffizienz eines Prozesses wird im weitesten Sinne verstanden als das Verhältnis zwischen dem nutzbaren Ergebnis eines Prozesses und der in den Prozess eingebrachten Energie. Energieeffizienz-Indikatoren lassen sich u. a. in die folgenden drei Gruppen einteilen.

- ▶ Thermodynamische Indikatoren, z. B. für einen thermodynamischen Prozess der Enthalpiewirkungsgrad (Enthalpieoutput (GJ) / Enthalpieinput (GJ)).
- ▶ Physikalisch-thermodynamische Indikatoren, z. B. für die Stahlproduktion die Menge des produzierten Stahls (t) im Verhältnis zum Energieverbrauch (GJ).
- ▶ Wirtschaftliche Indikatoren, z. B. die Energieproduktivität, d. h. das Verhältnis aus Bruttowertschöpfung (€) und Energieverbrauch (GJ) eines Sektors der Volkswirtschaft.

Für die Bewertung von Technologien im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung der Industrie ist auf politischer Ebene der spezifische Energiebedarf üblich (d. h. ein physikalisch-thermodynamischer Indikator). Er beschreibt den Energiebedarf eines Prozesses zur Herstellung eines Produktes.

$$\text{Spezifischer Energiebedarf} = \frac{\text{Energieverbrauch (GJ)}}{\text{Output (t)}}$$

Der *spezifische Energiebedarf* stellt daher den zentralen Indikator zur Bewertung des Kriteriums Energieeffizienz dar.

Für die Bewertung ist ein niedriger spezifischer Energiebedarf besser als ein hoher, d. h. im Vergleich mehrerer Technologien sollte der Wert so weit wie möglich minimiert werden.

Vorgehen

Im 1. Schritt werden für jede der Technologien einer Gruppe die zur Bestimmung des jeweiligen *Spezifischen Energiebedarfs* benötigten Daten erhoben. Je nach Datenverfügbarkeit sollte dies für den Ist-Zustand (2020) und für zukünftige Zeitpunkte (2030, 2040, 2050) erfolgen. Die Daten werden zudem für beide Bewertungsebenen erhoben.

- ▶ Die Bewertungsebene 1 entspricht hier der verwendeten Endenergie;
- ▶ die Bewertungsebene 2 entspricht der hierfür benötigten Primärenergie.

Die Daten werden in Tabellen, differenziert nach Energieträgern, dargestellt, so dass der spezifische Energieverbrauch *pro Energieträger* für die betrachtete Technologie ersichtlich ist. Dies resultiert in einem „Mengengerüst Energieträger“. Der Indikator *Spezifischer Energiebedarf* wird dann aus der Summe des Energieverbrauchs pro verwendetem Energieträger berechnet.

Dazu sind folgende Daten zu erheben:

- ▶ Endenergiebedarfe für fossile und biogene Brennstoffe sowie Strom
- ▶ Primärenergiefaktoren für fossile und biogene Brennstoffe sowie Strom

Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass bei der Bewertungsebene 1 unterschiedliche Energieträger addiert werden, z. B. Strom und fossile Brennstoffe. Zwar haben Energieträger eine unterschiedliche Wertigkeit, doch wurde dieser Weg bewusst gewählt, um klare und strukturierte Analysen zu ermöglichen. Folgende Argumente sprechen dafür.

1. Eine Differenzierung zwischen Elektrizität und Brennstoffen würde bedeuten, dass für jede Technologie mindestens zwei Indikatoren gebildet werden müssten, die dann in eine vergleichende Bewertung umgesetzt werden müssen. Dies führt zwangsläufig zur Entwicklung von Metriken (z. B. Gewichtungen) für die zusammenführende Bewertung

mehrerer Indikatoren. Dadurch wird die Bewertung des Kriteriums weniger klar und intransparent.

- Ein Hauptargument für die Unterscheidung zwischen Elektrizität und Brennstoffen ist, dass es neue Technologien geben kann, die zwar insgesamt weniger Energie, jedoch mehr Strom als die derzeitigen Technologien verbrauchen. Dies kann je nach dem jeweiligen Strommix zu insgesamt höheren THG-Emissionen führen und erhöht auch die Anforderungen an das Energiesystem. Diese Effekte werden jedoch in den Kriterien 3 (THG-Effizienz) und 10 (Infrastrukturabhängigkeit) berücksichtigt.

Anschließend wird das Ergebnis der Bewertung in die nachfolgende Tabelle eingetragen.

Tabelle 19: Bewertung der Energieeffizienz der betrachteten Technologie im Zeitablauf

Indikator		Bezug	Einheit	Wert 2020	2030	2040	2050
2.1	Spezifischer Energiebedarf	Bewertungsebene 1 (Endenergie)	GJ/t Output				
2.2	Spezifischer Energiebedarf	Bewertungsebene 2 (Primärenergie)	GJ/t Output				

Hinweis: Falls nur ein zukünftiger Werte ermittelt werden kann, bitte diesen für alle Zeiträume verwenden.

Querbezüge zu anderen Kriterien

Kriterium 3: THG-Effizienz (baut auf Bewertung der Energieeffizienz auf).

Kriterium 6: Risiken für die Minderung der THG-Emissionen

Kriterium 7: Regionale Abhängigkeiten

Kriterium 10: Infrastrukturabhängigkeit (hier werden Aspekte, die einen signifikanten Einfluss auf das Energiesystem haben, behandelt – z. B. wenn eine neue Technologie deutlich mehr Strom benötigt als bisherige Technologien, was wiederum Bedürfnisse im Energiesystem schafft).

Datenquellen

- ▶ Die „Best Available Techniques Reference“-Dokumente (BREF) der EU-Kommission⁸ bieten eine gute Datengrundlage für die derzeit vorherrschenden Technologien.
- ▶ Für Technologien, die in der Zukunft eingesetzt werden können, bieten wissenschaftliche Artikel aus Fachzeitschriften brauchbare Datengrundlagen.
- ▶ Primärenergiefaktoren können grundsätzlich der DIN V 18599-1 entnommen werden, wobei bei Strom zu prüfen ist, ob aktuellere Quellen sinnvoll sind.

3.2.2 Vergleich aller Technologien einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die Indikatorwerte der einzelnen Technologien in folgende Tabelle eingetragen. Gleichzeitig werden die Werte aller Technologien pro Bewertungsebene gegenübergestellt, indem ihnen wie in Kapitel 2.3.2.2 beschrieben in der letzten Spalte eine Farbe zugeordnet wird.

⁸ BREF-Dokumente (Best Available Techniques Reference): <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/referenc>

Tabelle 20: Vergleich der Energieeffizienz verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Einheit GJ/t Output	Wert 2020	2030	2040	2050	Arithm. Mittel	Einstufung (farblich)
2.1	Spezifischer Energiebedarf	Bewertungs- ebene 1 (Endenergie)	Techno- logie 1						
			Techno- logie 2						
			Techno- logie ...						
2.2	Spezifischer Energiebedarf	Bewertungs- ebene 2 (Primärener- gie)	Techno- logie 1						
			Techno- logie 2						
			Techno- logie ...						

3.3 Kriterium 3: Treibhausgas-Effizienz

3.3.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 21: Überblick zu Kriterium 2: Treibhausgas-Effizienz

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/>	Ökonomie <input type="checkbox"/>	Umwelt <input checked="" type="checkbox"/> Systemaspekte <input type="checkbox"/>
Definition	THG-Emissionen einer Technologie für die Herstellung bestimmter Produkte. Dies betrifft sowohl die von der Anlage verursachten Emissionen als auch die außerhalb des Unternehmens verursachten Emissionen (Vorkette).		
Ziel des Kriteriums	Mit diesem Kriterium soll die THG-Effizienz von Technologien bewertet werden.		
Kurzbeschreibung des Optimums	Die Technologie verursacht innerhalb der Prozesskategorie die geringsten THG-Emissionen.		
Art des Kriteriums	Quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input type="checkbox"/>	
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input checked="" type="checkbox"/>	
Indikator(en)	Indikator	Einheit	Optimierungsrichtung
	3: Spezifische THG-Emissionen	t CO ₂ -Äq./t Output	Minimum
Bewertungsebene	Ebene 1 <input type="checkbox"/>	Ebene 2 <input checked="" type="checkbox"/>	
Vorgehen	Wenn möglich, Bewertung nach der angegebenen Formel; alternativ Verwendung existierender Literaturwerte; ggf. Experteninterview		

Bedeutung des Kriteriums

Die THG-Effizienz ist das primäre Kriterium zur Bewertung der in diesem Projekt betrachteten Technologien. Schließlich geht es darum, Technologien zu identifizieren, die zum einen im Vergleich zu bisherigen Technologien weniger Treibhausgase ausstoßen und zum anderen einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Industrie leisten können. Im besten Fall werden Technologien identifiziert, die keine Treibhausgase mehr ausstoßen.

Eine Reduktion der THG-Emissionen kann zum einen dadurch erreicht werden, dass Technologien, die fossile Brennstoffe nutzen, energieeffizienter gestaltet werden, da eine Reduktion des Energieverbrauchs auch zu geringeren THG-Emissionen führt. Zum anderen können THG-Einsparungen durch grundlegende Veränderungen von Prozessen erreicht werden, zum Beispiel durch eine Änderung der Art der eingesetzten Energieträger. Beide Aspekte spiegeln sich zusammen in dem Kriterium 3: THG-Effizienz wieder.

Beschreibung des Kriteriums

Das Kriterium THG-Effizienz beschreibt die THG-Emissionen der betrachteten Technologien.

Zu verwendende Indikator(en)

Für die Technologiebewertung ist der Indikator *Spezifische THG-Emissionen* zentral zur Bewertung des Kriteriums THG-Effizienz. Für die Bewertung sind niedrige spezifische THG-Emissionen besser als hohe, d. h. der Indikator sollte so weit wie möglich minimiert werden.

$$\text{Spezifische THG-Emissionen} = \frac{\text{THG-Emissionen (t CO}_2\text{ - Äq.)}}{\text{Output (t)}}$$

Vorgehen

Im 1. Schritt werden für jede der Technologien einer Gruppe die zur Bestimmung der jeweiligen *Spezifischen THG-Emissionen* benötigten Daten erhoben. Je nach Datenverfügbarkeit sollte dies für den Ist-Zustand (2020) und für zukünftige Zeitpunkte (2030, 2040, 2050) erfolgen. Die Daten werden für die Bewertungsebene 2 erhoben.

Die Daten werden für die Bewertungsebene 2 erhoben, diese enthält die Vorketten für den Bezug von Energieträgern.

Die Grundlage für die Bestimmung des Indikators ist das *Mengengerüst Energieträger*, das in Kriterium 2 erstellt wurde. Zur Bestimmung des Indikators werden die aus dem Verbrauch der Energieträger resultierenden THG-Emissionen ermittelt und aufsummiert. Dazu sind die folgenden zentralen Daten zu erheben:

- ▶ THG-Emissionsfaktoren (für Primärenergie) für fossile und biogene Brennstoffe sowie Strom
- ▶ Zur Bestimmung der Emissionen sind die Primärenergiebedarfe aus Kriterium 2 zu verwenden

Anschließend wird das Ergebnis der Bewertung in die nachfolgende Tabelle eingetragen.

Tabelle 22: Bewertung der THG-Effizienz der betrachteten Technologie im Zeitablauf

Indikator		Bezug	Einheit	Wert 2020	2030	2040	2050
3	Spezifische THG-Emissionen	Bewertungsebene 2 (Vorketten)	t/t Output				

Hinweis: Falls nur ein zukünftiger Werte ermittelt werden kann, bitte diesen für alle Zeiträume verwenden.

Querbezüge zu anderen Kriterien

Kriterium 2: Energieeffizienz (Grundlage zur Ermittlung der THG-Emissionen).

Datenquellen

- ▶ Die „Best Available Techniques Reference“-Dokumente (BREF) der EU-Kommission bieten eine gute Datengrundlage für die derzeit vorherrschenden Technologien.
- ▶ Für Technologien, die in der Zukunft eingesetzt werden können, können wissenschaftliche Artikel aus Fachzeitschriften als Datengrundlage dienen.
- ▶ Emissionsfaktoren (z. B. für Energieträger) können den nationalen Treibhausgasinventaren (im Rahmen der Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll) entnommen werden. Z. B. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-26_climate-change_13-2017_nir-2017_unfccc_de.pdf

3.3.2 Vergleich aller Technologien einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die Indikatorwerte der einzelnen Technologien in die folgende Tabelle eingetragen. Gleichzeitig werden die Werte aller Technologien pro Bewertungsebene gegenübergestellt, indem ihnen wie in Kapitel 2.3.2.2 beschrieben in der letzten Spalte eine Farbe zugeordnet wird.

Tabelle 23: Vergleich der THG-Effizienz verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Einheit t/t Output	Wert 2020	2030	2040	2050	Arithm. Mittel	Einstufung (farblich)
3	Spezifische THG-Emissionen	Bewertungs- ebene 2	Technologie 1						
		(Vorketten)	Technologie 2						
			Technologie ...						

3.4 Kriterium 4: Kosteneffizienz

3.4.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 24: Überblick zu Kriterium 4: Kosteneffizienz

Fragestellung	Kurzbeschreibung			
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/>	Ökonomie <input checked="" type="checkbox"/>	Umwelt <input type="checkbox"/>	Systemaspekte <input type="checkbox"/>
Definition	Es werden die Kosten pro Einheit Output der betrachteten Technologie ermittelt, die sich aus Investitionskosten (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) sowie Brennstoffkosten und ggf. CO ₂ -Kosten zusammensetzen. Dabei werden die nivellierten Kosten nach der Methode des „Levelised Cost of Output“ verwendet, mit der die Investitionskosten annuitätisch auf die Laufzeit einer Anlage abgezinst werden.			
Ziel des Kriteriums	Mit diesem Kriterium sollen die Kosten verschiedener Technologien vergleichend bewertet werden.			
Kurzbeschreibung des Optimums	Die Technologie verursacht innerhalb einer Technologiegruppe die geringsten Kosten.			
Art des Kriteriums	Quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input type="checkbox"/>		
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>		
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input type="checkbox"/>	Ja <input checked="" type="checkbox"/>		
Indikator(en)	Indikator	Einheit	Optimierungsrichtung	
	4: Spezifische Kosten (LCOO)	EUR/t Output	Minimum	
Bewertungsebene	Ebene 1 <input checked="" type="checkbox"/>	Ebene 2 <input type="checkbox"/>		
Vorgehen	Wenn möglich, Bewertung nach der angegebenen Formel; alternativ Verwendung existierender Literaturwerte; ggf. Experteninterview			

Bedeutung des Kriteriums

Neben der THG-Effizienz sind die Kosten einer Maßnahme bzw. einer Technologie ein weiteres zentrales Kriterium zur Bewertung der in diesem Projekt betrachteten Technologien. Schließlich geht es darum, ein tragbares Verhältnis von Kosten zu THG-Effizienz zu erreichen bzw. zumindest aufzuzeigen, wie hoch die Kostendifferenz zu den Kosten derzeit betriebener Anlagen ist.

Beschreibung des Kriteriums

Das Kriterium Kosteneffizienz beschreibt die Kosten, die pro Einheit Output der betrachteten Technologie entstehen. Durch die einheitliche Bezugsgröße kann die Kosteneffizienz verschiedener Technologien verglichen werden. Dabei werden die unterschiedlichen Kostenarten mit einbezogen, indem Investitionskosten annuitätisch auf die Laufzeit einer Anlage abgezinst werden und laufende Kosten wie CO₂-Vermeidungskosten und Betriebskosten addiert werden. Alle Kosten werden schließlich auf eine Einheit Output (z. B. eine Tonne Stahl) bezogen.

Solche über die Laufzeit einer Anlage „nivellierten“ Kosten werden üblicherweise als „levelised cost“ bezeichnet. Da die Levelised Cost of Electricity (LCOE) im Stromsektor eine gängige

Bezeichnung sind, wird in diesem Vorhaben analog der Terminus Levelised Cost of Output (LCOO) verwendet. Für die Bewertung sind niedrige LCOO besser als hohe, d. h. der Indikator sollte so weit wie möglich minimiert werden.

Zu verwendende Indikator(en)

Der Indikator Levelised Cost of Output (LCOO) wird wie folgt berechnet.

$$LCOO = \frac{\text{Kosten (EUR)}}{\text{Output (t)}}$$

bzw.

$$LCOO = \frac{(K_{\text{Kapital}} + K_{\text{Betrieb}}) \times af + K_{\text{Brennstoff}} + K_{\text{CO}_2}}{\text{Output}}$$

und

$$af = \frac{I \times (1 + I)^n}{(1 + I)^n - 1}$$

mit:

$LCOO$ = Nivellierte Kosten der Industrieproduktion (LCOO) [EUR/t]

K_{Kapital} = Investmentkosten (CAPEX) [EUR]

K_{Betrieb} = Fixe Betriebskosten (OPEX) [EUR]

$K_{\text{Brennstoff}}$ = Jährliche Energiekosten [EUR/a]

K_{CO_2} = Jährliche CO₂-Kosten (z. B. Zertifikate), sofern noch Restemissionen bestehen [EUR/a]

af = Annuitätsfaktor [1/a]

I = volkswirtschaftlicher Zinssatz [%]

n = ökonomische Lebensdauer [a]

$Output$ = Jährlich produziertes Produkt [t/a]

Vorgehen

Die beiden zentralen Größen zur Ermittlung der LCOO sind die Investitionskosten sowie die Betriebskosten, die jeweils ermittelt oder aus der Literatur abgeleitet werden müssen:

- ▶ Investitionskosten der Umstellung auf den dekarbonisierten Prozess (CAPEX)

Um bei bestehenden Anlagen die Umstellung auf den dekarbonisierten Prozess zu ermöglichen, sind bestimmte Veränderungen an den jeweiligen Produktionsanlagen und davon abgeleitete Investitionen erforderlich. Diese hängen von den konkreten Verhältnissen am jeweiligen Standort ab, die für eine solche Umstellung mehr oder weniger förderlich sein können. Bei Neuanlagen können die Investitionen erheblich niedriger ausfallen, weil typische kostenwirksame Restriktionen eines gegebenen Standortes entfallen.

- ▶ Variable Kosten der Umstellung auf den dekarbonisierten Prozess (OPEX)

Neben den Investitionen können auch die variablen, d. h. von Auslastung und Produktionsmenge abhängigen Kosten von der Umstellung beeinflusst werden. Dies kann die Produktionskosten erhöhen, wenn bezogene dekarbonisierte Energieträger zu Kostensteigerungen führen. Umgekehrt kann die Dekarbonisierung für den Referenzprozess erforderliche Filtertechnologien zur Vermeidung der Emission von Luftschadstoffen (Abgasbehandlung) überflüssig machen.

Weitere Festlegungen:

- ▶ Alle Kostenbestandteile sollten je nach Datenverfügbarkeit für den Ist-Zustand (2020) und für zukünftige Zeitpunkte (2030, 2040, 2050) erfolgen. Mit der Fortschreibung können Kostensenkungen durch Skaleneffekte (größere Anlagen), Volumeneffekte (Massenproduktion) und technische Verbesserungen berücksichtigt werden. Dabei wird die obige Berechnungsweise jeweils auf neu hergestellte Technologien zum entsprechenden Zeitpunkt angewandt.
- ▶ Zur Fortschreibung der Investitionskosten auf spätere Zeiträume wird i. d. R. die Lernkurvenmethodik verwendet. Dazu muss eine je nach Technologie spezifische Lernrate ermittelt werden. Dies ist der Faktor, um den die Kosten pro Verdoppelung des Outputs (z. B. der installierten Leistung) sinken. Zur Ermittlung des jährlichen Outputs sollen Werte aus globalen Szenarien verwendet werden.
- ▶ Die Kosten sollten alle inflationsbereinigt in Euro angegeben werden, basierend auf einer für alle Technologien einheitlichen Preisbasis (z. B. 2020).
- ▶ Als volkswirtschaftlicher Zinssatz für die Annuität wird 4 % gewählt. Ein solcher ist in der Impact-Assessment-Richtlinie der EU empfohlen, siehe European Commission (2015).
- ▶ Die Daten werden für die Bewertungsebene 2 erhoben, beziehen also wie oben beschrieben alle Kostenarten ein.

Anschließend wird das Ergebnis der Bewertung in die nachfolgende Tabelle eingetragen.

Tabelle 25: Bewertung der Kosteneffizienz der betrachteten Technologie im Zeitablauf

Indikator		Bezug	Einheit	Wert 2020	2030	2040	2050
4	Spezifische Kosten (LCOO)	Bewertungsebene 2 (Capex und Opex)	EUR/t Output				

Hinweis: Falls nur ein zukünftiger Werte ermittelt werden kann, bitte diesen für alle Zeiträume verwenden.

Querbezüge zu anderen Kriterien

Kriterium 1: Technische Verfügbarkeit

Kriterium 2: Energieeffizienz

Datenquellen

Für die hier betrachteten dekarbonisierten Technologien dürften – abhängig vom technischen Entwicklungsstand – wenig Kostendaten verfügbar sein, die zudem mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind und teilweise wettbewerblich sensible Daten enthalten könnten. Sind im Idealfall die einzelnen Basisdaten verfügbar, können wie oben angegeben die LCOO einheitlich berechnet werden. Sind nur Angaben zu LCOO direkt verfügbar, sollte die Grundlage ihrer Berechnung geprüft und angegeben werden. Im späteren Vergleich sollten alle LCOO auf ähnlichen Berechnungen basieren. Eine Kombination einzelner Basisdaten aus verschiedenen Quellen birgt die Gefahr von Verzerrungen durch unterschiedliche Methoden und Annahmen.

Neben Kostenschätzungen aus der Literatur könnten ggf. Daten im Rahmen der Stakeholder-Beteiligung gewonnen werden. In jedem Fall sind alle Datenquellen und die Berechnungsweise nachvollziehbar anzugeben.

3.4.2 Vergleich aller Technologien einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die Indikatorwerte der einzelnen Technologien in folgende Tabelle eingetragen. Gleichzeitig werden die Werte aller Technologien pro Bewertungsebene gegenüber gestellt, indem ihnen wie in Kapitel 2.3.2.2 beschrieben in der letzten Spalte eine Farbe zugeordnet wird.

Tabelle 26: Vergleich der Kosteneffizienz verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Einheit EUR/t Output	Wert 2020	2030	2040	2050	Arithm. Mittel	Einstufung (farblich)
4	Spezifische Kosten (LCOO)	Bewertungsebene 2 (Capex und Opex)	Technologie 1						
			Technologie 2						
			Technologie ...						

3.5 Kriterium 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten

3.5.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 27: Überblick zu Kriterium 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/>	Ökonomie <input type="checkbox"/>	Umwelt <input type="checkbox"/> Systemaspekte <input checked="" type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Pfadabhängigkeiten zeigen auf, in weit durch den Einsatz einer Technologie langfristig nicht mehr abänderbare Strukturen festgelegt werden.		
Ziel des Kriteriums	Einstufung der Stärke möglicher zukünftiger Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekte einer eingesetzten Technologie.		
Kurzbeschreibung des Optimums	Das Optimum ist eine Technologie, die zukünftig keine oder nur sehr geringe Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte aufweist.		
Art des Kriteriums	Quantitativ <input type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
	5: Grad der prospektiven Pfadabhängigkeit	1 (keine) – 6 (sehr hoch)	Minimum
Bewertungsebene	Ebene 1 <input type="checkbox"/>	Ebene 2 <input checked="" type="checkbox"/>	
Vorgehen	Beschreibung möglicher Pfadabhängigkeiten und ihrer jeweiligen Stärke und Zusammenfassung zu einer Gesamtbewertung.		

Bedeutung des Kriteriums

Mithilfe dieses Kriteriums wird qualitativ untersucht, inwieweit durch den Einsatz der betrachteten Technologie Strukturen langfristig festgelegt werden, die nur noch schwer verändert werden können. Dies ist vor dem Hintergrund wichtig zu betrachten, dass die Energie- und Industriewende Technologie-offen erfolgen soll und nicht der Weg verstellt werden soll, einmal installierte Technologien nach einer bestimmten Zeitspanne ggf. durch verbesserte, effizientere Technologien zu ersetzen.

Beschreibung des Kriteriums

Pfadabhängigkeiten können retrospektiv oder prospektiv ermittelt werden. Pfadabhängigkeiten *bestehender Produktionssysteme* und daran anknüpfender Infrastrukturen schränken den Handlungsspielraum einer Transformation ein und erhöhen deren Kosten. Dies ist für die Transformation von einem fossil basierten zu einem dekarbonisierten Produktions- und Energiesystem evident. Zugleich kann eine solche Transformation je nach ihrem Verlauf neue Pfadabhängigkeiten erzeugen, die die Erreichung eines insgesamt optimierten Systems begünstigen oder beeinträchtigen.

Während die Beurteilung bisheriger technologischer Entwicklungspfade ex-post häufig evident ist, besteht die tatsächliche Herausforderung jedoch in der *Voraussicht zukünftiger kritischer Entwicklungspfade* und der bewussten Pfadgestaltung. Dies ist um so wichtiger, als dass im Fall der Grundstoffindustrie in einem relativ kurzen Zeitraum eine umfassende Umgestaltung einer gesamten Branche erfolgen wird. Es sollten daher Technologien eingesetzt werden, die – aus derzeitiger Sicht – möglichst geringe Pfadabhängigkeiten aufweisen. Das Kriterium beschreibt daher die Stärke, mit der mögliche Pfadabhängigkeiten und Lock-In-Effekte durch die hier betrachtete Technologie ausgelöst werden.

Neben der eigentlichen Technologie, die am Standort installiert wird, wird dabei auch die Abhängigkeit einer hiermit ggf. verbundenen Infrastruktur mit in die Bewertung einbezogen (die Anforderungen an die Infrastruktur selber werden in Kriterium 9 bewertet). Es wird daher die Bewertungsebene 2 betrachtet, die das Unternehmen mitsamt seiner Umwelt einbezieht.

Zu verwendende Indikator(en)

Hinweise auf Pfadabhängigkeiten ergeben sich aus folgenden Fragestellungen:

- ▶ Je größer die Planungs- und Nutzungsdauer einer Technologie ist, um so eher wird ein Umschwenken auf sich zukünftig abzeichnende Alternativen erschwert.
- ▶ Auch durch hohe Investitionskosten pro Output entsteht eine hohe Pfadabhängigkeit, da sich die Investition dann in einem langen Zeitraum amortisieren müssen.
- ▶ Aber auch die vorübergehende Nutzung fossiler Strukturen kann auf eine Gefahr von (Carbon-)Lock-In-Effekten hindeuten, wenn diese zunächst aufgebaut werden, aber mittel- bis langfristig ein zu 100 % erneuerbares Energiesystem angestrebt wird.

Vorgehen

Die Einstufung der Stärke der Pfadabhängigkeit erfolgt auf einer Skala von 1 – 6 im Sinne einer Schulnote. Die Bewertenden sollten zunächst mögliche Pfadabhängigkeiten ermitteln und jeweils einzeln auf der Skala einordnen und in der folgenden Tabelle eintragen. Anschließend erfolgt eine Zusammenschau aller Teilwerte und die Festlegung eines Gesamtwertes für die Technologie.

Tabelle 28: Bewertungsskala 1-6 für die semi-quantitative Bewertung der Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten der betrachteten Technologie

Skala-Wert	1	2	3	4	5	6
Stärke der Pfadabhängigkeit	Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe

Einschätzung der Technologie

Tabelle 29: Semi-quantitative Bewertung der Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten der betrachteten Technologie

Bezeichnung der Pfadabhängigkeit (Quelle)	Skala 1-6	Begründung für die Bewertung in Stichworten
Festlegung des Gesamtwertes:		

Für die Bewertung wird eine geringe Pfadabhängigkeit angestrebt, d. h. im Vergleich mehrerer Technologien sollte der Wert so weit wie möglich minimiert werden.

Bei der Bewertung wird nicht nach unterschiedlichen Zeiträumen unterschieden, da sich i. d. R. keine Veränderung ergeben dürfte.

Beispiel

Durch die Einführung von blauem Wasserstoff können teilweise bestehende Strukturen weiter genutzt werden (großflächige Erdgasnetze), es müssen jedoch auch auf fossilen Energien basierende Strukturen (Erdgas-Dampfreformierung) neu aufgebaut werden. Eine Pfadabhängigkeit besteht darin, dass auch bei zukünftiger ausreichender Versorgung mit grünem Wasserstoff die einmal installierten Erzeugungskapazitäten für blauen Wasserstoff weiter genutzt werden könnten. Diese Pfadabhängigkeit wird als mittel eingestuft.

Ein anderes Beispiel ist die Nutzung der Kernenergie, die mit sehr großen Kraftwerken, hohen spezifischen und absoluten Investitionskosten und sehr langen Lebensdauern von über 50 Jahren einhergeht. Diese Pfadabhängigkeit wird als sehr hoch eingestuft, da ein frühzeitiger Rückbau mit erheblichen Kosten verbunden wäre.

Querbezüge zu anderen Kriterien

Keine

Datenquellen

Bei der Bewertung wird entweder auf bestehende Analysen von Pfadabhängigkeiten der hier zu betrachtenden Technologien zurückgegriffen. Vermutlich gibt es hierzu jedoch wenig Quellen in der Literatur zu finden, so dass alternativ eine eigene Bewertung, ggf. unterstützt durch Einschätzungen externer Experten, durchgeführt werden muss. Einige Fragestellungen, die dabei unterstützen, finden sich in der obigen Liste von Spiegelstrichen.

3.5.2 Vergleich aller Technologien aus einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die Indikatorwerte der einzelnen Technologien in die folgende Tabelle eingetragen. Gleichzeitig werden die Werte aller Technologien pro Bewertungsebene gegenübergestellt, indem ihnen wie in Kapitel 2.3.2.3 beschrieben in der letzten Spalte eine Farbe zugeordnet wird.

Tabelle 30: Vergleich der Stärke der Pfadabhängigkeit verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Einheit Skala	Wert	Einstufung (farblich)
5	Grad der prospektiven Pfadabhängigkeit	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 1		
			Technologie 2		
			Technologie ...		

3.6 Kriterium 6: Risiken für die Minderung der THG-Emissionen

Tabelle 31: Überblick zu Kriterium 6: Risiken für die Minderung der THG-Emissionen

Fragestellung	Kurzbeschreibung			
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/>	Ökonomie <input type="checkbox"/>	Umwelt <input checked="" type="checkbox"/>	Systemaspekte <input checked="" type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Die Risiken betreffen die rohstoffliche und die energetische Möglichkeit der Umsetzung der Technologie für eine gesamte Volkswirtschaft.			
Ziel des Kriteriums	Einstufung der Stärke möglicher zukünftiger Risiken für die Minderung der THG-Emissionen einer eingesetzten Technologie, die die Versorgung mit Rohstoffen und regenerativer Energie bei breiter Diffusion betreffen.			
Kurzbeschreibung des Optimums	Das Optimum ist eine Technologie, die zukünftig keine oder nur sehr geringe Risiken für die Minderung der THG-Emissionen aufweist.			
Art des Kriteriums	Quantitativ <input type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>		
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>		
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>		

Fragestellung		Kurzbeschreibung	
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung
	6: Grad der zukünftigen Risiken	1 (keine) – 6 (viele/sehr hohe)	Minimum
Bewertungsebene	Ebene 1 <input type="checkbox"/>	Ebene 2 <input checked="" type="checkbox"/>	
Vorgehen	Beschreibung möglicher Engpässe bei Rohstoffen und Energieträgern und ihrer jeweiligen Stärke und Zusammenfassung zu einer Gesamtbewertung.		

Bedeutung des Kriteriums

Technische Verfahren in der Industrie können den Einsatz erheblicher Rohstoff- und Energiemengen erfordern. Dabei besteht die Gefahr, dass die rohstoffliche und energetische Basis zum Einsatzzeitpunkt weder in Deutschland noch im Ausland zur Verfügung steht. Zudem können besonders knappe Rohstoffe beansprucht werden, die nur in sehr relativ kleinen Mengen förderbar sind und deren geringe Reserven einen besonders sparsamen Einsatz erfordern.

Beschreibung des Kriteriums

Mithilfe dieses Kriteriums wird qualitativ untersucht, inwieweit beim marktbreiten Einsatz der betrachteten Technologie die rohstofflichen und energetischen Anforderungen erfüllt werden können.

Zu verwendende Indikator(en)

Als Indikator wird der Grad der zukünftigen Risiken für die Minderung der THG-Emissionen für den Fall einer marktbreiten Einführung abgeschätzt. Hinweise zu Risiken ergeben sich aus folgenden Fragestellungen:

- ▶ Falls im *Kriterium 2: Energieeffizienz* für die Einführung einer Technologie im Verhältnis zur Stromerzeugung (Indikator 2.1) große Mengen regenerativ erzeugte Energien (Indikator 2.2) ermittelt wurden, wie groß ist dann das Risiko, diese möglicherweise nicht bereitstellen zu können?
- ▶ Sind für die Einführung im Verhältnis zu den Produktionsmöglichkeiten große Mengen Biomasse erforderlich und wie groß ist das Risiko, diese möglicherweise nicht bereitstellen zu können?
- ▶ Falls im *Sub-Indikator 9.1c: Verwendung kritischer Rohstoffe* bestimmte kritische Rohstoffe ermittelt wurden, wie groß ist dann das Risiko diese möglicherweise nicht bereitstellen zu können?

Vorgehen

Die Einstufung der Stärke der Risiken erfolgt auf einer Skala von 1 – 6 im Sinne einer Schulnote. Der Bewerter/die Bewerterin sollte zunächst mögliche rohstoffliche und energetische Risiken ermitteln und jeweils einzeln auf der Skala einordnen und in der folgenden Tabelle eintragen. Anschließend erfolgt eine Zusammenschau aller Teilwerte und die Festlegung eines Gesamtwertes für die Technologie. Diese Zeile wird schließlich fett markiert.

Für die Bewertung werden geringe oder keine Risiken angestrebt, d. h. im Vergleich mehrerer Technologien sollte der Wert so weit wie möglich minimiert werden.

Bei der Bewertung wird nicht nach unterschiedlichen Zeiträumen unterschieden, da sich i. d. R. keine Veränderung ergeben dürfte.

Die Daten werden für die Bewertungsebene 2 erhoben, beziehen also das Unternehmen mitsamt seiner Umwelt mit ein.

Tabelle 32: Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der Risiken für die Minderung der THG-Emissionen durch die betrachtete Technologie

Indikator	Bezug	Skala	Stärke der Risiken	Begründung für die Auswahl in Stichworten
6 Grad der zukünftigen Risiken	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	1	Keine	
		2	Nahezu keine	
		3	Geringe	
		4	Mittlere	
		5	Hohe	
		6	Sehr hohe	

Beispiele

Bei der Primärproduktion von Rohstahl dient Koks kohle in der Hochofenroute dazu, Eisenerz in Rohstahl umzuwandeln, d. h. die chemische Bindung des Sauerstoffs im Eisenerz an das Eisen aufzubrechen und dieses zu schmelzen. Bei den alternativen Verfahren der elektrolytischen Direktreduktion oder der Reduktion mit Wasserstoff sind im industriellen Maßstab erhebliche Strommengen erforderlich, die für eine wirksame Dekarbonisierung regenerativ erzeugt werden müssen.

Ähnlich verhält es sich bei dekarbonisierten industriellen Produktionstechniken, deren Nutzung zwingend den Einsatz von Biomasse erfordern. Der Einsatz von Biomasse als regenerativem Energieträger ist in Ermangelung anderweitiger mit relativ geringem Zeitbedarf umsetzbarer Dekarbonisierungs-Technologien in vielen Sektoren und Branchen beliebt. Allerdings kann die nachhaltige Erzeugung von Biomasse bei weitem nicht mit den Mengenanforderungen mithalten, die ein über viele Sektoren verbreiteter Einsatz erfordern würde. Auch unterhalb solcher Mengenbeschränkungen können insbesondere bei importierter Biomasse Erzeugungssysteme gefördert werden, die von einer nachhaltigen Nutzung weit entfernt sind oder die wie etwa im Falle von Palmöl aufgrund der Landnutzungsänderungen kontraproduktive Klimawirkungen nach sich ziehen.

Schließlich könnte eine dekarbonisierte industrielle Produktionstechnik vor allem bei speziellen Rohstoffen wie etwa der Gruppe der seltenen Erden die rohstoffliche Basis überstrapazieren.

Querbezüge zu anderen Kriterien

Kriterium 2: Energieeffizienz (Indikatoren 2.1 und 2.2)

Kriterium 9: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft (Sub-Indikator 9.1c)

Datenquellen

Die Bewertung dieses Kriteriums hängt von der technischen Entwicklung einerseits, der Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe und der Nachfrage anderer Branchen und Sektoren hinsichtlich deren Nutzung ab. Neueste technische Verfahren können die Einsatzmengen

kritischer Rohstoffe einer betrachteten Technologie, aber auch die anderer Technologien mindern. Zudem kann die Bereitstellung durch neue Lagerstätten und technische Verfahren der Gewinnung sowie des Recyclings effizienter werden. Daher sind immer aktuelle Studien hinsichtlich Bedarfs und Verfügbarkeit von Rohstoffen hinzuziehen.

Bezüglich des Einsatzes kritischer mineralischer Rohstoffe sind neben anderen Studien zur jeweiligen Technologie und den verwendeten Rohstoffen insbesondere die Marktbeobachtungen und Analysen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) relevant.

3.6.1 Vergleich aller Technologien aus einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die Indikatorwerte der einzelnen Technologien in die folgende Tabelle eingetragen. Gleichzeitig werden die Werte aller Technologien pro Bewertungsebene gegenübergestellt, indem ihnen wie in Kapitel 2.3.2.3 beschrieben in der letzten Spalte eine Farbe zugeordnet wird.

Tabelle 33: Vergleich der Stärke der Risiken für die Minderung der THG-Emissionen verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator	Bezug	Einheit Skala	Wert	Einstufung (farblich)
6 Grad der zukünftigen Risiken	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 1		
		Technologie 2		
		Technologie ...		

3.7 Kriterium 7: Regionale Abhängigkeiten

3.7.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 34: Überblick zu Kriterium 7: Regionale Abhängigkeiten

Fragestellung	Kurzbeschreibung
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/> Ökonomie <input type="checkbox"/> Umwelt <input type="checkbox"/> Systemaspekte <input checked="" type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Die Risiken betreffen regionale Abhängigkeiten durch die Umsetzung der Technologie für eine gesamte Volkswirtschaft.
Ziel des Kriteriums	Einstufung der Stärke möglicher zukünftig von einer eingesetzten Technologie bewirkter regionaler Abhängigkeiten, die die Versorgung mit Rohstoffen und regenerativer Energie bei breiter Diffusion betreffen.
Kurzbeschreibung des Optimums	Das Optimum ist eine Technologie, die zukünftig keine oder nur sehr geringe regionale Abhängigkeiten zur Folge hat.
Art des Kriteriums	Quantitativ <input type="checkbox"/> Semi-quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/>

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung
	7: Grad der regionalen Abhängigkeiten	1 (keine) – 6 (sehr hoch)	Minimum
Bewertungsebene	Ebene 1 <input type="checkbox"/>	Ebene 2 <input checked="" type="checkbox"/>	
Vorgehen	Beschreibung möglicher regionaler Abhängigkeiten bei Rohstoffen und Energieträgern und ihrer jeweiligen Stärke und Zusammenfassung zu einer Gesamtbewertung.		

Bedeutung des Kriteriums

Die erfolgreiche Einführung bestimmter Produktionstechniken kann in erheblichem Umfang von regionalen Gegebenheiten abhängen sowie mit der Entstehung regionaler Abhängigkeiten einhergehen. Insbesondere gilt dies für die Verfügbarkeit regenerativ erzeugter und THG-neutraler Energieträger wie auch für die Versorgung mit speziellen Rohstoffen. Schließlich können disruptive Ereignisse die Logistik solcher internationaler Wertschöpfungsketten unterbrechen und so die dekarbonisierte Produktion zumindest temporär stilllegen. Besonders schwierig sind regionale Abhängigkeiten dieser Art im Zusammenhang mit politischer Instabilität der Lieferstaaten sowie einer hohen Vulnerabilität der Lieferketten.

Beschreibung des Kriteriums

Mithilfe dieses Kriteriums wird qualitativ untersucht, inwieweit beim marktbreiten Einsatz der betrachteten Technologie deren rohstoffliche und energetische Anforderungen regionale Abhängigkeiten etablieren können. Dies ist wichtig, damit die Energie- und Industriewende möglichst keine einseitigen regionalen Abhängigkeiten erzeugt.

Zu verwendende Indikator(en)

Als Indikator wird der Grad der regionalen Abhängigkeiten für den Fall einer marktbreiten Einführung abgeschätzt. Hinweise hierzu ergeben sich aus folgenden Fragestellungen:

- ▶ Falls in den Indikatoren 2.2 und Sub-Indikator 9.1c große Mengen an zu importierenden Energieträgern und Rohstoffen ermittelt wurden, konzentrieren sich die Vorkommen und Importe auf wenige Länder in politisch instabilen Regionen?
- ▶ Sind die Lieferketten der importierten Vorleistungsgüter besonders verletzlich?

Vorgehen

Die Einstufung der Stärke der regionalen Abhängigkeiten erfolgt auf einer Skala von 1 – 6 im Sinne einer Schulnote. Der Bewerter/die Bewerterin sollte zunächst mögliche rohstoffliche und energetische sowie logistische Abhängigkeiten ermitteln und jeweils einzeln auf der Skala einordnen und in der folgenden Tabelle eintragen. Anschließend erfolgt eine Zusammenschau aller Teilwerte und die Festlegung eines Gesamtwertes für die Technologie. Diese Zeile wird schließlich fett markiert.

Für die Bewertung werden geringe oder keine regionalen Abhängigkeiten angestrebt, d. h. im Vergleich mehrerer Technologien sollte der Wert so weit wie möglich minimiert werden.

Bei der Bewertung wird nicht nach unterschiedlichen Zeiträumen unterschieden, da sich i. d. R. keine vorhersehbare Veränderung ergeben dürfte.

Die Daten werden für die Bewertungsebene 2 erhoben, beziehen also das Unternehmen mitsamt seiner Umwelt mit ein.

Tabelle 35: Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der möglichen regionalen Abhängigkeiten durch die betrachtete Technologie

Indikator	Bezug	Skala	Stärke der Abhängigkeiten	Begründung für die Auswahl in Stichworten	
7	Grad der regionalen Abhängigkeiten (Unternehmen plus Umwelt)	Bewertungsebene 2	1	Keine	
			2	Nahezu keine	
			3	Geringe	
			4	Mittlere	
			5	Hohe	
			6	Sehr hohe	

Beispiele

Das gegenwärtige System der Versorgung mit fossilen Energieträgern konstituiert eine Vielzahl von regionalen Abhängigkeiten, denen nur begrenzt mittels diversifizierter Importstrukturen begegnet werden kann.

So existiert etwa bei der Versorgung mit Rohöl nach wie vor eine relativ hohe Abhängigkeit von der teilweise politisch instabilen Region des Nahen Ostens. Auf dem zu weiten Teilen nach wie vor kontinentalen europäischen Erdgasmarkt dominieren wenige Anbieter.

Die gegenwärtige Förderung von Elementen der seltenen Erden konzentriert sich teilweise in politisch besonders instabilen Staaten Afrikas, womit Importe zur Finanzierung regionaler Konflikte und despotischer Regime beitragen.

Querbezüge zu anderen Kriterien

Kriterium 2: Energieeffizienz (Indikatoren 2.1 und 2.2)

Kriterium 6: Risiken für die Minderung der THG-Emissionen

Kriterium 9: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft (Sub-Indikator 9.1c)

Datenquellen

Bezüglich der Abhängigkeiten von kritischen mineralischen Rohstoffen sind neben anderen Studien insbesondere die Marktbeobachtungen und Analysen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)⁹ sowie der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) relevant.

⁹ Siehe dazu: www.bgr.bund.de/DERA/DE/Themenfeld_Mineralische_Rohstoffe_BGR/miro_node.html

3.7.2 Vergleich aller Technologien aus einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die Indikatorwerte der einzelnen Technologien in die folgende Tabelle eingetragen. Gleichzeitig werden die Werte aller Technologien pro Bewertungsebene gegenübergestellt, indem ihnen wie in Kapitel 2.3.2.3 beschrieben in der letzten Spalte eine Farbe zugeordnet wird.

Tabelle 36: Vergleich der Stärke der möglichen regionalen Abhängigkeiten durch verschiedene Technologien einer Gruppe

Indikator	Bezug	Einheit Skala	Wert	Einstufung (farblich)
7 Grad der regionalen Abhängigkeiten	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 1		
		Technologie 2		
		Technologie ...		

3.8 Kriterium 8: Notwendige Rahmenbedingungen

3.8.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 37: Überblick zu Kriterium 8: Notwendige Rahmenbedingungen

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/>	Ökonomie <input type="checkbox"/>	Umwelt <input type="checkbox"/> Systemaspekte <input checked="" type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Die Risiken betreffen notwendige Rahmenbedingungen für die Umsetzung der Technologie in einer gesamten Volkswirtschaft.		
Ziel des Kriteriums	Einstufung der Vielzahl und Bedeutung für die eingesetzte Technologie erforderlicher Rahmenbedingungen bei marktbreiter Diffusion.		
Kurzbeschreibung des Optimums	Das Optimum ist eine Technologie, die zukünftig keine oder nur sehr wenige Rahmenbedingungen erfordert.		
Art des Kriteriums	Quantitativ <input type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung
	8: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen	1 (keine) – 6 (sehr viele)	Minimum
Bewertungsebene	Ebene 1 <input type="checkbox"/>	Ebene 2 <input checked="" type="checkbox"/>	

Fragestellung	Kurzbeschreibung
Vorgehen	Beschreibung erforderlicher Rahmenbedingungen für die Einführung einer Technologie.

Bedeutung des Kriteriums

Bei diesem Kriterium geht es darum, in welchem Maße bestimmte Rahmenbedingungen erfüllt sein müssen, damit eine Prozesstechnik in der Industrie zum Klimaschutz beitragen kann. Ist eine Vielzahl von spezifischen Rahmenbedingungen notwendig, deren jeweilige Umsetzung gegenwärtig nicht gegeben und aus heutiger Sicht als unsicher einzustufen ist, so stellt dies eine Einschränkung der Umsetzbarkeit dieser Prozesstechnik dar.

Beschreibung des Kriteriums

Mithilfe dieses Kriteriums wird qualitativ untersucht, inwieweit für einen marktbreiten Einsatz der betrachteten Technologie regulatorische Rahmenbedingungen erforderlich sind. Dies ist wichtig, damit keine Technologien eingeführt werden, bei denen erforderliche Rahmenbedingungen nicht umsetzbar sind. Zudem geht es darum zu erkennen, in welchen Fällen die simultane Entwicklung der Technologie und der dafür notwendigen regulatorischen Rahmenbedingungen für die erfolgreiche Einführung von entscheidender Bedeutung ist.

Zu verwendende Indikator(en)

Als Indikator wird der Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen für den Fall einer marktbreiten Einführung eingeschätzt:

- ▶ Werden für die Einführung begleitende regulative Rahmenbedingungen benötigt?
- ▶ Handelt es sich um eine Vielzahl von regulativen Rahmenbedingungen?
- ▶ Ist die politische oder wirtschaftliche Umsetzung dieser Rahmenbedingungen in hohem Maße unsicher? Insbesondere wenn nur eine oder wenige Bedingungen identifiziert werden – sind diese evtl. besonders schwierig umzusetzen?

Vorgehen

Die Einstufung der Bedeutung der notwendigen Rahmenbedingungen erfolgt auf einer Skala von 1 – 6 im Sinne einer Schulnote. Der Bewerter/die Bewerterin sollte zunächst notwendige Rahmenbedingungen ermitteln und jeweils einzeln auf der Skala einordnen und in der folgenden Tabelle eintragen. Anschließend erfolgt eine Zusammenschau aller Teilwerte und die Festlegung eines Gesamtwertes für die Technologie. Diese Zeile wird schließlich fett markiert.

Für die Bewertung werden wenige oder keine notwendigen Rahmenbedingungen angestrebt, d. h. im Vergleich mehrerer Technologien sollte der Wert so weit wie möglich minimiert werden.

Bei der Bewertung wird nicht nach unterschiedlichen Zeiträumen unterschieden, da sich i. d. R. keine vorhersehbare Veränderung ergeben dürfte.

Die Daten werden für die Bewertungsebene 2 erhoben, beziehen also das Unternehmen mitsamt seiner Umwelt mit ein.

Tabelle 38: Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der möglichen notwendigen Rahmenbedingungen für die betrachtete Technologie

Indikator	Bezug	Skala	Anzahl der notwendigen Rahmenbedingungen	Begründung für die Auswahl in Stichworten	
8	Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen (Unternehmen plus Umwelt)	Bewertungsebene 2	1	Keine	
			2	Wenige, einfach zu implementieren	
			3	Viele, einfach zu implementieren	
			4	Wenige, aber ggf. schwierig umzusetzen	
			5	Viele, zudem teilweise schwierig umzusetzen	
			6	Sehr viele und viele schwierig umzusetzen	

Beispiele

Im Falle vieler Technologien ist die Erlangung der Marktreife nur mittels staatlicher Förderung zu erreichen, weil der Markt für die Entwicklung bis zur Diffusion keine ausreichenden Anreize setzt. Dies ist ein Feld der Technologiepolitik und Forschungsförderung.

Typisch für die Einführung neuer Technologien ist zudem, dass hierfür der Bestand technischer Normen ausreichend sein muss. In vielen Fällen ergeben sich neue Normierungsanforderungen, die für die effiziente und sichere Nutzung der Technologie unverzichtbar sind.

Jenseits der Normungstätigkeit können durch eine neue Technologie Belange berührt sein, die nur mit gesetzgeberischen Mitteln angemessen berücksichtigt werden können. So ist die Verfolgung von Belangen des Klimaschutzes vor allem in einer Frühphase der Diffusion einer Technologie nur mittels finanzieller Anreize möglich, da die Technologie gegenüber konventionellen Verfahren wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig ist. Hierzu können Grenzausgleichsabgaben auf konventionell hergestellte importierte Produkte sowie Anpassungen im Emissionshandel angezeigt sein.

Ggf. würde als Mittel der Wahl ein CO₂-Preis von 300 Euro/t CO₂ identifiziert werden. Solch eine Maßnahme wäre aber nicht einfach, zumindest nicht kurz- und mittelfristig umzusetzen. In diesem Fall müsste statt einer 1 mit einer 4 bewertet werden („Wenige, aber ggf. schwierig umzusetzen“).

Querbezüge zu anderen Kriterien

Entfällt.

Datenquellen

Systematische Zusammenstellungen von förderlichen klima- und energiepolitischen Rahmenbedingungen und politischen Instrumenten für die Industrie sind von Gupta et al. (2008) sowie in Fleiter et al. (2013) zusammengestellt und analysiert worden.

Aktuelle Einschätzungen zu notwendigen Rahmenbedingungen können zudem aus relevanten Technikfolgenabschätzungen bezogen werden. Diese werden u. a. vom Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)¹⁰ und dem Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)¹¹ erstellt.

3.8.2 Vergleich aller Technologien aus einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die Indikatorwerte der einzelnen Technologien in die folgende Tabelle eingetragen. Gleichzeitig werden die Werte aller Technologien pro Bewertungsebene gegenübergestellt, indem ihnen wie in Kapitel 2.3.2.3 beschrieben in der letzten Spalte eine Farbe zugeordnet wird.

Tabelle 39: Vergleich der Bedeutung der notwendigen Rahmenbedingungen für verschiedene Technologien einer Gruppe

Indikator	Bezug	Einheit Skala	Wert	Einstufung (farblich)
8 Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 1		
		Technologie 2		
		Technologie ...		

3.9 Kriterium 9: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft

3.9.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 40: Überblick zu Kriterium Nr. 9: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft

Fragestellung	Kurzbeschreibung
Kategorie	Technologie <input checked="" type="checkbox"/> Ökonomie <input type="checkbox"/> Umwelt <input type="checkbox"/> Systemaspekte <input type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Das Kriterium hinterfragt, wie positiv oder negativ sich die betrachtete Technologie im Hinblick auf die Veränderung von Stoffströmen verhält und ob bzw. wie sie dazu beiträgt, Kreislaufwirtschaftsaspekte zu fördern.
Ziel des Kriteriums	Mit dem Kriterium wird einerseits bewertet, ob der Wechsel der Technologien zu möglichen Problemen beim Einsatz von Stoffen für andere Technologien führt und ob die eingesetzten Stoffe selber problematisch sind. Andererseits wird abgeschätzt, wie ressourcenschonend und abfallvermeidend die Technologien sind.
Kurzbeschreibung des Optimums	Hinsichtlich der Veränderung von <i>Stoffströmen</i> hat der Prozess keinerlei positive wie negative Rückwirkungen auf Technologien in anderen Sektoren und erfordert insbesondere keinen Einsatz kritischer Rohstoffe. Hinsichtlich von Aspekten der <i>Kreislaufwirtschaft</i> verursacht der Prozess den geringsten Abfallanfall und ermöglicht den höchsten Einsatz von Sekundärrohstoffen und die höchste End-of-Life-Recyclingquote.

¹⁰ www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung/technikfolgenabschaetzung

¹¹ www.itas.kit.edu

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
Art des Kriteriums	Quantitativ <input type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung
	9.1: Veränderung von Stoffströmen		
	9.1a: Intersektorale Rückwirkungen	1 – 6 (unterschiedliche Bedeutungen, siehe Text)	Minimum
	9.1b: Einsatz gefährlicher und umweltschädlicher Stoffe		
	9.1c: Verwendung kritischer Rohstoffe		
	9.2: Grad Kreislaufwirtschaft		
	9.2a: Sektorale Abfallintensität	1 – 6 (unterschiedliche Bedeutungen, siehe Text)	Minimum
	9.2b: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen		
	9.2c: EOL-RQ		
Bewertungsebene	Ebene 1 <input type="checkbox"/>	Ebene 2 <input checked="" type="checkbox"/>	
Vorgehen	Literaturrecherche, eigenes Expertenwissen, ggf. Experteninterview; für Sub-Indikator 6.1a siehe die dort genannten Maßnahmen		

Bedeutung des Kriteriums

Die Bewertung von *Stoffströmen* ist bei neuen Anlagen oder Prozessen der Grundstoffindustrie relevant, weil einerseits bestehende Prozesse aufgebrochen werden, die über Jahre hinsichtlich eines idealen Einsatzes von Materialien optimiert wurden. So können neue Prozesse in einem Sektor zu möglichen Problemen in einem anderen Sektor führen. Ein Beispiel ist, wenn der Hüttsand, der bisher als Abfallprodukt der Stahlindustrie an die Zementwerke geliefert wurde, aufgrund neuer Stahlverfahren nicht mehr zur Verfügung steht. Andererseits könnten vermehrt kritische Rohstoffe benötigt werden, wenn neue Werkstoffe und Materialien zum Einsatz kommen.

Fragen der *Kreislaufwirtschaft* sind eng mit den Stoffströmen verknüpft, allerdings geht es hier weniger um intersektorale Verknüpfungen als z. B. um den vermehrten Einsatz von Sekundärmaterialien, mit dem indirekt Einsparungen beim Energieverbrauch, den THG-Emissionen und den Kosten (Kriterien 2-4) verbunden sind. Fragen des Recyclings sind insbesondere relevant, wenn die obige Bewertung von Stoffströmen die Verwendung kritischer Rohstoffe ergeben hat, deren Einsatz mittelfristig durch den Aufbau von Recyclingsystemen vermindert werden könnte.

Beschreibung des Kriteriums

Im Teilbereich der *Stoffströme* wird bewertet, ob ein Wechsel der Technologie zu möglichen Problemen beim Einsatz von Stoffen für andere Technologien führt, ob die Menge und Zusammensetzung der benötigten Einsatzstoffe problematisch sind und ob bei der Herstellung der Technologien insbesondere kritische Rohstoffe zum Einsatz kommen.

Im Teilbereich der *Kreislaufwirtschaft* werden die betrachteten Technologien darauf hin bewertet, wie hoch ihre entstehenden prozessbedingten Abfälle sind, wieviel der eingesetzten Ressourcen aus Sekundärrohstoffen bestehen und damit Ressourcen in der Primärproduktion einsparen und in welcher Höhe bestimmte eingesetzte Rohstoffe rezykliert werden können.

Zu verwendende Indikator(en)

Bei diesem Kriterium werden zwei Indikatoren betrachtet, die jeweils drei Sub-Indikatoren umfassen:

Indikator 9.1: Veränderungen von Stoffströmen

► Sub-Indikator 9.1a: Intersektorale Rückwirkungen

Dieser Sub-Indikator erfasst mögliche Auswirkungen einer Maßnahme oder Technik in Bezug auf ausgelöste Stoffstromveränderungen bei externen Prozessen. Beispiele sind eine fehlende oder reduzierte Verfügbarkeit von Hüttensand für die Zementindustrie bei einer Dekarbonisierung der Stahlindustrie oder die Notwendigkeit einer anderweitigen Abfallentsorgung bei Wegfall oder Reduktion des Einsatzes sogenannter alternative Brennstoffe in der Zementindustrie.

Die Bewertung der jeweiligen Technologie erfolgt mit folgenden Schulnoten:

- 1 Keine Rückwirkungen/Veränderungen durch den neuen Prozess
- 2 Geringe Rückwirkungen, die keine Probleme aufwerfen
- 3 Geringe Rückwirkungen, aber Handlungsbedarf
- 4 Relevante Rückwirkungen, die mit überschaubarem Aufwand gelöst werden können
- 5 Starke Rückwirkungen, die einen hohen Aufwand für eine Umorganisation bedeuten
- 6 Starke Rückwirkungen mit Nachteilen für eine andere Branche

► Sub-Indikator 9.1b: Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen

Der Sub-Indikator bewertet, ob eine bestimmte Maßnahme bzw. Technik in relevantem Ausmaß positive oder negative Veränderungen in Hinblick auf Menge und Zusammensetzung der benötigten *Einsatz- /Betriebsstoffe* auslösen (u. a. bezüglich ggf. zusätzlich benötigter Chemikalien).

Die Bewertung der jeweiligen Technologie erfolgt mit folgenden Schulnoten:

- 1 Positive Veränderung durch den neuen Prozess (gefährliche Einsatzstoffe fallen weg)
- 2 Geringe positive Veränderung durch den neuen Prozess (....)
- 3 Keine Veränderung durch den neuen Prozess
- 4 Geringe negative Veränderung durch den neuen Prozess (wenige problematische Einsatzstoffe)
- 5 Negative Veränderung durch den neuen Prozess (viele problematische Einsatzstoffe)

- 6 Sehr negative Veränderung durch den neuen Prozess (Einsatz von Stoffen, die nicht akzeptierbar sind)

► **Sub-Indikator 9.1c: Verwendung kritischer Rohstoffe**

Mit diesem Sub-Indikator wird ermittelt, ob die zu bewertende Technologie kritische Rohstoffe (z. B. Metalle der seltenen Erden) in relevanten Mengen benötigt. Dieser Indikator ist in Verbindung mit den später beschriebenen Indikatoren 9.2b und 9.2c zu sehen, denn die Nutzung von Sekundärmaterialien bzw. ein effizientes Recycling würde die Nutzung kritischer Rohstoffe relativieren. Zudem besteht eine Verknüpfung zu Kriterium 6 (Risiken) und Kriterium 7 (Regionale Abhängigkeiten) – falls hier kritische Rohstoffe angegeben werden, sollte dort das Risiko und mögliche Abhängigkeiten angegeben werden (dies ist jedoch nur möglich, falls Risiko und Abhängigkeiten bereits extern ermittelt wurden, da hierfür ansonsten eigene Studien notwendig wären).

Zur Kritikalität tragen in unterschiedlichem Maße folgende Faktoren bei:

- Mengenmäßige Verfügbarkeit (ausreichende Reserven/Ressourcen)
- Technische Verfügbarkeit (Minen)
- Ökologische Fragen des Bergbaus
- Abhängigkeit von Lieferländern

Eine weitergehende Recherche kann in dieser Studie nicht geleistet werden, daher wird nur die *Anzahl* der kritischen Stoffe ermittelt. Hierbei kann aus einer in der nachfolgenden Tabelle 41 bereitgestellten Liste ausgewählt werden. Die Bewertung der jeweiligen Technologie erfolgt dann mit den nachfolgend gezeigten Schulnoten.

Auch nur die Verwendung eines einzigen kritischen Rohstoffes kann jedoch ggf. je nach Menge zu negativen Folgen führen. Dies muss im Einzelfall bei der Gesamtbewertung einer Technologie berücksichtigt werden, indem anschließend ggf. eine Abschätzung des Bedarfs erfolgt. Entscheidend ist dabei insbesondere, ob die späteren Indikatoren 9.2b und 9.2c Handlungsbedarf aufzeigen.

- 1 Keine Verwendung kritischer Rohstoffe durch den neuen Prozess
- 2 Verwendung eines kritischen Rohstoffs ...
- 3 Verwendung von 2-3 kritischen Rohstoffen ...
- 4 Verwendung von 4-5 kritischen Rohstoffen ...
- 5 Verwendung von 6-7 kritischen Rohstoffen ...
- 6 Verwendung von mehr als 7 kritischen Rohstoffen ...

Indikator 9.2: Grad der Kreislaufwirtschaft**► Sub-Indikator 9.2a: Sektorale Abfallintensität**

Dieser Sub-Indikator zeigt auf, wie sich die Abfallintensität des jeweiligen Sektors durch die Anwendung der hier zu bewertenden Technologien im Zeitverlauf verändert. Die Abfallintensität wird u. a. vom Statistischen Bundesamt als Indikator für die Nachhaltigkeit der Abfall- bzw. Kreislaufwirtschaft und insbesondere für das im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) gesetzte Ziel einer Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Abfallaufkommen erhoben. Sie ist definiert als das Verhältnis des sektoralen Abfallaufkommens (in kg) zum Bruttoinlandsprodukt (BIP in 1.000 Euro) über die Zeit. Das Statistische Bundesamt spricht von einer „nachhaltigen Abfallwirtschaft“¹², wenn die Entwicklung des Abfallaufkommens deutlich hinter dem Wirtschaftswachstum zurückbleibt.

Die Bewertung der jeweiligen Technologie erfolgt mit folgenden Schulnoten:

- 1 Starke Abnahme der sektoralen Abfallintensität (-5 % oder mehr gegenüber dem Referenzjahr der Einführung der zu bewertenden Technologie)
- 2 Mittlere Abnahme (-2 % oder mehr gegenüber dem Referenzjahr der Einführung der zu bewertenden Technologie)
- 3 Keine Änderung bis geringe Abnahme (bis zu 2 % gegenüber dem Referenzjahr der Einführung der zu bewertenden Technologie)
- 4 Geringer Anstieg (bis zu 2 % Anstieg gegenüber dem Referenzjahr der Einführung der zu bewertenden Technologie)
- 5 Mittlerer Anstieg (bis zu 5 % gegenüber dem Referenzjahr der Einführung der zu bewertenden Technologie)
- 6 Starker Anstieg (5 % oder mehr gegenüber dem Referenzjahr der Einführung der zu bewertenden Technologie)

► Sub-Indikator 9.2b: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen

Dieser Sub-Indikator zeigt auf, wie die hier zu bewertende Technologie durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen zur Ressourcenschonung beiträgt. Er kann erfasst werden anhand der Indikatoren DERec und DIERec. *DERec (Direct Effect of Recovery)* und *DIERec (Direct and Indirect Effects of Recovery)* sind die im Rahmen von ProgRes III verwendeten Indikatoren, die abbilden, in welchem Umfang auf volkswirtschaftlicher Ebene durch Kreislaufführung und Verwertung Primärrohstoffe geschont werden. Der DERec-Wert bildet die inländischen, direkten Schonungseffekte ab und korrespondiert somit mit dem volkswirtschaftlichen Materialflussindikator „Inländischer Materialeinsatz“ (DMI). Der DIERec-Wert bildet zusätzlich die globalen Auswirkungen auf die indirekten Rohstoffansprüche im Ausland ab und bezieht sich folglich auf den Indikator „Rohstoff-Input“ (RMI). Beide Indikatoren werden in Tonnen gemessen und stellen Nettosalde dar, welche die realen Verwertungs- und Rückführungsqualitäten von Sekundärrohstoffen zu Grunde legen. Es werden die materiellen Aufwendungen von Sekundärprozessrouten, d. h. für das Sammeln, Transportieren, Aufbereiten und Verwerten der Sekundärmaterialien erfasst und von den äquivalenten Aufwendungen der Primärprozesse subtrahiert. Berücksichtigt werden sowohl inländische Rohstoffentnahmen als auch solche für importierte Güter. Die Indikatoren basieren u. a. auf dem kumulierten

¹² Destatis 2020, Abfallbilanz 2018, S. 11. www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf

Rohstoffaufwand (KRA) und könnten somit auch für konkrete Vorketten und nachgelagerte Prozesse für einzelne Sektoren verwendet werden.

Die Bewertung der jeweiligen Technologie erfolgt mit folgenden Schulnoten, die sich auf quantifizierte Steigerung des umfassenderen Indikators DIERec beziehen (Referenzwert 2015: 476 Mio t)

- 1 Sehr hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 50 Mio. t oder mehr)
- 2 Hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 20 Mio. t oder mehr)
- 3 Hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 10 Mio. t oder mehr)
- 4 Niedrige Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 2 Mio. t oder mehr)
- 5 Sehr niedrige Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 1 Mio. t oder mehr)
- 6 Keine Ressourcenschonung

► **Sub-Indikator 9.2c: End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe (EOL-RQ)**

Dieser Sub-Indikator zeigt auf, zu welchen Anteilen in der Herstellung einzelner Produkte eingesetzte Rohstoffe wieder zurückgewonnen werden.

Die End-of-Life-Recyclingquote (EOL-RQ) für einzelne Materialien bezieht sich auf den Anteil spezifischer Materialien, der am Ende ihrer Nutzungsphase wieder zurückgewonnen wird und für einen weiteren Einsatz zur Verfügung steht. Die EOL-RQ unterscheidet sich damit von Recyclingquoten, wie sie z. B. im KrWG für einzelne Abfallströme vorgegeben sind: Hier wird in der Regel der Anteil an Abfällen erfasst, der bestimmten Verwertungsverfahren zugeführt wird (stoffliches Recycling, thermische Verwertung etc.). Die Qualität des Recyclingprozesses oder die tatsächlich zurückgewonnene Menge einzelner Materialien spielt aus dieser Perspektive keine Rolle – selbst bei Recyclingquoten von 100 % auf Ebene eines Produktes können bestimmte Stoffe überhaupt nicht zurückgewonnen werden, die EOL-RQ wären dementsprechend 0 %.

Die Bewertung der jeweiligen Technologie erfolgt mit folgenden Schulnoten. Alternativ könnte eine Quantifizierung durch eine Auswahl einzelner Rohstoffe erfolgen, z. B. mit Blick auf die o. g. kritischen Rohstoffe:

- 1 Sehr hohe EOL-Recyclingquote
- 2 Hohe EOL-Recyclingquote
- 3 Ausreichende EOL-Recyclingquote
- 4 Niedrige EOL-Recyclingquote
- 5 Sehr niedrige EOL-Recyclingquote
- 6 Nicht akzeptable EOL-Recyclingquote

Vorgehen

Bei der Bewertung wird nicht nach unterschiedlichen Zeiträumen unterschieden, da sich i. d. R. keine Veränderung ergeben dürfte.

Bei beiden Indikatoren wird die „Bewertungsebene 2“ verwendet, da es bei diesen Indikatoren nicht nur um die Situation vor Ort im Betrieb geht.

Zur Ermittlung der einzelnen Sub-Indikatoren ist wie folgt vorzugehen:

Indikator 9.1: Veränderungen von Stoffströmen

► **Sub-Indikator 9.1a: Intersektorale Rückwirkungen**

Literaturanalyse, eigenes Expertenwissen

► **Sub-Indikator 9.1b: Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen**

Literaturanalyse, eigenes Expertenwissen

► **Sub-Indikator 9.1c: Verwendung kritischer Rohstoffe**

Literaturanalyse, eigenes Expertenwissen

Die Bewertungsbasis bildet die Übersicht derjenigen Rohstoffe, die von der EU als allgemein versorgungskritisch angesehen werden (Europäische Kommission 2017). Eine Übersicht zeigt Tabelle 41.

Tabelle 41: Übersicht kritischer Rohstoffe

Antimon	Baryt	Beryllium	Bismut	Borat	Cer
Dysprosium	Erbium	Europium	Flussspat	Gadolinium	Gallium
Germanium	Hafnium	Helium	Holmium	Indium	Iridium
Kobalt	Kokskohle	Lanthan	Lutetium	Magnesium	Naturkautschuk
Natürlicher Grafit	Neodym	Niob	Palladium	Phosphor	Phosphorit
Platin	Praseodym	Rhodium	Ruthenium	Samarium	Scandium
Siliciummetall	Tantal	Terbium	Thulium	Vanadium	Wolfram
Ytterbium	Yttrium				

Quelle: Europäische Kommission (2017)

Indikator 9.2: Grad der Kreislaufwirtschaft

► Sub-Indikator 9.2a: Sektorale Abfallintensität

Zur Berechnung der sektoralen Abfallintensität (kg/1.000 Euro) wird in der Regel neben dem gesamten (inländischen) Abfallaufkommen die Wirtschaftsleistung in seiner preisbereinigten Version berücksichtigt, damit im längeren Zeitvergleich Preiseffekte eliminiert sind.

Für die hier betrachteten sektoralen Abfallintensitäten werden die in der Abfallbilanz des Statistischen Bundesamtes aufgeführten Abfallaufkommen auf das reale BIP der Gesamtwirtschaft bezogen.

► Sub-Indikator 9.2b: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen (DERec und DIERec)

Für die Beiträge zur Ressourcenschonung anhand der Indikatoren DERec (Direct Effect of Recovery) und DIERec (Direct and Indirect Effects of Recovery) kann auf ein im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickeltes Mengengerüst zurückgegriffen werden¹³. Bei Veränderungen gegenüber dem dort dargestellten Referenzjahr 2013, z. B. mit Blick auf eingesetzte Technologien und der Effizienzen, müssen neben der Auswertung der oben genannten abfallwirtschaftlichen Statistiken weitere Literaturanalysen und ggf. ergänzende Expertenbefragungen durchgeführt werden.

► Sub-Indikator 9.2c: End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe (EOL-RQ)

Das Vorgehen zur Ermittlung der EOL-RQ wurde u. a. vom Umweltbundesamt detailliert beschrieben. Für die notwendigen Daten insbesondere zur Menge der eingesetzten Rohstoffe kann auf LCA-Datenbanken wie ecoinvent oder ProBas zurückgegriffen werden, darüber hinaus sind weitere Literaturanalysen und ggf. ergänzende Expertenbefragungen notwendig. Die Auswahl der zu betrachtenden Metalle kann sich z. B. an der Liste kritischer Rohstoffe orientieren oder an den quantifizierten Beiträgen zum Ressourcenschutz aus Sub-Indikator 9.2b.

¹³ www.umweltbundesamt.de/publikationen/stoffstromorientierte-ermittlung-des-beitrags-der

Die Werte der Sub-Indikatoren werden dann in folgender Tabelle eingetragen:

Tabelle 42: Skala für die semi-quantitative Bewertung der Veränderung von Stoffströmen und den Grad der Kreislaufwirtschaft, die bei der betrachteten Technologie erreicht werden

Indikator	Bezug	1	2	3	4	5	6
9.1	Veränderungen von Stoffströmen						
9.1a	Intersektorale Rückwirkungen	Bewertungsebene 2	<input type="checkbox"/>				
9.1b	Einsatz gefährlicher und umweltschädlicher Stoffe	(Unternehmen plus Umwelt)	<input type="checkbox"/>				
9.1c	Verwendung kritischer Rohstoffe		<input type="checkbox"/>				
9.2	Grad der Kreislaufwirtschaft						
9.2a	Sektorale Abfallintensität	Bewertungsebene 2	<input type="checkbox"/>				
9.2b	Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen	(Unternehmen plus Umwelt)	<input type="checkbox"/>				
9.2c	EOL-RQ		<input type="checkbox"/>				

Beispiel

Während die Sub-Indikatoren zu 9.1 selbsterklärend sind, müsste für die Sub-Indikatoren zu 9.2 zunächst ein Beispiel konstruiert werden. Da die Ermittlung der Indikatoren zudem recht aufwändig ist, wird auf ein Beispiel verzichtet und auf die Hinweise zum Vorgehen verwiesen.

Querbezüge zu anderen Kriterien

- ▶ Kriterium 2: Energieeffizienz
- ▶ Kriterium 3: THG-Effizienz
- ▶ Kriterium 4: Kosteneffizienz
- ▶ Kriterium 6: Risiken für die Minderung der THG-Emissionen
- ▶ Kriterium 7: Regionale Abhängigkeiten
- ▶ Kriterium 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen

Datenquellen

Die jeweiligen Datenquellen bzw. Berechnungsweisen wurden oben bereits bei jedem Sub-Indikator dargestellt.

3.9.2 Vergleich aller Technologien aus einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die ermittelten Indikatorwerte der einzelnen Technologien zunächst - wie in Kapitel 2.3.2.4 beschrieben - in der bereitgestellten excel-Datei eingetragen. Dort findet eine automatisierte Ermittlung der farblichen Einstufung statt, die in die folgende Tabelle übertragen wird.

Tabelle 43: Vergleich der Veränderung von Stoffströmen und des Grades der Kreislaufwirtschaft verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Einheit Skala	Einstufung (farblich)
9.1	Veränderungen von Stoffströmen	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 1	
			Technologie 2	
			Technologie ...	
9.2	Grad der Kreislaufwirtschaft	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 1	
			Technologie 2	
			Technologie ...	

3.10 Kriterium 10: Infrastrukturabhängigkeit

3.10.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 44: Überblick zu Kriterium 10: Infrastrukturabhängigkeit

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/> Ökonomie <input type="checkbox"/> Umwelt <input type="checkbox"/> Systemaspekte <input checked="" type="checkbox"/>		
Definition des Kriteriums	Das Kriterium Infrastrukturabhängigkeiten zeigt, was auf der Infrastrukturseite getan werden muss, um eine neue Technologie zu implementieren.		
Ziel des Kriteriums	Abschätzung des Aufwands und der Vorlaufzeiten für den Einsatz einer Technologie, die sich aus infrastrukturellen Abhängigkeiten ergeben.		
Kurzbeschreibung des Optimums	Das Optimum ist eine Technologie, die im Hinblick auf Infrastrukturabhängigkeit keine Aufwände erzeugt und mit der bestehenden Infrastruktur sofort einsetzbar ist.		
Art des Kriteriums	Quantitativ <input type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
	10.1: Leitungen für Elektrizität 10.2: Leitungen für Stofftransport 10.3: Sonstige Infrastruktur	1 (Kein Aufwand) – 6 (Sehr hoher Aufwand)	Minimum
Bewertungsebene	Ebene 1 <input type="checkbox"/>	Ebene 2 <input checked="" type="checkbox"/>	
Vorgehen	Beschreibung der infrastrukturellen Abhängigkeiten sowie Bewertung der Aufwände und Zusammenfassung zu einer Gesamtbewertung.		

Bedeutung des Kriteriums

Für die (tiefe) Dekarbonisierung der Grundstoffindustrien sind in vielen Bereichen Technologien relevant, für die bestehende Infrastrukturen ausgebaut oder neue geschaffen werden müssen. Die Verbreitung solcher Technologien ist daher besonders abhängig von der Infrastruktur.

Infrastrukturabhängigkeiten können dazu führen, dass die Verbreitung einer Technologie gehemmt oder gefördert wird. Wird sie gehemmt, kann die Abhängigkeit von der Infrastruktur zu Henne-Ei-Problemen führen, da im wirtschaftlichen und politischen Kontext oft nicht ganz klar ist, wie die Hindernisse beseitigt werden können. Sollen neue Technologien zuerst geplant (und teilweise gebaut) werden und erst dann die Infrastruktur? Oder sind ungeeignete oder fehlende Infrastrukturen ein so großes Hindernis für die Planung neuer Technologien, dass diese zuerst geschaffen werden müssen, um die Verbreitung neuer Technologien zu beschleunigen?

Es ist daher ratsam zu bewerten, was auf der Infrastrukturseite getan werden muss, um eine neue Technologie zu implementieren. Im besten Fall lassen sich daraus hemmende und fördernde Faktoren ableiten, die bei der Verbreitung der Technologie berücksichtigt werden müssen.

Beschreibung des Kriteriums

Das Kriterium Infrastrukturabhängigkeit beschreibt, in welchem Umfang und in welchem Ausmaß der Einsatz einer neuen Technologie von der Infrastruktur abhängig ist. Es soll festgestellt werden, ob die Technologie unabhängig von Änderungen an bestehenden Infrastrukturen eingesetzt werden kann oder ob bestehende Infrastrukturen ausgebaut oder neue geschaffen werden müssen. Es beschreibt somit infrastrukturbezogene Aufwände und die daraus möglicherweise resultierenden Zeitverzögerungen für den Einsatz der Technologie.

Zu verwendende Indikator(en)

Für die Bewertung werden Informationen über die infrastrukturellen Abhängigkeiten der betreffenden Technologie gesammelt. Dabei werden Indikatoren aus 3 Kategorien unterschieden:

- ▶ **Indikator 10.1: Leitungsnetze für Elektrizität** (Übertragungsnetze, Verteilnetze, ...)
- ▶ **Indikator 10.2: Leitungsnetze für Stofftransport** (Erdgas, Wasserstoff, CO₂, Methanol, ...)
- ▶ **Indikator 10.3: Sonstige Infrastruktur** (z. B. Logistik, Verkehrsinfrastruktur)

Vorgehen

Die Einstufung der Stärke der Infrastrukturabhängigkeit erfolgt auf einer Skala von 1 – 6 im Sinne einer Schulnote. Die Benotung erfolgt nach folgendem Muster:

- 1 *Kein* Aufwand, sofortige Nutzung möglich
(Z. B. wenn vorhandene Infrastruktur sofort genutzt werden kann)
- 2 *Geringer* Aufwand, keine sofortige Nutzung möglich
(Z. B. wenn vorhandene Infrastruktur genutzt werden kann, jedoch leicht angepasst werden muss)
- 3 *Mäßiger* Aufwand und Vorlaufzeiten
(Z. B. Umnutzung vorhandener Infrastrukturen machbar mit mäßigem zeitlichen Vorlauf, oder Neubau von Infrastrukturen mit mäßigem Aufwand und mäßigem Vorlauf)
- 4 *Mittlerer* Aufwand und Vorlaufzeiten
(Z. B. Umnutzung vorhandener Infrastrukturen machbar, aber mittlerer Vorlauf; oder Neubau von Infrastrukturen mit mittlerem Aufwand und mittlerem Vorlauf)
- 5 *Hoher* Aufwand und Vorlaufzeiten
(Z. B. Neubau von Infrastrukturen mit hohem Aufwand und hohen Vorlaufzeiten)
- 6 *Sehr Hoher* Aufwand und Vorlaufzeiten
(Z. B. Neubau von Infrastrukturen mit sehr hohem Aufwand und sehr hohen Vorlaufzeiten, z. B. wenn Bürgerbeteiligungen notwendig sind)

Der Bewertende sollte zunächst mögliche infrastrukturelle Abhängigkeiten ermitteln und jeweils einzeln auf der Skala einordnen und in der folgenden Tabelle eintragen.

Tabelle 45: Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der Infrastrukturabhängigkeiten der betrachteten Technologie

Indikator		Bezug	Aufwand und (zeitlicher Vorlauf) 1 2 3 4 5 6	Begründung für die Auswahl in Stichworten
10.1	Leitungsnetze für Elektrizität (Übertragungs- und Verteilnetze...)	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)		
10.2	Leitungsnetze für Stofftransport (Erdgas, Wasserstoff, CO ₂ , Methanol,...)	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)		

Indikator		Bezug	Aufwand und (zeitlicher Vorlauf) 1 2 3 4 5 6	Begründung für die Auswahl in Stichworten
10.3	Sonstige Infrastruktur (z. B. Verkehr, usw.)	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)		

Für die Bewertung werden geringe Aufwände angestrebt, d. h. im Vergleich mehrerer Technologien sollte der Wert so weit wie möglich minimiert werden.

Bei der Bewertung wird nicht nach unterschiedlichen Zeiträumen unterschieden, da sich i. d. R. keine vorhersehbare Veränderung ergeben dürfte.

Die Daten werden für die Bewertungsebene 2 erhoben, beziehen also das Unternehmen mitsamt seiner Umwelt mit ein.

Beispiele

In der Primärstahlproduktion ist derzeit die Hochofenroute mit Koks als Reduktionsmittel das dominierende Verfahren. Eine alternative Technologie für die Dekarbonisierung dieses Bereichs ist die Anwendung des Direktreduktionsverfahrens mit Wasserstoff als Reduktionsmittel. Hier könnte der Wasserstoff an den Stahlstandorten erzeugt werden. Dies würde jedoch im Vergleich zur heutigen Situation deutlich höhere Mengen und Leistungen für Elektrizität erfordern. Daraus folgt, dass die elektrische Infrastruktur für den Einsatz der Technologie angepasst werden muss. Dies wird z. B. anhand des Kriteriums „Infrastrukturabhängigkeiten“ untersucht und bewertet.

Querbezüge zu anderen Kriterien

Kriterium 5: Erzeugung von Pfadbahängigkeiten und Lock-in-Effekten

Datenquellen

Wissenschaftliche Literatur und relevante Studien insbesondere zu Szenarien, z. B. das Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (Langfristszenarien 3)“: www.langfristszenarien.de

3.10.2 Vergleich aller Technologien aus einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die ermittelten Indikatorwerte der einzelnen Technologien zunächst wie in Kapitel 2.3.2.4 beschrieben in der bereit gestellten Excel-Datei eingetragen. Dort findet eine automatisierte Ermittlung der farblichen Einstufung statt, die in die folgende Tabelle übertragen wird.

Tabelle 46: Vergleich der Stärke des Potenzials zur Verbesserung oder Verschlechterung von Infrastrukturabhängigkeiten verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Einheit Skala	Einstufung (farblich)
10	Infrastrukturabhängigkeiten	Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 1	
			Technologie 2	
			Technologie ...	

3.11 Kriterium 11: Anlagensicherheit

3.11.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 47: Überblick zu Kriterium Nr. 11: Anlagensicherheit

Fragestellung	Kurzbeschreibung			
Kategorie	Technologie <input checked="" type="checkbox"/>	Ökonomie <input type="checkbox"/>	Umwelt <input type="checkbox"/>	Systemaspekte <input type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Das Kriterium bewertet die stofflichen und prozessualen Sicherheitsrisiken einer Technologie.			
Ziel des Kriteriums	Einstufung des Potenzials zur Verbesserung oder Verschlechterung der stofflichen und prozessualen Sicherheitsrisiken einer eingesetzten Technologie.			
Kurzbeschreibung des Optimums	Das Optimum ist eine Technologie, die die stofflichen und prozessualen Sicherheitsrisiken signifikant verbessert.			
Art des Kriteriums	Quantitativ <input type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>		
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>		
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>		
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung	
	11.1: Stoffbezogene Indikatoren: Sicherheitsrisiken durch ...			
	11.1a: Humantoxizität	1 (keine) – 6 (sehr hoch)	Minimum	
	11.1b: Ökotoxizität			
	11.1c: Niedriger Flammpunkt			
	11.d: Bildung zündfähiger Stoffe			
	11.1e: Sonstige heftige Reaktionen			
	11.2: Prozessbezogene Indikatoren: Sicherheitsrisiken durch ...			
	11.2a: Hohe Temperaturen		Minimum	

Fragestellung	Kurzbeschreibung	
	11.2b: Hohe Drücke	1 (keine) – 6 (sehr hoch)
Bewertungsebene	Ebene 1 <input checked="" type="checkbox"/>	Ebene 2 <input type="checkbox"/>
Vorgehen	Beschreibung des Potenzials möglicher Verbesserungen und Verschlechterungen von Einzelrisiken mit abschließender Zusammenfassung zu einer Gesamtbewertung.	

Bedeutung des Kriteriums

Vor allem bei der Genehmigung von Anlagen ist eine Vielzahl von Sicherheitsrisiken zu beachten. Durch den Wechsel auf dekarbonisierte technische Verfahren können diese Sicherheitsrisiken in unterschiedlicher Weise beeinflusst werden. Grundsätzlich lassen sich *stoffliche Risiken* durch die Nutzung bestimmter Einsatzstoffe und die Produktion von Nebenprodukten sowie *prozessbedingte Risiken* unterscheiden.

Beschreibung des Kriteriums

Für das Kriterium der Anlagensicherheit wird betrachtet, welche Maßnahmen zur Sicherstellung der Anlagensicherheit bei der Nutzung neuer Einsatzstoffe (inkl. Energieträger wie Wasserstoff) und/oder neuer Prozesstechniken (wie z. B. Luftzerlegung für die Gewinnung von O₂ aus der Atmosphäre) notwendig sind, wie aufwändig diese Maßnahmen sind und wie fehleranfällig sie erscheinen. Zum anderen werden separat und in analoger Weise die potenziellen Auswirkungen im Hinblick auf die Sicherstellung der Anlagensicherheit beim An- und Abtransport von Roh-, Brenn- und Einsatzstoffen berücksichtigt.

Dabei wird jeweils nicht nur die Anlage selbst betrachtet, in der die industriellen Grundstoffe erzeugt werden, sondern es wird ebenfalls die Sicherheit von möglicherweise notwendigen neuen Infrastrukturen (wie z. B. von Ladeterminals oder Wasserstoffleitungen) auf Unternehmensebene berücksichtigt („Bewertungsebene 1“).

Zu verwendende Indikator(en)

Für das Kriterium der Anlagensicherheit werden zwei Indikatoren betrachtet, die jeweils mehrere Sub-Indikatoren umfassen:

Indikator 11.1: Stoffbezogene Risiken

► Sub-Indikator 11.1a: Risiken durch Humantoxizität

Welche stoffliche Zusammensetzung ergibt sich bei der dekarbonisierten Produktionstechnik? In welcher Höhe entstehen humantoxische Einsatzstoffe?

► Sub-Indikator 11.1b: Risiken durch Ökotoxizität

Welche ökotoxischen Eigenschaften ergibt sich durch die dekarbonisierte Produktionstechnik? In welcher Höhe entstehen ökotoxische Einsatzstoffe?

► Sub-Indikator 11.1c: Risiken durch niedrigen Flammpunkt

Welche Brandrisiken entstehen durch die Flammpunkte der eingesetzten Substanzen bei der dekarbonisierte Produktionstechnik? In welcher Höhe entstehen diese?

► Sub-Indikator 11.1d: Risiken durch Bildung zündfähiger Gemische

Welche Explosionsrisiken entstehen durch die dekarbonisierte Produktionstechnik? In welcher Höhe entstehen diese?

► **Sub-Indikator 11.1e: Risiken durch sonstige heftige Reaktionen**

Welche Risiken entstehen durch den Kontakt von Einsatzstoffen mit Luftsauerstoff oder Löschwasser durch die dekarbonisierte Produktionstechnik? In welcher Höhe entstehen diese? Dies kann etwa im Falle von Havarien die Bildung von Säuren sein.

Indikator 11.2: Prozessbezogene Risiken

► **Sub-Indikator 11.2a: Risiken durch hohe Temperaturen**

Welche Risiken entstehen durch hohe Prozesstemperaturen durch die dekarbonisierte Produktionstechnik? In welcher Höhe entstehen diese?

► **Sub-Indikator 11.2b: Risiken durch hohe Drücke**

Welche Risiken entstehen durch hohe Drücke durch die dekarbonisierte Produktionstechnik? In welcher Höhe entstehen diese?

Die Sub-Indikatoren werden alle nach dem gleichen Muster bewertet und schließlich zu den beiden Indikatoren zusammengeführt:

- 1 Kein Risiko (oder nicht relevant)
- 2 Nahezu kein Risiko
- 3 Geringes Risiko
- 4 Mittleres Risiko
- 5 Hohes Risiko
- 6 Sehr hohes Risiko

Vorgehen

Für die Risikobewertung wird auf Expertenwissen, ggf. ergänzt um zusätzliche Expertenbefragungen, zurückgegriffen. Für neue Technologien werden ggf. keine Einschätzungen möglich sein. Eigene Analysen können hierzu nicht durchgeführt werden. Ggf. muss auf Einschätzungen zu ähnlichen Technologien zurückgegriffen werden.

Für die Bewertung wird ein geringes oder auch ein fehlendes Risiko angestrebt, d. h. im Vergleich mehrerer Technologien sollte der Wert so weit wie möglich minimiert werden.

Bei der Bewertung wird nicht nach unterschiedlichen Zeiträumen unterschieden, da sich i. d. R. keine Veränderung ergeben dürfte.

Beispiel

Das Beispiel Kernenergie zeigt, dass einzelne Technologien sowohl hinsichtlich stofflicher als auch prozessbedingter Risiken hochrelevant sein können. Dies gilt für Einsatzstoffe wie Uran und Spaltprodukte wie etwa Plutonium sowie deren Transport und Endlagerung wie auch für den Prozess der Kernspaltung selbst und die dabei im Normalbetrieb und bei Havarien möglichen Temperaturen, Drücke, Strahlungsintensitäten etc. Eine derartig starke Kumulation von Risiken wie bei der Kernenergie ist allerdings eher selten.

Querbezüge zu anderen Kriterien

Kriterium 6: Stoffströme und Kreislaufwirtschaft (Indikator 6.1b Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen)

Tabelle 48: Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung der Anlagensicherheit der betrachteten Technologie

Indikator	Bezug	Risiko	1	2	3	4	5	6
			Keines	Nahezu keines	Geringes	Mittleres	Hohes	Sehr hohes
11.1	Stoffbezogene Risiken							
11.1a	Humantoxizität	Bewertungsebene 1 (Standort)	<input type="checkbox"/>					
11.1b	Ökotoxizität		<input type="checkbox"/>					
11.1c	niedrigen Flammpunkt		<input type="checkbox"/>					
11.1d	Bildung zündfähiger Gemische		<input type="checkbox"/>					
11.1e	sonstige heftige Reaktionen		<input type="checkbox"/>					
11.2	Prozessbezogene Risiken							
11.2a	hohe Temperaturen	Bewertungsebene 1 (Standort)	<input type="checkbox"/>					
11.2b	hohe Drücke		<input type="checkbox"/>					

Datenquellen

Informationssystem zum Stand der Sicherheitstechnik - INFOSIS:
www.infosis.uba.de

Service-Plattform Technische Regelwerke des VCI:
www.vci.de/technische-regelwerke/anlagensicherheit/uebersichtsseite.jsp

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI):
www.bgrci.de/anlagensicherheit

TÜV Rheinland Anlagensicherheit und Risiko-Management:
www.tuv.com/germany/de/anlagensicherheit.html

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAUA):
www.baua.de/DE/Home/Home_node.html

3.11.2 Vergleich aller Technologien aus einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die ermittelten Indikatorwerte der einzelnen Technologien zunächst wie in Kapitel 2.3.2.4 beschrieben in der bereit gestellten Excel-Datei eingetragen. Dort findet eine automatisierte Ermittlung der farblichen Einstufung statt, die in die folgende Tabelle übertragen wird.

Tabelle 49: Vergleich der Anlagensicherheit verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Einheit Skala	Einstufung (farblich)
11.1	Stoffbezogene Risiken	Bewertungsebene 1 (Standort)	Technologie 1	
			Technologie 2	
			Technologie ...	
11.2	Prozessbezogene Risiken	Bewertungsebene 1 (Standort)	Technologie 1	
			Technologie 2	
			Technologie ...	

3.12 Kriterium 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen

3.12.1 Bewertung einer einzelnen Technologie

Tabelle 50: Überblick zu Kriterium 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
Kategorie	Technologie <input type="checkbox"/>	Ökonomie <input type="checkbox"/>	Umwelt <input checked="" type="checkbox"/> Systemaspekte <input type="checkbox"/>
Definition des Kriteriums	Das Kriterium zeigt, inwieweit der Einsatz einer Technologie den Immissionsschutz und das Abfallaufkommen verbessern oder verschlechtern kann.		
Ziel des Kriteriums	Einstufung des Potenzials zur Verbesserung oder Verschlechterung des Immissionsschutzes und des Abfallaufkommens einer eingesetzten Technologie.		
Kurzbeschreibung des Optimums	Das Optimum ist eine Technologie, die den Immissionsschutz und das Abfallaufkommen signifikant verbessert.		
Art des Kriteriums	Quantitativ <input type="checkbox"/>	Semi-quantitativ <input checked="" type="checkbox"/>	
Ausschlusskriterium	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Fortschreibung für jedes Jahrzehnt	Nein <input checked="" type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>	
Indikator(en)	Indikator	Skala	Optimierungsrichtung

Fragestellung	Kurzbeschreibung		
	12.1: Gasförmige Emissionen 12.2: Abwässer 12.3: Feste Abfallstoffe	1 (entfallen) – 6 (nehmen stark zu)	Minimum
Bewertungsebene	Ebene 1 <input checked="" type="checkbox"/>	Ebene 2 <input type="checkbox"/>	
Vorgehen	Beschreibung des Potenzials möglicher Verbesserungen und Verschlechterungen und Einschätzung der Signifikanz mit abschließender Zusammenfassung zu einer Gesamtbewertung.		

Bedeutung des Kriteriums

Technologien zur Dekarbonisierung der Grundstoffindustrie können dazu beitragen, gasförmige Emissionen sowie flüssige und feste Abfälle zu reduzieren. So besteht in den allermeisten Fällen die berechtigte Hoffnung, dass durch den Verzicht auf den Einsatz fossiler Brennstoffe neben der Dekarbonisierung als relevanter Zusatznutzen u. a. die Entstehung klassischer Luftschadstoffe teilweise oder vollständig vermieden werden kann (IRENA 2017).

Die Vermeidung der Emission von Luftschadstoffen und der damit zusammenhängenden Gesundheitsschäden durch den verminderten Einsatz von fossilen Energieträgern zählt sicher zu den gewichtigsten Zusatznutzen der klimapolitisch motivierten Dekarbonisierung. Allein für diesen Bereich werden die jährlichen weltweiten vorzeitigen Todesfälle auf mindestens fünf Mio. geschätzt. Diese durch die Dekarbonisierung weitgehend vermeidbaren Schäden dürften die Kosten der Dekarbonisierung bereits bei weitem überkompensieren (Academy of Science of South Africa et al. 2019). Nach einer aktuellen Studie der Europäischen Umweltagentur ist Luftverschmutzung in Europa für mehr als 400 000 durch sie verursachte vorzeitige Todesfälle verantwortlich und somit die größte Umweltbedrohung für die Gesundheit in Europa (EEA 2020).

Beschreibung des Kriteriums

Das Kriterium beschreibt das Potenzial der betrachteten treibhausgasarmen Technologien zur Verbesserung oder Verschlechterung des Immissionsschutzes und des Abfallaufkommens. Ziel ist es, eine qualitative Einschätzung auf Basis eines Vergleiches mit bestehenden Technologien zu erlangen.

Zu verwendende Indikator(en)

Für die Beurteilung sollten Informationen über die Besten Verfügbaren Techniken (BVT) für den betreffenden Sektor aus den BREF-Dokumenten (Best Available Techniques Reference) als Referenz verwendet werden¹⁴. Hinweise für die qualitative Beurteilung des Potenzials durch den Bewerter ergeben sich durch die Betrachtung der nachfolgenden Indikatoren.

- ▶ **Indikator 12.1: Gasförmige Emissionen** (z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide oder Quecksilber)
- ▶ **Indikator 12.2: Abwässer** (z. B. Säuren, Laugen)
- ▶ **Indikator 12.3: Feste Abfallstoffe** (z. B. Aschen, Filterstäube)

Vorgehen

Die Einstufung der Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen erfolgt auf einer Skala von 1 – 6 im Sinne einer Schulnote.

¹⁴ BREF-Dokumente (Best Available Techniques Reference): <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/referenc>

Die Bewertenden sollten zunächst mögliche Verbesserungen oder Verschlechterungen im Vergleich zu „Besten Verfügbaren Techniken“ (BVT) ermitteln. Anschließend erfolgt eine Zusammenschau aller erfassten Informationen und die Festlegung eines Gesamtwertes für die Technologie. Es handelt sich also um eine ingenieurmäßige Einschätzung des Potenzials, die je nach Betrachtungswinkel variieren kann. Es ist daher wichtig, die Bewertung durch einen kurzen Begleittext zu begründen.

Für die Bewertung wird eine Verbesserung angestrebt, d. h. im Vergleich mit der BVT sollte der Wert so weit wie möglich minimiert werden.

Die Bewertung sollte mit Blick auf Bewertungsebene 1 erfolgen, also Immissionsschutz und Abfallaufkommen vor Ort im Betrieb betrachten.

Querbezüge zu anderen Kriterien

keine

Datenquellen

- ▶ Die „Best Available Techniques Reference“-Dokumente (BREF) der EU-Kommission¹⁵ bieten eine gute Datengrundlage für die derzeit vorherrschenden Technologien.
- ▶ Für Technologien, die erst in der Zukunft eingesetzt werden können, bieten wissenschaftliche Artikel aus Fachzeitschriften ggf. gute Datengrundlagen.

Tabelle 51: Bewertungsskala für die semi-quantitative Bewertung des Potenzials zur Verbesserung oder Verschlechterung des Immissionsschutzes und Abfallaufkommens der betrachteten Technologie

Skala-Wert	1	2	3	4	5	6
Stärke der Veränderung	Entfallen	Nehmen stark ab	Nehmen leicht ab	Bleiben unverändert	Nehmen zu	Nehmen stark zu

Indikator		Bezug	Stärke der Veränderung 1 2 3 4 5 6	Begründung für die Auswahl in Stichworten
12.1	Gasförmige Emissionen	Bewertungsebene 1 (Standort)		
12.2	Abwässer	Bewertungsebene 1 (Standort)		

¹⁵ BREF-Dokumente (Best Available Techniques Reference): <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/referenc>

Indikator		Bezug	Stärke der Veränderung 1 2 3 4 5 6	Begründung für die Auswahl in Stichworten
12.3	Feste Abfallstoffe	Bewertungsebene 1 (Standort)		

3.12.2 Vergleich aller Technologien einer Gruppe

Sind alle Technologien einer Gruppe nach obigem Muster bewertet, werden sie im 2. Schritt miteinander verglichen. Hierzu werden die ermittelten Indikatorwerte der einzelnen Technologien zunächst - wie in Kapitel 2.3.2.4 beschrieben - in der bereit gestellten Excel-Datei eingetragen. Dort findet eine automatisierte Ermittlung der farblichen Einstufung statt, die in die folgende Tabelle übertragen wird.

Tabelle 52: Vergleich der Stärke des Potenzials zur Verbesserung oder Verschlechterung bei Immissionsschutz und Abfallaufkommen verschiedener Technologien einer Gruppe

Indikator		Bezug	Einheit Skala	Einstufung (farblich)
12	Immissionsschutz und Abfallaufkommen	Bewertungsebene 2	Technologie 1	
		(Unternehmen plus Umwelt)	Technologie 2	
			Technologie ...	

3.13 Zusammenführung aller Kriterien pro Technologiegruppe

Liegen die Bewertungen mit allen Kriterien vor, erfolgt im nächsten Schritt wie Kapitel 2.3.3 beschrieben die Zusammenführung aller Technologien einer Gruppe. Da dies grafisch erfolgt, wird hier keine Tabelle vorgehalten.

4 Verlauf und Ergebnis der Präsentation des Bewertungstools

Online-Veranstaltung zur Präsentation des Bewertungstools

Am 29. September 2022 fand mit 27 Teilnehmenden und sechs Vertretern und Vertreterinnen des Konsortiums eine dreistündige virtuelle Veranstaltung zur Vorstellung des *Bewertungstools für Dekarbonisierungstechnologien* statt. Ziel der Veranstaltung war es, einer ausgewählten Gruppe an Teilnehmenden das Excel-Bewertungstool zur Bewertung von Techniken, Verfahren und Maßnahmen zur deutlichen Minderung industrieller THG-Emissionen vorzustellen und Rückmeldungen von den Expertinnen und Experten aufzunehmen. Die Teilnehmenden der Veranstaltung waren einzelne Akteurinnen und Akteure der bestehenden Stakeholdergruppe, die im DekarbInd-Projekt mitwirkten, sowie zusätzlich ausgewählte Wissenschaftler*innen aus dem Bereich der Systemforschung.

Im Vorfeld wurde den Teilnehmenden ein Infoblatt zum Bewertungstool bereitgestellt. Dieses enthielt einen Ausschnitt sowie Erläuterungen des Bewertungstools und die Beispielbewertung zweier Dekarbonisierungs-Technologien aus dem Stahl- und Zementsektor.

Die Veranstaltung selbst bestand aus drei Teilen:

- ▶ (1) Zunächst wurden den Teilnehmenden auf Grundlage der vorab bereitgestellten Informationen eine allgemeine Einführung in das Tool gegeben. Hierbei wurden die zugrundeliegenden Kriterien sowie ihre Erarbeitung erläutert.
- ▶ (2) Im zweiten Teil der Veranstaltung wurde das Excel-Bewertungstool vorgeführt, um die praktische Handhabung aufzuzeigen.
- ▶ (3) Im dritten Teil wurde die inhaltliche Anwendbarkeit des Tools anhand zweier Beispielbewertungen aus der Stahl- und Zementbranche demonstriert.

Auf alle inhaltlichen Präsentationen folgte eine offene Gesprächsrunde, in denen Fragen und Anmerkungen der Teilnehmenden gemeinsam beantwortet und diskutiert wurden.

Zentrale Rückmeldungen und Diskussionen

Im Folgenden werden die zentralen Rückmeldungen und Diskussionen thematisch gebündelt dargestellt.

Von Seiten der Hersteller und Anlagenbauer wurde die Sorge geäußert, dass ein „einfaches“ Tool simplifizierte Darstellungen fördert, die missverstanden werden könnten. In diesem Zusammenhang wurde auch darauf hingewiesen, dass eine Bewertung der Kriterien lediglich eine subjektive Einschätzung des Bewertenden abdecke.

- ▶ Dem wurde durch begegnet, indem die Stärke des Tools hervorgehoben wurde: Diese besteht darin, dass nicht nur die Technologien selbst, sondern auch ihre Vorketten in die Bewertung einbezogen werden. Indem die Systemgrenze erheblich weiter als bei reinen Unternehmensentscheidungen gefasst wird, können sonst nicht „sichtbare“ Entwicklungen und mögliche „Stolperfallen“ aufgezeigt werden, aus denen sich möglicherweise neue Abhängigkeiten ergeben könnten z. B. der hohe kumulierte Energieaufwand bei der Bereitstellung von Wasserstoff.
- ▶ Darüber hinaus ermöglicht das Tool die Darstellung von divergierenden Bewertungen. Das bedeutet, dass es gerade eine Stärke des Tools ist, keine eindeutige Priorität für eine einzelne Technologie auszusprechen, sondern einen ganzheitlichen und transparenten Blick auf die Stärken und Schwächen von Technologien innerhalb einer Technologiegruppe zu

ermöglichen. Auf diese Weise können auch komplexere Pfade und Ketten abgebildet werden. Wird eine Technologie präferiert, gibt das Tool Hinweise, bei welchen Bewertungsdimensionen bzw. konkreten Indikatoren nachgebessert werden sollte.

- ▶ Zusätzlich wurde auf den *Bewertungsbogen zum Tool* verwiesen. Dieser bietet die Grundlage für eine transparente Bewertung, da dort alle Bewertungen, die innerhalb des Tools vorgenommen wurden, dokumentiert und begründet werden. Es gab den Hinweis aus dem Teilnehmerkreis, auch diese Bewertungsgrundlagen bzw. einzelne zentrale Annahmen zusätzlich zu den Ergebnissen des Tools abzubilden.

Es wurde weiterhin vorgeschlagen, auch konkrete Standortbedingungen zu berücksichtigen, die an jedem Standort anders sein könnten. So könnten beispielsweise einzelne Industrie-Standorte das Tool nutzen, um standortspezifische Entscheidungen für die zukünftigen Einsatz von Dekarbonisierungstechnologien zu treffen und dabei die jeweilige Situation vor Ort zu berücksichtigen.

Demgegenüber wurde die zentrale Schlussfolgerung gezogen, dass das Tool nicht als *Entscheidungstool* für Unternehmen oder Politik angesehen sollte, sondern vielmehr als *Transparenztool* genutzt werden sollte. Für erstere haben Unternehmen eigene Tools und bewerten meist die ökonomische Relevanz von Investitionen und das auch eher im kürzeren Zeitrahmen. Mit dem entwickelten *Bewertungstool für Dekarbonisierungstechnologien* steht dagegen im Vordergrund, mögliche langfristige Entwicklungen zu betrachten sowie über die Bewertung aus verschiedenen Perspektiven mögliche Restriktionen und Konflikte frühzeitig aufzuzeigen. Diese könnten dann natürlich Unternehmensentscheidungen beeinflussen, aber nicht ersetzen.

Neben der Frage der möglichen Gewichtung der Kriterien (derzeit sind alle Kriterien gleich gewichtet) wurde schließlich insbesondere die Frage diskutiert, ob und wie das Bewertungstool bereitgestellt werden wird und wer es nutzen könne. Die Zielgruppe und die zukünftige Nutzung ist vom Umweltbundesamt derzeit noch nicht abschließend entschieden. Das Umweltbundesamt nimmt hierzu aber gerne Vorschläge entgegen.

Insgesamt war die Online-Veranstaltung sehr wertvoll, um die Praxistauglichkeit des Tools zu testen und die möglichen Erwartungen der potenziellen Nutzer und Nutzerinnen gut einschätzen zu können. Das DekarbInd-Projektteam dankt allen Teilnehmenden für ihre wertvollen Beiträge.

5 Quellenverzeichnis

Academy of Science of South Africa; Brazilian Academy of Sciences; German National Academy of Sciences Leopoldina; U. S. National Academy of Medicine; U. S. National Academy of Sciences (2019): Air Pollution and Health – A Science-Policy Initiative. *Annals of Global Health*. 85(1)140. DOI: <https://doi.org/10.5334/aogh.2656>

Agora Energiewende; Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019.

Bundesregierung (2018): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Aktualisierung 2018. Berlin. <http://www.bmub.bund.de/themen/nachhaltigkeit-internationales/nachhaltige-entwicklung/2030-agenda/>.
Letzter Zugriff: 28.10.2020

EEA (2020): Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe. EEA Report No 21/2019 der European Environment Agency (EAA). ISSN 1977-8449. www.eea.europa.eu/publications/healthy-environment-healthy-lives. Letzter Zugriff: 28.10.2020

European Commission (2015): Better Regulation Guidelines. http://ec.europa.eu/smart-regulation/guidelines/toc_guide_en.htm. Letzter Zugriff: 28.10.2020

Europäische Kommission (2017): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0490>. Letzter Zugriff: 28.10.2020.

Fleiter, T.; Schломann, B.; Eichhammer, W. (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung.

Greenhouse Gas Protocol (2020): <https://ghgprotocol.org/>. Washington, Geneva. Letzter Zugriff: 28.10.2020.

Gupta, S.; Tirpak, D. A.; Burger, N.; Gupta, J.; Höhne, N.; Boncheva, A. I. et al. (2008): Policies, Instruments and Co-operative Arrangements. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IRENA (2017): Methodology background document: Development of a decarbonisation pathway for the global energy system to 2050. Masdar City (Abu Dhabi): International Renewable Energy Agency.

Mankins, J. C. (2004): Technology Readiness Levels. A White Paper, Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, edited version from April 6 1995, NASA.

UN (2019): The Sustainable Development Goals Report 2019. United Nations, New York. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019.pdf>. Letzter Zugriff: 28.10.2020.

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Zelt, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2018b): Technologien für die Energiewende - Kriterienraster. Teilbericht 1 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Viebahn, P.; Chappin, E.J.L. (2018): Scrutinising the Gap between the Expected and Actual Deployment of Carbon Capture and Storage – A Bibliometric Analysis. *Energies* 11(9)2319. Doi: 10.3390/en11092319.

Zelt, O., Kobiela, G., Ortiz, W., Scholz, A., Monnerie, N., Rosenstiel, A., Viebahn, P. (2020). Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe. MENA-Fuels: Teilbericht 3 des Wuppertal Instituts und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). www.wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/789

A Anhang: Muster des Excel-Tools zum Eintragen der Werte pro Technologie

Autorin: Jacqueline Kligen

		2030		2040		E 1		E 2		E 1		E 2			
1	1	Technische Verfügbarkeit	1	Jahr, in dem TRL 9 erreicht wird	ja	X									1
2*	2	Energieeffizienz	2.1	Spezifischer Energiebedarf (Endenergie)	ja	X	GJ/t Output	-		-		-		-	2
			2.2	Spezifischer Energiebedarf (Primärenergie)	ja	X	GJ/t Output		-		-		-	-	2
	3	THG-Effizienz	3	Spezifische THG-Emissionen	ja	X	t CO ₂ -Äq./t Output		-		-		-	-	3
	4	Kosteneffizienz	4	Spezifische Kosten (LCOO)	ja	X	EUR/t Output	-		-		-		-	4
							E 1				E 2				
3	5	Erzeugung von Pfadabhängigkeiten	5	Grad der prospektiven Pfadabhängigkeit	nein	X	1 (keine) – 6 (sehr hoch)								5
	6	Minimierung der THG-Emissionen	6	Grad der zukünftigen Risiken	nein	X	1 (keine) – 6 (viele/sehr hohe)								6
	7	Regionale Abhängigkeiten	7	Grad der regionalen Abhängigkeiten	nein	X	1 (keine) – 6 (sehr hoch)								7
	8	Notwendige Rahmenbedingungen	8	Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen	nein	X	1 (keine) – 6 (sehr viele)								8
4	9.1	Veränderung von Stoffströmen	9.1a	Intersektorale Rückwirkungen	nein	X	1 – 6 (unterschiedliche Bedeutungen, siehe Text)								9
			9.1b	Einsatz gefährlicher und umweltschädlicher Stoffe											
			9.1c	Verwendung kritischer Rohstoffe											
	9.2	Grad Kreislaufwirtschaft	9.2a	Sektorale Abfallintensität											
			9.2b	Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen											
			9.2c	End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe (EOL-RQ)											
	10	Infrastruktur-Abhängigkeit	10.1	Leitungsnetze für Elektrizität	nein	X	1 (Kein Aufwand) – 6 (Sehr hoher)								10
			10.2	Leitungsnetze für Stofftransport											
			10.3	Sonstige Infrastruktur											
	11.1	Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren	11.1a	Risiko Humantoxizität	nein	X	1 (keines) - 6 (sehr hohes)								11
11.1b			Risiko Ökotoxizität												
11.1c			Risiko Niedriger Flammpunkt												
11.1d			Risiko Bildung zündfähiger Stoffe												
11.1e			Risiko sonstige heftige Reaktionen												
11.2	Anlagensicherheit: Prozessbezogene Indikatoren	11.2a	Risiko hohe Temperaturen												
		11.2b	Risiko hohe Drücke												
12	Wirkungen auf Immissionsschutz & Abfallaufkommen	12.1	Gasförmige Emissionen	nein	X	1 (entfallen) - 6 (Nehmen stark zu)								12	
		12.2	Abwässer												
		12.3	Feste Abfallstoffe												

*Hinweis Block 2: Die Felder 2020 bis 2050 müssen pro Indikator entweder alle gefüllt werden oder alle leer sein. Ist für ein Jahr kein Wert vorhanden wird der Wert des vorherigen Jahrzehnts fortgeschrieben.

B Anhang: Exemplarischer Test des Bewertungsschemas für die Zementindustrie: Vergleichende Bewertung von Optionen zur Bereitstellung thermischer Energie für die Klinkerproduktion

Autoren: Dietmar Schüwer, Georg Holtz

Im Folgenden wird das oben dargestellte ganzheitliche Bewertungsschema für Dekarbonisierungs-Technologien zur deutlichen Minderung industrieller THG-Emissionen getestet. Gegenstand des Tests ist eine vergleichende Bewertung von Optionen zur Bereitstellung von thermischer Energie für die Klinkerproduktion in der Zementherstellung. Zu diesem Zweck werden folgende vier Optionen miteinander verglichen:

- ▶ Alternativbrennstoffe (ABS)
- ▶ Elektrifizierter Kalzinator (LEILAC)
- ▶ Wasserstoff
- ▶ Biomasse

In Abschnitt B.1 werden zunächst übergreifende Annahmen, Rahmenparameter und Referenzwerte definiert. Abschnitt B.2 beschreibt die wesentlichen methodischen und inhaltlichen Ergebnisse des Tests. Die weiteren Abschnitte dokumentieren die Annahmen für die Optionen (B.3) und die Begründungen für die Bewertung der Indikatoren innerhalb des Schemas (B.4).

B.1 Festlegung von Bezugsgrößen und einheitlichen Annahmen zu Rahmenparametern für alle bewerteten Technologien

B.1.1 Festlegung von Bezugsgrößen

Alle Angaben und Berechnungen beziehen sich auf einen modernen Drehrohrofen mit Zyklonvorwärmer und Kalzinator.

- ▶ Als Einheit für „t Output“ in Block 2 wird „t Klinker“ festgelegt.
- ▶ Der spezifische Energiebedarf (Kriterium 2) ist abhängig von Rohmaterialfeuchte und angenommener Effizienz des Ofens. Als Bezugsgröße wird ein Ofen mit einem thermischen Energiebedarf von 3,5 GJ/t Klinker bei Befuerung mit Steinkohle festgelegt. Es wird keine Veränderung der Effizienz des Ofens im Zeitverlauf angenommen, um eine Vergleichbarkeit der Angaben zu verschiedenen Energieträgern zu gewährleisten.
- ▶ Spezifische THG-Emissionen (Kriterium 3): die *prozessbedingten* Emissionen ändern sich durch den Einsatz verschiedener thermischer Energiequellen nicht. Hier werden daher nur die Emissionen aus der Bereitstellung der *thermischen* Energie (inkl. Vorkette) berücksichtigt. Biogene CO₂-Mengen werden nicht einberechnet und nicht gesondert ausgewiesen.

- ▶ **Kosteneffizienz (Kriterium 4):** Die Herstellungskosten für die Klinkerherstellung werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wovon Brennstoffkosten nur ein Teil sind. Um Unterschiede deutlich(er) zu machen, werden hier nur die spezifischen Brennstoffkosten €/t Klinker angegeben, wobei auch ein Preis für fossile CO₂-Mengen angenommen wird (biogenes CO₂ wird nicht als Kostenpunkt angesehen; eine mögliche Vergütung von Negativ-Emissionen wurde hier nicht berücksichtigt; frei zugeteilte ETS-Zertifikate werden nicht berücksichtigt).
- ▶ **Intersektorale Rückwirkungen (Kriterium 9.1a):** die intersektoralen Rückwirkungen (unter Punkt 9.1 Veränderung von Stoffströmen) werden in Bezug auf den Status-quo (heutiger Brennstoffmix der Zementindustrie) bewertet; d. h. bei einem Wechsel zu Strom/H₂/Biomasse wird auch der *Wegfall* der ABS mitberücksichtigt.

B.1.2 Festlegung von Rahmenparametern

Für die Bewertung müssen Annahmen zu Strompreisen, Primärenergiefaktoren Strom, Emissionsfaktoren Strom und CO₂-Preisen getroffen werden. Idealerweise sollten diese Rahmenparameter konsistent zueinander sein, z. B. indem alle Werte auf demselben Szenario basieren. Für den Zweck dieses Tests wurden hier nur plausible Schätzwerte verwendet.

Tabelle 53: Angenommene Strom- und CO₂-Preise, Primärenergie- und Emissionsfaktoren (plausible Schätzwerte)

Parameter	Einheit	2020	2030	2040	2050
(fiktiver) Strompreis	€/MWh	70,00	70,00	70,00	70,00
	€/GJ	19,40	19,40	19,40	19,40
(fiktiver) Primärenergiefaktor für Strom	MWh/MWh	1,8	1,4	1,1	1,1
(fiktiver) Emissionsfaktor des Stromsystems	g CO ₂ /kWh	400	100	0	0
(fiktiver) CO ₂ -Preis für fossile CO ₂ -Mengen	€/t CO ₂	25	50	80	120

B.2 Zusammenfassende Erkenntnisse aus der multikriteriellen Bewertung

Abbildung 5: Zusammenfassende Bewertung der vier Energieträger-Optionen nach Farbschema

Kriterien		Alternativbrennstoffe	Elektrifizierter Kalzinator (LEILAC)	Wasserstoff	Biomasse
		2020	2030	2030	2020
1	Jahr, in dem TRL 9 erreicht wird	2020	2030	2030	2020
2.1	Spezifischer Energiebedarf (Endenergie)	Blau	Blau	Blau	Blau
2.2	Spezifischer Energiebedarf (Primärenergie)	Grün	Grün	Rot	Gelb
3	Spezifische THG-Emissionen	Rot	Grün	Grün	Grün
4	Spezifische Kosten (LCOO)	Grün	Gelb	Rot	Grün
5	Grad der prospektiven Pfadabhängigkeit	Gelb	Gelb	Rot	Grün
6	Grad der zukünftigen Risiken	Gelb	Grün	Gelb	Rot
7	Grad der regionalen Abhängigkeiten	Gelb	Grün	Grün	Grün
8	Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen	Gelb	Gelb	Gelb	Grün
9	Stoffströme und Kreislaufwirtschaft	Rot	Rot	Rot	Rot
10	Infrastruktur-Abhängigkeit	Gelb	Rot	Rot	Grün
11	Anlagensicherheit	Grün	Grün	Grün	Grün
12	Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen	Rot	Gelb	Gelb	Gelb

Quelle: eigene Darstellung (Bildausschnitt Excel-Tool), Wuppertal Institut

B.2.1 Inhaltliche Erkenntnisse

- ▶ Alternative Brennstoffe und Biomasse sind sofort verfügbare Optionen, während Strom (im elektrifizierten Kalzinator) und Wasserstoff voraussichtlich frühestens in 10 Jahren **marktreif** (TRL 9) zur Verfügung stehen werden.
- ▶ Der von der Zementindustrie bereits heute in hohem Maße verwendete und auch für die Zukunft favorisierte Brennstoff **ABS** zeichnet sich - im Vergleich zu den anderen Optionen - insbesondere durch einen niedrigen spezifischen Primärbedarf und niedrige Kosten aus. Vergleichsweise kritisch sind hingegen die Wirkungen auf den Immissionsschutz sowie das Maß der spezifischen Treibhausgasemissionen. Insbesondere bei den gasförmigen

Schadstoffemissionen müssen daher ausreichende Schutzmaßnahmen getroffen werden. Ferner hat ABS alleine nicht das Potenzial für eine klimaneutrale Energiebereitstellung, so dass bis 2050 weitere geeignete Maßnahmen (z. B. CCS, Kompensation durch negative Emissionen an anderer Stelle) getroffen werden müssen.

- ▶ **Strom** als Energieträger weist ebenso einen niedrigen Primärenergiebedarf auf. Daneben wird er als derjenige Energieträger angesehen mit den geringsten Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen, allerdings bei gleichzeitig hoher Infrastrukturabhängigkeit.
- ▶ **Wasserstoff** ist zwar – ebenso wie Strom und Biomasse – potenziell in der Lage, klimaneutral Wärme bereitzustellen, allerdings bei einem im Vergleich dazu deutlich höheren spezifischen Primärenergiebedarf und Kosten. Sowohl der Grad der prospektiven Pfadabhängigkeit als auch die Infrastrukturabhängigkeit wird jeweils als kritisch eingeschätzt.
- ▶ **Biomasse** schneidet im Gesamtbild bzgl. vieler Kriterien (mit) am besten ab. Das zentrale (mögliche) Hemmnis für einen zukünftig verstärkten Einsatz ist die Verfügbarkeit nachhaltig angebaute Biomasse bzw. die Konkurrenz um die begrenzten nachhaltigen Biomassemengen mit anderen (potenziellen) Nachfragern. Jedoch ist Biomasse selbst bei der angenommenen Verdoppelung des Bezugspreises unter den hier angenommenen Rahmenbedingungen (Strompreis, CO₂-Preis) auch langfristig eine der günstigsten Optionen. Dies zeigt, dass Biomasse auch bei starker Konkurrenz (hohe Preise) zukünftig für die Zementindustrie eine interessante Option sein könnte. Ein Einsatz von Biomasse hätte im Zusammenspiel mit CCS zudem positive Klimaeffekte (negative Emissionen). Ein weiteres technisches Hindernis für den Einsatz von Biomasse sind die erforderlichen Mindestheizwerte am Drehrohrofen. Es sollte evaluiert werden, inwieweit Forschung und Entwicklung z. B. in Hinsicht auf Kombinationen mit Brennstoffen mit hohen Heizwerten (z. B. Wasserstoff) oder in Kombination mit Oxyfuel-Verbrennung (mit oder ohne Carbon Capture) dieses Hindernis reduzieren können.
- ▶ Ausgehend von den Vor- und Nachteilen der jeweiligen Optionen erscheint vor dem Hintergrund der Klimaziele die folgende **Kombination von Nutzungsoptionen** sinnvoll: Die Nutzung und der weitere Ausbau von ABS ist zu bevorzugen. Für den verbleibenden Energiebedarf, der technisch oder potenziellseitig nicht durch ABS gedeckt werden kann, sind Biomasse aus nachhaltigem Anbau und erneuerbarer Strom (insbesondere im indirekt beheizten Kalzinator) mögliche Substitute für fossile Energieträger. Wasserstoff aus erneuerbarem Strom ist voraussichtlich frühestens 2030 in ausreichenden Mengen verfügbar und technisch einsetzbar und spielt eine eher untergeordnete bzw. additive Rolle.
- ▶ Die Verwendung des Tools machte transparent, dass bei allen betrachteten Optionen die Verwendung **kritischer Ressourcen** zu beachten ist. Eine Quantifizierung und genauere Einordnung der Relevanz dieser Effekte bedürfte tiefergehender Analysen.

- ▶ Hinsichtlich des spezifischen **Endenergiebedarfs** sind keine relevanten Unterschiede (obere Grenze des Wertebereichs liegt weniger als 10 % über der unteren Grenze des Wertebereichs) zwischen den vier Optionen erkennbar.

B.2.2 Methodische Erkenntnisse

- ▶ Die Ergebnisse des Technologievergleichs sind bzgl. einiger Kriterien (insbesondere Kosten) stark abhängig von Annahmen, z. B. hinsichtlich der Entwicklung des CO₂-Preises und des Strompreises. Das Tool eignet sich prinzipiell dazu, Technologien im Lichte verschiedener zukünftiger Entwicklungen zu vergleichen, indem verschiedene Bewertungen mit abweichenden Rahmenbedingungen durchgeführt werden.
- ▶ Die farblich zusammenfassende Bewertung ermöglicht auch für interessierte Laien eine verständliche und schnell erfassbare multikriterielle Einordnung der Stärken und Schwächen von Technologieoptionen. Diejenigen Optionen, die Stärken in für den Anwender besonders interessanten Indikatorbereich aufweisen (z. B. THG-Emissionen), kommen daher zunächst in die nähere Auswahl, allerdings müssen anschließend nach möglichen Lösungen für Schwächen dieser Technologien gefunden werden bzw. geprüft werden, ob eine Schwäche in einem Indikator möglicherweise ein Ausschlusskriterium sein kann.
- ▶ Das Bewertungsschema bietet auch Experten eine strukturierte Vorgehensweise, um die Vor- und Nachteile von Optionen aufzudecken und auf dieser Basis Quintessenzen und weiterführende Fragen zu erarbeiten.
- ▶ Aufgrund der (partiellen) Sensitivität der Bewertung ist eine Dokumentation der angenommenen Rahmenbedingungen ebenso wie die Berücksichtigung der Annahmen und Begründungen bei der Interpretation der Ergebnisse wichtig.
- ▶ Für eine belastbare Bewertung aller Kriterien ist ein breites Wissen über die Technologien erforderlich. Nicht immer sind dabei mit vertretbarem Aufwand quantitative Daten für die Bewertung recherchierbar.

B.3 Vorbemerkungen zu den Optionen

B.3.1 Option 1: Alternativbrennstoffe (ABS)

- ▶ Unter „Alternativbrennstoffe“ sind verschiedene Abfallstoffe zusammengefasst, die sich für einen thermischen Einsatz an Zementöfen eignen, z. B. Altreifen, Kunststoffabfälle, Klärschlamm, Altholz, etc.
- ▶ Für die Bewertung wurde eine dem heute in der Zementindustrie verwendeten Mix an Abfallstoffen vergleichbare Zusammensetzung mit einem Anteil biogenen Kohlenstoffs von ca. 35% unterstellt.

- ▶ Bewertungsrelevante Rahmenparameter (Strompreis, Primärenergiefaktor und Emissionsfaktor Strommix, CO₂-Preis, u. a.) wurden gemäß der für die Technologiegruppe festgelegten Rahmenentwicklungen spezifiziert (siehe Kapitel B.1.2).

B.3.2 Option 2: Elektrifizierter Kalzinator (LEILAC)

- ▶ Das LEILAC-Verfahren zur Direktabscheidung von CO₂ am Kalzinator erlaubt eine strombasierte Wärmebereitstellung am Kalzinator.
- ▶ Für die Bewertung wurde nur die Wärmebereitstellung am Kalzinator (ca. 2/3 der gesamten Wärmezufuhr) berücksichtigt und für die Vergleichbarkeit der spezifischen Werte mit anderen thermischen Verfahren auf den Gesamtwärmebedarf hochskaliert.
- ▶ Es wird angenommen, dass Strom aus dem Netz bezogen wird. Bewertungsrelevante Rahmenparameter (Strompreis, Primärenergiefaktor und Emissionsfaktor Strommix, CO₂-Preis, u. a.) wurden gemäß der für die Technologiegruppe festgelegten Rahmenentwicklungen spezifiziert (siehe Kapitel B.1.2).

B.3.3 Option 3: Wasserstoff

- ▶ Wasserstoff kann zu einem heute noch nicht klar benennbaren Anteil (ca. 10 - 20%) als Brennstoff an der Hauptfeuerung des Drehrohrofens verwendet werden.
- ▶ Um eine Vergleichbarkeit der Bewertung zu gewährleisten, wurde dieser Anteil für die quantitativen Indikatoren auf die gesamte Wärmebereitstellung (hypothetisch) skaliert.
- ▶ Es wird angenommen, dass der Wasserstoff per Elektrolyse aus erneuerbarem Strom inländisch gewonnen wird.¹⁶ Hintergrund der Annahme ist, dass Zementwerke aufgrund ihrer dezentralen Lage an Steinbrüchen ggf. nicht im Einzugsbereich einer nationalen H₂-Infrastruktur liegen könnten. Regionale Lösungen erscheinen daher plausibel.

B.3.4 Option 4: Biomasse

- ▶ Unter „Biomasse“ werden hier speziell angebaute Energiepflanzen verstanden (z. B. Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen).
- ▶ Reine Biomasse kann prinzipiell bis zu 100% des Brennstoffs umfassen. Für den Einsatz an der Hauptfeuerung sind jedoch geeignete hochkalorische (biogene) Brennstoffe mit einem Heizwert von mindestens 20-22 GJ/t erforderlich (ECRA/CSI 2017).¹⁷ Die meisten

¹⁶ Die Nutzung von grauem/blauem H₂ oder von Importen würden zu anderen Zahlen für Primärenergie und spezifischen THG-Emissionen sowie teilweise zu anderen qualitativen Einschätzungen führen.

¹⁷ CSI/ECRA 2017. Technology Papers: Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead. European Cement Research Academy. www.ecra-online.org

Biomassen erreichen diesen Wert nicht, z. B. hat Holz mit einem Wassergehalt von 20% nur einen Heizwert von ca. 14 GJ/t (FNR 2012)¹⁸.

- ▶ Es wird daher angenommen, dass an der Hauptfeuerung andere Brennstoffe mit höherem Heizwert ergänzend zugefeuert werden.
- ▶ Für die Vergleichbarkeit der Technologien wird der Biomasse-Einsatz jedoch auf den gesamten Wärmebedarf skaliert.
- ▶ Bewertungsrelevante Rahmenparameter (Strompreis, Primärenergiefaktor und Emissionsfaktor Strommix, CO₂-Preis, u. a.) wurden gemäß der für die Technologiegruppe festgelegten Rahmenentwicklungen spezifiziert (siehe Kapitel B.1.2).

¹⁸ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2012). Energieholz aus der Landwirtschaft.

B.4 Bewertung der Optionen

B.4.1 Indikator 1: Technische Verfügbarkeit

Tabelle Anhang 1: Technische Verfügbarkeit: Jahr, in dem TRL 9 erreicht ist*

Option	2020	2030	2040	2050	Begründung
1: ABS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	TRL 9 im Jahr 2020. Alternativbrennstoffe werden bereits heute im Mittel zu rund 69 % in deutschen Zementwerken (Stand 2019) und in einzelnen Anlagen auch bis zu 100% eingesetzt.
2: Leilac	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	TRL 9 im Jahr 2030. LEILAC-Demonstrationsanlagen sind im Betrieb (LEILAC 1) bzw. in der Planung (LEILAC 2) ¹⁹ . Eine Elektrifizierung (Wiederstanderwärmung des Kalzinatorbehälters) ist laut persönlichem Gespräch mit Heidelberg Cement ohne großen Forschungsbedarf möglich und auch für das LEILAC 2-Projekt in Planung.
3: Wasserstoff	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ein Einsatz von Wasserstoff in der Feuerung in geringem Umfang erscheint bereits heute möglich (VDZ 2020) ²⁰ . Für eine Skalierung auf größere Energieeinträge sind jedoch noch weitere Forschungen nötig. Das TRL-Level und die technische Verfügbarkeit hängen daher vom anvisierten Anteil des H ₂ an der Energiebereitstellung ab. Da heute (2020) kein kommerzieller Einsatz von H ₂ an Zementöfen bekannt ist, wird hier für das Erreichen von TRL 9 das Jahr 2030 angegeben.
4: Biomasse	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ein Einsatz von reiner Biomasse ist bei Zugang zu geeigneten Brennstoffen technisch prinzipiell bereits heute möglich.

* Bewertungsebene 1 (Standort)

¹⁹ www.project-leilac.eu/leilac-pilot-plant

²⁰ VDZ 2020. Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie.

B.4.2 Indikator 2: Energieeffizienz

Indikator 2.1: Spezifischer Energiebedarf (Endenergie)

Tabelle 54: Indikator 2.1: Energieeffizienz: Spezifischer Energiebedarf*

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung
1: ABS	GJ/t	3,8	3,8	3,8	3,8	Alternativbrennstoffe müssen (je nach Abfallstoff und Form der Anlieferung) am Zementwerk aufbereitet werden, z. B. durch das Zerkleinern von Kunststoffabfällen zu sogenanntem Fluff (Flugfähige Fraktion), Trocknen von Klärschlamm etc. Durch Trocknungsvorgänge erhöht sich der thermische Endenergiebedarf im Vergleich zum Referenzfall Kohle um ca. 200 bis 300 MJ/t Klinker (56 bis 83 kWh/t) und durch mechanische Vorgänge entsteht ein zusätzlicher Strombedarf von ca. 2 bis 4 kWh/t Klinker (ca. 7 bis 14 MJ/t)(CSI/ECRA 2017).
2: Leilac	GJ/t	3,5	3,5	3,5	3,5	Für den spezifischen Energiebedarf wird unterstellt, dass dieselbe Effizienz erreicht wird, wie beim Einsatz fossiler Brennstoffe.
3: Wasserstoff	GJ/t	3,5	3,5	3,5	3,5	Qua Annahme wird der verwendete Wasserstoff aus Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt und ist daher als THG-neutral anzusehen.
4: Biomasse	GJ/t	3,8	3,8	3,8	3,8	Für den spezifischen Energiebedarf wird unterstellt, dass dieselbe Effizienz erreicht wird wie beim Einsatz alternativer Brennstoffe (CSI/ECRA 2017).

* Bewertungsebene 1 (Endenergie)

Indikator 2.2: Spezifischer Energiebedarf (Primärenergie)**Tabelle 55: Indikator 2.2: Energieeffizienz: Spezifischer Energiebedarf***

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung
1: ABS	GJ/t	3,80	3,80	3,80	3,80	Abfallstoffe werden hier als Primärenergie behandelt. Der (vergleichsweise geringe) Stromeinsatz für die Aufbereitung der Abfallstoffe fällt auch nach Berücksichtigung des Primärenergiefaktors für Strom in den Bereich der Unsicherheit der Annahmen, so dass auf eine veränderte Bewertung des Primärenergiebedarfs im Zeitverlauf verzichtet wird.
2: Leilac	GJ/t	6,30	4,90	3,85	3,85	Für die Berechnung des Primärenergiebedarfs wird der Endenergiebedarf mit dem Primärenergiefaktor des unterstellten Strommix multipliziert.
3: Wasserstoff	GJ/t	6,42	6,11	6,11	6,02	Für die Berechnung des Primärenergiebedarfs wird der Endenergiebedarf mit dem Primärenergiefaktor eines auf erneuerbaren Energien basierenden Stromsystems (1,1) sowie durch den heizwertbezogenen Wirkungsgrad eines durchschnittlichen Elektrolyseurs geteilt. Folgende Annahme wird für den heizwertbezogenen Wirkungsgrad getroffen: 2020: 60%/2030: 63% /2040: 63%/2050: 64%
4: Biomasse	GJ/t	4,56	4,45	4,56	4,56	Als Primärenergiefaktor wird mit 1,2 der Primärenergiefaktor von Holz nach DIN V 18599-1: 2011-12 angesetzt.

* Bewertungsebene 2 (Primärenergie)

B.4.3 Indikator 3: Treibhausgas-Effizienz

Tabelle 56: Indikator 3: Treibhausgas-Effizienz*

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung
1: ABS	t CO ₂ -Äq./t Output	0,175	0,175	0,175	0,175	Durch den Strombedarf für die Aufbereitung der Abfallstoffe ergeben sich prinzipiell sich im Zeitverlauf ändernde indirekte THG-Emissionen aus dem Strombezug. Für das Jahr 2020 liegen diese gemäß obiger Annahmen und Daten (Tabelle 53) in der Höhe von 0,8 bis 1,6 kg CO ₂ / t Klinker. Im Vergleich zum CO ₂ aus der thermischen Nutzung der Abfallstoffe (175 kg/t Klinker) ist dieser Wert so gering, dass seine Fortschreibung im Zeitverlauf vernachlässigt wird.
2: Leilac	t CO ₂ -Äq./t Output	0,39	0,10	0,00	0,00	Die THG-Emissionen ergeben sich aus dem genutzten Strom durch Multiplikation des Endenergiebedarfs mit dem Emissionsfaktor von Strom im jeweiligen Stützjahr.
3: Wasserstoff	t CO ₂ -Äq./t Output	0	0	0	0	Qua Annahme wird der verwendete Wasserstoff aus Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt und ist daher als THG-neutral anzusehen.
4: Biomasse	g/kWh _{th} (UBA 2013)	50	40	20	0	Obwohl bei der thermischen Nutzung der Biomassen nur biogene Emissionen entstehen, die nicht angerechnet werden, so entstehen doch beim Anbau, der Ernte, Verarbeitung und dem Transport der Energiepflanzen THG-Emissionen. Der Emissionsfaktor von Anbau-Biomasse ist daher größer Null. Es wird jedoch im Zeitverlauf eine zunehmende THG-Minderung bei den landwirtschaftlichen Geräten und den Transportmitteln unterstellt.
	kg/GJ _{th} (UBA 2013)	14	11	6	0	
	t CO ₂ -Äq./t Output	0,05	0,04	0,02	0,00	

* Bewertungsebene 2 (Vorketten)

B.4.4 Indikator 4: Spezifische Kosten

Tabelle 57: Indikator 4: Spezifische Kosten*

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung
1: ABS	€/t _{Brennstoff} (CSI/ECRA)	10,44	27,3	k.A.	71,3	<p>Spezifische Kosten sind abhängig von Abfallart und regionaler Verfügbarkeit. Die laufenden Kosten (OPEX) werden von CSI/ECRA (2017) als globaler Wert angegeben (Heizwerte 16,7 MJ/kg Brennstoff, basierend auf VDZ Umweltdaten 2017).²¹</p> <p>Der OPEX-Wert für 2040 wurde zu 11,22 €/t_{Klinker} aus den Werten für 2030 und 2050 interpoliert. Zu evtl. erhöhten Betriebskosten (z. B. zusätzlich erforderliche Arbeitskräfte) sind keine Angaben bekannt.</p> <p>Die Investitionskosten für die Anlagen zur Aufbereitung der Abfälle werden von CSI/ECRA mit 5-15 Mio. Euro angegeben, jedoch für eine in Deutschland untypisch große Anlage (2 Mio. t Klinker/a). Bzgl. der Investitionen ist zudem zu berücksichtigen, dass die maximale Auslastung des Klinkerofens durch einen hohen Einsatz von Alternativbrennstoffen verringert wird (auf ca. 60-70%; Referenzfall ca. 90% unter Berücksichtigung der üblichen Winterrevision). Dies könnte - durch die Notwendigkeit, eine größere Anlage zu bauen - als erhöhte Investitionskosten veranschlagt werden. Eine Umrechnung der Investitionen in jährliche CAPEX erfolgte im Rahmen dieses Tests nicht.</p> <p>In die spezifischen Kosten fließen auch die Kosten für fossile CO₂-Emissionen ein, die sich aus dem Produkt der spezifischen CO₂-Emissionen (Tabelle 56) und dem veranschlagten CO₂-Preis ergeben (Tabelle 53).</p> <p>Abfallstoffe haben biogene Kohlenstoffanteile. Die Berücksichtigung einer Vergütung möglicher negativer Emissionen könnte daher den Kostenindikator deutlich beeinflussen. Dies geschieht hier jedoch nicht.</p>
	€/GJ _{th} (eigene Rech.)	0,63	1,63	2,95	4,27	
	€/t _{Klinker} (eigene Rech.)	2,38	6,21	11,22	16,22	
	€/t _{Klinker inkl. CO2} (eigene Rech.)	6,76	14,96	25,22	37,22	
2: Leilac	€/MWh _{el}	70,00	70,00	70,00	70,00	<p>Die Stromkosten ergeben sich aus dem Endenergiebedarf und dem unterstellten Strompreis, der über die Jahre als konstant angenommen wird. Zu evtl. erhöhten Betriebskosten (z. B. zusätzlich erforderliche Arbeitskräfte) sind keine Angaben bekannt. Für die Investitionskosten werden 4 €/t Klinker angelegt (Agora & WI 2019)²².</p> <p>Anders als bei den Brennstoffen ist der CO₂-Preis in den Strombezugskosten bereits eingepreist.</p>
	€/GJ _{el}	19,40	19,40	19,40	19,40	
	€/t _{Klinker inkl. CO2} (eigene Rech.)	71,90	71,90	71,90	71,90	

²¹ Der Grund für die von ECRA/CSI angenommene hohe Kostensteigerung bleibt unklar, vermutlich wird eine wachsende Konkurrenz um alternative Brennstoffe angenommen.

²² Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019). Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019.

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung
3: Wasserstoff	€/MWh _{th}	180,00	130,00	120,00	120,00	Die Kosten ergeben sich aus dem Endenergiebedarf und den hier dargestellten angenommenen Preisen für Wasserstoff. Der CO ₂ -Preis spielt beim grünen Wasserstoff keine Rolle, da dieser als CO ₂ -frei angesehen wird. Zu evtl. veränderten Betriebskosten (z. B. zusätzlich erforderliche Arbeitskräfte) sind keine Angaben bekannt. Die Kosten für die Umrüstung des Brenners werden vernachlässigt, da sie erwartungsgemäß gegenüber den Bezugskosten für H ₂ sehr gering sind.
	€/GJ _{th}	50,00	36,00	33,00	33,00	
	€/t _{Klinker inkl. CO₂} (eigene Rech.)	175,00	126,00	115,50	115,50	
4: Biomasse	€/MWh _{th}	24,40	32,40	43,20	48,78	Die Kosten ergeben sich aus dem Endenergiebedarf und dem unterstellten Preis für Biomasse. Für die Biomasse wird Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen angenommen, wofür FNR (2012) einen Preis von ca. 100 Euro/t und einen Heizwert (für Pappel) von 4,1 kWh/kg angibt (= 24,4 €/MWh). Vor dem Hintergrund einer erwarteten zukünftigen starken Konkurrenz um Biomasse wird hier eine deutliche Preissteigerung für Biomasse angenommen. Die Kosten für die ggf. nötige Umrüstung des Brenners werden vernachlässigt, da sie erwartungsgemäß gegenüber den Bezugskosten für die Biomasse sehr gering sind.
	€/GJ _{th}	6,78	9,00	12,55	13,55	
	€/t _{Klinker inkl. CO₂} (eigene Rech.)	25,75	34,20	45,60	51,49	

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt) (Capex und Opex)

B.4.5 Indikator 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in Effekten

Tabelle 58: Indikator 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten*

Skala: Stärke der prospektiven Pfadabhängigkeit					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Keine	Geringe	Hohe	Sehr hohe
Option	Aspekt	Skala	Begründung		
1: ABS	Investitionen in Abfallaufbereitungsanlagen	3	Geringe Investition im Vergleich zu Klinkerofen (< 5%)		
	Ausrichtung Abfallströme auf Zementwerke	4	Andere Kapazitäten für die Verwertung von Abfallstoffen müssten aufgebaut werden, falls ABS nicht mehr in Zementwerken eingesetzt werden.		
	Gesamtwert ABS	4			
2: Leilac	Investitionen in LEILAC-Kalzinator	4	Langlebige Investition		
	Ausbau Strominfrastruktur	4	Ein Ausbau der Strominfrastruktur am Standort sowie ggf. im vorgelagerten Verteilnetz ist aufgrund des deutlich erhöhten Strombezugs erforderlich.		
	Gesamtwert Leilac	4			
3: Wasserstoff	Investitionen in Elektrolyseure	5	Zementwerk ggf. regional der einzige große Abnehmer von H ₂		
	Aufbau regionaler Infrastruktur	5	Aufwand abhängig von nötiger Pipeline-Länge, um H ₂ -Netz / Quelle mit Zementwerk zu verbinden. Annahme, es gibt nicht „sowieso“ ein Netz oder eine H ₂ -Quelle		
	Gesamtwert Wasserstoff	5			
4: Biomasse	Aufbau einer Logistik für die Bereitstellung der Biomasse	2	Zementwerke besitzen bereits eine Logistik für ABS oder fossile Energieträger		
	Gesamtwert Biomasse	2			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

B.4.6 Indikator 6: Zukünftige Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen

Tabelle 59: Indikator 6: Grad der zukünftigen Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen*

Skala: Stärke der zukünftigen Risiken (Minderung THG-Emissionen)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Keine	Geringe	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	4	Es könnte zukünftig zu einer verstärkten Konkurrenz um Abfallstoffe kommen, falls Verfahren der Kreislaufwirtschaft verstärkt etabliert werden. Dies betrifft insbesondere die (aus Sicht des Heizwertes hochwertigen) kunststoffbasierten Abfälle, welche durch weiter verbessertes mechanisches sowie zukünftig auch chemisches Recycling verstärkt in den Kunststoffkreislauf recycelt werden könnten und entsprechend nicht mehr für eine thermische Verwertung in Zementöfen verfügbar wären. Auch Strategien zur grundsätzlichen Minimierung des Plastikaufkommens (möglicher gesellschaftlicher Handlungsdruck: Mikroplastik, Plastik in Meeren) könnten zu einem Rückgang der verfügbaren Mengen führen. Andere Abfallströme blieben jedoch vermutlich erhalten und ggf. können weitere erschlossen werden. Das Risiko wird als Mittel eingeschätzt.			
2: Leilac	2	Für eine THG-Minderung ist eine Minderung der Emissionsfaktoren des Stromsystems ausschlaggebend. Diesbezüglich werden <i>nahezu keine Risiken</i> gesehen, dass dies nicht erreicht werden kann.			
3: Wasserstoff	3	Für eine THG-Minderung ist die (regionale) Verfügbarkeit von aus erneuerbarem Strom erzeugtem Wasserstoff ausschlaggebend. Wasserstoff kann ggf. in gewissen Mengen zwischengespeichert werden, so dass kurze Fluktuationen in der Verfügbarkeit abgefangen werden könnten. Das Risiko, dass bei sorgfältiger Planung dennoch kein H ₂ verfügbar ist, wird als <i>gering</i> eingeschätzt.			
4: Biomasse	5	Für eine THG-Minderung ist die (regionale) Verfügbarkeit von Biomasse in ausreichender Menge und geeigneter Qualität ausschlaggebend. Dies hängt von der Flächenverfügbarkeit ab, welche wiederum von Entwicklungen in der Landschaftsplanung und im Landwirtschaftssektor abhängig ist. Zudem haben andere Sektoren wie der Gebäudebereich, das Stromsystem und andere Industriezweige im Zuge der Transformation zur THG-Neutralität konkurrierende Bedarfe an (nachhaltig angebaute) Biomasse. Das Risiko, dass Biomasse nicht in ausreichender Menge und geeigneter Qualität verfügbar ist, wird als <i>Hoch</i> eingeschätzt.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

B.4.7 Indikator 7: Grad der regionalen Abhängigkeiten

Tabelle 60: Indikator 7: Grad der regionalen Abhängigkeiten

Skala: Stärke der regionalen Abhängigkeit					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Keine	Geringe	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	3	Die Bewertung des Grads der regionalen Abhängigkeiten bezieht sich nur auf die Bereitstellung der Abfallstoffe (nicht die gesamte Zementproduktion). Abfallstoffe werden teilweise lokal bezogen, andere Fraktionen – insbesondere Kunststoffabfälle – werden aber auch international gehandelt. Der Grad der regionalen Abhängigkeit von anderen Weltregionen wird daher als „Mittel“ bewertet.			
2: Leilac	1	Keine (EE-Strom kann überwiegend in Deutschland erzeugt werden).			
3: Wasserstoff	1	Keine (qua Annahme wird Wasserstoff aus regionalem EE-Strom erzeugt).			
4: Biomasse	2	Nahezu keine. Biomasse wird entweder auf regionaler/nationaler Ebene angebaut oder ggf. (unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit) aus europäischen Nachbarländern bezogen.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

B.4.8 Indikator 8: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen

Tabelle 61: Indikator 8: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen*

Skala: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen					
1	2	3	4	5	6
Keine	Wenige, einfach zu implementieren	Viele, einfach zu implementieren	Wenige, aber ggf. schwierig umzusetzen	Viele, zudem teilweise schwierig umzusetzen	Sehr viele und viele schwierig umzusetzen
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	3	Die Anforderungen an den Betrieb von Zementwerken, die Abfälle mitverbrennen, sind sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene über verschiedene Rechtsvorschriften geregelt. Dies wird in VDZ (2015) ²³ und UBA (2020a) ²⁴ ausführlich dargestellt. Eine wichtige Rolle spielt z. B. der Immissionsschutz. In Deutschland sind i.d.R. standortspezifisch und für den eingesetzten Alternativbrennstoff Genehmigungen einzuholen und ein Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung durchzuführen. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Alternativbrennstoffen sind prinzipiell gegeben. Bei der Erschließung neuartiger ABS kann es dazu kommen, dass bestehende Regularien aus dem Abfallsektor angepasst werden müssten. Ebenso kann es geschehen, dass neuartige Regelungen den bisherigen Einsatz von ABS in Frage stellen. Ein Beispiel ist die zukünftige Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen (UBA 2020b) ²⁵ . Der Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen wird als „Mittel“ angesehen.			
2: Leilac	4	Zusätzlich notwendige regulatorische Rahmenbedingungen sind nicht bekannt. Jedoch ist ein sehr starker finanzieller Anreiz (OPEX-Förderung, sehr hoher CO ₂ -Preis) erforderlich, um diese auf einem vergleichsweise teuren Energieträger basierende Technologie wirtschaftlich zu betreiben.			
3: Wasserstoff	4	Zusätzlich notwendige regulatorische Rahmenbedingungen sind nicht bekannt. Jedoch ist ein sehr starker finanzieller Anreiz für den - im Vergleich zu fossilen Brennstoffen oder ABS - voraussichtlich hochpreisigen regenerativen Wasserstoff erforderlich (z. B. OPEX-Förderung oder sehr hoher CO ₂ -Preis), um diese Technologie wirtschaftlich zu nutzen.			
4: Biomasse	1	Zusätzlich notwendige regulatorische Rahmenbedingungen sind nicht bekannt.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

²³ VDZ 2015. Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess - Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen. Technischer Bericht A-2015/0117-2.

²⁴ UBA 2020a. Abfallmitverbrennung in Zementwerken. Sachverständigenutachten. UBA Texte 202/2020.

²⁵ UBA 2020b. Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie. Abschlussbericht. UBA Texte 48/2020.

B.4.9 Indikator 9: Stoffströme und Kreislauf

Indikator 9.1: Veränderungen von Stoffströmen

Indikator 9.1a: Intersektorale Rückwirkungen

Tabelle 62: Indikator 9.1a: Veränderung von Stoffströmen: Intersektorale Rückwirkungen*

Skala: Veränderungen von Stoffströmen					
1	2	3	4	5	6
Keine Rückwirkungen/Veränderungen durch den neuen Prozess	Geringe Rückwirkungen, die keine Probleme aufwerfen	Geringe Rückwirkungen, aber Handlungsbedarf	Relevante Rückwirkungen, die mit überschaubarem Aufwand gelöst werden können	Starke Rückwirkungen, die einen hohen Aufwand für eine Umorganisation bedeuten	Starke Rückwirkungen mit Nachteilen für eine andere Branche
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	2	Die Nutzung von Alternativbrennstoffen ist heute Standard und die Rückwirkungen auf den Abfallsektor entsprechend für alle Seiten der status-quo. Eine Erhöhung des Anteils an Alternativbrennstoffen kann nur in Zusammenarbeit mit der Abfallwirtschaft gelingen. Die Zusammenarbeit ist jedoch etabliert. Insofern gibt es hier „geringe Rückwirkungen, die keine Probleme aufwerfen“.			
2: Leilac	5	Die Nutzung von Alternativbrennstoffen ist heute Standard und die Rückwirkungen auf den Abfallsektor entsprechend für alle Seiten der status-quo. ABS werden insbesondere am Kalzinator eingesetzt. Durch den Einsatz eines elektrifizierten LEILAC-Kalzinators würde ABS durch Strom ganz oder teilweise ersetzt werden. Dies hätte entsprechende Rückwirkungen auf die Abfallwirtschaft. So müssten erhebliche zusätzliche Abfallströme in (ggf. neu zu errichtenden) Müllverbrennungsanlagen entsorgt werden. Andererseits wäre die Elektrifizierung des Kalzinators eine Möglichkeit, bei (angebotsseitig) gleichbleibender Menge an ABS die von der Zementindustrie gewünschte Erhöhung des ABS-Anteils von heute knapp 70 % in Richtung 100 % voranzutreiben.			
3: Wasserstoff	1	Die Nutzung von Alternativbrennstoffen ist heute Standard und die Kopplung mit dem Abfallsektor entsprechend für alle Seiten der status-quo. Ein weitgehender Ersatz der ABS durch Wasserstoff hätte entsprechende Rückwirkungen auf die Abfallwirtschaft. So müssten erhebliche zusätzliche Abfallströme in (ggf. neu zu errichtenden) Müllverbrennungsanlagen entsorgt werden. Es wird hier jedoch davon ausgegangen, dass Wasserstoff in absehbarer Zukunft nur zu geringen Teilen zu anderen Brennstoffen zugefeuert werden kann. Insbesondere kann Wasserstoff aufgrund seines hohen Heizwerts die			

Skala: Veränderungen von Stoffströmen

		Nutzung von niederkalorischen Brennstoffen an der Hauptfeuerung des Ofens ggf. sogar unterstützen. Es wird hier davon ausgegangen, dass H2 fossile Brennstoffe (z. B. Kohle) und nicht ABS ersetzt. Daher sind keine Rückwirkungen auf den Abfallsektor zu erwarten.
4: Biomasse	6	Die Nutzung von Alternativbrennstoffen ist heute Standard und die Kopplung mit dem Abfallsektor entsprechend für alle Seiten der status-quo. Ein Ersatz der ABS durch Biomasse hätte entsprechend Rückwirkungen auf die Abfallwirtschaft. So müssten erhebliche zusätzliche Abfallströme in (ggf. neu zu errichtenden) Müllverbrennungsanlagen entsorgt werden. Zudem besteht über die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen eine Rückwirkung auf den Landwirtschaftssektor, sowie (indirekt) durch die Konkurrenz um zukünftig voraussichtlich knappe Biomasse mengen eine Wechselwirkung mit dem Gebäudesektor, dem Stromsektor sowie anderen Industriesektoren. Es werden daher starke Rückwirkungen mit Nachteilen für andere Branchen gesehen.

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Indikator 9.1b: Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen

Tabelle 63: Indikator 9.1b: Veränderung von Stoffströmen: Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen

Skala: Veränderungen von Stoffströmen					
1	2	3	4	5	6
Positive Veränderung durch den neuen Prozess (gefährliche Einsatzstoffe fallen weg)	Geringe positive Veränderung durch den neuen Prozess (....)	Keine Veränderung durch den neuen Prozess	Geringe negative Veränderung durch den neuen Prozess (wenige problematische Einsatzstoffe)	Negative Veränderung durch den neuen Prozess (viele problematische Einsatzstoffe)	Sehr negative Veränderung durch den neuen Prozess (Einsatz von Stoffen, die nicht akzeptierbar sind)
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	3	Bei der Verbrennung von Alternativbrennstoffen werden potenziell umweltschädliche Stoffe freigesetzt, genannt seien hier Chlorverbindungen und Quecksilber (UBA 2020a), und entsprechende Techniken zur Emissionsminderung sind erforderlich. Durch einen erhöhten Einsatz von Alternativbrennstoffen steigen die Anforderungen an den Immissionsschutz im Zementwerk. Auf Ebene 2 (Unternehmen + Umwelt) bleibt der Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen jedoch gleich.			
2: Leilac	3	Auf Ebene 2 ändert sich der Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen nicht.			
3: Wasserstoff	3	Auf Ebene 2 ändert sich der Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen nicht.			
4: Biomasse	3	Auf Ebene 2 ändert sich der Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen nicht.			

Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Indikator 9.1c: Verwendung kritischer Rohstoffe

Tabelle 64: Indikator 9.1c: Veränderung von Stoffströmen: Verwendung kritischer Rohstoffe

Skala: Veränderungen von Stoffströmen					
1	2	3	4	5	6
Keine Verwendung kritischer Rohstoffe durch den neuen Prozess	Verwendung eines kritischen Rohstoffs ...	Verwendung von 2-3 kritischen Rohstoffen ...	Verwendung von 4-5 kritischen Rohstoffen ...	Verwendung von 6-7 kritischen Rohstoffen ...	Verwendung von mehr als 7 kritischen Rohstoffen ...
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	5	Die in ABS enthaltenen kritischen Rohstoffe werden in den Zementklinker eingebunden und somit dem Stoffkreislauf dauerhaft entzogen. Klärschlamm ist ein als ABS verwendeter Abfallstoff, dessen Nutzung zukünftig tendenziell ausgeweitet werden soll. Die im Klärschlamm enthaltenen Phosphorbestandteile werden in den Zementklinker eingebunden und somit dem Phosphorkreislauf dauerhaft entzogen (UBA 2020b). In Altreifen ist beispielsweise Naturkautschuk enthalten, der vor ihrer thermischen Verwertung nicht zurückgewonnen wird.			
2: Leilac	3	Für die Konstruktion des LEILAC-Kalzinators wird Stahl bzw. Edelstahl als Konstruktionsmaterial eingesetzt. Dies erfordert den Einsatz der kritischen Rohstoffe Flussspat, Kokskohle (zumindest im heutigem Hochofen-Verfahren) und Chrom.			
3: Wasserstoff	5	Beim Bau von für die H ₂ -Herstellung genutzten Elektrolyseuren werden je nach Typ unterschiedliche Mengen Aluminium, Stahl und Edelstahl als Konstruktionsmaterialien eingesetzt. Dies erfordert den Einsatz der kritischen Rohstoffe Flussspat, Kokskohle (mit heutigen Verfahren) und Chrom. Zudem werden je nach Elektrolyseur-Typ verschiedene Edelmetalle aus der Gruppe der Platinmetalle verwendet.			
4: Biomasse	3	Energiepflanzen (aus Kurzumtriebsplantagen) entziehen dem Boden beim Wachstum Phosphor und Magnesium (in geringen Mengen) (FNR 2012), die bei energetischer Nutzung im Zementofen den Stoffkreisläufen entzogen werden.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

B.4.10 Indikator 9.2: Grad der Kreislaufwirtschaft

Indikator 9.2a: Sektorale Abfallintensität

Tabelle 65: Indikator 9.2a: Grad der Kreislaufwirtschaft: Sektorale Abfallintensität

Skala: Grad der sektoralen Abfallintensität (Prozentuale Veränderung ggü. Referenzjahr der Einführung der zu bewertenden Technologie)					
1	2	3	4	5	6
Starke Abnahme (-5 % oder mehr)	Mittlere Abnahme (-2 % oder mehr)	Geringe Abnahme (bis zu 2 %)	Geringer Anstieg (bis zu 2 %)	Mittlerer Anstieg (bis zu 5 %)	Starker Anstieg (5 % oder mehr)
Option	Skala	Begründung ²⁶			
1: ABS	3	Eine Änderung der Abfallintensität ist nicht zu erwarten (das gesamte Abfallaufkommen verändert sich nicht).			
2: Leilac	3	Eine Änderung der Abfallintensität ist nicht zu erwarten (das gesamte Abfallaufkommen verändert sich nicht).			
3: Wasserstoff	3	Eine Änderung der Abfallintensität ist nicht zu erwarten (das gesamte Abfallaufkommen verändert sich nicht).			
4: Biomasse	3	Eine Änderung der Abfallintensität ist nicht zu erwarten (das gesamte Abfallaufkommen verändert sich nicht).			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

²⁶ Die vorgesehene Berechnung wurde im Rahmen des Tests nicht durchgeführt.

Indikator 9.2b: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen

Tabelle 66: Indikator 9.2b: Grad der Kreislaufwirtschaft: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen

Skala: Grad der Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen					
1	2	3	4	5	6
Sehr hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 50 Mio. t oder mehr)	Hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 20 Mio. t oder mehr)	Hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 10 Mio. t oder mehr)	Niedrige Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 2 Mio. t oder mehr)	Sehr niedrige Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 1 Mio. t oder mehr)	Keine Ressourcenschonung
Option	Skala	Begründung ²⁷			
1: ABS	5	Durch eine weitere Erhöhung des ABS-Anteils würde ggü. dem Status-quo Kohle und andere fossile Energieträger eingespart werden.			
2: Leilac	5	Durch einen elektrifiziertes LEILAC-Kalzinator würde bei Verwendung von EE-Strom gegenüber dem Status-quo Kohle und andere fossile Energieträger eingespart werden.			
3: Wasserstoff	5	Durch Wasserstoffeinsatz würde ggü. dem Status-quo Kohle und andere fossile Energieträger eingespart werden.			
4: Biomasse	5	Durch Biomasseeinsatz würde ggü. dem Status-quo Kohle und andere fossile Energieträger eingespart werden.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

²⁷ Eine Berechnung zum DIREec wurde hier zunächst nicht durchgeführt.

Indikator 9.2c: EOL-RQ (End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe)

Tabelle 67: Indikator 9.2c: Grad der Kreislaufwirtschaft: EOL-RQ (End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe)

Skala: Grad der End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe (EOL-RQ)					
1	2	3	4	5	6
Sehr hohe EOL-Recyclingquote	Hohe EOL-Recyclingquote	Ausreichende EOL-Recyclingquote	Niedrige EOL-Recyclingquote	Sehr niedrige EOL-Recyclingquote	Nicht akzeptable EOL-Recyclingquote
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	EOL-RQ	Dieser Indikator erscheint auf Brennstoffe nicht sinnvoll anwendbar zu sein und wird daher für alle hier betrachteten Energieträger nicht bewertet.			
2: Leilac	EOL-RQ	Dieser Indikator erscheint auf Brennstoffe nicht sinnvoll anwendbar zu sein und wird daher für alle hier betrachteten Energieträger nicht bewertet.			
3: Wasserstoff	EOL-RQ	Dieser Indikator erscheint auf Brennstoffe nicht sinnvoll anwendbar zu sein und wird daher für alle hier betrachteten Energieträger nicht bewertet.			
4: Biomasse	EOL-RQ	Dieser Indikator erscheint auf Brennstoffe nicht sinnvoll anwendbar zu sein und wird daher für alle hier betrachteten Energieträger nicht bewertet.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

B.4.11 Indikator 10: Infrastrukturabhängigkeit

Elektrizität (Verteilnetze, ...)

Tabelle 68: Indikator 10.1: Infrastrukturabhängigkeit: Leitungsnetze für Elektrizität

Skala: Aufwand und (zeitlicher Vorlauf)					
1	2	3	4	5	6
Kein Aufwand (sofort)	Geringer Aufwand (nicht sofort)	Mäßiger Aufwand (mäßiger Vorlauf)	Mittlerer Aufwand (mittlerer Vorlauf)	Hoher Aufwand (hoher Vorlauf)	Sehr hoher Aufwand (sehr hoher Vorlauf)
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	1	Kein Aufwand (nur ggf. geringer Strommehrbedarf durch zusätzliche Schritte bei der Aufarbeitung von ABS).			
2: Leilac	5	Der Strombezug eines Zementwerks mit elektrifiziertem LEILAC-Kalzinators steigt gegenüber dem heute typischen Strombedarf auf ein Vielfaches. Ein Ausbau des lokalen Verteilnetzes sowie der werkseigenen elektrischen Infrastruktur ist wahrscheinlich erforderlich.			
3: Wasserstoff	2	Je nach regionalen Gegebenheiten und Position der Elektrolyseure im Stromnetz ist ein Ausbau des Stromnetzes erforderlich.			
4: Biomasse	1	Kein Aufwand.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Netzgekoppelt (Erdgas, Wasserstoff, CO₂, Methanol, ...)

Tabelle 69: Indikator 10.2: Infrastrukturabhängigkeit: Leitungsnetze für Stofftransport

Skala: Aufwand und (zeitlicher Vorlauf)					
1	2	3	4	5	6
Kein Aufwand (sofort)	Geringer Aufwand (nicht sofort)	Mäßiger Aufwand (mäßiger Vorlauf)	Mittlerer Aufwand (mittlerer Vorlauf)	Hoher Aufwand (hoher Vorlauf)	Sehr hoher Aufwand (sehr hoher Vorlauf)
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	1	Kein Aufwand.			
2: Leilac	1	Kein Aufwand.			
3: Wasserstoff	5	Insofern der Elektrolyseur nicht direkt am Zementwerk errichtet wird, muss eine H ₂ -Infrastruktur errichtet oder eine vorhandene (Erdgas-)Infrastruktur umgenutzt werden. Für die Bewertung wird hier nicht angenommen, dass der Elektrolyseur direkt am Zementwerk steht (in dem Fall wäre die Infrastrukturabhängigkeit Elektrizität höher zu bewerten). Stattdessen wird davon ausgegangen, dass eine H ₂ -Infrastruktur zumindest teilweise neu errichtet werden muss.			
4: Biomasse	1	Kein Aufwand.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Sonstige (z. B. Logistik, Verkehrsinfrastruktur)

Tabelle 70: Indikator 10.3: Infrastrukturabhängigkeit: Sonstige Infrastruktur

Skala: Aufwand und (zeitlicher Vorlauf)					
1	2	3	4	5	6
Kein Aufwand (sofort)	Geringer Aufwand (nicht sofort)	Mäßiger Aufwand (mäßiger Vorlauf)	Mittlerer Aufwand (mittlerer Vorlauf)	Hoher Aufwand (hoher Vorlauf)	Sehr hoher Aufwand (sehr hoher Vorlauf)
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	4	Für die Sammlung und Aufbereitung (zusätzlicher) ABS ist der Aufbau geeigneter Logistikketten erforderlich, insbesondere falls neuartige ABS genutzt werden sollen.			
2: Leilac	1	Kein Aufwand.			
3: Wasserstoff	1	Kein Aufwand.			
4: Biomasse	2	Der Transport großer Mengen Biomasse erfordert ggf. kleinere Anpassungen der Logistik.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

B.4.12 Indikator 11: Anlagensicherheit

Stoffbezogene Risiken

Indikator 11.1a: Risiken durch Humantoxizität

Tabelle 71: Indikator 11.1a: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Humantoxizität

Skala: Stoffbezogene Risiken (Humantoxizität)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	3	Durch ABS werden diverse potenziell humantoxische Stoffe (z. B. Quecksilber, gasförmige Chlorverbindungen, Polychlorierte Dibenzo-p-dioxin und -dibenzofurane; UBA 2020a) in den Prozess eingebracht. Für eine Ungefährlichkeit des Prozesses ist auf eine korrekte Fahrweise (geeignet hohes T-Niveau und Verweildauer) des Ofens sowie geeignete Emissionsschutztechnik zu achten. Durch Fehler oder technische Ausfälle können Risiken entstehen.			
2: Leilac	1	Kein Risiko bekannt.			
3: Wasserstoff	1	Keine Risiken bekannt.			
4: Biomasse	1	Keine Risiken bekannt.			

* Bewertungsebene 1 (Standort)

Indikator 11.1b: Risiken durch Ökotoxizität**Tabelle 72: Indikator 11.1b: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Ökotoxizität**

Skala: Stoffbezogene Risiken (Ökotoxizität)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	3	s. 11.1.a			
2: Leilac	1	Kein Risiko bekannt.			
3: Wasserstoff	1	Keine Risiken bekannt.			
4: Biomasse	1	Keine Risiken bekannt.			

* Bewertungsebene 1 (Standort)

11.1c: Risiken durch niedrigen Flammpunkt

Tabelle 73: Indikator 11.1c: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko niedriger Flammpunkt

Skala: Stoffbezogene Risiken (niedriger Flammpunkt)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	1	Keine Risiken bekannt.			
2: Leilac	1	Kein Risiko bekannt.			
3: Wasserstoff	1	Keine Risiken bekannt.			
4: Biomasse	1	Keine Risiken bekannt.			

* Bewertungsebene 1 (Standort)

11.1d: Risiken durch Bildung zündfähiger Gemische**Tabelle 74: Indikator 11.1d: I: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Bildung zündfähiger Gemische**

Skala: Stoffbezogene Risiken (Bildung zündfähiger Gemische)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	1	Keine Risiken bekannt.			
2: Leilac	1	Kein Risiko bekannt.			
3: Wasserstoff	3	Gemäß DWV (2011) ²⁸ ist Wasserstoff selbst nicht explosionsfähig und kann nur in Mischungsverhältnissen von 4 bis 77 Vol.-% H ₂ in Luft gezündet werden (zum Vergleich Methan: 4,4 bis 17 Vol.-%) ²⁹ . Der Einsatz von Wasserstoff in der Industrie scheint im Vergleich zu anderen Technologien nicht gefährlicher zu sein bzw. die Risiken erscheinen nicht unzumutbar hoch und können ohne besonders aufwendige Maßnahmen bewältigt werden.			
4: Biomasse	1	Keine Risiken bekannt.			

* Bewertungsebene 1 (Standort)

²⁸ DWV 2011. DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium. www.h2de.de²⁹ s.a. BAM 2016: Sicherheitstechnische Eigenschaften von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:koby:b43-372977>

Indikator 11.1e: Risiken durch sonstige heftige Reaktionen

Tabelle 75: Indikator 11.1e: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko sonstige heftige Reaktionen

Skala: Stoffbezogene Risiken (sonstige heftige Reaktionen)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	1	Keine Risiken bekannt.			
2: Leilac	1	Kein Risiko bekannt.			
3: Wasserstoff	1	Keine Risiken bekannt.			
4: Biomasse	1	Keine Risiken bekannt.			

* Bewertungsebene 1 (Standort)

Prozessbezogene Risiken

Indikator 11.2a: Risiken durch hohe Temperaturen

Tabelle 76: Indikator 11.2a: Anlagensicherheit: Prozessbezogene Risiken: Risiken durch hohe Temperaturen

Skala: Prozessbezogene Risiken (hohe Temperaturen)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	1	Das Temperaturniveau des Klinkerbrennprozesses ist unabhängig vom Brennstoff.			
2: Leilac	1	Das Temperaturniveau des Klinkerbrennprozesses ist unabhängig vom Brennstoff.			
3: Wasserstoff	1	Das Temperaturniveau des Klinkerbrennprozesses ist unabhängig vom Brennstoff.			
4: Biomasse	1	Keine Risiken bekannt.			

* Bewertungsebene 1 (Standort)

Indikator 11.2b: Risiken durch hohe Drücke

Tabelle 77: Indikator 11.2b: Anlagensicherheit: Prozessbezogene Risiken: Risiken durch hohe Drücke*

Skala: Prozessbezogene Risiken (hohe Drücke)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	1	Risiken durch hohe Drücke sind nicht bekannt.			
2: Leilac	1	Risiken durch hohe Drücke sind nicht bekannt.			
3: Wasserstoff	3	Das Temperaturniveau des Klinkerbrennprozesses ist unabhängig vom Brennstoff.			
4: Biomasse	1	Keine Risiken bekannt.			

* Bewertungsebene 1 (Standort)

B.4.13 Indikator 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen

Indikator 12.1: Gasförmige Emissionen (z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide oder Quecksilber)

Tabelle 78: Indikator 12.1: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Gasförmige Emissionen (z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide, Quecksilber)

Skala: Stärke der Veränderung (gasförmige Emissionen)					
1	2	3	4	5	6
Entfallen	Nehmen stark ab	Nehmen leicht ab	Bleiben unverändert	Nehmen zu	Nehmen stark zu
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	5	Durch eine Ausweitung des Einsatzes von ABS nehmen die gasförmigen Emissionen weiter zu (vgl. Indikator 11.1a; UBA 2020a)			
2: Leilac	3	Durch Ersatz von fossilen Brennstoffen (insbesondere Kohle und ABS) werden gasförmige Emissionen gemindert. Genannt seien hier Quecksilber und Chlorverbindungen. Diese Stoffe werden jedoch anteilig auch über die Rohstoffe in den Klinkeröfen eingebracht, daher ist nicht von einer vollständigen Vermeidung auszugehen. Weitere relevante gasförmige Emissionen – insbesondere Stickoxide und Schwefeldioxid – entstehen unabhängig vom genutzten Brennstoff aufgrund der Brenntemperaturen (Stickoxid) bzw. durch rohstoffbedingten Eintrag (Schwefel). Daher, und aufgrund des begrenzten Einsatzes von Wasserstoff, wird (nur) von einer leichten Abnahme der gasförmigen Emissionen ausgegangen.			
3: Wasserstoff	3	Durch Ersatz von fossilen Brennstoffen (insbesondere Kohle und ABS) werden gasförmige Emissionen gemindert. Genannt seien hier Quecksilber und Chlorverbindungen. Diese Stoffe werden jedoch anteilig auch über die Rohstoffe in den Klinkeröfen eingebracht, daher ist nicht von einer vollständigen Vermeidung auszugehen. Weitere relevante gasförmige Emissionen – insbesondere Stickoxide und Schwefeldioxid – entstehen unabhängig vom genutzten Brennstoff aufgrund der Brenntemperaturen (Stickoxid) bzw. durch rohstoffbedingten Eintrag (Schwefel). Daher, und aufgrund des begrenzten Einsatzes von Wasserstoff, wird (nur) von einer leichten Abnahme der gasförmigen Emissionen ausgegangen.			
4: Biomasse	3	Durch Ersatz von fossilen Brennstoffen (insbesondere Kohle) und ABS werden gasförmige Emissionen gemindert. Genannt seien hier Quecksilber und Chlorverbindungen. Diese Stoffe werden jedoch anteilig auch über die Rohstoffe in den Klinkeröfen eingebracht, daher ist nicht von einer vollständigen Vermeidung auszugehen. Weitere relevante gasförmige Emissionen – insbesondere Stickoxide und Schwefeldioxid – entstehen unabhängig vom genutzten Brennstoff aufgrund der Brenntemperaturen (Stickoxid) bzw. durch rohstoffbedingten Eintrag (Schwefel). In Summe wird daher beim Einsatz von Biomasse nur von einer leichten Abnahme der gasförmigen Emissionen ausgegangen.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Indikator 12.2: Abwässer (z. B. Säuren, Laugen)

Tabelle 79: Indikator 12.2: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Abwässer (z. B. Säuren, Laugen)

Skala: Stärke der Veränderung (Abwässer)					
1	2	3	4	5	6
Entfallen	Nehmen stark ab	Nehmen leicht ab	Bleiben unverändert	Nehmen zu	Nehmen stark zu
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	4	Eine Auswirkung auf das Aufkommen von Abwässern ist nicht bekannt.			
2: Leilac	4	Eine Auswirkung auf das Aufkommen von Abwässern ist nicht bekannt.			
3: Wasserstoff	4	Eine Auswirkung auf das Aufkommen von Abwässern ist nicht bekannt.			
4: Biomasse	4	Eine Auswirkung auf das Aufkommen von Abwässern ist nicht bekannt.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Indikator 12.3: Feste Abfallstoffe (z. B. Aschen, Filterstäube)

Tabelle 80: Indikator 12.3: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Feste Abfallstoffe (z. B. Aschen, Filterstäube)

Skala: Stärke der Veränderung (Feste Abfallstoffe)					
1	2	3	4	5	6
Entfallen	Nehmen stark ab	Nehmen leicht ab	Bleiben unverändert	Nehmen zu	Nehmen stark zu
Option	Skala	Begründung			
1: ABS	3	Durch die stoffliche Nutzung der Verbrennungsaschen im Klinker wird das Abfallaufkommen auf Ebene 2 reduziert (weniger Aschen / Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen).			
2: Leilac	4	Eine Auswirkung auf das Aufkommen von festen Abfallstoffen ist nicht bekannt.			
3: Wasserstoff	4	Eine Auswirkung auf das Aufkommen von festen Abfallstoffen ist nicht bekannt.			
4: Biomasse	4	Eine Auswirkung auf das Aufkommen von festen Abfallstoffen ist nicht bekannt.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

C Anhang: Exemplarischer Test des Bewertungsschemas für die Stahlindustrie: Vergleichende Bewertung von Optionen zur kohlefreien Herstellung von Stahl

Autor: Ali Aydemir

Im DekarbInd-Projekt wurde ein multikriterielles Bewertungsschema für Techniken, Verfahren und Maßnahmen zur deutlichen Minderung industrieller THG-Emissionen entwickelt. Das Schema wurde im Projekt beispielhaft für Techniken in der Stahl- und Zementindustrie getestet. Dieser Anhang befasst sich mit dem Test für die Stahlindustrie. Gegenstand des Tests ist eine vergleichende Bewertung von drei Optionen für die kohlefreie Herstellung von Stahl aus Erzen.

- ▶ **DRI-Erdgas:** Hierbei handelt es sich um die Herstellung von Stahl über das Erdgas-DRI-Verfahren und einen Elektroofen. Beim Erdgas-DRI-Verfahren wird Erdgas verwendet, um ein Reduktionsgas zu erzeugen, das dann in einem Schachtofen verwendet wird, um aus Erzen Eisenschwamm herzustellen. Der Eisenschwamm wird dann in einem Elektroofen unter Zugabe von anderen Materialien (Schrott, eventuell auch Kohlenstoffquellen) zu Roheisen geschmolzen.
- ▶ **DRI-Wasserstoff-extern:** Dies ist im Grunde das gleiche Verfahren wie DRI-Erdgas, mit dem Unterschied, dass Wasserstoff als Reduktionsmittel im Schachtofen verwendet wird. Bei DRI-Wasserstoff-extern wird davon ausgegangen, dass der Wasserstoff nicht im Stahlwerk produziert wird, sondern über Pipelines von außen an das Werk geliefert wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass 30% des Wasserstoffs in den Pipelines aus der nationalen Produktion stammen und der Rest über den Export von grünem Wasserstoff in das Versorgungsnetz eingespeist wird.
- ▶ **DRI-Wasserstoff-intern:** Dies ist im Grunde das gleiche Verfahren wie DRI-Erdgas, mit dem Unterschied, dass Wasserstoff als Reduktionsmittel im Schachtofen verwendet wird. Bei DRI-Wasserstoff-extern wird jedoch davon ausgegangen, dass der Wasserstoff im Stahlwerk selbst durch Elektrolyse erzeugt wird.

Der Vergleich zielt daher weniger darauf ab, technologische Alternativen miteinander zu vergleichen, sondern vielmehr auf den Kontext, in dem die Technologien eingesetzt werden (welches Reduktionsmittel, wie wird es bereitgestellt). Es geht also ausdrücklich nicht um einen detaillierten technischen Vergleich der einzelnen Technologien. **Außerdem ist zu beachten, dass der Test in erster Linie dazu dient, die Systematik des Bewertungsschemas auszuprobieren und nicht dazu, inhaltliche Aussagen für die Roadmap zu treffen.**

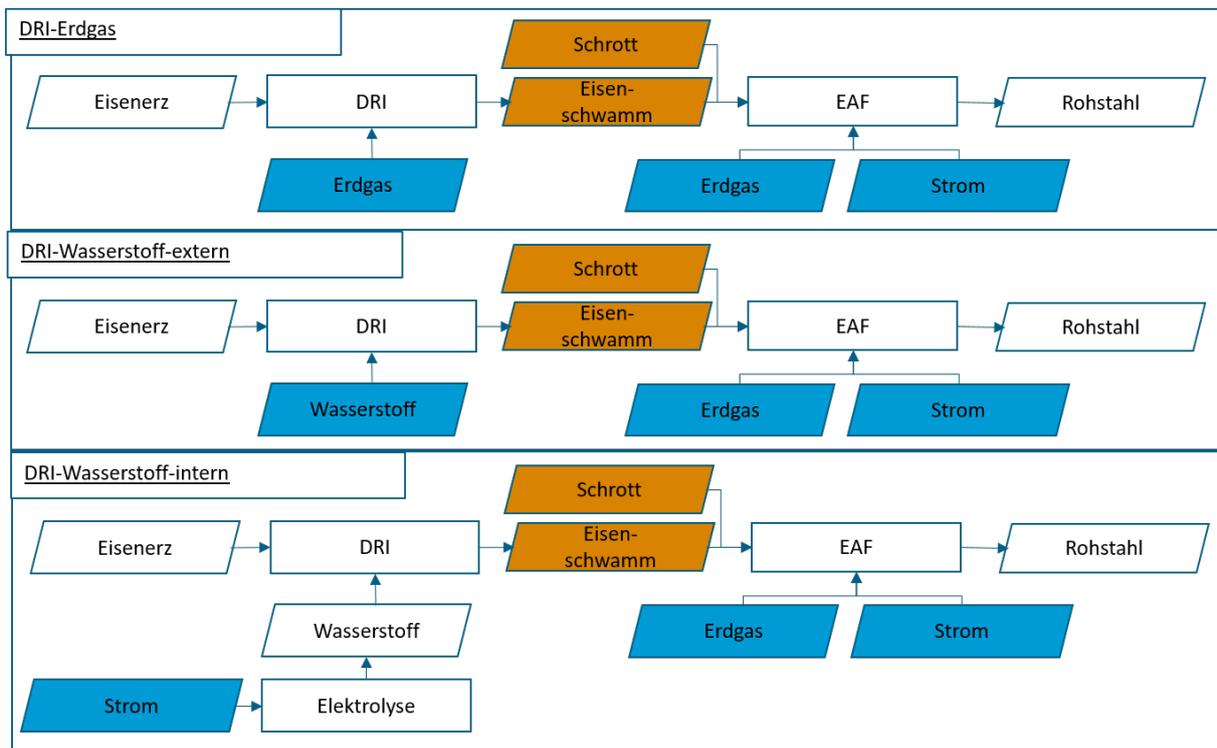
Nachfolgend werden zunächst die betrachteten Systemgrenzen dargestellt und übergreifende Annahmen definiert. Danach folgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse in Kapitel C.2. In Kapitel C.3 werden die Begründungen für die Bewertung der Indikatoren dargestellt.

C.1 Systemgrenzen

Nachfolgende Abbildung 6 zeigt die Systemgrenzen, die zur Berechnung der Energieindikatoren für die drei Optionen verwendet wurden. Blau markierte Felder stellen den berücksichtigten Energiebedarf dar. Orange markierte Felder werden indirekt berücksichtigt, indem ein Eisenschwammbedarf pro Tonne Rohstahl angenommen wird. Der Test bezieht sich

ausschließlich auf die dargestellte Rohstahlbilanzgrenze, d.h. weitere Verarbeitungsschritte (Gießen, Walzen usw.) werden nicht berücksichtigt.

Abbildung 6: Systemgrenzen zur Berechnung der Energieindikatoren



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

Nachfolgende Primärenergie- und Emissionsfaktoren wurden für den Test verwendet.

Tabelle 81: Angenommene Strom- und CO₂-Preise, Primärenergie- und Emissionsfaktoren (plausible Schätzwerte)

Faktoren	Einheit	2020	2030	2040	2050
Primärenergiefaktor für Erdgas (national)	MWh/MWh	1,1			
Emissionsfaktor für Erdgas (national)	t CO ₂ / TJ	55,9			
(fiktiver) Primärenergiefaktor für Strom (national)	MWh/MWh	1,8	1,4	1,1	1,1
(fiktiver) Emissionsfaktor des Stromsystems (national)	g CO ₂ /kWh	400	100	0	0
(fiktiver) Primärenergiefaktor für Strom (H2-Lieferländer)	MWh/MWh	1,4	1,1	1,1	1,1
(fiktiver) Emissionsfaktor des Stromsystems (H2-Lieferländer)	g CO ₂ /kWh	100	0	0	0

C.2 Zusammenfassende Erkenntnisse

Die Bewertungen der Indikatoren für die drei Optionen sind nachfolgend in Abbildung 7 aufgeführt. Einige Indikatoren wurden bewusst nicht berücksichtigt oder ausgeblendet.

Abbildung 7: Zusammenfassende Bewertung der Optionen nach Farbschema.

Optionen		DRI-Erdgas	DRI-Wasserstoff-extern	DRI-Wasserstoff-intern
1	Jahr, in dem TRL 9 erreicht wird	2020	2030	2030
2.1	Spezifischer Energiebedarf (Endenergie)			
2.2	Spezifischer Energiebedarf (Primärenergie)			
3	Spezifische THG-Emissionen			
4	Spezifische Kosten (LCOO)	Nicht verwendet		
5	Grad der prospektiven Pfadabhängigkeit			
6	Grad der zukünftigen Risiken			
7	Grad der regionalen Abhängigkeiten			
8	Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen			
9	Stoffströme und Kreislaufwirtschaft	Ausgeblendet		
10	Infrastruktur-abhängigkeit			
11	Anlagensicherheit	Nicht verwendet		
12	Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen			

Quelle: eigene Darstellung (Bildausschnitt Excel-Tool), Wuppertal Institut

C.2.1 Inhaltliche Erkenntnisse

- ▶ Erdgas-DRI stellen eine Brückentechnologie dar. Im Vergleich zu wasserstoffbasierten DRIs können nationale Treibhausgasminderungen mit vergleichsweise weniger Anpassungen an den Rahmenbedingungen und der Infrastruktur erreicht werden. Allerdings sind Erdgas-DRI keine langfristige Lösung für eine nahezu treibhausgasneutrale Stahlproduktion. Da die Gefahr besteht, auf dem Erdgas-DRI-Pfad zu verharren, müssen rechtzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um dieser Option entgegenzuwirken.
- ▶ Wasserstoff-DRI sind mit dem Endziel einer nahezu treibhausgasneutralen Stahlproduktion vereinbar. Allerdings ist der Energieaufwand für die Herstellung des Wasserstoffs nicht unerheblich, was sich in den Energieindikatoren widerspiegelt. Der Import von Wasserstoff aus Ländern, die einen besonders hohen Anteil an erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung haben, bietet hier eine Chance. Dies spiegelt sich in niedrigen Primärenergie- und Emissionsfaktoren wieder. Dies wurde im Test simuliert, indem für die

Option "Wasserstoff-extern" Primärenergie- und Emissionsfaktoren angenommen wurden, die die nationale Produktion im Test erst später erreicht. Darüber hinaus kann ein Mix aus nationaler Wasserstoffproduktion und Beschaffung aus internationalen Quellen Pfadabhängigkeiten, regionale Abhängigkeiten und zukünftige Risiken minimieren. Bei der Planung einer wasserstoffbasierten Stahlproduktion scheint es daher lohnenswert, dies direkt zu berücksichtigen und die Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass auch außerhalb der Stahlindustrie eine Wasserstoffwirtschaft entsteht, die sowohl nationale als auch internationale Potenziale ausschöpft.

C.2.2 Methodische Erkenntnisse

- ▶ Einige Indikatoren verwenden viele Unterindikatoren (z. B. Indikator 9). Das kann wichtige Aussagen verwischen. Z. B. helfen DRI-Anlagen grundsätzlich, den Einsatz von Schrott zu erhöhen. Im Test geht dieser positive Aspekt in der Arithmetik unter, da Aspekte im Bereich der kritischen Rohstoffe überwiegen. Darauf sollte bei der Interpretation der Farben geachtet werden.
- ▶ Einige Indikatoren erfordern eher den Vergleich zwischen den betrachteten Optionen, für andere (z. B. Indikator 12) ist ein sinnvoller Bezug zum Stand der Technik notwendig. Dies kann jedoch mitunter sehr umfangreich werden.
- ▶ Teilweise könnte die Abstufung zwischen den Noten eine Schwierigkeit sein. Im Test fiel das bei Indikator 12.1 auf. Wasserstoff-DRI sind unter Emissionsgesichtspunkten besser als Erdgas-DRI, aber es kann nicht davon ausgegangen werden, dass es bei Wasserstoff-DRI keine Emissionen mehr gibt. Da der Vergleich mit dem Stand der Technik (Hochofen) durchgeführt wurde, konnte dies jedoch nicht dargestellt werden.
- ▶ Insgesamt hilft das Schema dabei, verschiedene Aspekte im Blick zu behalten. Es sollte jedoch immer betont werden, dass viele Indikatoren qualitativer Natur sind und ihre Bewertung stark vom Wissensstand, aber auch von subjektiven Präferenzen und dem Zeitpunkt abhängen kann. Im Test wurde zum Beispiel die Einstufung einer Note mehrmals aufgrund äußerer Ereignisse geändert, z. B. im Fall von Erdgas-DRI angesichts des aktuellen Krieges in der Ukraine.

C.3 Bewertung der Optionen

C.3.1 Indikator 1: Technische Verfügbarkeit

Tabelle 82: Indikator 1: Technische Verfügbarkeit: Jahr, in dem TRL 9 erreicht ist*

Option	2020	2030	2040	2050	Begründung
1: DRI-Erdgas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	DRI-Anlagen mit Erdgas sind Stand der Technik.
2: DRI-Wasserstoff-extern	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Eine erste Demonstrationsanlage mit Wasserstoff wird in Salzgitter gebaut. Studien gehen davon aus, dass Wasserstoff-DRI-Anlagen bis spätestens 2030 marktreif sein werden. ³⁰
3: DRI-Wasserstoff-intern	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

³⁰ Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Internet. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf

C.3.2 Indikator 2: Energieeffizienz

Indikator 2.1: Spezifischer Energiebedarf (Endenergie)

Tabelle 83: Indikator 2.1: Energieeffizienz: Spezifischer Energiebedarf (exklusive Rohstoffaufbereitung) *

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung bzw. Annahmen zur Berechnung				
1: DRI-Erdgas	GJ/t	11,0					Kategorie	Wert	Einheit	Quelle
						DRI-CH4	Erdgasbedarf	9,7	GJ-Erdgas / t-Eisenschwamm	Hölling et al.
						DRI-CH4	Strombedarf	0,5	GJ-Strom / t-Eisenschwamm	Weigel (2014)
						DRI-CH4	THG (direkt)	0,54	t-CO2.äq /t-Eisenschwamm	Berechnet
2: DRI-Wasserstoff-extern	GJ/t	10,2				DRI-CH4	Eisenschwammbedarf	0,8	t-Eisenschwamm / t-Roheisen	Annahme
						DRI-H2	Wasserstoffbedarf (DRI)	8,7	GJ-H2 / t-Eisenschwamm	Weigel (2014)
						DRI-H2	Strombedarf	0,5	GJ-Strom / t-Eisenschwamm	Weigel (2014)
						DRI-H2	THG (direkt)	0	t-CO2.äq /t-Eisenschwamm	Annahme
3: DRI-Wasserstoff-intern	GJ/t	13,1				DRI-H2	Eisenschwammbedarf	0,8	t-Eisenschwamm / t-Roheisen	Annahme
						EAF	Erdgasbedarf	0,8	GJ-Erdgas / t-Rohstahl	Weigel (2014)
						EAF	Strombedarf EAF	2	GJ-Strom / t-Rohstahl	Weigel (2014)
						EAF	THG (direkt)	0,04	t-CO2.äq /t-Rohstahl	Berechnet
						Elektrolyse	Wirkungsgrad	0,7	-	Annahme

Weigel (2014): Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal. Internet: <https://d-nb.info/1071378708/34>.

Hölling et al.: Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff. Fachbeitrag. Internet:

<https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/med/b8e/b8e0c15a-102c-d51d-b2a9-147d7b2f25d3,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf>.

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

Indikator 2.2: Spezifischer Energiebedarf (Primärenergie)**Tabelle 84: Indikator 2.2: Energieeffizienz: Spezifischer Energiebedarf***

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung
1: DRI-Erdgas	GJ/t	13,6	12,56	11,6	11,6	Annahmen wie bei Indikator 2.1, kombiniert mit Annahmen aus Tabelle 1.
2: DRI-Wasserstoff-extern	GJ/t	18,8	14,7	14,7	13,6	
3: DRI-Wasserstoff-intern	GJ/t	23,1	18,2	14,5	14,5	
* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)						

C.3.3 Indikator 3: Treibhausgas-Effizienz

Tabelle 85: Indikator 3: Treibhausgas-Effizienz*

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung
1: DRI-Erdgas	GJ/t	1,1	0,7	0,5	0,5	Annahmen wie bei Indikator 2.1, kombiniert mit Annahmen aus Tabelle 1.
2: DRI-Wasserstoff-extern	GJ/t	1,0	0,2	0,05	0,05	Hierbei ist zu beachten, dass für die Berechnung der Emissionen länderspezifische Emissionsfaktoren verwendet wurden. Vorgelagerte Emissionen außerhalb der Landesgrenze (Methanlecks usw.) werden daher nicht berücksichtigt. Für den Test wurde fiktiv angenommen, dass für die Option "Wasserstoff-extern" niedrigere Emissionsfaktoren für Strom vorliegen, die die nationale Produktion erst später erreicht.
3: DRI-Wasserstoff-intern	GJ/t	2,5	0,5	0,05	0,05	

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

C.3.4 Indikator 4: Spezifische Kosten

Indikator wurde für den Test bewusst nicht verwendet.

Tabelle 86: Indikator 4: Spezifische Kosten*

Option	Einheit	2020	2030	2040	2050	Begründung

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort) (Capex und Opex)

C.3.5 Indikator 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in Effekten

Tabelle 87: Indikator 5: Erzeugung von Pfadabhängigkeiten oder Lock-in-Effekten *

Skala: Stärke der prospektiven Pfadabhängigkeit					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe

Option	Skala	Begründung
DRI-Erdgas	4	<p><u>Contra Lock-In</u></p> <p>Aus Unternehmenssicht: Der Aufwand zur Schaffung von Strukturen für das Reduktionsmittel "Erdgas" ist im Vergleich zu Wasserstoff geringer (geringere Investitionen).</p> <p>Aus Staatssicht: Ein Anreizsystem für einen späteren Umstieg von Erdgas auf Wasserstoff ist realistisch, schließlich wurden in den Unternehmen keine versunkenen Investitionen getätigt (s.o.).</p> <p><u>Pro Lock-In</u></p> <p>Aus Staats- und Unternehmenssicht: Erdgas ist ein im Vergleich zu Strom günstiger Energieträger. Wenn die Energiewende weltweit an Fahrt gewinnt, wird Erdgas bei sinkender Nachfrage voraussichtlich günstiger werden; sofern das Angebot nicht künstlich verknappt wird oder besonders hohe CO₂-Preise dies kompensieren. Das kann bedeuten, dass die Stahlproduktion mit Erdgas lange Zeit rentabler sein kann als die Produktion mit Wasserstoff, falls dies nicht über Maßnahmen (CO₂-Preis, Subventionen) kompensiert wird. Zahlenbeispiel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Besonders optimistische Projektionen gehen von Preisen für grünen Wasserstoff zwischen 9 und 12 ct./kWh in 2030 und 6 und 9 ct./kWh in 2050 aus (statista (2021)). • Für Erdgas werden in prognos (2020) Energiepreise zwischen 3 und 4 ct./kWh für 2030 bis 2050 projiziert. • Rechnet man vereinfacht mit (9-4)=5 ct./kWh Kostenunterschied (2030-2050) dann würde dies einen Unterschied in den Energiekosten (Annahme 9,7 GJ/t bei Erdgas-DRI, 9,2 GJ/t bei Wasserstoff-DRI) von etwa 120 €/t bedeuten. • Geht man nun von 0,8 tCO₂/t direkten Emissionen aus, dann müssten die CO₂-Preise über 150 €/t liegen, um den Kostenunterschied zu kompensieren.

Option	Skala	Begründung
DRI-Wasserstoff-extern	2	<p><u>Contra Lock-In</u> Aus Unternehmenssicht</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Aufwand für die Schaffung von Strukturen (Rohrleitungen usw.) für den Transport des Reduktionsmittels "Wasserstoff" zum Stahlwerk ist begrenzt; verglichen mit der Produktion von Wasserstoff im Werk. • Wenn nicht genügend Wasserstoff zur Verfügung steht, kann Erdgas verwendet werden. • Wenn es sinnvoll ist, mehr Schrott zu verwenden, bleibt dies möglich und ist eine Alternative. <p>Aus Staatssicht:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Staat hat sich in diesem Fall auf die Schaffung internationaler Lieferbeziehungen und Übergabepunkte (Häfen,..) fokussiert. Diese werden aber ggf. für andere Sektoren auch gebraucht. • Der Staat kann sicherstellen, dass ausreichend Wasserstoff zu einem angemessenen Preis zur Verfügung steht. Die "externe" Beschaffung durch Abnehmer kann es dem Staat ermöglichen, die sinnvollsten Bezugsquellen für den Wasserstoff zu erschließen bzw. zu fördern (z. B. Kombination von Inland/Ausland etc.). • Wenn zum Beispiel Wasserstoffproduzenten und -verteiler eigenständige Marktteilnehmer sind, dann können für diese Teilnehmer zielgerichtete Policies entwickelt werden. <p><u>Pro Lock-In</u> Aus Staatssicht: Die Schaffung von Infrastrukturen für die Versorgung von Unternehmen mit Wasserstoff bedeutet einen hohen Aufwand (Investitionen,...) und Koordination seitens des Staates. Sollte es in Zukunft sinnvoll sein einen höheren Schrotteinsatz oder höhere Eisenschwammimporte anzustreben, die dazu führen, dass weniger Wasserstoff benötigt wird, dann sind möglicherweise große Strukturen geschaffen worden (Marktteilnehmer, Infrastrukturen), die einen Abbau von Kapazitäten erschweren könnten.</p> <p>Prämisse: die wasserstofferzeugenden Strukturen sind erneuerbar, d.h. es besteht keine Gefahr für ein Carbon-Lock-In.</p>
DRI-Wasserstoff-intern	5	<p><u>Contra Lock-In</u> -</p> <p><u>Pro Lock-In</u> Aus Unternehmenssicht: Die Entwicklung von Strukturen für die Produktion von Wasserstoff direkt vor Ort ist verglichen zu den anderen beiden Varianten eher hoch. Neben Investitionen für die Integration von Wasserstoff (DRI + Elektrolichtbogenofen) sind weitere relevante Komponenten wie z. B. Elektrolyseure etc. zu beschaffen. Wenn es nun langfristig sinnvoll ist, z. B. mehr Schrott zu verwenden, dann sind bereits große Summen in die Wasserstoffstrukturen investiert worden, was einen Kapazitätsabbau in diesem Bereich unattraktiv machen kann (Vermeiden von sunk investments).</p>

Option	Skala	Begründung
		<p>Aus Staatssicht: Will der Staat z. B. die Reduktion des Wasserstoffeinsatzes im Stahlsektor fördern, z. B. weil höhere Recyclingquoten oder eine geringere Produktion angestrebt werden, so ist dies schwierig, weil die Stahlunternehmen bereits so viel investiert haben. In diesem Fall ist der Staat stärker gebunden als bei der Variante "Wasserstoff-extern", da Unternehmen angereizt werden müssen, deren Hauptzweck nicht die Wasserstoffproduktion, sondern die Stahlproduktion ist. Sind diese Bereiche getrennt, erscheint der staatliche Handlungsspielraum bei den Anreizsystemen größer.</p> <p>Prämisse: die wasserstofferzeugenden Strukturen sind erneuerbar, d.h. es besteht keine Gefahr für ein Carbon-Lock-In.</p>

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

C.3.6 Indikator 6: Zukünftige Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen

Tabelle 88: Indikator 6: Grad der zukünftigen Risiken für die Minimierung der THG-Emissionen*

Skala: Stärke der zukünftigen Risiken (Minderung THG-Emissionen)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe

Option	Skala	Begründung
Allgemeine Anmerkungen	-	Orientiert sich im Prinzip an den Texten zu Kriterium 5, Bewertung auf Basis vergleichender Darstellung.
DRI-Erdgas	4	Bezieht sich auf das Risiko, mittel- bis langfristig auf dem Erdgaspfad zu verharren, was wiederum das Erreichen der Treibhausgasziele behindert.
DRI-Wasserstoff-extern	2	Bezieht sich auf das Risiko einer unzureichenden Versorgung mit grünem Wasserstoff für die Stahlwerke, was wiederum die Erreichung der Treibhausgasziele behindert. Die Versorgung mit grünem Wasserstoff in der Variante "Wasserstoff-extern" kann entweder i) durch die Versorgung mit grünem Wasserstoff aus heimischer Produktion oder ii) durch grünen Wasserstoff vom Weltmarkt erfolgen. <ul style="list-style-type: none"> • Bei i) stellt ein zu langsamer nationaler Ausbau der Kapazitäten für grünen Wasserstoff das Risiko dar. • Bei ii) stellt ein zu langsamer internationaler Ausbau der Kapazitäten für grünen Wasserstoff das Risiko dar.
DRI-Wasserstoff-intern	4	Im Prinzip bestehen hier die gleichen nationalen Risiken (Strommix) wie bei der Variante "DRI-Wasserstoff-extern". Darüber hinaus werden weniger Chancen im Bereich des Zukaufs von grünem Wasserstoff auf dem internationalen Markt gesehen. Dies liegt daran, dass in dieser Variante weniger Strukturen zur Integration von externem Wasserstoff geschaffen werden, zumal die Stahlunternehmen in diesem Fall in "große" Elektrolyseure investiert haben.

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

C.3.7 Indikator 7: Grad der regionalen Abhängigkeiten

Tabelle 89: Indikator 7: Grad der regionalen Abhängigkeiten*

Skala: Stärke der regionalen Abhängigkeit					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-	Orientiert sich im Prinzip an den Texten zu Kriterium 5, Bewertung auf Basis vergleichender Darstellung. Zudem allgemeine Informationen zu Erzen: Derzeit gibt es keinen Mangel an Erzen für DRI-Anlagen, aber das könnte sich in Zukunft ändern. Darüber hinaus wird an der Verwendung anderer Erzqualitäten für DRI-Anlagen geforscht (Informationen aus den Interviews). Dies betrifft jedoch alle drei Varianten gleichermaßen. Daher ein Vergleich auf Basis der Verfügbarkeit von Erdgas/Wasserstoff.			
DRI-Erdgas	3	Bezieht sich auf das Risiko einer unzureichenden Versorgung mit Erdgas. Die Abhängigkeit wird als eher gering eingeschätzt. Zwar besteht derzeit aufgrund des Krieges in der Ukraine ein höheres Risiko, aber es ist davon auszugehen, dass die Bundesregierung Maßnahmen ergreifen wird, um dieses Risiko mittelfristig zu verringern (z. B. durch eine stärkere Diversifizierung unter den Lieferanten).			
DRI-Wasserstoff-extern	2	Bezieht sich auf das Risiko einer unzureichenden Versorgung der Stahlwerke mit grünem Wasserstoff entweder durch nationale oder internationale Produktion. Zwar gibt es derzeit keinen bedeutenden nationalen oder globalen Markt für grünen Wasserstoff, aber es könnte sich einer entwickeln. Der Ukraine-Krieg könnte dies möglicherweise noch stärker vorantreiben. Ggf. können Wasserstoffimporte zudem besser diversifiziert werden im Vergleich zu Erdgas (da es z. B. mehr gute Standorte für die Wasserstoffproduktion gibt im Vergleich zur Gasförderung).			
DRI-Wasserstoff-intern	3	Bezieht sich auf das Risiko einer unzureichenden Versorgung mit grünem Wasserstoff. Wenn Wasserstoff nur dann grün ist, wenn er aus erneuerbarem Strom stammt (z. B. nach dem aktuellen REDII-Vorschlag), dann ist der Engpass der erneuerbare Strom. Wenn der Ausbau zu langsam ist, besteht hier ein Risiko.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

C.3.8 Indikator 8: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen

Tabelle 90: Indikator 8: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen*

Skala: Umfang der notwendigen Rahmenbedingungen					
1	2	3	4	5	6
Keine	Wenige, einfach zu implementieren	Viele, einfach zu implementieren	Wenige, aber ggf. schwierig umzusetzen	Viele, zudem teilweise schwierig umzusetzen	Sehr viele und viele schwierig umzusetzen
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-	-			
DRI-Erdgas	2	In erster Linie muss der regulatorische Rahmen so angepasst werden, dass erdgasbetriebene DRI-Anlagen im Vergleich zu bestehenden Technik (Hochofen) wettbewerbsfähig sind. Technisch gesehen sind erdgasbefeuerte DRI-Anlagen Stand der Technik und seit Jahrzehnten in Betrieb.			
DRI-Wasserstoff-extern	4	In erster Linie muss der regulatorische Rahmen angepasst werden, damit DRI-Anlagen auf Basis von grünem Wasserstoff im Vergleich zur bestehenden Technologie (Hochofen) wettbewerbsfähig sind. Außerdem müssen Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff und dessen Transport geschaffen werden. Außerdem müssen internationale Importkanäle zur Diversifizierung geschaffen werden. Darüber hinaus müssen auf grünem Wasserstoff basierende DRI-Anlagen getestet werden.			
DRI-Wasserstoff-intern	4	In erster Linie muss der regulatorische Rahmen angepasst werden, damit DRI-Anlagen auf Basis von grünem Wasserstoff im Vergleich zur bestehenden Technologie (Hochofen) wettbewerbsfähig sind. Außerdem müssen Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff und dessen Transport geschaffen werden. Darüber hinaus müssen auf grünem Wasserstoff basierende DRI-Anlagen getestet werden.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

C.3.9 Indikator 9: Stoffströme und Kreislauf

Indikator 9.1: Veränderungen von Stoffströmen

Indikator 9.1a: Intersektorale Rückwirkungen

Tabelle 91: Indikator 9.1a: Veränderung von Stoffströmen: Intersektorale Rückwirkungen*

Skala: Veränderungen von Stoffströmen					
1	2	3	4	5	6
Keine Rückwirkungen/Veränderungen durch den neuen Prozess	Geringe Rückwirkungen, die keine Probleme aufwerfen	Geringe Rückwirkungen, aber Handlungsbedarf	Relevante Rückwirkungen, die mit überschaubarem Aufwand gelöst werden können	Starke Rückwirkungen, die einen hohen Aufwand für eine Umorganisation bedeuten	Starke Rückwirkungen mit Nachteilen für eine andere Branche
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-	-			
DRI-Erdgas	3	Es entfällt Hüttensand für die Zementindustrie. Dies muss möglicherweise kompensiert werden. Gegebenenfalls kann ein Teil der Schlacke aus Elektroöfen verwendet werden, was noch untersucht werden muss. Siehe z. B. https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/KlimPro/save_co2.php			
DRI-Wasserstoff-extern	3				
DRI-Wasserstoff-intern	3				

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Indikator 9.1b: Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen

Tabelle 92: Indikator 9.1b: Veränderung von Stoffströmen: Einsatz von gefährlichen und umweltschädlichen Stoffen *

Skala: Veränderungen von Stoffströmen					
1	2	3	4	5	6
Positive Veränderung durch den neuen Prozess (gefährliche Einsatzstoffe fallen weg)	Geringe positive Veränderung durch den neuen Prozess (....)	Keine Veränderung durch den neuen Prozess	Geringe negative Veränderung durch den neuen Prozess (wenige problematische Einsatzstoffe)	Negative Veränderung durch den neuen Prozess (viele problematische Einsatzstoffe)	Sehr negative Veränderung durch den neuen Prozess (Einsatz von Stoffen, die nicht akzeptierbar sind)
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-	Kriterium nicht im Detail untersucht. Daher Annahme „3“.			
DRI-Erdgas	3	Annahme			
DRI-Wasserstoff-extern	3				
DRI-Wasserstoff-intern	3				

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Indikator 9.1c: Verwendung kritischer Rohstoffe

Tabelle 93: Indikator 9.1c: Veränderung von Stoffströmen: Verwendung kritischer Rohstoffe *

Skala: Veränderungen von Stoffströmen					
1	2	3	4	5	6
Keine Verwendung kritischer Rohstoffe durch den neuen Prozess	Verwendung eines kritischen Rohstoffs ...	Verwendung von 2-3 kritischen Rohstoffen ...	Verwendung von 4-5 kritischen Rohstoffen ...	Verwendung von 6-7 kritischen Rohstoffen ...	Verwendung von mehr als 7 kritischen Rohstoffen ...
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-				
DRI-Erdgas	2	Für den Betrieb von DRI-Anlagen sind spezielle Erze notwendig, deren Verfügbarkeit kritisch werden könnte.			
DRI-Wasserstoff-extern	6	Für den Betrieb von DRI-Anlagen sind spezielle Erze notwendig, deren Verfügbarkeit kritisch werden könnte.			
DRI-Wasserstoff-intern	6	Zudem sind kritische Rohstoffe für den Bau von Elektrolyseanlagen notwendig, je nach Typ (AEC, PEM, PEMEC), unterschiedlich viele. Z. B. bei PEM Platin als Katalysator. Zahlreiche weitere Elemente werden je nach Typ in Literaturquellen genannt. https://www.researchgate.net/publication/324107128_Energieinstitut_an_der_JKU_Linz_-_Analyse_Kritischer_Rohstoffe_von_Elektrolyseuren			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Indikator 9.2: Grad der Kreislaufwirtschaft

Indikator 9.2a: Sektorale Abfallintensität

Tabelle 94: Indikator 9.2a: Grad der Kreislaufwirtschaft: Sektorale Abfallintensität *

Skala: Grad der sektoralen Abfallintensität (Prozentuale Veränderung ggü. Referenzjahr der Einführung der zu bewertenden Technologie)					
1	2	3	4	5	6
Starke Abnahme (-5 % oder mehr)	Mittlere Abnahme (-2 % oder mehr)	Geringe Abnahme (bis zu 2 %)	Geringer Anstieg (bis zu 2 %)	Mittlerer Anstieg (bis zu 5 %)	Starker Anstieg (5 % oder mehr)
Option	Skala	Begründung ³¹			
Allgemeine Anmerkungen	-	Kriterium nicht verwendet.			
DRI-Erdgas	3	Annahme, für alle 3.			
DRI-Wasserstoff-extern	3				
DRI-Wasserstoff-intern	3				

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

³¹ Die vorgesehene Berechnung wurde im Rahmen des Tests nicht durchgeführt.

Indikator 9.2b: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen

Tabelle 95: Indikator 9.2b: Grad der Kreislaufwirtschaft: Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen *

Skala: Grad der Ressourcenschonung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen					
1	2	3	4	5	6
Sehr hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 50 Mio. t oder mehr)	Hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 20 Mio. t oder mehr)	Hohe Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 10 Mio. t oder mehr)	Niedrige Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 2 Mio. t oder mehr)	Sehr niedrige Ressourcenschonung (Steigerung des DIERec um 1 Mio. t oder mehr)	Keine Ressourcenschonung
Option	Skala	Begründung ³²			
Allgemeine Anmerkungen	-	Es wird angenommen, dass der Einsatz von Schrott bei Wasserstoff-DRI tendenziell höher ist als bei Erdgas-DRI, da Wasserstoff tendenziell teurer ist als Erdgas und es daher einen stärkeren Anreiz gibt.			
DRI-Erdgas	5	s.o.			
DRI-Wasserstoff-extern	4	s.o.			
DRI-Wasserstoff-intern	4	s.o.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

³² Eine Berechnung zum DIERec wurde hier zunächst nicht durchgeführt.

Indikator 9.2c: EOL-RQ (End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe)

Tabelle 96: Indikator 9.2c: Grad der Kreislaufwirtschaft: EOL-RQ (End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe) *

Skala: Grad der End-of-life-Recyclingquote für ausgewählte Rohstoffe (EOL-RQ)					
1	2	3	4	5	6
Sehr hohe EOL-Recyclingquote	Hohe EOL-Recyclingquote	Ausreichende EOL-Recyclingquote	Niedrige EOL-Recyclingquote	Sehr niedrige EOL-Recyclingquote	Nicht akzeptable EOL-Recyclingquote
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-	Im Vergleich zu anderen Materialien kann Stahl vergleichsweise gut wiederverwendet werden.			
DRI-Erdgas	2	S.o.			
DRI-Wasserstoff-extern	2	S.o.			
DRI-Wasserstoff-intern	2	S.o.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

C.3.10 Indikator 10: Infrastrukturabhängigkeit

Elektrizität (Verteilnetze, ...)

Tabelle 97: Indikator 10.1: Infrastrukturabhängigkeit: Leitungsnetze für Elektrizität*

Skala: Aufwand und (zeitlicher Vorlauf)					
1	2	3	4	5	6
Kein Aufwand (sofort)	Geringer Aufwand (nicht sofort)	Mäßiger Aufwand (mäßiger Vorlauf)	Mittlerer Aufwand (mittlerer Vorlauf)	Hoher Aufwand (hoher Vorlauf)	Sehr hoher Aufwand (sehr hoher Vorlauf)
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-				
DRI-Erdgas	2	Möglicherweise sind Kapazitäten für neu zu installierende Elektroöfen (z. B. EAF) zu erweitern.			
DRI-Wasserstoff-extern	2	Möglicherweise sind Kapazitäten für neu zu installierende Elektroöfen (z. B. EAF) zu erweitern.			
DRI-Wasserstoff-intern	5	Es müssen vor Ort Erzeugungskapazitäten für die Herstellung von Wasserstoff aufgebaut werden. Dies erfordert hohe elektrische Leistungen. Vermutlich muss die elektrische Infrastruktur im Werk und darum herum dahingehend ertüchtigt werden.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Netzgekoppelt (Erdgas, Wasserstoff, CO₂, Methanol, ...)

Tabelle 98: Indikator 10.2: Infrastrukturabhängigkeit: Leitungsnetze für Stofftransport*

Skala: Aufwand und (zeitlicher Vorlauf)					
1	2	3	4	5	6
Kein Aufwand (sofort)	Geringer Aufwand (nicht sofort)	Mäßiger Aufwand (mäßiger Vorlauf)	Mittlerer Aufwand (mittlerer Vorlauf)	Hoher Aufwand (hoher Vorlauf)	Sehr hoher Aufwand (sehr hoher Vorlauf)
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-	-			
DRI-Erdgas	2	Kapazitäten der Erdgasleitungen zu den Stahlwerken müssen ggf. erweitert werden.			
DRI-Wasserstoff-extern	4	Es müssen Zugangsleitungen für den Transport des Wasserstoffs gelegt werden; zudem bei Anlieferung via Häfen (--> Import von internationalem Markt) ist der Bau von Übergabestationen notwendig.			
DRI-Wasserstoff-intern	2	Der Wasserstoff wird bei dieser Option im Werk produziert. Im Werk sind jedoch neue Leitungen zu verlegen.			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

Sonstige (z. B. Logistik, Verkehrsinfrastruktur)

Tabelle 99: Indikator 10.3: Infrastrukturabhängigkeit: Sonstige Infrastruktur *

Skala: Aufwand und (zeitlicher Vorlauf)					
1	2	3	4	5	6
Kein Aufwand (sofort)	Geringer Aufwand (nicht sofort)	Mäßiger Aufwand (mäßiger Vorlauf)	Mittlerer Aufwand (mittlerer Vorlauf)	Hoher Aufwand (hoher Vorlauf)	Sehr hoher Aufwand (sehr hoher Vorlauf)
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen	-	-			
DRI-Erdgas	1	-			
DRI-Wasserstoff-extern	2	Ein möglicherweise stattfindender Wasserstofftransport via LKW wird nur als temporäre Übergangslösung angesehen und daher nicht bewertet. Jedoch besteht bei „DRI-Wasserstoff-extern“ die Möglichkeit Wasserstoff via Schiff zu importieren, und diesen per Übergabestation in ein nationales Wasserstoffnetz einzuspeisen, was dann wiederum an das Stahlwerk angeschlossen ist. Dies verursacht zusätzliche Aufwände in der Hochsee- und Binnenschifffahrt.			
DRI-Wasserstoff-intern	1	-			

* Bewertungsebene 2 (Unternehmen plus Umwelt)

C.3.11 Indikator 11: Anlagensicherheit

In allen drei Konstellationen wird eine Direktreduktionsanlage verwendet. Ein Unterschied ist der Energieträger, der zur Erzeugung des Reduktionsmittels verwendet wird. Bei der Erdgas-DRI wird Erdgas zur Erzeugung eines wasserstoffreichen Reduktionsgases verwendet; bei den anderen beiden Optionen wird ein hauptsächlich aus Wasserstoff bestehendes Reduktionsgas verwendet, wobei der Wasserstoff entweder extern beschafft, oder durch Elektrolyse erzeugt wird. Die Verfahren sind also vergleichbar. Vgl. Hölling et al. (2017): „In diesem Prozess wird Erdgas als Reduktionsmittel genutzt, das in einem Reformier zu Reduktionsgas umgewandelt wird. Dies besteht zu 60 % aus Wasserstoff und reduziert bei rund 800 °C das Eisenerz zu Eisenschwamm bzw. DRI (Direct Reduced Iron).“ Daher wird die Anlagensicherheit in Bezug auf die DRI-Anlage bei allen drei Konzepten als vergleichbar bewertet.

In Bezug auf andere Komponenten könnte es Unterschiede geben. Zum Beispiel zwischen Wasserstoff- und Erdgaspipelines, zumal Erdgaspipelines weiter verbreitet sind. Allerdings ist der Betrieb von Wasserstoff-Pipelinennetzen nicht neu; im Ruhrgebiet wurden zwischen den 1930er und 1970er Jahren umfangreiche, weit verzweigte Netze gebaut, die seither betrieben werden.

Weitere Unterschiede in der Anlagensicherheit könnten sich aus dem Betrieb von Elektrolyseuren ergeben. Alles in allem sind hier jedoch detaillierte Analysen notwendig.

Insgesamt ist es zudem fraglich, ob zwischen den drei Konzepten wesentliche Unterschiede in Bezug auf die Anlagensicherheit festgestellt werden können, zumal die Indikatoren qualitativer Natur sind. Daher wird das Kriterium Anlagensicherheit für den Test nicht angewendet. Alle Indikatoren werden standardmäßig mit 1 bewertet.

Stoffbezogene Risiken

Indikator 11.1a: Risiken durch Humantoxizität*

Tabelle 100: Indikator 11.1a: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Humantoxizität

Skala: Stoffbezogene Risiken (Humantoxizität)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		s.o.			
DRI-Erdgas	1				
DRI-Wasserstoff-extern	1				
DRI-Wasserstoff-intern	1				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

Indikator 11.1b: Risiken durch Ökotoxizität

Tabelle 101: Indikator 11.1b: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Ökotoxizität *

Skala: Stoffbezogene Risiken (Ökotoxizität)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		s.o.			
DRI-Erdgas	1				
DRI-Wasserstoff-extern	1				
DRI-Wasserstoff-intern	1				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

11.1c: Risiken durch niedrigen Flammpunkt

Tabelle 102: Indikator 11.1c: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko niedriger Flammpunkt *

Skala: Stoffbezogene Risiken (niedriger Flammpunkt)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		s.o.			
DRI-Erdgas	1				
DRI-Wasserstoff-extern	1				
DRI-Wasserstoff-intern	1				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

11.1d: Risiken durch Bildung zündfähiger Gemische

Tabelle 103: Indikator 11.1d: I: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko Bildung zündfähiger Gemische *

Skala: Stoffbezogene Risiken (Bildung zündfähiger Gemische)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		s.o.			
DRI-Erdgas	1				
DRI-Wasserstoff-extern	1				
DRI-Wasserstoff-intern	1				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

Indikator 11.1e: Risiken durch sonstige heftige Reaktionen

Tabelle 104: Indikator 11.1e: Anlagensicherheit: Stoffbezogene Indikatoren: Risiko sonstige heftige Reaktionen *

Skala: Stoffbezogene Risiken (sonstige heftige Reaktionen)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		s.o.			
DRI-Erdgas	1				
DRI-Wasserstoff-extern	1				
DRI-Wasserstoff-intern	1				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

Prozessbezogene Risiken

Indikator 11.2a: Risiken durch hohe Temperaturen

Tabelle 105: Indikator 11.2a: Anlagensicherheit: Prozessbezogene Risiken: Risiken durch hohe Temperaturen *

Skala: Prozessbezogene Risiken (hohe Temperaturen)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		s.o.			
DRI-Erdgas	1				
DRI-Wasserstoff-extern	1				
DRI-Wasserstoff-intern	1				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

Indikator 11.2b: Risiken durch hohe Drücke

Tabelle 106: Indikator 11.2b: Anlagensicherheit: Prozessbezogene Risiken: Risiken durch hohe Drücke*

Skala: Prozessbezogene Risiken (hohe Drücke)					
1	2	3	4	5	6
Keine	Nahezu keine	Geringe	Mittlere	Hohe	Sehr hohe
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		s.o.			
DRI-Erdgas	1				
DRI-Wasserstoff-extern	1				
DRI-Wasserstoff-intern	1				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

C.3.12 Indikator 12: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen*

Indikator 12.1: Gasförmige Emissionen (z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide oder Quecksilber)

Tabelle 107: Indikator 12.1: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Gasförmige Emissionen (z. B. Schwefeldioxid, Stickoxide, Quecksilber)

Skala: Stärke der Veränderung (gasförmige Emissionen)					
1	2	3	4	5	6
Entfallen	Nehmen stark ab	Nehmen leicht ab	Bleiben unverändert	Nehmen zu	Nehmen stark zu
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		Grobe Einschätzung. Im Vergleich zur gegenwärtigen Hochofen-Route.			
DRI-Erdgas	2	In Anlehnung an UNEP(1983).			
DRI-Wasserstoff-extern	2	Im Prinzip fehlt hier aber eine Note zwischen 1 und 2. Wasserstoffbasierte DRI sind vermutlich deutlich besser als Erdgas-DRI im Bereich der gasförmigen Emissionen. Allerdings ist die Skala nicht geeignet, um dies darzustellen.			
DRI-Wasserstoff-intern	2				

UNEP(1983): ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE DIRECT REDUCTION ROUTE TO STEEL MAKING. Internet.
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28008/Environmental_AsptsSteel.pdf?sequence=1&isAllowed=y

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

Indikator 12.2: Abwässer (z. B. Säuren, Laugen)*

Tabelle 108: Indikator 12.2: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Abwässer (z. B. Säuren, Laugen)

Skala: Stärke der Veränderung (Abwässer)					
1	2	3	4	5	6
Entfallen	Nehmen stark ab	Nehmen leicht ab	Bleiben unverändert	Nehmen zu	Nehmen stark zu
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		Grobe Einschätzung. Im Vergleich zur gegenwärtigen Hochofen-Route.			
DRI-Erdgas	2	Das Abwasser aus Kokereien entfällt bei allen drei Verfahren.			
DRI-Wasserstoff-extern	2				
DRI-Wasserstoff-intern	2				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)

Indikator 12.3: Feste Abfallstoffe (z. B. Aschen, Filterstäube)*

Tabelle 109: Indikator 12.3: Wirkungen auf Immissionsschutz und Abfallaufkommen: Feste Abfallstoffe (z. B. Aschen, Filterstäube)

Skala: Stärke der Veränderung (Feste Abfallstoffe)					
1	2	3	4	5	6
Entfallen	Nehmen stark ab	Nehmen leicht ab	Bleiben unverändert	Nehmen zu	Nehmen stark zu
Option	Skala	Begründung			
Allgemeine Anmerkungen		Grobe Einschätzung. Im Vergleich zur gegenwärtigen Hochofen-Route.			
DRI-Erdgas	2	Bei der Hochofenroute fallen feste Abfälle sowie Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung an. Zudem entstehen Schlacken, die jedoch auch als Wertstoff gesehen werden können. Wegfallende Emissionen aus Abgasen führen also zu fallenden Abfallaufkommen.			
DRI-Wasserstoff-extern	2				
DRI-Wasserstoff-intern	2				

* Bewertungsebene 1 (Unternehmen/Standort)