



GWS RESEARCH REPORT 2023/07

Zentrale Technologien und Länder der globalen grünen Transformation

Methoden und Analysen vor dem Hintergrund des „Low Carbon Leakage“-Risikos

Maximilian Banning

Lisa Becker

Katharina Hembach-Stunden

Juri Horst

Uwe Klann

Christian Lutz

Patrick Matschoss

Impressum

AUTOR:INNEN

Maximilian Banning (GWS)

Tel: +49 (0) 541 40933-286, E-Mail: banning@gws-os.com

Lisa Becker (GWS)

Tel: +49 (0) 541 40933-287, E-Mail: becker@gws-os.com

Dr. Katharina Hembach-Stunden (GWS)

Tel: +49 (0) 541 40933-220, E-Mail: hembach-stunden@gws-os.com

Juri Horst (IZES)

Tel: +49 (0) 681 844972-37, E-Mail: horst@izes.de

Dr. Uwe Klann (IZES)

Tel: +49 (0) 681 844972-86, E-Mail: klann@izes.de

Dr. Christian Lutz (GWS)

Tel: +49 (0) 541 40933-120, E-Mail: lutz@gws-os.com

Dr. Patrick Matschoss (IZES)

Tel: +49 (0) 30 568 372 94, E-Mail: matschoss@izes.de

TITEL

Zentrale Technologien und Länder der globalen grünen Transformation – Methoden und Analyse vor dem Hintergrund des „Low Carbon Leakage“-Risikos

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, September 2023

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Die in diesem Papier vertretenen Auffassungen liegen ausschließlich in der Verantwortung der Verfasser:innen und spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der GWS mbH wider.

FÖRDERHINWEIS

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des durch das BMWi/BMWK geförderten Forschungsprojekts „Low Carbon Leakage“ erarbeitet (Förderkennzeichen 03EI1024A (IZES) und 03EI1024B (GWS)).

HERAUSGEBER DER GWS RESEARCH REPORT SERIES

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH

Heinrichstr. 30

49080 Osnabrück

ISSN 2196-4262

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
Abstract	1
1 Einleitung	2
2 Methodischer Ansatz	4
2.1 Gravity-Modell	4
2.2 Multi-level-perspective (MLP)-Analyse	6
3 Auswahl von Technologien und deren Komponenten	12
3.1 Technologieauswahl	12
3.1.1 Diskussion von Filterkriterien	12
3.1.2 Anwendung der ausgewählten Filterkriterien	18
3.2 Überblick über die Technologien	20
3.2.1 Technologiegruppe 1: Windenergie	20
3.2.2 Technologiegruppe 2: Solarenergie	22
3.2.3 Technologiegruppe 3: Batteriespeicher	25
3.2.4 Technologiegruppe 4: Carbon Capture Use and Storage (CCU/CCS)	28
3.2.5 Technologiegruppe 5: Biomasse	33
3.2.6 Technologiegruppe 6: Elektromobilität	35
3.2.7 Technologiegruppe 7: Grüner Wasserstoff	37
3.2.8 Technologiegruppe 8: Wasserkraft	40
3.2.9 Technologiegruppe 9: Wärmespeichersysteme	43
3.2.10 Technologiegruppe 10: Brennstoffzellen-Fahrzeuge	45
3.2.11 Technologiegruppe 11: Wärmepumpen	48
3.3 Komponentenauswahl	50
4 Länderauswahl	57
5 Ausblick	63
6 Literaturverzeichnis	65

7 Anhang

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	MLP-Ansatz nach Geels	8
Abbildung 2:	Filterung für die Technologieauswahl	18
Abbildung 3:	TRLs von ausgewählten Technologien entlang der CCU/CCS-Wertschöpfungskette	31
Abbildung 4:	Das Prinzip einer Brennstoffzelle	46
Abbildung 5:	Stufen der Wertschöpfungskette bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen am Beispiel Lkw (engl. "Fuel cell trucks")	47

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Regime-Dimensionen nach Geels und Einordnung der eigenen Kriterien, Ziele und Indikatoren	10
Tabelle 2:	Potenzielle Filterkriterien für eine Kürzung der Technologielist und Ergebnisse ihrer Diskussion	13
Tabelle 3:	Technologiegruppen-Shortlist	19
Tabelle 4:	Liste der ausgewählten Güterpositionen je Technologie	52
Tabelle 5:	Für die Länderauswahl verwendete Güterpositionen in den COMTRADE-Daten	58
Tabelle 6:	Überblick über Länderanzahlen in Exportdaten für die einzelnen Technologien nach Abdeckungsgrad des Weltexportvolumens	59
Tabelle 7:	Matrix Länder-Technologien für die aus einer mindestens 70%-Abdeckung der Weltexporte resultierende Länderliste* (dunkel eingefärbt: Element relevant)	60
Tabelle 8:	Überblick über die für die weitere MLP-Analyse ausgewählten Länder nach Technologiegruppen	62

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABM	Agenten Basierte Modelle
AEL	Alkalische Elektrolyse
a. n. g.	anderweitig nicht genannt
BECCU/BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Use/Storage
BHKW	Blockheizkraftwerke
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BtL	Biomass-to-Liquid
BWS	Bruttowertschöpfung
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Use
CCUS	Carbon Capture Use and Storage
CSP	Concentrated Solar Power
DAC	Direct Air Capture
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union
EV	Electric vehicles
EWT	Energiewende-Technologien
F&E	Forschung & Entwicklung
Gt	Gigatonne
GW/GWh	Gigawatt/Gigawattstunde
HS-Klassifikation	Harmonisiertes System-Klassifikation
HVO	Hydrogenated vegetable oils
IC-Schaltungen	Integrierter Schaltkreis-Schaltungen
ISIC-Klassifikation	Internationale Standardklassifikation der Wirtschaftszweige-Klassifikation
kVA	Kilovoltampere
kW/kWh	Kilowatt/Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCOE	Levelised cost of energy (deutsch: Stromgestehungskosten, Stromerzeugungskosten)
MLP	Multi-Level-Perspective
Mrd.	Milliarden
Mt	Megatonne
MW/MWh	Megawatt/Megawattstunde
PEM	Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse
PV	Photovoltaik
TES	thermische Energiespeichersysteme
TF-Energiewende	Technologien für die Energiewende
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Levels

TW/TWh	Terawatt/Terawattstunde
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
USD	US-Dollar
WSK	Wertschöpfungsketten

ABSTRACT

Technologien, die für die CO₂-neutrale Wirtschaft benötigt werden, sind bereits heute für den Klimaschutz wie für die wirtschaftliche Entwicklung von zentraler Bedeutung. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob Deutschland Gefahr läuft, durch eine zu langsame Energiewende Leitmärkte bei Energiewendetechnologien (EWT) zu verlieren (oder bereits verloren hat). Um gesellschaftliche Aspekte quantitativ in Modellanalysen erfassen zu können, wird im Projekt *Low Carbon Leakage* der Multi-Level-Perspective- (MLP-) Ansatz quantitativ weiterentwickelt. Mit dem makroökonomischen Modell GINFORS-E wird mit einem neuen Gravity-Ansatz zur Erklärung des internationalen Handels untersucht, welche Implikationen die Erkenntnisse aus den MLP-Analysen für die Realisierung eines ausgewählten Zielszenarios haben. Der Bericht stellt den methodischen Ansatz des Gravity-Modells zur Erklärung der Handelsstruktur und die Methodik der MLP-Analyse kurz vor. Anschließend werden die wichtigsten EWT einschließlich wichtiger Komponenten dargestellt. Die für die MLP-Analysen durchgeführte Länderauswahl wird erläutert. Abschließend wird ein Ausblick auf die nachfolgenden Arbeitsschritte im Projekt *Low Carbon Leakage* gegeben

1 EINLEITUNG

Technologien, die für die Transformation hin zu einer CO₂-neutralen Wirtschaft benötigt werden, sind bereits heute für den Klimaschutz von zentraler Bedeutung. Neben Technologien zur Erzeugung, d. h. zur direkten Nutzbarmachung von erneuerbaren Energien in Form von Strom, Wärme, Treibstoffen und Gasen, kommt solchen zur Erweiterung der Nutzung in den Anwendungssektoren (z. B. Elektromobilität im Verkehr, Wärmepumpen im Gebäudesektor) und schließlich Technologien, die den für eine erfolgreiche Energiewende erforderlichen Um- und Ausbau von Infrastrukturen (Speicher, Wasserstoff, CO₂-Abscheidung, Netze) ermöglichen, eine essenzielle Rolle zu. Gleichzeitig gewinnen diese Energiewende-Technologien (EWT) auch in ökonomischer Hinsicht immer stärker an Gewicht. Unter anderem spricht die IEA (2022k) im „World Energy Outlook 2022“ in diesem Zusammenhang von einer neuen Energieökonomie. Akteure, denen es gelingt, sich als Anbieter der stark nachgefragten Produkte zu etablieren, sehen langfristig wachsenden Absatzmärkten entgegen. Der Aufbau inländischer Märkte und Wertschöpfungsketten und anschließende Exporterfolge infolge einer Vorreiterposition von Herstellern wird oft unter dem Begriff der Leitmärkte zusammengefasst. Leitmärkte und entsprechende Wertschöpfungsketten (WSK) können eine entscheidende Rolle bei der Überwindung von Markt- und Diffusionsbarrieren spielen, mit denen EWT konfrontiert sind. Gleichzeitig wurde stets – unter dem Begriff *carbon leakage* – vor einer zu schnellen Energiewende und der damit einhergehenden möglichen Gefahr der Verlagerung von Produktionsstätten in Bezug auf CO₂-intensive Technologien gewarnt (siehe für einen Abriss der Diskussion: SRU 2016, Kap.1-2). Dies hat zu häufigen Ausnahmen für Unternehmen, bei z. B. Umlagen und Abgaben bei Energiekosten, Ausnahmen von der Versteigerung von CO₂-Zertifikaten sowie zu Grenzausgleichsregelungen im europäischen Emissionshandel geführt. Mit Blick auf das inzwischen international festgeschriebene 1,5°-Ziel und entsprechende Bemühungen anderer Länder, ihre Energiesysteme THG-neutral auszugestalten, ergeben sich ähnliche Fragestellungen im Hinblick auf CO₂-arme Technologien. D. h., in Umkehrung des obigen Arguments stellt sich die Frage, ob Deutschland Gefahr läuft, durch eine zu langsame Energiewende Leitmärkte bei EWT – *low carbon leakage* – zu verlieren (oder bereits verloren hat).

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Vorhabens *Low Carbon Leakage*¹ wird vor diesem Hintergrund der Frage nachgegangen, welche Determinanten zu einer Produktionsverlagerung von EWT führen und welche Länder sich langfristig als Anbieter unter welchen Bedingungen durchsetzen könnten. In globalen Modellanalysen spielen bisher in der Regel relative Preise eine große Rolle für die Erklärung der Produktions- und Handelsstrukturen. Andere Erklärungsansätze werden nur wenig betrachtet. Um gesellschaftliche Aspekte, d. h. regulativ-politisch bedingte Übergangsdynamiken etc. und damit einhergehende Abweichungen vom „idealen“

¹ Wertschöpfungsketten und Markt- und Diffusionsbarrieren in einem erweiterten makroökonomischen und Handelsmodell-Rahmen: Akteursverhalten in Leitmärkten, Handelsstrukturen und struktureller Wandel im Kontext unterschiedlicher Transformationsgeschwindigkeiten (Kurzform: Low Carbon Leakage); Fördergeber: BMWi/BMWK, Förderkennzeichen: 03E11024A (IZES) bzw. 03E11024B (GWS)

Referenzpfad quantitativ im Modell erfassen zu können, wird im Rahmen des Forschungsprojektes der Multi-Level-Perspective- (MLP-) Ansatz genutzt und quantitativ weiterentwickelt. Im Anschluss daran wird mit dem makroökonomischen Modell GINFORS-E im Rahmen von Szenarienrechnungen untersucht, welche Implikationen die Erkenntnisse aus den MLP-Analysen für die Realisierung eines ausgewählten Zielszenarios haben. Die geänderten Rahmenbedingungen wirken sich unter anderem auf die Wettbewerbsfähigkeit potenzieller Exporteure aus, die auf dem Weltmarkt miteinander konkurrieren; zudem ändert sich die Nachfrage in potenziellen Zielmärkten. Von zentraler Bedeutung ist in diesem Kontext folglich die weltweite Handelsstruktur; diese wird im Modell unter Zuhilfenahme eines Gravity-Ansatzes für einzelne Komponenten einer Technologie erklärt.

Das vorliegende Papier stellt den methodischen Ansatz des Gravity-Modells zur Erklärung der Handelsstruktur und die Methodik der MLP-Analyse kurz vor (Kapitel 2). Anschließend werden die Technologien dargestellt, die als für den Transformationsprozess zur Klimaneutralität besonders bedeutend eingeschätzt werden (Kapitel 3). Dazu wird zunächst der Prozess der Technologieauswahl nachgezeichnet (Kapitel 3.1). Im Anschluss folgen Beschreibungen der einzelnen Technologien (Kapitel 3.2), an die sich eine Erläuterung der Komponentenauswahl anschließt (Kapitel 3.3). Die für die MLP-Analysen durchgeführte Länderauswahl wird in Kapitel 4 erläutert. Abschließend wird ein Ausblick auf die nachfolgenden Arbeitsschritte im Forschungsprojekt *Low Carbon Leakage* gegeben (Kapitel 5).

2 METHODISCHER ANSATZ

Das Forschungsvorhaben Low Carbon Leakage (LCL) beschäftigt sich mit der Abbildung von Akteursverhalten bei der Einführung neuer Technologien angesichts von Markt- und Diffusionsbarrieren, unter Berücksichtigung von internationalem Wettbewerb und Handelsbeziehungen sowie der Analyse der gesellschaftlichen Voraussetzungen hierfür. Dafür ist einerseits eine neue, verbesserte Modellierung internationaler Wertschöpfungsketten von Energiewende-relevanten Technologien (EWT) in einem globalen Modell notwendig. Dieses Modell muss Beschaffungsmärkte, Leitmärkte und Absatzmärkte abbilden, um Markt- und Diffusionsbarrieren und die resultierenden ökonomischen Effekte aufzuzeigen. Andererseits sind komplementäre Analysen aus der Transformationsforschung jenseits der Modellierung notwendig, die die gesellschaftliche Dimension dieses Wandels beschreiben.

Im Folgenden wird zunächst die Gravity-Modellierung, die das bestehende internationale Modell GINFORS-E erweitert, beschrieben. Anschließend wird die MLP-Analyse dargestellt, die das Akteursverhalten erfasst. Die Verknüpfung beider Methoden stellt den zentralen methodischen Mehrwert des Vorhabens dar.

2.1 GRAVITY-MODELL

Das GINFORS-Modell in seiner ursprünglichen Form weist wie vergleichbare internationale Modelle zu Beginn des Projektes zwei wesentliche Limitationen auf, die für die geplanten Analysen durch Erweiterungen beziehungsweise Modifikationen adressiert werden. Zum einen findet die Modellierung des Welthandels, also der bilateralen Handelsströme, verhältnismäßig hoch aggregiert auf Ebene der 2-Steller der ISIC-Klassifikation (Revision 4) in 33 Kategorien statt. Während diese Gliederung üblicherweise hinreichend ist – und sich gerade vor dem Hintergrund des Anschlusses an Input-Output-Tabellen anbietet –, bedarf die Evaluation der hier betrachteten Technologien einer schärferen Auflösung. Die Nutzung differenzierter Handelsdaten auf 6-Steller-Ebene der HS-Klassifikation trägt diesem Umstand Rechnung. Zum anderen stellt die Modellierung maßgeblich auf den Einfluss von relativen Preisen ab, das heißt, Verschiebungen des Welthandels und damit einhergehende Produktionsverlagerungen finden als direkte Reaktion auf Veränderungen länderspezifischer Produktionspreise statt. Diese recht einseitige Modellierung – die zudem bei Handelsströmen, für die kein signifikanter Einfluss von Preisveränderungen festgestellt werden kann, zu lediglich unflexiblen Reaktionen führt – wird dahingehend erweitert, dass eine Vielzahl erklärender Variablen herangezogen werden kann.

Zu diesem Zweck wird auf die Nutzung eines Gravity-Ansatzes zurückgegriffen, der, wie im Folgenden erläutert, unterschiedlichste Einflüsse auf die Handelsstruktur berücksichtigen kann. Die Analyse erfolgt zunächst in höherem Detailgrad als die in GINFORS üblicherweise abgebildeten Sektoren. Die resultierenden Schätzungen werden erst in einem späteren Schritt in das Gesamtmodell integriert.

GINFORS-E² ist ein globales makroökonomisches Modell, das auf der post-keynesianischen Theorie basiert. Es ist für die Bewertung der Wirtschafts-, Energie-, Klima- und Umweltpolitik bis zum Jahr 2050 konzipiert. Es handelt sich um ein bilaterales Welthandelsmodell auf der Grundlage von OECD-Daten, das Ausfuhren und Einfuhren von 25 Warengruppen für 64 Länder und eine Region "Rest der Welt" konsistent und kohärent modelliert. Alle EU-27-Länder, weitere europäische Volkswirtschaften und wichtige internationale Handelspartner werden explizit erfasst. Für jedes Land wird ein Makromodell erstellt, das die Exporte und Importe, andere Komponenten der Endnachfrage (privater und öffentlicher Konsum und Investitionen), die Warenmärkte und den Arbeitsmarkt umfasst. Die Ländermodelle sind außerdem in 36 Güterkategorien unterteilt, die den international harmonisierten Input-Output-Tabellen (IO) der OECD entsprechen. Für jedes Land werden die bilateralen Handelsdaten der OECD auf Branchenebene mit den IO-Tabellen verknüpft. Jedes nationale Modell ist mit einem Energiemodell verknüpft, das die Energieumwandlung, die Energieerzeugung und die Endenergienachfrage für 19 Energieträger aufgeschlüsselt nach Wirtschaftssektoren auf der Grundlage von IEA-Energiebilanzen ermittelt. Die energiebezogenen CO₂-Emissionen sind mit dem Energieverbrauch verknüpft. Das Modell berücksichtigt technologische Trends und Preisabhängigkeiten. Mit dem Modell können die sozioökonomischen Auswirkungen verschiedener Preisänderungen und Politiken in einzelnen Ländern in einem globalen Kontext analysiert werden. Explizit abgedeckt sind alle EU-Länder, alle OECD-Länder und ihre wichtigsten Handelspartner. Die in den Modellgleichungen verwendeten Parameter werden ökonomisch auf der Grundlage von Zeitreihendaten der OECD, der UN, des IWF und der IEA von 1990 bis 2019 geschätzt. Die Akteure haben kurzfristige Erwartungen und folgen vergangenen Verhaltensroutinen. Es wird nicht davon ausgegangen, dass die Märkte geräumt sind. Das Modell wird jährlich gelöst. In Lutz et al. (2010) wird das Modell detailliert beschrieben, obwohl sich einige der Beziehungen geändert haben (z. B. hat die OECD die Sektorklassifizierung mehrmals angepasst). In den letzten Jahren wurde die Art und Weise, wie das Modell den Energiesektor abbildet, weiter verfeinert, um den globalen Entwicklungen bei den Technologien für erneuerbare Energien Rechnung zu tragen.

Gravity-Modelle in der Ökonomik gehen zurück auf Tinbergen (1962). Der zugrunde liegende Ansatz ist dabei den Erkenntnissen der Physik entlehnt: Äquivalent zur Gravitationskraft zwischen zwei Körpern, die proportional von deren Massen und umgekehrt proportional von deren Abstand zueinander abhängt, werden Handelsströme zwischen zwei Ländern proportional von der Größe der Länder (ihrer wirtschaftlichen Stärke) beeinflusst und umgekehrt proportional von der Entfernung zwischen ihnen.

$$E_{ij} = \alpha_0 * BIP_i^{\alpha_1} * BIP_j^{\alpha_2} * D_{ij}^{\alpha_3}$$

$$\log E_{ij} = \log \alpha_0 + \alpha_1 * \log BIP_i + \alpha_2 * \log BIP_j + \alpha_3 * \log D_{ij}$$

² <https://web.jrc.ec.europa.eu/modinv/discovery/midas/explore/models/model-ginfors-e/>

wobei E_{ij} dem Handelsstrom zwischen Land i und Land j entspricht, BIP dem Bruttoinlandsprodukt von Land i bzw. j und D_{ij} der Distanz zwischen beiden Ländern; $\alpha_0 \dots \alpha_3$ kennzeichnen zu bestimmende Parameter.

Für die vorliegenden Arbeiten wird eine modifizierte Version des ursprünglichen Gravity-Modells verwendet, für das ein zwei-stufiges Panel-Schätzverfahren angewandt wird (Yotov et al. 2016). Auf der ersten Stufe fließen neben der aus dem Grundmodell bekannten Distanz weitere Variablen ein, die die Beziehung zwischen zwei Ländern kennzeichnen. Zu potenziellen Größen zählen hier eine gemeinsam verwendete Sprache, verwandte Rechtssysteme oder enge historische Verbindungen, beispielsweise in Form ehemaliger kolonialer Beziehungen. Zudem werden zeitabhängige Fixed-Effekt-Größen für Importeure sowie für Exporteure mit aufgenommen. Diese werden wiederum auf der zweiten Stufe des Schätzverfahrens durch eine Vielzahl möglicher Variablen erklärt. Die Identifikation der erklärenden Größen bildet dabei einen Schwerpunkt der Arbeiten. Auch hier kann auf den ursprünglichen Ansatz des Gravity-Modells zurückgegriffen und die wirtschaftliche Stärke eines Landes auf ihren Erklärungsgehalt untersucht werden. Im weiteren Sinne geht es aber darum, verschiedene Determinanten sowohl für die Wettbewerbsfähigkeit eines Landes (dargestellt durch die auf der ersten Stufe erhaltenen Koeffizienten der Exporter-Fixed-Effects) als auch für die Attraktivität des Absatzmarktes (dargestellt durch die Koeffizienten der Importer-Fixed-Effects) zu finden – zu möglichen Kandidaten zählen die Infrastruktur des betrachteten Landes oder Preisniveaus für die betrachteten Güter.

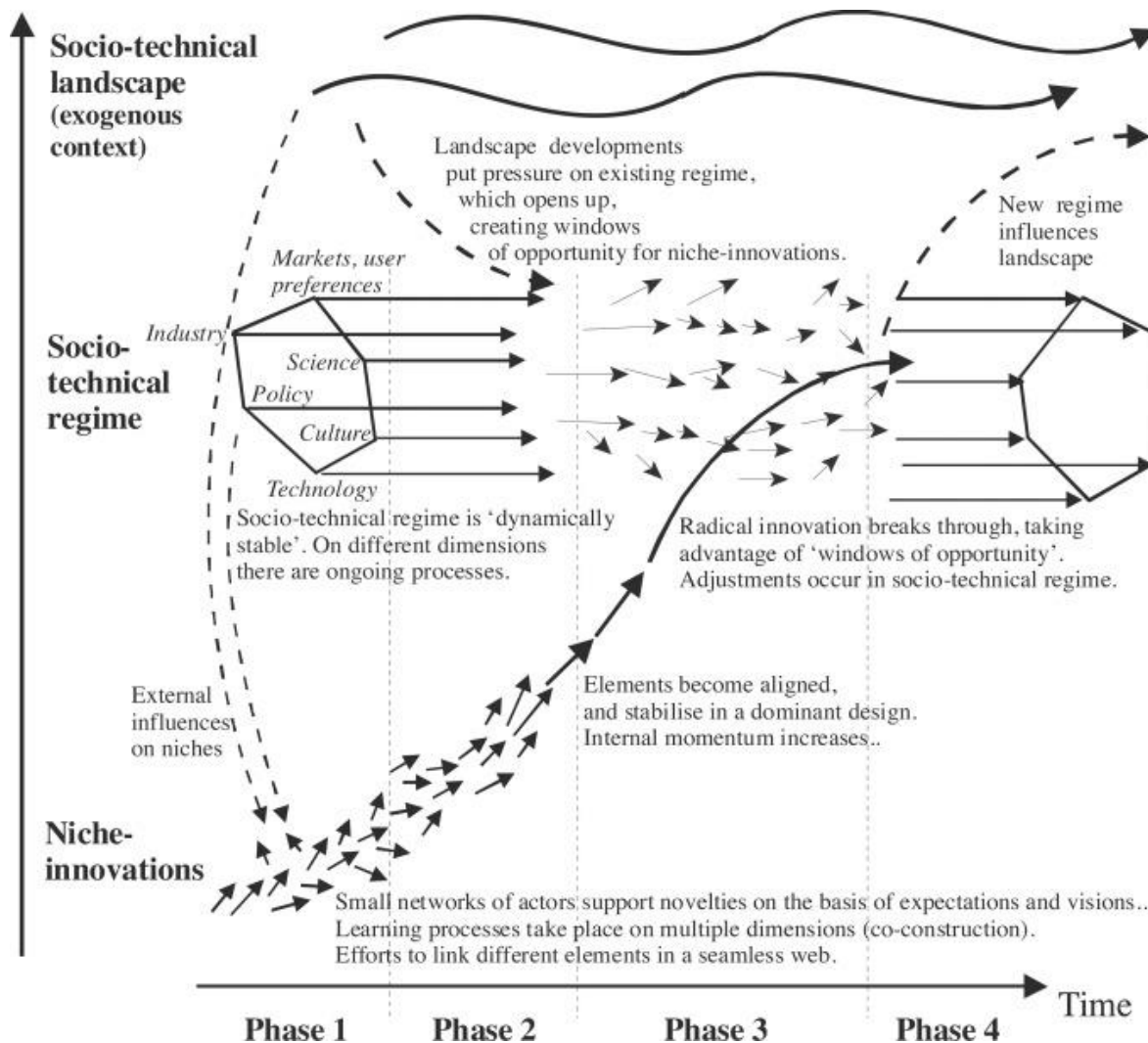
2.2 MULTI-LEVEL-PERSPECTIVE (MLP)-ANALYSE

Als Voraussetzung für eine quantitative Erfassung von möglichen Politikpfaden sollen Übergangsdynamiken einbezogen werden, die regulativ, interessenspolitisch etc. bedingt sind und zu Abweichungen von einem festzulegenden Referenzpfad führen, der i. d. R. modelltheoretisch auf einem kostenoptimalen Pfad aus einer Energiesystemmodellierung beruht. Hierfür wird der Multi-Level-Perspective- (MLP-) Ansatz nach (Geels 2002, 2005) genutzt und weiterentwickelt. Der MLP-Ansatz verknüpft Elemente aus evolutorischer Ökonomik, Techniksoziologie, Geschichte der Technik- und Innovationsstudien in einem verbal-analytischen Rahmen, der aufzeigt, unter welchen Voraussetzungen Innovationen ihre Nische verlassen und zur neuen dominanten Technologie werden können. Es werden drei Ebenen und vier zeitliche Phasen (s. Abbildung 1) der gesellschaftlichen Durchdringung neuer Technologien unterschieden (Geels 2002, 2005; Geels & Schot 2007; Geels 2018). In der unteren Nischen-Ebene beginnen „radikale“ Innovationen in einem abgeschirmten Bereich, da sie im etablierten Regime zunächst nicht wettbewerbsfähig sind. Die mittlere soziotechnische Regime-Ebene stellt die Gesamtheit der aktuellen Rahmenbedingungen aus technischen, marktlichen und rechtlichen Regeln sowie Akteurs- und Nutzungskonstellation und politischen Zielen dar, die die vorherrschenden Technologien stützen. Aufbauend auf dem evolutorischen Konzept des technologischen Regimes nach Nelson und Winter (vgl. Matschoss 2004, S.56ff), das um Aspekte der Techniksoziologie erweitert wurde, wird hier dem Argument Rechnung getragen, dass neue Technologien bzw. Technologiepfade auch durch Politik, Regulierung, Interessengruppen etc. mitbestimmt werden. Die obere Landscape-Ebene steht schließlich für übergreifende Rahmenbedingungen, die sich entweder langfristig (gesellschaftlich-kulturelle

Überzeugungen, Megatrends, Demographie, Digitalisierung, Klimawandel) ändern oder kurzfristig / disruptiv sein können (GAU von Fukushima, Erdbeben, Kriege; Merten et al. 2018).

Bei den vier zeitlichen Phasen, die Innovationen – bei Erfolg – durchlaufen (Geels et al. 2017; Geels 2018), starten sie in Nischen (engl. „pre-development“), die von noch unsicheren Netzwerken getragen werden. Daraus entstehen in Phase zwei (engl. „early market niche“) dominante Designs in kleinen Marktnischen, woraus finanzielle Ressourcen und eine gewisse Stabilität für Weiterentwicklungen innerhalb der Nischen hervorgehen. In Phase drei (engl. „breakthrough“) fängt die Innovation an zu diffundieren und direkt mit dem Regime zu konkurrieren. Der Erfolg hängt einerseits von Nischen-internen Faktoren, wie techno-ökonomische Fortschritte, Entwicklung komplementärer Infrastrukturen oder Unterstützung durch Stakeholder, ab. Andererseits hängt der Erfolg aber auch von externen Faktoren aufgrund politischer Konstellationen (engl. „windows of opportunities“) ab, die das bis dato vorherrschende Regime destabilisieren. Diese können im Regime selbst begründet sein (z. B. politische Probleme durch zögerlichen Strukturwandel) oder aus der Landscape-Ebene herrühren (z. B. Auswirkungen des Klimawandels). In Phase vier (engl. „stabilization of new regime“) finden schließlich weitreichende Änderungen von Infrastrukturen, Regulierungen, Gewohnheiten etc. als Anpassung an die neuen, nun breit eingesetzten Technologien statt.

Abbildung 1: MLP-Ansatz nach Geels



Quelle: Geels 2018, S. 3

Ursprünglich wurde der MLP-Ansatz zur Ex-Post-Analyse „ungewollter“ Transformationen angewandt (Übergang von der Segel- auf die Dampfschiffahrt, vom Pferdefuhrwerk zum Auto etc.; Geels 2002; Papachristos et al. 2013). Dort wurden neue Technologien überwiegend durch Unternehmer vorangetrieben, da sie Vorteile im bestehenden Markt aufwiesen. Inzwischen wurde der MLP-Ansatz auch auf politisch gewollte Transformationen, wie die Energiewende, angewendet, deren Technologien sich nicht allein im Markt durchsetzen. Dadurch gewinnt die politische Dimension der Transformation, wie z. B. Widerstände gegen die Einführung neuer Marktregeln etc., an Bedeutung (Geels & Schot 2007). Aber auch hier beschränkt sich die Analyse meist auf die Ex-post-Analyse von sektoral und/oder geographisch begrenzten Fallbeispielen, wie z. B. die Transformation des Verkehrssektors in den Niederlanden (Geels 2014; Köhler et al. 2018; Köhler et al. 2020, Kapitel 2.7, S. 38-41) oder einen Vergleich bisheriger Phasen der britischen und deutschen Energiewende (Geels et al. 2016).

Um die Erkenntnisse beider Ansätze – makroökonomische Modellierungen und MLP – kombinieren zu können, ist es nötig, die Vielfalt der MLP-relevanten Aspekte (oder

zumindest einen Teil davon) mit „modellfähigen“ Daten oder Indikatoren zu beschreiben, die in das Modell integrierbar sind. Dafür stellen Köhler et al. (2018) die bisherigen Modelle und die Anforderungen der MLP-Modellierung gegenüber. Insbesondere zeigen Köhler & Holtz (2020) auf, dass die Modellierung von Transformationen auf eine Reihe methodischer Probleme stößt. Transformationen zeichnen sich durch radikalen (nicht marginalen) Wandel mit einer Reihe von Eigenschaften, wie Nicht-Linearität, qualitativ unterschiedliche Systemzustände, Änderungen von Werten und Normen, Offenheit und Unsicherheit etc., aus, die Transformationen als offene ko-evolutionäre und zufällige Prozesse charakterisieren. Diese Eigenschaften werden in den meisten, eher an marginalen Veränderungen orientierten mikroökonomischen Modellen nicht abgebildet. Zwar können einige Modell-Arten bestimmte Teilaspekte abbilden bzw. entsprechend modifiziert werden. Da für viele der Teilaspekte von MLP quantifizierbare Theorien fehlen, fehlen auch etablierte Daten und es muss auf Datensätze aus anderen Zusammenhängen zurückgegriffen werden, die nicht immer passend sind. So wird die Entwicklung von Indikatoren-Sets, ob Transformationen stattgefunden haben (oder nicht) als eigenes Forschungsfeld gesehen (Köhler & Holtz 2020). Zur besseren empirischen Fundierung der MLP-Forschung schlagen De Haan et al. (2020) einen empirischen Ansatz anhand historischer Ereignisse vor. Dafür sollen „Ereignisse“ in einer open source Datenbank gesammelt werden. D. h. es sollen das Ereignis an sich als historisches Faktum mit Beginn und Ende, Vorgang und – soweit möglich – wer was gemacht hat, gesammelt werden (De Haan et al. 2020). Bianchi & Squazzoni (2020) legen den Fokus auf die Vorteile Agenten-basierte Modelle (ABM) zur besseren Abbildung sozialer Prozesse. Köhler (2020) stellt mit dem MATISSE-Modell ein speziell zur Abbildung des MLP-Prozesses entwickeltes, ABM vor, das Nischen-, Regime- und Landscape-Ebene mit deren Interaktion abbildet. Es werden unterschiedliche Nachfragen nach Nischen- und Regimeprodukten abgebildet, wodurch sich beide im Zeitablauf in ihrer Bedeutung ändern. Allerdings können hier nur jeweils eine Technologie und ein Land (also nicht die Interaktion zwischen Ländern) abgebildet werden.

Insgesamt werden die großen methodischen Unterschiede zwischen Modellierung und Fallstudien deutlich und bisherige Ansätze zeigen, dass bereits bei entsprechenden Vorhaben für einzelne Länder/Sektoren ein hoher Aufwand entsteht (Trutnevyte et al. 2014; Köhler et al. 2018). So wird „das Finden passender Indikatoren zum Strukturieren der Komplexität“ als Forschungsgrenze der Transformationsforschung bezeichnet (Köhler et al. 2019). Auch Köhler (2020) weist noch einmal darauf hin, dass keine Literatur dazu existiert, wie bspw. kultureller Wandel in numerischen Modellen abzubilden sei.

Vor diesem Hintergrund werden im vorliegenden Projekt Wertschöpfungsketten – d. h. Produktions- und Handelsbeziehungen – von EWT anhand eines datengestützten MLP-Ansatzes untersucht. Insbesondere soll untersucht werden, für welche Technologien in welchen Ländern Leitmärkte existieren oder potenziell entstehen können. Die Einflussfaktoren bzw. Dimensionen des sozio-technischen Regimes (vgl. Abbildung 1) weisen eine große Übereinstimmung mit der multi-kriteriellen Bewertung von Technologien für die Energiewende auf (Viebahn et al. 2018a, Kap. 3). Daher wurden diese mit leichten Anpassungen zur Umsetzung des MLP-Konzepts übernommen und durch Recherche-Indikatoren konkretisiert (Tabelle 1). Die Recherche-Indikatoren für die genannten

Technologien werden letztlich für die aktuellen Hauptexportländer (vgl. Abschnitt 4) länderspezifisch erhoben. Im Anschluss werden für einige dieser vorab ausgewählten Länder und für eine Auswahl an Technologien noch weitergehende MLP-Analysen vorgenommen (deep dive). Diese weitere Auswahl für die Vertiefung wird auf Grundlage der zu den in Tabelle 1 genannten Indikatoren gesammelten Daten erfolgen. Allerdings konnten für einzelne Indikatoren trotz hohem Rechercheaufwand nur eingeschränkt die hier erforderlichen länderspezifischen Informationen gefunden werden. Die Schwierigkeiten unterscheiden sich je nach Kriterium und auch nach Technologie, sind im Allgemeinen aber darauf zurückzuführen, dass gleichzeitig sowohl länder- als auch technologiespezifische Daten benötigt werden. Aufgrund der Bedeutung der empirischen Basis und den gleichzeitigen indikatorenspezifischen Schwierigkeiten ist daher geplant, den Recherchegang in einer separaten Veröffentlichung darzustellen.

Tabelle 1: Regime-Dimensionen nach Geels und Einordnung der eigenen Kriterien, Ziele und Indikatoren

Regime-Dimensionen (Geels 2018)	Kriterien Datenrecherche	Ziele	Recherche-Indikatoren
Politik / Regulierung (Policy)	Politische Ziele & hist. Zielerreichung	Gesteckte zukünftige Ziele sowie historische Zielerreichungsgrade	Ausbauziele (bspw. GW, GWh, Anteile an der Stromerzeugung, Anzahl batterieelektrischer Fahrzeuge usw.), z. T. bisherige Ziele & Zielerreichung
	Öff. Förderung (pol. Instrumente)	Aktivitäten zur beschleunigten Marktdurchdringung, Erhöhung der Nachfrage	Quantitative Erfassung (zentraler) monetärer Fördermaßnahmen
Wissenschaft	Forschung & Entwicklung (F&E)	Unterstellung von Marktvorteilen bei hohen F&E-Aktivitäten	Beschreibung Aktivitäten öffentliche Forschungsmittel
Technologie	Kosteneffizienz	Fähigkeit zur zügigen Marktdurchdringung; Vergleich Alt/Neu und Neu/Neu	LCOE (bzw. entsprechende Werte für andere Outputs, z. B.: Levelised cost of hydrogen) Vergangenheit & Zukunft

Regime-Dimensionen (Geels 2018)	Kriterien Datenrecherche	Ziele	Recherche-Indikatoren
			Spezifische Investitionskosten, wo verfügbar
	Abhängigkeit von Infrastrukturen	Bewertung, ob notwendige Infrastrukturen fehlen und ob dies zu verzögerten Entwicklungen führt	Abhängigkeiten gegeben? Engpässe vorhanden? (Maßnahmen zur) Abhilfe geplant?
Märkte, Nutzerpräferenzen	Marktpotentiale	Abschätzung Bedeutung des Gesamtmarktes und ggf. bestehender Leitmärkte	Umfang Weltmarkt Verwendung in Ländern
	Inländische Wertschöpfung	Bedeutung einer Technologie für die Wirtschaft eines Landes	BWS je Technologiegruppe BWS-Komponenten Produktion, Produktionskapazitäten
Industrie	Unternehmens- bzw. techn. Pfadabhängigkeiten	Identifikation realistische Ausbaufähigkeit und -geschwindigkeit; ggf. Identifikation regulativer Hemmnisse, Ziele zu erreichen	Planungs- & Bauzeit Nutzungsdauer
Kultur	Gesellschaftliche Akzeptanz	Identifikation möglicher Widerstände gegen neue bzw. Identifikation beliebter neuer Technologien	Kultureller Hintergrund bzgl. Veränderungen Offenheit für Neues?
	Weitere Rahmenbedingungen	Identifikation weiterer Begünstigungen und Hemmnisse	Qualitative Beschreibungen im „Deep Dive“ für ausgewählte Länder-Technologiegruppen-Kombinationen

Quelle: eigene Darstellung

3 AUSWAHL VON TECHNOLOGIEN UND DEREN KOMPONENTEN

Im Fokus dieses Kapitels stehen die Auswahl und Beschreibung der 14 Technologiegruppen, die für die „grüne“ Transformation eine zentrale Bedeutung spielen. Der Technologieauswahlprozess wird in Kapitel 3.1 im Detail beschrieben. In Kapitel 3.2 finden sich Kurzbeschreibungen zu den einzelnen Technologien. Da sich die einzelnen Technologien nicht direkt in offiziellen Statistiken wiederfinden, war es für die weiterführenden Analysen notwendig, eine Komponentenauswahl zu treffen. Diese Komponentenauswahl wird in Kapitel 0 erläutert.

3.1 TECHNOLOGIEAUSWAHL

Für eine Vorauswahl der Technologien, die für die Energiewende wichtig sind oder in absehbarer Zeit sein werden, werden mehrere Listen durchleuchtet. Ausgangspunkt bildet der „Clean Energy Technology Guide“ aus den „Energy Technology Perspectives“ der IEA (2021c). Er gibt einen Überblick über 433 Technologien und fasst jeweils deren technologischen Reifegrad, die Stufe in der Wertschöpfungskette und die Bedeutung für den Klimaschutz zusammen. Ergänzt um weitere Technologien aus dem Projekt „TF-Energiewende“ (Viebahn et al. 2018c, 2018d) und dem GreenTech-Atlas (BMU 2021) resultiert eine Longlist von 453 Technologien.

Da eine derart umfangreiche Technologieliste für die geplanten Projektarbeiten nicht praktikabel ist, werden in einem ersten Schritt Kriterien entwickelt, nach denen eine Filterung erfolgen kann. Anschließend werden die ausgewählten verschiedenen Filterkriterien angewandt und die verbleibenden Technologien zu Technologiegruppen zusammengefasst.

3.1.1 DISKUSSION VON FILTERKRITERIEN

Um die Anzahl der Technologien in der Longlist auf eine handhabbare Anzahl zu reduzieren, sind Kriterien erforderlich, die Technologien auswählen oder ausschließen.³ Zur handhabbaren Anzahl ist anzumerken, dass die gegenwärtige Liste praktisch keine Technologien enthält, die in der Wertschöpfungskette vorgelagert sind (also z. B. der Bau von Maschinen, die für eine Produktion von PV-Modulen eingesetzt werden (vorgelagerte Investitionen), oder Chemikalien, aus denen PV-Zellen entstehen (Vorprodukte)). Dazu ist zum ersten zu beachten, dass mitunter – v. a. bei der Effizienz von industrieller Produktion, wie z. B. Zement – für eine Emissionsreduktion eingesetzte Technologien (vorgelagerte Investitionen) oder eingesetzte klimaneutrale Energieträger die eigentlichen Energiewendeprodukte sind und nicht etwa z. B. der mit diesen Maschinen produzierte Zement. Zum zweiten können mögliche Teile einer Wertschöpfungskette doch Gegenstand der Abbildung sein, sofern sie unmittelbar an der Umwandlung, dem Transport, der

³ Es sei betont, dass es sich hier um Kriterien zur Filterung handelt. Für die nach der Filterung erfolgende MLP-Analyse kann sehr wohl auf ähnliche Kriterien zurückgegriffen werden, auch auf solche, die für eine Filterung als nicht geeignet eingeschätzt werden.

Speicherung oder der Nachfrage nach Energie beteiligt sind. Wie welche Wertschöpfungsketten erfasst werden, ist Gegenstand des nächsten Schritts.

Für die Filterung (und im nächsten Schritt die Aggregation) der Technologien werden im Weiteren mögliche Kriterien diskutiert und ausgewählt. Die möglichen Kriterien ergeben sich dabei aus zwei grundsätzlichen Überlegungen: 1. inwieweit innerhalb des Untersuchungszeitraums (etwa bis 2050) große Weltmärkte entstehen und 2. inwieweit zu erwarten ist, dass die Produktion in Deutschland erfolgen könnte. Berücksichtigt wurden dabei auch Kriterien aus Viebahn et al. (2018c, 2018d). Aufgrund der anderen Zielrichtung jener Untersuchungen (Identifizierung von F&E-Bedarf für Energietechnologien) von der hiesigen (wirtschaftliche Potenziale für Deutschland in einer Energiewendestrategie) wurden die Kriterien nicht unmittelbar übernommen. Zu betonen ist, dass es sich an dieser Stelle um Kriterien zur Technologieauswahl handelt und nicht um Kriterien für eine MLP-Analyse, obgleich die beiden Kriterienlisten insoweit zusammenhängen, als einige der folgenden Auswahlkriterien auch für die MLP-Analyse relevant sein können.

Für jedes der in Tabelle 2 genannten potenziellen Filterkriterien wird im Folgenden dargestellt, weshalb sie in Erwägung gezogen wurden, welche Möglichkeiten und Schwierigkeiten mit einer Anwendung verbunden sind, woraus schließlich begründet wird, ob sie verwendet werden oder nicht. Zur Orientierung gibt Tabelle 2 bereits eine Übersicht der Ergebnisse der Abwägungen. Zuerst werden nun die letztendlich nicht verwendeten und dann die verwendeten Kriterien abgehandelt.

Tabelle 2: Potenzielle Filterkriterien für eine Kürzung der Technologielist und Ergebnisse ihrer Diskussion

Verwendete Kriterien	Nicht verwendete Kriterien
Verfügbarkeit einer Technologie	Handelbarkeit
Bedeutung für den Klimaschutz	Komplexität der Produktion
Potenzielles Marktvolumen	Forschungsintensität
Akzeptanz	CO ₂ -Preis-abhängige Wirtschaftlichkeitsschwelle

Quelle: eigene Darstellung

Zu „Handelbarkeit“: Die Marktpotentiale für eine Fertigung in Deutschland hängen wesentlich davon ab, ob ein Weltmarkt oder nur lokale/regionale/nationale Märkte beliefert werden können.⁴ Hierfür ausschlaggebend sind die Transportkosten in Abhängigkeit vom Warenwert, was als Maß für eine Handelbarkeit dienen kann. Dabei können schwer zu fassende Wareneigenschaften, wie Empfindlichkeit, eine Rolle spielen. Wird aber davon ausgegangen, dass die Transportkosten deutlich von der Masse und/oder Volumen abhängen, dann kann der Warenwert pro Kilogramm oder pro m³ als Indikator für eine Handelbarkeit herangezogen werden. Je höher diese spezifischen Werte, desto geringer

⁴ Allerdings können in Deutschland ansässige Unternehmen geistige Eigentumsrechte besitzen, die über Lizenzen oder Patentgebühren auch dann zu Einnahmen führen können, wenn ein Gut im Ausland für einen ausländischen Markt gefertigt wird. Diese Möglichkeit wird nicht weiter betrachtet, da angenommen wird, dass industriepolitisch eine Produktion in Deutschland im Vordergrund steht.

dürften die Transportkosten in Relation zu den Herstellungskosten sein. Ab einem Schwellenwert lohnt sich dann womöglich ein Transport nicht mehr. Dabei können sich auch verschiedene Größen für einzelne Komponenten einer Technik ergeben, woraus dann ein eher regionaler Markt für bestimmte Komponenten und ein eher globaler Markt für andere Komponenten entstehen können. Beispielsweise dürften Fundamente und Türme für Windkraftanlagen eher regional gehandelt werden. Allerdings ist anzumerken, dass entsprechende Indikatoren für viele Technologien aus der „Longlist“ nur schwer zu bekommen sein dürften, da es sich um Fertigungstechniken (z. B. Maschinen) handelt, deren Volumen oder Masse nicht ohne weiteres abzuschätzen oder veröffentlicht sind. Deshalb wird „Handelbarkeit“ als allgemeines Filterkriterium nicht weiterverfolgt.

Zu „Komplexität der Produktion“: Für Technologien mit den höchsten TRL stellt sich die Frage, inwieweit sie in Deutschland eingesetzt oder mit der höheren Technologiereife als Serienproduktion in anderen Ländern angesiedelt werden. Hierzu kann die These aufgestellt werden, dass die Wahrscheinlichkeit einer Produktion in Deutschland als Hochtechnologieland steigt, wenn der Produktionsprozess und damit seine Steuerung komplex sind. Zum Thema Komplexität von Produktionsprozessen und Komplexitätsmanagement gibt es eine umfangreiche Literatur, in der eine Vielzahl von Definitionen und möglichen Indikatoren zu finden ist.⁵ Dort sind verschiedene Definitionen von Komplexität zu finden und eine Vielzahl möglicher Indikatoren / Maße. Allen Maßen ist gemein, dass deren Berechnung eine sehr genaue Kenntnis der Produktionsprozesse voraussetzt. Während eine solche Kenntnis vorausgesetzt werden darf, wenn ein Unternehmen einen eigenen Betrieb untersucht oder plant, ist sie für eine Fülle verschiedener Verfahren kaum oder nur sehr aufwendig zu beschaffen. Deshalb ist es nicht praktikabel, ein derartiges Maß für die Filterung einer sehr langen Liste an Produkten, Verfahren und Technologien einzusetzen und das Kriterium wird nicht weiterverfolgt.

Zu „Forschungsintensität“: Ebenfalls zur Frage, ob reife Technologien – im Sinne eines hohen Technology Readiness Levels für das Produkt – in Deutschland produziert werden, kann als zweite Hypothese aufgeführt werden, dass Produkte und Prozesse, die einer steten und relativ schnellen Innovation unterworfen sind, auch in Deutschland produziert bzw. angewandt werden. Als Beispiel mag die Automobilindustrie dienen, deren Produkte seit langem als ausgereift angesehen werden, die aber dennoch auch in Deutschland produziert und deren Produkte sich über die letzten Jahrzehnte noch deutlich geändert haben. Demnach wären – bezogen auf Indikatoren – ausgereifte Produkte/Technologien auszusortieren, die von Unternehmen mit relativ geringen Forschungsausgaben oder wenigen neuen Patenten produziert werden. Allerdings wäre hierbei entsprechend dem Projektziel auf nationale Werte abzustellen. Unabhängig von der genauen Wahl eines Indikators besteht das Problem, einen Grenzwert festzulegen, ab dem eine Filterung erfolgen soll. Zudem wird es schwierig, für eine größere Anzahl an Produkten oder

⁵ Einen Überblick über verschiedene Ansätze liefern Alkan et al. (2018). Siehe auch Modrak & Soltysova (2017) wo ein Kurzüberblick über verschiedene Komplexitätsmessungen gegeben wird. Als Beispiel für Anzahl von Komplexitätsindikatoren mag dienen Kermanshachi et al. (2016), wo die Top-30-Komplexitätsindikatoren für Bauprojekte identifiziert und nach Wichtigkeit geordnet werden.

Technologien einschlägige Werte zu erheben. Deshalb wird „Forschungsintensität“ als Filterkriterium nicht weiterverfolgt.

Zu „CO₂-Preis-abhängige Wirtschaftlichkeitsschwelle“: Im Zuge der Transformation kann auch die Frage gestellt werden, ob der Einsatz gewisser Technologien aus wirtschaftlichen Gründen nicht oder noch nicht erfolgen sollte. Hierfür könnten die aktuellen CO₂-Vermeidungskosten für einzelne Technologien herangezogen werden. Technologien mit sehr hohen CO₂-Vermeidungskosten könnten dann nicht oder erst später eingesetzt werden. Dadurch würde der Expansionspfad von Technologien – und damit die mit deren Produktion und Einsatz verbundene Wertschöpfung – beeinflusst. Zusätzlich zu beachten wäre dabei allerdings, dass die zeitlich kumulierten CO₂-Vermeidungskosten gerade durch eine frühzeitige Markteinführung einer Technologie auch bei hohen aktuellen Vermeidungskosten gesenkt werden können. Zudem wäre auch zu berücksichtigen, dass aus Sicht des Gesamtsystems ein frühzeitiges Hochfahren einzelner Technologien sinnvoll sein kann, die erst später im Zuge der Transformation ihr Vermeidungspotenzial ausschöpfen (z. B. batterieelektrische Fahrzeuge, deren Vermeidungspotenzial erst durch eine treibhausgasneutrale Stromerzeugung realisiert wird). Abgesehen von diesen Erwägungen eines kostenoptimalen Hochfahrens verliert dieses Filterkriterium an Überzeugungskraft, wenn berücksichtigt wird, dass hier eben nicht kostenoptimale Pfade im Mittelpunkt stehen, sondern mögliche tatsächliche Ausbaupfade betrachtet werden sollen. Diese sind aufgrund von anderweitigen Hemmnissen und politischen Entscheidungen nicht kostenoptimal. Deshalb wird dieses Kriterium für eine Filterung nicht weiterverfolgt.

Zu „Verfügbarkeit einer Technologie“: Da die Entstehung oder das Wachstum von Märkten und die damit verbundenen wirtschaftlichen Potenziale für eine Produktion in Deutschland untersucht werden sollen, erscheint es sinnvoll, nur Technologien zu betrachten, die innerhalb der Betrachtungszeit nicht nur eine Marktreife erlangen, sondern auch breit eingesetzt werden könnten. Dabei wird ein Betrachtungszeitraum bis etwa 2050 angenommen. Demnach können Technologien ausgeschlossen werden, die vermutlich nicht deutlich vor 2050 eine breite Anwendung erlangen oder ein hohes Forschungs- und Entwicklungsrisiko haben. Als ein Indikator für die zeitliche Verfügbarkeit und die Wahrscheinlichkeit eines Erfolgs⁶ einer Technologie kann der Technology Readiness Level⁷ (TRL) aufgefasst werden. Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, alle Technologien auszuschließen, die gegenwärtig ein TRL kleiner als 5 aufweisen; also diejenigen, die noch nicht als großer Prototyp vorliegen. Anzumerken sind hier zweierlei Unschärfen: Zum einen variiert die Zeit, in der höhere TRL erreicht werden, stark. Zum

⁶ So auch verwendet von Viebahn et al. (2018a, S.24).

⁷ Zur Einteilung des TRL s. Anhang. Dort wird der TRL nach IEA-Definition angeführt. Die ersten neun Stufen sind analog zu anderweitig häufig verwendeten 9-stufigen TRL-Skala. Der Unterschied besteht im Wesentlichen in zusätzlich eingeführten Levels für fortgeschrittene Entwicklungsstufen, die hier nicht unmittelbar relevant sind, aber z. B. auf die im Energiebereich wichtige Voraussetzung einer Systemintegration für ein schnelles länger anhaltendes Wachstum einer Anwendung hinweisen. Eine gewisse Übersicht zu verschiedenen TRL-Skalen im Energiebereich – jedoch ohne die IEA-Skala – liefert European Commission (2017, S. 27), wo als Ergebnis festgehalten ist: Die Unterschiede der TRL-Skalen „are merely limited to the detailed descriptions..., not to the general characterisation of the levels“.

zweiten ist zu erwarten, dass die Geschwindigkeit, mit der eine Marktreife erreicht wird, auch von Rahmenbedingungen, z. B. von politischen Maßnahmen, abhängt. Allerdings dürfte keine beliebige Beschleunigung möglich sein, da z. B. Prototypen gebaut oder Reallabore eingerichtet werden müssen und die weitere Technologieentwicklung dann auch von den Erkenntnissen aus diesen Aktivitäten abhängt. Insofern dürfte der TRL zumindest tendenziell den Zeitbedarf bis zu einer Marktreife oder einem breiteren Einsatz einer Technologie indizieren. Hier ist ergänzend darauf hinzuweisen, dass diese Filterung auf einer disaggregierten Ebene angewandt werden sollte, da man ansonsten eine größere Bandbreite an TRLs enthält, die eine Filterung ausschließen. Dies ist auch praktikabel, da in der die Longlist dominierenden IEA-Technologieliste der TRL für jede Technologie angegeben ist. Daher wird dieses Kriterium angewendet.

Zu: „Bedeutung für den Klimaschutz“: Da es darum geht, die industriepolitischen Potentiale einer anspruchsvollen Klimapolitik zu besprechen, ist es naheliegend, sich auf die Technologien zu fokussieren, denen eine besonders große Bedeutung für den Klimaschutz zukommen dürfte. Demnach sind die Technologien zu filtern, die nur geringfügig zum Klimaschutz beitragen. Das ist auch umzusetzen, da die IEA-Technologieliste – die ja schon auf THG-Emissionsfreiheit basiert – die Technologien hinsichtlich ihrer Bedeutung für „net-zero emissions“ in drei Stufen einordnet: moderate, high und very high. Dementsprechend könnte „moderate“ herausgefiltert werden. Der offensichtliche Nachteil besteht darin, dass eine große Anzahl von Technologien mit einer geringen Klimaschutzwirkung insgesamt eine große Wirkung entfalten kann. Dann kann sich in der Summe zeigen, dass auch Technologien mit einem moderaten Beitrag notwendig sind, um ein Null-Emissionsziel zu erreichen. Dabei ist zudem anzumerken, dass die Höhe des Beitrags evtl. von der künstlich bestimmten Tiefe der Gliederung abhängt: Je feiner die Technologien untergliedert werden, desto größer dürfte der Anteil von Technologien mit einem geringen Beitrag zum Klimaschutz werden. Da die Longlist aber überwiegend sehr detaillierte Technologiebeschreibungen enthält, ist dieses Problem voraussichtlich wenig bedeutsam. Insofern ist dies ein geeignetes Filterkriterium, zumal grundsätzlich davon ausgegangen werden kann, dass die Technologien, deren Wichtigkeit für das Net-Zero-Emission-Ziel als „high“ oder „very high“ eingeschätzt werden, tatsächlich in absehbarer Zeit in nennenswertem Umfang eingesetzt werden, sofern sich die Staatengemeinschaft an den von ihr gesetzten Zielen – zumindest grob – orientiert. Daher wird auch dieses Kriterium angewendet.

Zu „Potenzielles Marktvolumen“: Die potenzielle wirtschaftliche Bedeutung eines in Deutschland produzierenden Sektors/Unternehmens hängt von der Gesamtgröße des Marktes ab, der potenziell beliefert werden kann. Deshalb erscheint ein zusätzliches Kriterium zum Marktvolumen angezeigt. Dabei ist auf das zukünftig zu erwartende oder in Szenarien entwickelte Marktvolumen abzuheben bzw. auf die Entwicklung des Marktvolumens im Zeitablauf. Hierfür wird der Weltmarkt betrachtet, da er den weitestmöglichen Markt darstellt und mithin für ein Filterkriterium besonders geeignet ist. Der weltweite Umsatz im Zeitverlauf ist dann ein angemessener Indikator. Ergänzend oder ersatzweise kann ein Mengenindikator für eine Abschätzung des Marktvolumens herangezogen werden; z. B. GW der jährlich neu installierten Leistung für EE-Anlagen, was aber ein schlechterer Indikator für ein wirtschaftliches Potential ist. Grundsätzlich sind dafür Szenarien auszuwerten. In Frage kommen dabei vor allem Zielszenarien, da diese den

erforderlichen Technologieeinsatz für eine Erreichung der Klimaschutzziele und damit die Vereinbarkeit von Technologieentwicklung und Zielsystem abbilden. Zu beachten ist dabei, dass in der detaillierten Technologielliste einzelne Technologien sowohl alternativ als auch ergänzend sein können. Sofern Technologien in Konkurrenz stehen, dürfte es schwierig werden, potenzielle Marktvolumina gut zu schätzen, da in Szenarien mitunter nicht einzelne Technologien aufgeführt sein dürften (z. B. gibt es Daten zum zukünftigen weltweiten PV-Einsatz, aber kaum eine für die Aufteilung des PV-Einsatzes auf einzelne Technologien, wie „concentrated PV“, „crystalline silicon“ oder „Perovskite solar cell“). Aufgrund dessen ist es angezeigt, bei dem Kriterium Marktvolumen mitunter auf zusammengefasste Technologien zurückzugreifen. Auch hier ist anzumerken, dass das Marktvolumen mitunter abhängig von der Entwicklung von Rahmenbedingungen ist und mithin auch ein Ergebnis der Analyse sein kann. Das wird dadurch berücksichtigt, dass ein vergleichsweise niedriger Schwellenwert (1 Mrd. €) angesetzt wird. Bei einem derartigen geringen Volumen ist dann auch nicht zu erwarten, dass in der quantitativen Analyse merkliche Effekte festgestellt werden könne. Zudem werden Technologien ausgeschlossen, für die – oder für Aggregate, zu denen sie gehören – kein Marktvolumen zu finden war, da angenommen werden kann, dass für wirtschaftlich wahrscheinlich bedeutsame, in absehbarer Zeit verfügbare Technologien Zahlen zu finden sein sollten. Diese Filterung von Technologien, für die keine Marktvolumendaten vorliegen, ist auch forschungspraktisch begründet: Für Technologien, für die keine Daten zum Marktvolumen vorliegen, ist eine Abbildung in den quantitativen Modellen kaum möglich. Aufgrund der erforderlichen Aggregation und um die erforderliche Recherche begrenzt zu halten, ist es angezeigt, die Filterung nach dem Kriterium „Marktvolumen“ nach den anderen Filterungen durchzuführen.⁸

Zu „Akzeptanz“: Das Ausmaß einer Akzeptanz ist zweifellos ein wichtiger Faktor, um einzuschätzen, wie sich eine Technologie in einem Land zukünftig entwickeln dürfte. Deshalb ist „Akzeptanz“ im Zuge der MLP-Analyse zu behandeln. Sie kann aber auch als Filterkriterium dienen, sofern sie so gering ist, dass eine Technologieanwendung in einem Land ausgeschlossen werden kann. Vor dem Hintergrund des Projektinhalts, die mögliche Bedeutung des Klimaschutzes für die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands zu untersuchen und dabei auf die Bedeutung von Leitmärkten abzuheben, ist es sinnvoll, diejenigen Technologien auszuschließen, deren Einsatz in Deutschland eindeutig abgelehnt wird, da es unwahrscheinlich sein dürfte, dass Deutschland eine führende Rolle bei deren Produktion und Anwendung spielt.

Insgesamt werden für die Filterung also herangezogen (zur Übersicht siehe auch Tabelle 2 oben): Technische Verfügbarkeit, Bedeutung für den Klimaschutz, Akzeptanz und Marktvolumen. Die gleichzeitige Verwendung von TRL, Marktvolumen und Bedeutung für die Erreichung von Net-Zero-Emission-Zielen ist auch geeignet, die Schwäche des TRL⁹, nicht die wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Bedeutung einer Technologie abzubilden, teilweise zu kompensieren.

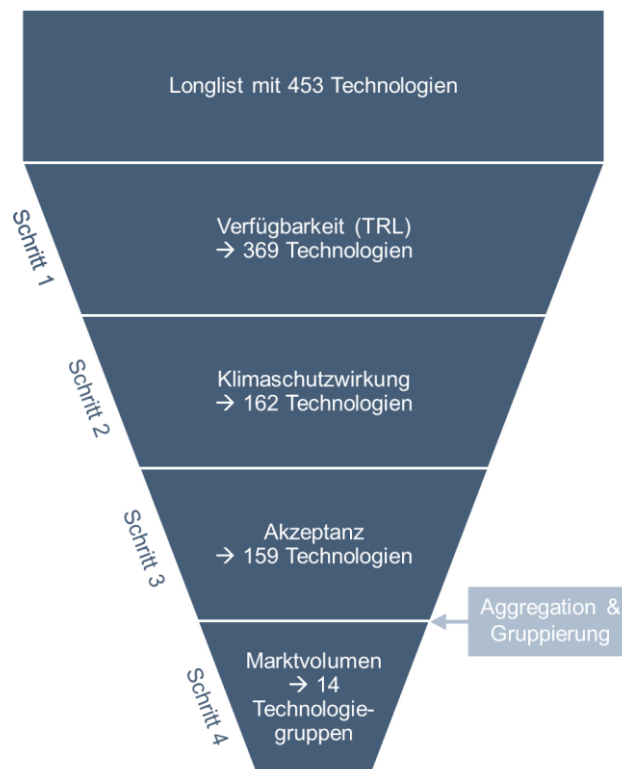
⁸ Zudem ist eine solche Aggregation auch für die weitere Arbeit von Bedeutung, da es vielfach impraktikabel sein dürfte, für die MLP-Analyse auf sehr detaillierten Technologien aufzusetzen.

⁹ Siehe hierzu Mendoza et al. (2022).

3.1.2 ANWENDUNG DER AUSGEWÄHLTEN FILTERKRITERIEN

Die resultierenden Filterungs- und Aggregationsschritte sind in Abbildung 2 dargestellt. Den Filterkriterien ist – wie oben ausgeführt – gemein, dass sie angewendet werden können, ohne dass eine tiefgreifende Analyse der Technologien notwendig ist.

Abbildung 2: Filterung für die Technologieauswahl



Quelle: eigene Darstellung

Im ersten Schritt werden die Technologien anhand des „Technology Readiness Levels“ (TRL) gefiltert. Die Einstufung der Technologien mit Hilfe des TRLs dient der Bestimmung des Reifegrads und damit einhergehend der Verfügbarkeit der Technologien. Die Skala reicht von „Concept“ (TRL 1 bis 3) bis zu „Mature“ (TRL 11) (IEA 2021b, siehe Anhang 1). Aus der Ausgangsliste werden die Technologien gefiltert, deren technologischer Reifegrad einen Wert kleiner als 5 hat, d. h., dass es für die Technologie mindestens einen Prototypen geben muss, der sich unter den vorgesehenen Einsatzbedingungen bewährt hat (Näheres zur Begründung der Filter s. Abschnitt 3.1.1). Durch die Filterung nach TRL bleiben von den 453 noch 369 Technologien in der Liste erhalten.

Das zweite Filterkriterium ist die Bedeutung für den Klimaschutz: Die IEA teilt diese in „moderate“, „high“ und „very high“ ein (IEA 2021c). Gilt eine Technologie demnach als moderat relevant für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende, wird sie nicht weiter betrachtet. Somit verbleiben 162 Technologien mit einem technologischen Reifegrad von mindestens 5 und einer mindestens hohen Klimaschutzbedeutung.

Im dritten Schritt wurden die Technologien von der Liste ausgeschlossen, die eine unzureichende Akzeptanz in Deutschland haben (bzw. in Teilen Deutschlands verboten sind). Einschätzungen hierzu wurden aus Viebahn et al. (2018c, 2018d) genutzt. Es stellte

sich heraus, dass die drei Verfahren CCU/CCS-Technologie in Verbindung mit Kohlekraftwerken, der Kalina-Kreisprozess und Atomenergie eine zu geringe Akzeptanz in der Bevölkerung aufweisen, sodass die Auswahlliste auf 159 Technologien verkürzt wurde.

Bevor der letzte Schritt der Filterung durchgeführt werden kann, müssen die Technologien aggregiert und zu Gruppen zusammengefasst werden. Anderenfalls ist der Detailgrad der Technologien so tief, dass eine Datenrecherche auf dieser Gliederungsebene für den Projektrahmen zu umfangreich und von vorneherein auch nicht erfolgversprechend wäre. Die Aggregation findet auf der „Technologie-Ebene“ der IEA-Liste statt („Sector“ > „Sub-sector“ > „**Technology**“), wodurch sich 87 „Technologieaggregate“ ergeben. Da die Technologien teilweise auch nach der Aggregation noch auf einer zu detaillierten Gliederungsebene vorliegen, werden sie anschließend gruppiert. Beispielsweise werden alle Technologien, die sich auf Wasserstoff beziehen, zu der Technologiegruppe „Wasserstoff“ zusammengefasst.

Das letzte Filterkriterium stellt das Marktvolumen dar. Für dessen Abschätzung wurden verschiedene Daten herangezogen (u. a. Umsätze, Investitionen, installierte Leistung). Technologiegruppen, die entweder weltweit ein jährliches Marktvolumen von weniger als 1 Mrd. Euro haben (heute oder in Projektionen) oder für die keine Daten zum Marktvolumen gefunden werden konnten, wurden aussortiert. Dahinter steht die Annahme, dass sich bei einem geringen Marktvolumen keine nennenswerten Effekte in den Modellanalysen zeigen können bzw. dass im Fall fehlender Daten eine Abbildung der Technologie im Modell nicht möglich ist. Nach diesem Filterschritt umfasst die sich ergebende Shortlist 14 Technologiegruppen. Anhand der Datenrecherchen und Modellierungsarbeiten im Gravity-Modell hat sich jedoch bereits gezeigt, dass sich die Technologiegruppen „Effizienz in den Industriesektoren“, „Übertragung und Netze“ (für Strom)¹⁰ und „Gebäudetechnologien“ auf Basis der recherchierten Datenlage nicht im Modell abbilden lassen. Tabelle 3 enthält daher die elf verbleibenden Technologiegruppen, die im nächsten Abschnitt näher beleuchtet und im weiteren Projektverlauf weiter untersucht werden.

Tabelle 3: Technologiegruppen-Shortlist

	Technologie(-gruppe)		Technologie(-gruppe)
1	Windenergie	7	Grüner Wasserstoff
2	Solarenergie (insb. PV und CSP)	8	Wasserkraft
3	Batteriespeicher	9	Wärmespeichersysteme
4	CCU/CCS	10	Brennstoffzellen-Fahrzeuge
5	Biomasse	11	Wärmepumpen
6	E-Mobilität		

Quelle: eigene Tabelle

¹⁰ Hier sei darauf hingewiesen, dass Stromnetze damit zwar nicht als eigene Technologiegruppe untersucht, ihre Bedeutung für andere Technologiegruppen gleichwohl unter dem Kriterium „Abhängigkeit von Infrastrukturen“ thematisiert wird.

3.2 ÜBERBLICK ÜBER DIE TECHNOLOGIEN

In den folgenden Unterkapiteln wird jede der ausgewählten Technologien kurz vorgestellt und ihre Wirkungsweise beschrieben. Die verwendeten Materialien und Komponenten sowie die wichtigsten Stufen der Wertschöpfungskette werden zusammengefasst. Darauf folgen ein kurzer Überblick über die zentralen Akteure zurzeit und die technologiespezifischen Marktentwicklungen der letzten Jahre sowie ein Ausblick auf die erwartete zukünftige Entwicklung der jeweiligen Technologien. Die Detailtiefe und Länge der einzelnen Unterkapitel ist abhängig von der Datenverfügbarkeit bezüglich der einzelnen Technologien. Daher sind die Unterkapitel zu etablierten Technologien wie zum Beispiel Windenergie und Photovoltaik ausführlicher als die Unterkapitel zu den neueren Technologien wie zum Beispiel CCUS etc.

3.2.1 TECHNOLOGIEGRUPPE 1: WINDENERGIE

Technologiebeschreibung und Materialien: Die Hauptbestandteile einer Windkraftanlage oder Windenergieanlage sind das Fundament, der Turm, die Maschinengondel (Maschinenhaus) und der Rotor bestehend aus der Nabe und den (drei) Rotorblättern. Der Generator und, abhängig vom Anlagentyp, das Getriebe befinden sich in der Maschinengondel. Insgesamt wird eine Reihe von Rohstoffen für diese Bestandteile benötigt. Zement und Stahl machen den weitaus größten Anteil aus. Dazu werden Sande, industrielle Mineralien und große Mengen an gewöhnlichen Metallen wie Eisen, Kupfer und Aluminium benötigt. Hinzu kommen Metalle wie Chrom, Mangan, Molybdän und Niob, die in der Gondel eingesetzt werden, sowie seltene Erden wie Neodym, Dysprosium und in kleineren Mengen Praseodym, Bor und Terbium, die hauptsächlich in der Elektronik der Gondel und den Permanentmagneten zum Einsatz kommen (Müller 2018).

Der Rotor der Windkraftanlage wandelt die Bewegungsenergie des Windes zunächst in mechanische Rotationsenergie um; ein Generator wandelt diese anschließend in elektrische Energie um. Je höher die Windgeschwindigkeit und je größer die Rotorfläche, desto höher ist der Stromertrag. Sprich hochgebaute Windkraftanlagen mit längeren Rotorblättern können das Windenergieangebot am besten nutzen (UBA 2021b).

Die Technologie der Windkraftanlagen an Land (TRL 9 bis 10) und von Offshore-Anlagen (TRL 9) ist ausgereift und wird kommerziell genutzt (IEA 2021c). Die Weiterentwicklungen der Technologie konzentrieren sich hauptsächlich auf eine Steigerung der Produktivität durch die Konstruktion längerer Rotorblätter und höherer Türme. Dies ist insbesondere für Gebiete mit schwachen Windverhältnissen an Land und Offshore-Windparks von Interesse. An Land wird die Größe von Windkraftanlagen allerdings in bestimmten Regionen aus Gründen des Umweltschutzes und der öffentlichen Akzeptanz begrenzt. Bei Offshore-Anlagen gibt es diese Einschränkungen bezüglich der Größe der Rotorblätter und Türme nicht, sodass die Konstruktion größerer Rotoren und Türme zur Steigerung der Kosteneffizienz der Stromanlagen voll ausgeschöpft werden kann. Des Weiteren steht die Entwicklung wettbewerbsfähiger und sicher schwimmender Offshore-Windkraftanlagen (TRL 8) im Fokus, da so das enorme Potential von Meeresgebieten mit zu großer Wassertiefe für feste Windkraftanlagen, z. B. vor den Küsten Japans, Koreas, Portugal, Frankreich und an der Westküste der USA, ausgeschöpft werden könnte (IEA 2021c, 2022j).

Wertschöpfungskette: Die Hauptstufen der Wertschöpfungskette umfassen (1) die Projektplanung (läuft zu Beginn und parallel zu den folgenden Stufen ab), (2) die Beschaffung von Rohstoffen und Zwischenprodukten, (3) die Produktion der Komponenten, u. a. Stahlbau (Türme), Fundamentkonstruktionen, Gondel und Drehzylinder, (4) der Transport der Ausrüstung, (5) die Endmontage der Windkraftanlage, (6) der Netzanschluss, (7) der Anlagenbetrieb und die Wartung des Windparks, (8) die Stilllegung der Anlage, der Rückbau und das Recycling (u. a. (De-)Installation, stoffliche Verwertung und Aufbereitung). Weitere Aktivitäten verschiedener Sektoren unterstützen den Prozess. Dazu gehören Beratung, Finanzierung, Bildung, Forschung und Entwicklung, Politikgestaltung und Verwaltungsaktivitäten (IRENA 2017, S. 16; dena 2022).

Weltweit waren 2021 1,4 Millionen Personen im Tätigkeitsfeld der Windkraft (an Land und offshore) beschäftigt. Die meisten Arbeitsplätze sind mit Abstand in China (48 %) angesiedelt, gefolgt von Europa (25 %) und Amerika (16 %) (IRENA & ILO 2022, S. 20). Für die Entwicklung eines 50-MW-Onshore-Windprojekts werden beispielsweise insgesamt 144.000 Personentage benötigt, dabei ist der Arbeitsbedarf im Bereich Betrieb und Wartung am höchsten (43 % des Gesamtbedarfs), gefolgt von Bau und Installation (30 %) und Fertigung (17 %) (IRENA 2017, 2019). Für die Entwicklung eines 500-MW-Offshore-Windparks werden 2,1 Millionen Personentage benötigt. Hier gibt es eine starke Konzentration auf den Bereich der Herstellung und Beschaffung (59 %), die Betriebs- und Wartungsarbeiten (24 %) sowie die Installation und den Netzanschluss (11 %). Länder, die sich gegen die eigene Herstellung von Windkraftanlagen entscheiden, können trotzdem von beträchtlichen Möglichkeiten zur Schaffung von Arbeitsplätzen in anderen, stets lokal begrenzten Segmenten (z. B. Betriebs- und Wartungsarbeiten, Installation und Wartung) profitieren (IRENA 2018, S. 15).

Marktentwicklung der letzten Jahre: Im Jahr 2021 haben die zehn größten Hersteller (u. a. Vestas (Dänemark), Goldwind (China), GE (USA), Envision (China) und Siemens Gamesa (Spanien)) 85 % des weltweiten Installationsmarktes auf sich vereinigt und der Trend der Konsolidierung der weltweiten Windindustrie hat sich fortgesetzt. Die chinesischen Hersteller bedienen trotz eines Wachstums ihrer globalen Exporte hauptsächlich den heimischen Markt und GE als US-amerikanischer Hersteller erwirtschaftete ebenfalls zwei Drittel seines Geschäfts mit US-Kunden (IRENA & ILO 2022, S. 20). Die meisten Windkraftanlagen, die auf dem europäischen Kontinent aufgestellt werden, werden auch in Europa hergestellt. Vestas und Siemens Gamesa, als europäische Hersteller, sind in mehr als 30 Ländern vertreten und können auf ausgereifte globale Lieferketten zurückgreifen. Dänemark und Deutschland sind als führende Hersteller und Exporteure für Windkraftanlagen zusammen mit den Niederlanden und Spanien für mehr als drei Viertel der weltweiten Ausfuhren im Jahr 2020 verantwortlich gewesen. Allerdings sind die europäischen Hersteller auf den Import von Seltenen Erden angewiesen, welche hauptsächlich in China abgebaut werden (UBA 2019c; IRENA 2022e, S. 333; IRENA & ILO 2022).

Im Jahr 2021 wuchs die Windkraftkapazität weltweit um 94 GW, davon machte 22 % ein Zuwachs an Offshore-Windkraftanlagen aus. Insgesamt sind damit weltweit 830 GW an Windkraftkapazität installiert, 93 % (774,3 GW) an Land und die restlichen 55,7 GW in

Offshore-Windkraftanlagen (IEA 2022j). Der Zuwachs an Windkraftanlagen an Land und Offshore war 2021 in China am größten. Insgesamt sind 72 % der globalen Windkraftkapazität in nur fünf Ländern (China, USA, Deutschland, Indien und Spanien) installiert (GWEC 2022, S. 104; IRENA & ILO 2022). Für die kommenden Jahre wird ein deutlicher Zuwachs an Offshore-Windparks erwartet (IEA 2022j).

Abgesehen von Wasserkraft hat Windenergie den größten Anteil an erneuerbaren Energien. Global wurden 2021 1870,3 TWh Elektrizität durch Windenergie gewonnen. Das war ein Zuwachs von 273,5 TWh im Vergleich zu 2020 (gesamt 1596,8 TWh). 70 % der Zunahme der Stromerzeugung aus Windenergie fand in China statt, 14 % in den Vereinigten Staaten (USA) und 7 % in Brasilien (IEA 2022j).

Die Wettbewerbsfähigkeit der Kosten der Windenergie hat von dem relativen Preisnachteil der fossilen Brennstoffe auf Grund der Preisentwicklungen im Jahr 2022 profitiert. Der global gewichtete durchschnittliche Auktionspreis für Windenergie lag 2022 bei 0,043 USD/kWh für Windkraftanlagen an Land und bei 0,084 USD/kWh für Offshore-Windkraftanlagen (IRENA 2022e). In Deutschland lag der durchschnittliche, mengengewichtete Zuschlagswert im Jahr 2022 für Windenergieanlagen an Land bei 0,058 bis 0,059 €/kWh (Bundesnetzagentur 2023c).

3.2.2 TECHNOLOGIEGRUPPE 2: SOLARENERGIE

In dieser Gruppe stehen v. a. Photovoltaik (PV) und konzentrierende Solarthermie (engl. Concentrated Solar Power, CSP) im Vordergrund. Diese beiden Untergruppen bestehen jeweils aus weiteren Einzeltechnologien.

3.2.2.1 Photovoltaik (PV)

Technologiebeschreibung und Materialien: PV bezeichnet die Technologie, über die elektrische Energie aus Licht durch den (inneren) Photoeffekt von Halbleiter-Strukturen gewonnen wird (Viebahn et al. 2018b). Unter dem Einfluss von Sonnenlicht werden im Halbleitermaterial Elektronen in Bewegung gesetzt. Der so erzeugte Gleichstrom wird über einen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt. Der globale PV-Markt wird zurzeit von mono- und polykristallinen Solarzellen dominiert, die über 95 % der weltweiten Produktion ausmachen (TRL 9, IEA 2021c). Dünnschichtzellen, die auf Silicium oder anderen Halbleitermaterialien, wie z. B. Cadmium-Tellurid, aufbauen, machen den Rest aus (UBA 2021a; IEA 2022h). Unabhängig von der Größe und dem Anlagensegment (u. a. Freifläche, Aufdach oder integriert) besteht die PV-Anlage meist aus PV-Modulen, Verkabelung, Unter-/Trägerkonstruktionen und ggfs. Nachführsystemen sowie Wechselrichtern und Transformatoren (oder Kombinationslösungen aus beiden) zur Anbindung an das Stromnetz (dena 2022). Die wichtigsten Komponenten der PV-Module, basierend auf der Silicium-Wafertechnologie, sind hochreines Polysilicium, die Kristallisation von Siliciumblocks (sogenannte Ingots) und Silicium-Wafer (Fraunhofer ISE 2022).

Grundsätzlich sind PV-Anlagen als Technologie ausgereift und in großem Stil kommerziell verfügbar (TRL 9; IEA 2021c). Insbesondere die politisch motivierten Investitionen in den Ausbau und Entwicklung solarer PV in China haben Skalenvorteile ermöglicht und kontinuierliche Innovationen in der gesamten Lieferkette unterstützt (IEA 2022h, S. 7).

Wertschöpfungskette: Die Wertschöpfungskette von siliciumbasierten PV-Modulen und Anlagen besteht im Wesentlichen aus den folgenden Schritten: (1) Projektentwicklung, (2) Finanzierung, (3) Modulfertigung, welche die Rohstoffförderung, Materialherstellung (Solarsilicium, Metallpasten, Verbinderdrähte, Kunststofffolien, Solarglas, Glasbeschichtung), Herstellung von Zwischen- und Endprodukten (Module, Kabel, Wechselrichter, Montagegestelle, ggfs. Nachführsysteme) und den Maschinenbau für die Zell- und Modulproduktion beinhaltet, (4) Installation und Montage (v. a. Handwerk), (5) Netzanbindung, (6) Anlagenbetrieb und -wartung und (7) Rückbau und Recycling (Fraunhofer ISE 2022; dena 2022). Grundsätzlich wird ein positiver Beschäftigungseffekt durch den Ausbau der Produktion und den weiteren Zubau von PV-Anlagen erwartet. Bisherige Studien zeigen, dass eine vertikal integrierte 10-GW-Produktion vom Silicium-Block über Wafer und Zelle bis zum Modul etwa 7.500 Vollarbeitsplätze schafft. Die Installation einer solchen 10-GW-PV-Anlage benötigt ca. 46.500 Vollzeitbeschäftigte (Berechnung basierend auf Zahlen aus dem Jahr 2018, Fraunhofer ISE 2022).

Marktentwicklung der letzten Jahre: Solarenergie, die durch PV-Anlagen gewonnen wird, ist, bezogen auf die Stromerzeugung, die drittgrößte der erneuerbaren Energien nach Wasserkraft und Windkraft (IEA 2022g). Für 2021 wird die weltweit installierte PV-Leistung auf etwa 940 GW geschätzt, im Mai 2022 wurden 1 TW installierte Leistung erreicht. Insgesamt gibt es weltweit 17 Märkte, deren Kapazität im GW-Bereich liegt (SolarPower Europe 2022, S. 5; IEA 2023c). Der jährliche Zuwachs an global hinzukommender PV-Kapazität hat sich von 37 GW im Jahr 2013 auf 150 GW im Jahr 2021 vervierfacht (IEA 2022g). Im Jahr 2021 wurden insgesamt 1.002,9 TWh durch PV-Anlagen generiert, dies ist ein neuer Höchstwert und bedeutet einen Anstieg um 22 % (179 TWh) im Vergleich zum Jahr 2020. Insgesamt wurden 3,6 % der global generierten Elektrizität durch Solarenergie bereitgestellt (IEA 2022g).

China ist nachfrageseitig weiterhin der globale Marktführer mit einer kumulierten Kapazität von 308,3 GW, was 33 % der weltweiten Kapazität im Jahr 2021 entspricht. Auf China folgen die USA mit 122,9 GW (13,1 %), Japan mit 77,6 GW (8,3 %) und Deutschland mit 60,6 GW (6,45 %) installierter Leistung. Damit ist Deutschland der größte Markt gemessen an der Kapazität innerhalb der EU (dena 2022; SolarPower Europe 2022).

Im Jahr 2021 lag die jährliche Produktionskapazität für PV-Module weltweit bei 250 GW (IEA 2022k, S. 170). Die Produktion und der Markt für PV-Module werden durch China dominiert. Dies betrifft insbesondere die Produktion von Polysilicium, Ingots und Wafern. 97 % der global für PV-Anlagen genutzten Wafer werden in China hergestellt, wobei 14 % der weltweit produzierten Wafer von einer einzelnen chinesischen Firma produziert werden. Die hohe Konzentration der Industriekapazitäten in China hat positive Skaleneffekte ermöglicht und die Preise für PV-Anlagen weltweit gesenkt. Allerdings birgt die derzeitige geographische Konzentration Herausforderungen bezüglich der Sicherung von Lieferketten (IEA 2022k, S. 77).

Kurzfristig ist nicht abzusehen, dass Chinas Dominanz in der Produktion von PV sinken wird, da die Investitionskosten in die Produktion von Polysilicium, Ingots und Wafern in den USA, der EU und Indien pro MW drei- bis viermal so hoch sind. Auch die Herstellungskosten in den USA, der EU und Indien sind deutlich höher als in China und ASEAN-Ländern. Diese

Kostenunterschiede sind u. a. bedingt durch längere Bau- und Entwicklungsphasen von Produktionsstätten, höhere Lohn- und Materialkosten und weniger Erfahrung in der Entwicklung von Großserienfertigung von PV-Anlagen. Jedoch kann die Kombination von sinkenden Herstellungskosten von PV-Modulen und steigenden Frachtkosten die Wettbewerbsposition Chinas langfristig schwächen und zu Gunsten anderer Länder verschieben. In den letzten Jahren ist der Kostenunterschied zwischen der inländischen Produktion und chinesischen Importen in Europa bereits auf 8 % und in den USA auf 3 % gesunken (IEA 2022h; Fraunhofer ISE 2022, S. 85, 87, 92, 117).

Die durchschnittlichen Auktionspreise für PV-Anlagen sind in den letzten Jahren ebenfalls kontinuierlich gesunken. Bei PV-Anlagen, die 2022 in Betrieb genommen wurden, lag der globale Durchschnittspreis bei 37 USD/MWh (IEA 2022a). Die Wettbewerbsfähigkeit der PV-Energie als saubere Energietechnologie hat aufgrund des gesunkenen Preises im Vergleich zu fossilen Alternativen in den letzten Jahren stark zugenommen (IEA 2023c). Auch mit Blick auf die Kapitalkosten kann PV-Energie mit fossilen Energieträgern konkurrieren und ist an den meisten Standorten bereits günstiger (IEA 2023a, S. 48). In Deutschland lag der durchschnittliche, mengengewichtete Zuschlagswert im Jahr 2022 bei Freiflächen-PV-Anlagen bei 5,19 bis 5,8 ct/kWh und bei Aufdach-PV-Anlagen bei 8,53 bis 8,84 ct/kWh (Bundesnetzagentur 2023a, 2023b).

Im Jahr 2021 hat die Kombination von hohen Rohstoffpreisen und Engpässen in den Lieferketten allerdings zu einem 20-prozentigen Preisanstieg für Solarmodule im Vergleich zu 2020 geführt. Zudem führt die Zunahme an Handelsbeschränkungen (Antidumping-, Ausgleichs- und Einfuhrzölle) potentiell dazu, dass sich die Verbreitung von PV-Anlagen und damit deren Nutzung im Rahmen der Energiewende verlangsamt (IEA 2022h, S. 9, 11, 62, 72-73). Zudem gibt es ein Ungleichgewicht in der Lieferkette, so dass heute ein Überangebot an Produktionskapazitäten für Wafer und Solarzellen einem Engpass in der Produktion von Polysilicium, dem Schlüsselmaterial für PV, gegenübersteht (IEA 2022h, S. 7).

3.2.2.2 Konzentrierende Solarthermie (CSP)

Technologiebeschreibung und Materialien: CSP als zweite Untergruppe ist eine ergänzende Technologie zur PV, die bei einer hohen Direktstrahlung zum Einsatz kommen kann, da sie im Gegensatz zur PV keine diffuse Sonnenstrahlung nutzen kann. Im Gegensatz zur PV, bei der Sonnenlicht direkt über einen chemisch-mineralischen Umwandlungsprozess in elektrischen Gleichstrom umgewandelt wird, wird bei der CSP das Sonnenlicht mit Hilfe von Spiegeln, die sich nach der Sonne ausrichten, gebündelt und effektiv auf einen Punkt konzentriert. Dadurch wird das Sonnenlicht in Wärme (Hochtemperatur) umgewandelt und entweder direkt als Nah- oder Fernwärme oder über einen Wärmetauscher in einen Wasser-Dampf-Kreislauf eingebracht. Wie in traditionellen Dampfkraftwerken wird dann über Dampfturbinen Strom erzeugt (Hogrefe 2021). Bisher kommen in der Praxis drei verschiedene Techniken für die Konzentration der Solarstrahlung zum Einsatz: Solartürme (TRL 9), Parabolrinnen (TRL 9) und Linear-Fresnel-Systeme (Hogrefe 2021; IEA 2021c). Ein Vorteil der CSP-Kraftwerke ist die Möglichkeit der thermischen Energiespeicherung – die günstiger ist als Stromspeicherung

– der Sonnenenergie, so dass eine Nutzung der Sonnenenergie 24 Stunden am Tag möglich ist (Hogrefe 2021).

Die Kopplung von PV und CSP in sogenannten Hybrid-Anlagen verspricht eine effiziente Möglichkeit, um die spezifischen Stromgestehungskosten zu senken. Die allgemeinen Versorgungseinrichtungen und Infrastruktur können geteilt werden und CSP kann die Aufgabe der Netzstabilisierung übernehmen. Erste Hybrid-Anlagen befinden sich in Marokko und Dubai in Betrieb bzw. im Bau (Hogrefe 2021; Innovation Centre 2023). Weiterhin bietet CSP die Möglichkeit zur kostengünstigen Herstellung von grünem Wasserstoff über Beiträge zur Hochtemperatur-Elektrolyse und Nutzung der Prozesswärme für die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu beispielsweise Ammoniak und Methanol (Details zu Wasserstoff s. Kapitel 3.2.7). Die Entwicklungen hierzu stehen jedoch noch ganz am Anfang (Hogrefe 2021).

Marktentwicklung der letzten Jahre: Weltweit bestehen 7 GW installierte elektrische Leistung an CSP, was einer Spiegelfläche von ca. 50 km² entspricht. Vor allem in den sonnenreichen Ländern der Erde ist ein kosteneffizienter Einsatz von CSP möglich. Im Jahr 2021 waren die meisten CSP-Kraftwerke in den folgenden Ländern zu finden: Spanien (2,3 GW), den USA (1,6 GW), Marokko (0,53 GW) sowie China und Südafrika (jeweils 0,5 GW). In den Vereinigten Arabischen Emiraten sind etwa 0,8 GW bereits in Betrieb und ein Ausbau auf 5 GW bis 2030 ist in Planung (Hogrefe 2021; BMWK 2022a; Innovation Centre 2023). Die berechneten Stromgestehungskosten sind seit dem Start der ersten CSP-Kraftwerke in den 2000er-Jahren deutlich gesunken und mittlerweile im Vergleich zu fossilen Brennstoffen wettbewerbsfähig.¹¹ Basierend auf Berechnungen der internationalen Energieagentur IRENA lagen 2019 die Stromgestehungskosten für Strom aus CSP-Kraftwerken bei 0,182 USD/kWh. Auf Grund der üblichen Skalierungseffekten sind die Auktionspreise bzw. Stromabnahmepreise in den letzten Jahren stark gefallen und lagen im Jahr 2021 bei 0,075 USD/kWh. Die Entwicklung der Kostenreduktion auf Grund von Skaleneffekten ist vergleichbar mit der Entwicklung bei PV und es wird erwartet, dass zukünftige Innovationen zu weiteren Kostenreduktionen führen (Hogrefe 2021, S. 19).

3.2.3 TECHNOLOGIEGRUPPE 3: BATTERIESPEICHER

Technologiebeschreibung und Materialien: Die Nachfrage nach Batteriespeichern wird angetrieben durch die Notwendigkeit von Speichermöglichkeiten im Energiesektor. Um Schwankungen dargebotsabhängiger erneuerbarer Energien abzufedern, sind Batteriespeicherkraftwerke als Energiespeichersysteme für das Stromnetz wichtig (IRENA 2022e; BMWK 2023). Da Lithium-Ionen-Batterien (TRL 9, IEA 2021c) eine besonders hohe Energiedichte haben und universell einsetzbar sind, dominieren sie den Markt für Speicheranwendungen und Elektrofahrzeuge (Details zu „Elektromobilität“ s. Kapitel 3.2.6) (IRENA 2022e; Batterieforum Deutschland 2023). Redox-Flow-Batterien (u. a. Vanadium-Redox-Flow-Batterien; TRL 8, IEA 2021c) werden ebenfalls als stationäre Energiespeicher

¹¹ In Kalifornien (USA) wurden bereits in den 1980er Jahren große CSP-Kraftwerke (sogenannte „Solar Energy Generating Systems“) errichtet und auch längerfristig betrieben. Allerdings folgte bis in die 2000er keine weitere kommerzielle CSP-Anlage auf der Welt.

eingesetzt, allerdings haben sie eine geringe Energiedichte, was sehr große Tanks notwendig macht, wenn viel Energie gespeichert werden soll (Batterieforum Deutschland 2023). Laut einer vergleichenden Studie von Roberts & Brown (2022) kommen Batteriespeicherkraftwerke beider Batterietypen, Lithium-Ionen und Vanadium-Redox-Flow, auf ähnliche Wirkungsgrade und Stromgestehungskosten von weniger als 0,22 USD/kWh. Daher sind wahrscheinlich andere Faktoren, wie zum Beispiel der verfügbare Platz oder die Umgebungstemperatur, bei der Entscheidung zwischen den beiden Technologien ausschlaggebend. Hohe Umgebungstemperaturen lassen für Lithium-Ionen-Batteriespeicherkraftwerke die Stromgestehungskosten ansteigen, weshalb an diesen Standorten beispielsweise Vanadium-Redox-Flow-Batterien im Vorteil sind (Roberts & Brown 2022). Im Folgenden liegt der Fokus auf Lithium-Ionen-Batterien.

Die Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien basiert auf Kathodenchemie. Die drei wichtigsten Metalle für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien sind Lithium, Kobalt und Nickel. Diese drei machen zusammen ungefähr ein Fünftel des Gesamtgewichts einer Batterie aus. Weitere Hauptbestandteile der Batterien sind Kupfer, Aluminium und Graphit (IRENA 2022e, S. 307 f.). Auf Grund des außergewöhnlich starken Nachfrageanstiegs nach Lithium-Ionen-Batterien, insbesondere für die Produktion von Elektrofahrzeugen, gibt es trotz großer globaler Vorkommen von Lithium, Kobalt und Nickel in der Erdoberfläche zurzeit eine Knappheit bedingt durch zu geringe Abbaumöglichkeiten der bestehenden Bergwerke (IEA 2022c, S. 146). Der Abbau und die Förderung der kritischen Metalle konzentrieren sich auf einzelne Länder. 99 % der weltweit geförderten Menge an Lithium stammen aus nur sieben Ländern (u. a. Australien, Chile und Argentinien). Der Großteil an Kobalt stammt aus dem Kongo, wo im Jahr 2020 100.000 Tonnen gefördert wurden, Russland und Australien. Graphit wird hauptsächlich in China, Mosambik und Brasilien gefördert. Problematisch bei der Förderung dieser kritischen Metalle ist die damit einhergehenden Schädigungen von Ökosystemen und Umweltbelastungen (VDI/VDE Innovation + Technik 2021b).

Die Technologie der Flüssigelektrolyt-Lithium-Ionen-Batterien ist weitgehend ausgereift und es verbleibt nur noch wenig Optimierungspotenzial durch die fortschreitende Weiterentwicklung. Expert:innen gehen davon aus, dass die Technologie innerhalb des nächsten Jahrzehnts an ihre technischen Grenzen stoßen wird. Der Automobilmarkt ist die treibende Kraft hinter der Entwicklung neuer Batterietechnologien (Fraunhofer ISI 2022, S. 15). Es wird erwartet, dass Batterietechnologien der nächsten Generation, sogenannte Feststoffbatterien (engl. Solid-state battery (SSB)), in den kommenden Jahren Marktreife erlangen. Feststoffbatterien bestehen aus Festelektrolyten und versprechen Verbesserungen bei den wichtigen Leistungsparametern Energiedichte, Sicherheit, Lebensdauer, Kosten und Schnelladefähigkeit. Zurzeit gibt es drei vielversprechende Materialien, die potentiell als Festelektrolyt eingesetzt werden können: Oxid-, Sulfid- und Polymer-Elektrolyte. Polymer-Feststoffbatterien sind die einzigen Feststoffbatterien, die bereits in einem größeren Umfang dem Markt zur Verfügung stehen und in Fahrzeugen erprobt werden. Der breite Markteintritt von Feststoffbatterien wird zunächst im

Endverbrauchermarkt erwartet (z. B. in Laptops, Smartphones und Elektrowerkzeugen¹²; Fraunhofer ISI 2022, S. 15–16).

Wertschöpfungskette: Die Stufen der Wertschöpfungskette von Lithium-Ionen-Batterien umfassen (1) die Förderung der Rohstoffe (u. a. Lithium, Kobalt, Nickel), (2) die Verarbeitung und Veredelung des Rohmaterials zu Vorprodukten für die Batterieherstellung, (3) die spezialisierte Produktion der einzelnen Zellkomponenten (Kathoden- und Anodenmaterialien, Elektrolyte, Separatoren und Gehäuse), (4) die Batteriezellfertigung und (5) die Modul- und Systemmontage. Die letzte Stufe der Wertschöpfungskette ist (6) das Batterie-Recycling und die Wiederverwendung der kritischen Stoffe, Kathoden und Anoden (VDI/VDE Innovation + Technik 2021a; IEA 2022c). Batteriespeicherkraftwerke bestehen aus zu Gruppen zusammengefasster Akkumulatoren. Dabei füllen die einzelnen Batterien meist raumhohe Racks aus und sind so eng übereinandergeschichtet, dass jedes Element eine eigene Lüftung als Schutz vor Überhitzung braucht. Die Racks mit den Akkumulatoren werden meist in getrennten Hallen oder Containern installiert. Dabei wird die mögliche Kapazität nur durch den zur Verfügung stehenden Platz beschränkt. Mit einem Wirkungsgrad von 80 bis 90 % erreichen Batteriespeicherkraftwerke eine sehr hohe Effizienz (Hühn 2021).

Marktentwicklung der letzten Jahre: Im Jahr 2021 waren weltweit Lithium-Ionen-Batteriespeicherkraftwerke mit einer Nennkapazität von 12,6 GWh und 1,3 GWh Flow-Batteriespeicherkraftwerke installiert (DOE Global Energy Storage Database 2023). Im Jahr 2021 waren die drei größten Speicherkraftwerke die „Moss Landing Energy Storage Facility“ mit 1.200 MWh Kapazität (USA, Kalifornien), das „Alamitos Energy Center“ mit 400 MWh Kapazität (USA, Kalifornien) und die „Buzen Substation“ mit 300 MWh Kapazität (Japan) (Hühn 2021). Basierend auf bisher angekündigten Projekten und Ausbauplänen wird davon ausgegangen, dass China die USA als größter Markt für Batteriespeicher bis 2030 überholen wird (BNEF 2023).

75 % der globalen Produktionskapazität für Batteriezellen ist in China angesiedelt. Für die nächsten Jahre wird prognostiziert, dass der Hauptteil der Batterieproduktion weiterhin in China stattfinden wird. Basierend auf geplanten Investitionen in Europa und den USA wird allerdings davon ausgegangen, dass sich ein Viertel der Produktionskapazität für Batteriezellen bis 2030 nach Europa und in die USA verlagern wird (Thielmann 2020; IEA 2022k, S. 168).

Es wird geschätzt, dass die jährliche Batterieproduktion von 95,3 GWh im Jahr 2020 auf 410,5 GWh im Jahr 2024 ansteigen wird. Die treibende Kraft hinter diesem Marktwachstum ist die steigende Marktnachfrage nach und Produktion von Elektrofahrzeugen (Details s. Kapitel 3.2.6). Die Kapazität stationärer Batteriesysteme im Stromsektor lag 2020 bei 17 GW und wird bis 2030 geschätzt auf 175 GW ansteigen und damit die Nachfrage zusätzlich zu dem Bedarf aus dem Sektor der Elektromobilität erhöhen (IRENA 2022e,

¹² Batterien für den tragbaren Einsatz werden nicht vertieft betrachtet.

S. 301-308). Im Jahr 2022 gab es bereits einen Zubau von 16 GW an Speicherkapazität, dies war 68 % mehr als im Jahr 2021 (BNEF 2023).

Die Kosten für Lithium-Ionen-Batterien sind seit 1991 um 97 % gefallen (Hühn 2021). Um die Abhängigkeit von kritischen Materialien, wie z. B. Grafit, Nickel und Kobalt, zu reduzieren, werden alternative Batteriechemikalien und -entwicklungen insbesondere im Bereich der Batterien für Elektrofahrzeuge erforscht. Eine Alternative, um den Einsatz kritischer Materialien und die Kosten für Batterien weiter zu senken, wäre zum Beispiel die von chinesischen Unternehmen entwickelte Lithium-Bor-Batterie. Deren Einsatz würde die Kosten einer Batterie von 140–160 USD/kWh auf 85 USD/kWh senken, hat allerdings den Nachteil, dass die Batterie schwerer ist und somit z. B. die Reichweite von Elektrofahrzeugen reduziert wird (IRENA 2022e, S. 308). Auf Grund der politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen kam es im Jahr 2022 erstmalig seit 2010 zu einem Preisanstieg für Lithium-Ionen-Batterien. Der kapazitätsgewichtete Durchschnittspreis stieg um 7 % auf 151 USD pro Kilowattstunde. Für die Zukunft werden aber weitere Preisreduzierungen pro Kilowattstunde erwartet, so dass im Jahr 2027 Preise von 94 USD pro Kilowattstunde als möglich eingestuft werden (BNEF 2022a).

3.2.4 TECHNOLOGIEGRUPPE 4: CARBON CAPTURE USE AND STORAGE (CCU/CCS)

Technologiebeschreibung und Materialien: Die Abscheidung, Nutzung und dauerhafte Speicherung von Kohlenstoff (engl. „Carbon Capture Use and Storage (CCU/CCS)“) wird als unvermeidlicher Bestandteil der weltweiten Strategie bis 2050 zur Treibhausgas (THG)-Neutralität gesehen. Ohne die Entnahme von Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre und der dauerhaften Speicherung in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten ist eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius realistisch nicht mehr möglich (IPCC 2022, S. 2901, 2023). CCU/CCS-Verfahren sind insbesondere wichtig, um den Ausstoß von CO₂ in der Industrie zu kompensieren, wenn eine Verringerung des Ausstoßes nur sehr schwer oder gar nicht möglich ist, beispielsweise in der Zementindustrie. Des Weiteren kann zum Beispiel die Menge an ausgestoßenen Treibhausgasen bei der Kohleverstromung und Herstellung von nicht-grünem Wasserstoff durch die Kombination mit CCU/CCS-Technologien reduziert werden (Details zu Wasserstoff siehe Kapitel 3.2.7; dena 2021, 49, 84; BMWK 2022d).

Grundsätzlich wird zwischen CO₂-Minderungsverfahren und Verfahren, die Negativemissionen erzielen, unterschieden. Zum einen können CO₂-Abscheidungsmethoden genutzt werden, um der Abluft oder den Prozessgasen der Energiewirtschaft oder Industrie CO₂ zu entziehen. Wenn das abgeschiedene CO₂ anschließend dauerhaft gespeichert wird, spricht man von „Carbon Capture and Storage (CCS)“. Basiert der Prozess auf fossilen Energieträgern und/oder Rohstoffen, werden die Emissionen entsprechend gemindert, d. h., ein CO₂-Anteil von 60 bis 85 % kann der Atmosphäre dauerhaft entzogen werden (UBA 2022a). Als „Carbon Capture and Use (CCU)“ wird die Abscheidung von CO₂ mit direkter nachfolgender Nutzung, z. B. in der Herstellung von kohlenstoffhaltigen Produkten bezeichnet. Hier wird zwischen dem Aufbau eines kurz- (Papier, Plastikbecher) oder langlebigen (Dachstuhl) zwischenzeitlichen Kohlenstoffspeichers unterschieden. Nach dem Nutzungsende muss der Kohlenstoff

entweder wieder abgeschieden/aufgefangen werden oder er entweicht in die Atmosphäre (BMWK 2022d). "CCU/CCS" wird in dieser Studie als additiver Sammelbegriff für CCU- und CCS-Verfahren genutzt.

Die kombinierte Nutzung von Anlagen mit biogenen Energieträgern und CCU-/CCS-Verfahren wird als "Bioenergy with Carbon Capture and Use/Storage (BECCU/BECCS)" bezeichnet. Handelt es sich um biologische Energieträger mit anschließender dauerhafter Speicherung (BECCS, Bio-CCS), können aufgrund der Entnahme des CO₂ aus der Atmosphäre Netto-Negativemissionen erzielt werden. Die Produktion der Biomasse und damit einhergehende Landnutzungsänderungen bzw. eventuelle Landdegradationen sollten möglichst keine nachteiligen Auswirkungen auf den Klimaschutz haben (BMWK 2022d).

Es gibt zwei Gruppen an CCU-/CCS-Technologien, die im größeren Maßstab verfügbar sind und bereits kommerziell genutzt werden: die chemische und physische Absorption (TRL 7 bis 11, IEA 2021c; IEA 2020, S. 98). Weitere CCU/CCS-Technologien, wie zum Beispiel Oxyfuel-Abscheidung, Membran-Abtrennung, Calcium- oder Chemical-Looping, befinden sich im Demonstrationsstadium bzw. stehen erste Prototypen zur Verfügung (TRL 5 bis 7; IEA 2020, 2021c, 2022b, 2022f). Rund 65 % der CO₂-Abscheidungskapazitäten bestehen an Erdgasverarbeitungsanlagen, da dies eine der vergleichsweise kostengünstigen CCU/CCS-Anwendungen ist (IEA 2022b). In Zusammenarbeit mit Betreibern von Kohlekraftwerken und Herstellern in der Zementindustrie werden neuere CCU/CCS-Technologien eingesetzt und getestet. Der Einsatz der Technologien kann sich in direkter Nähe von großen CO₂-Emittenten rechnen, da die CO₂-Konzentration an Punktquellen fossiler CO₂-Emissionen hoch ist, wodurch die Kosten pro Tonne CO₂ sinken (15–25 USD/t bis 40–120 USD/t CO₂; IEA 2020, 2021e, S. 100). Abhängig von der Lage und Effizienz der Anlagen, kann eine Ausstattung von konventionellen Kohlekraftwerken mit CCU/CCS-Technologien die Kosten von 600–2.100 USD/kW auf bis zu 1.800–6.600 USD/kW ansteigen lassen (IEA 2023a, S. 48).

Der direkte Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre wird als "Direct Air Capture (DAC)"-Verfahren bezeichnet. DAC kann ebenfalls zu Negativemissionen führen, wenn eine dauerhafte Speicherung des CO₂ sichergestellt ist (BMWK 2022d). Einige DAC-Verfahren befinden sich zurzeit in der Entwicklung (IEA 2021e). Die Verfahren stützen sich entweder auf flüssige Sorptionsmittel (flüssige DAC [L-DAC]; TRL 6), die eine Hydroxidlösung verwenden, auf feste Sorptionsmittel (feste DAC [S-DAC]; TRL 6), die einen CO₂-„Filter“ verwenden, oder auf trockene chemische Sorptionsmittel auf Aminbasis. Weitere Verfahren auf Prototyp-Ebene sind die Elektroschwingungsadsorption und die membranbasierte Abscheidung (IEA 2020, S. 83, 2022b). Ein Vorteil der DAC-Verfahren ist die flexible Standortwahl, da die Anlagen dort gebaut werden können, wo CO₂ als Rohstoff benötigt wird, oder in nächster Nähe zu geologischen Lagerstätten, so dass die Transportwege des CO₂ verkürzt werden. Der Nachteil der DAC-Verfahren ist die relativ niedrige CO₂-Konzentration in der normalen Umgebungsluft. Dadurch sind die Kosten dieser Art der CO₂-Abscheidung im Vergleich zu CCS/CCU-Anlagen, die die direkten Abgase der Industrie oder von Kraftwerken nutzen, relativ hoch (IEA 2020, S. 83, 2021e).

Neue CO₂-Anwendungen befinden sich in einem frühen Entwicklungsstadium. Drei Verwendungszwecke stehen dabei im Vordergrund: Die Herstellung synthetischer Kohlenwasserstoffkraftstoffe, die Herstellung von Chemikalien, die Kohlenstoff für ihre Struktur und Eigenschaften benötigen (u. a. Ethylen und Methanol) und die Verwendung bei der Herstellung von Baumaterialien (u. a. CO₂-Härtung bei der Betonherstellung). Eine Unterstützung durch die Politik wird von entscheidender Bedeutung sein, da neue Anwendungen vor allem wegen ihrer hohen Energieintensität im Vergleich zu herkömmlichen und alternativen kohlenstoffarmen Produkten sehr kostenintensiv sind. Kurzfristig wird der Markt für CO₂-basierte Produkte daher relativ klein bleiben, langfristig könnte er aber schnell wachsen (IEA 2020).

Der Transport von CO₂ ist im gasförmigen, flüssigen oder im überkritischen Zustand möglich.¹³ CO₂ kann in Rohrleitungen/Pipelines, in Kesselwagen auf Schienen und der Straße oder im flüssigen Zustand auch mit Tankschiffen transportiert werden (TRL 9, IEA 2021c). Der Transport per Güterzug, Lkw oder auf Schiffen ist bisher nur im kleinen Maßstab durchgeführt worden und bedarf weiterer Optimierungen. Bereits existierende Öl- und Gasleitungen haben das Potential, zukünftig für den Transport von CO₂ genutzt zu werden. Durch eine Umrüstung von bereits bestehenden Leitungen könnte ein Ausbau der notwendigen Infrastruktur deutlich kostengünstiger umgesetzt werden. Eine Umrüstung macht nur ca. 1–10 % der Kosten neuer Leitungen aus (IEA 2020, 2021a; BMWK 2022d).

Aufgrund möglicher Umwelt- und Gesundheitsrisiken sowie des sehr hohen Energiebedarfs von CCU/CCS-Technologien wird die Effektivität und der theoretische Beitrag zum Klimaschutz kritisch hinterfragt. Ein Argument ist, dass die hohen Energiebedarfe die theoretischen Emissionsminderungspotenziale zunichtemachen. Es wird befürchtet, dass emissionsreiche Energieträger vor allem in der fossilen Stromerzeugung länger genutzt werden, da durch CCU/CCS theoretisch die Möglichkeit besteht, den CO₂-Ausstoß erheblich zu vermindern. Zudem ist der Einsatz von CCU/CCS-Technologien stark abhängig von der Wasserverfügbarkeit vor Ort. Der Wasserbedarf, u. a. zur Kühlung von fossilen Kraftwerken, ist bei der Nutzung von CCU/CCS-Technologien um mehr als 50 % erhöht, weshalb die Nutzung der Technologien gerade in den Ländern des globalen Südens zu Problemen führen kann. Somit eignen sich insbesondere die Länder, deren Energienachfrage in den kommenden Jahren am stärksten ansteigen wird, weniger als Standorte für CCU/CCS-Technologien (IEA 2022k, S. 224; IPCC 2022, S. 2684; BMWK 2022d, S. 20). Weitere Umwelt- und Gesundheitsrisiken bestehen durch die Gefahr, dass es entlang der CCS-Prozesskette zu Leckagen kommen kann. Unkontrollierte und über einen längeren Zeitraum unbemerkte CO₂-Austritte könnten zu einer Verunreinigung des Grundwassers und der Versauerung des Meerwassers führen. Weiterführende Untersuchungen zur sicheren CO₂-Speicherung und engmaschige Monitoringsysteme sind daher unabdingbar (BMWK 2022d).

¹³ In der Thermodynamik wird als überkritischer Zustand der Zustand eines Stoffes oberhalb seines kritischen Punktes bezeichnet. Hier ist eine Unterscheidung, ob ein Stoff flüssig oder gasförmig ist, nicht mehr möglich, da er dicht wie eine Flüssigkeit ist, aber dieselbe Viskosität wie ein Gas hat (Bundesverband Geothermie 2023)

Wertschöpfungskette: Die Verfügbarkeit der einzelnen Technologien entlang der Wertschöpfungskette von CCU/CCS-Verfahren bestimmt letztendlich, inwieweit CCU/CCS-Technologien zur strategischen Bekämpfung des Klimawandels eingesetzt werden können. Von der CO₂-Abscheidung über Transport bis hin zur Nutzung oder Speicherung müssen alle Schritte technologisch ausgereift sein, damit CCU und CCS ihren Beitrag leisten können. Zwei Drittel der in einigen Szenarien als erforderlich angesehenen CO₂-Reduktionen basieren auf CCU/CCS-Verfahren, die im Jahr 2020 noch am Anfang ihrer Entwicklung stehen und bisher nicht kommerziell genutzt werden können. Daher sind in den kommenden Jahren hohe Investitionen in die Forschung und Entwicklung der Verfahren notwendig (IEA 2020, S. 94 ff.). Abbildung 3 zeigt die TRL für die einzelnen Technologien entlang der Wertschöpfungskette von CCU/CCS-Technologien.

Abbildung 3: TRLs von ausgewählten Technologien entlang der CCU/CCS-Wertschöpfungskette



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Technologies included are at large prototype or a more advanced stage. Each technology is assigned the highest technology readiness level of the underlying technology designs. For more detailed information on individual technology designs for each of these technologies and designs at small prototype stage or below, such as mineral CO₂ storage, see: www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide.

Quelle: IEA 2020, S. 95

Im Allgemeinen ist die Komplexität der Wertschöpfungskette von CCU/CCS-Technologien als hoch einzustufen. Da CCU/CCS-Technologien zur Dekarbonisierung der Industrie, der Stromerzeugung und der auf fossilen Brennstoffen basierenden Wasserstoffproduktion beitragen und ebenfalls in der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen eine Rolle spielen,

können Probleme oder Störungen in der Produktion von Komponenten der CCU/CCS-Technologien einen negativen Effekt auf die Versorgung mit CO₂-emissionsarmer Produktion von Energie oder anderer Produkte in mehreren Sektoren haben (IEA 2020, 2023a).

Marktentwicklungen der letzten Jahre: Weltweit sind rund 35 kommerzielle CCU-/CCS-Anlagen in Betrieb, die gemeinsam etwa 45 Mt CO₂ einfangen (IEA 2022k, S. 172). Der Großteil der 30 im Jahr 2022 bereits kommerziell genutzten CCS-Projekten befindet sich in den USA (13). Weitere Projekte sind in Kanada (5 Projekte), China (3), Norwegen (2), Australien, Brasilien, Island, Katar, Ungarn, Saudi-Arabien und den Vereinigten Arabischen Emiraten (jeweils 1) in Betrieb. Bei 28 der 30 kommerziell genutzten CCS-Projekte fällt das CO₂ im Rahmen eines industriellen Prozesses an. Die meisten Projekte injizieren CO₂ im Rahmen der Ölförderung in das Ölfeld ein (engl. „enhanced oil recovery“), lediglich neun Projekte verfolgen ausschließlich das Ziel der geologischen CO₂-Speicherung. Des Weiteren gab es in den letzten zwei Jahren einen signifikanten Anstieg an kommerziellen CCS-Projekten, die sich im Bau (11) bzw. in der (fortgeschrittenen) Entwicklung (78 fortgeschritten in der Planung und 75 am Anfang ihrer Entwicklung) befinden (Global CCS Institute 2022; BMWK 2022d). Im September 2022 lag die zu erwartende globale Kapazität für CO₂-Speicherung der 196 bekannten CCS-Projekten (kommerziell in Betrieb, Bauphase, Planungsphase oder zurzeit ausgesetzt) bei 244 Millionen Tonnen pro Jahr. Dies entspricht einem Anstieg um 44 % gegenüber dem Vorjahr. Insbesondere der private Sektor ist motiviert, CCS-Projekte zu entwickeln, da CCS-Verfahren maßgeblich zu einer Reduktion der ausgestoßenen THG-Emissionen beitragen können und diese rechtlich vorgeschrieben sind. Zudem bietet die Entwicklung von CCU/CCS-Projekten die Möglichkeit, an der Entwicklung einer neuentstehenden Industrie teilzuhaben, und eröffnet neue Geschäftsfelder (Global CCS Institute 2022).

Öffentliche Aufwendungen im Bereich der Forschung und Entwicklung und Subventionen sowie die politische Unterstützung für CCS-Projekte haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Insbesondere die USA (Inflation Reduction Act und US Bipartisan Infrastructure Law) und Kanada stechen dabei hervor. In Europa, Japan, Korea und Indien gibt es ebenfalls verstärkte Strategien oder Ziele. Die EU fördert den Ausbau der CCU/CCS-Technologien z. B. im Rahmen des Innovation Funds, bei dem in einer ersten Ausschreibungsrunde CCS-Anlagen in Schweden, Frankreich, Finnland und Belgien den Zuschlag erhalten haben. Die Entwicklungen im asiatisch-pazifischen Raum unterstützen den Ausbau von CCU/CCS ebenfalls. Australien, Japan und China (14. Fünfjahresplan 2021 bis 2025) haben politische Leitlinien entwickelt und planen Projekte (IEA 2022k, S. 173; Global CCS Institute 2022, S. 6; BMWK 2022d). Die USA haben im Jahr 2022 weltweit am meisten neue Projekte angekündigt (34), gefolgt von Kanada (19 neue Projekte), UK (13), Norwegen (8), Australien, Neuseeland und Island (jeweils 6) (Global CCS Institute 2022).

In einem Szenario, das die Stabilisierung des 1,5°C-Zieles anstrebt (NZE-Szenario), liegen die globalen Ausbauziele für fossile Brennstoffe mit CCS/CCU-Verfahren für das Jahr 2030 bei 62 GW und für 2050 bei 335 GW (IEA 2022k, S. 448). Die CO₂-Abscheidung steigt von etwa 40 Mt im Jahr 2021 auf 1.200 Mt im Jahr 2030 und 6.200 Mt im Jahr 2050, wobei mehr

als 40 % auf die Industrie und die Sektoren der Brennstoffumwandlung entfallen, etwa 5 % auf die direkte Abscheidung aus der Luft (DAC) und der Rest auf die Strom- und Wärmeerzeugung bis dahin (IEA 2023a, S. 42). Als zentrale Akteure auf dem Markt für die Kombination von fossilen Brennstoffen mit CCS/CCU-Verfahren im Jahr 2030 werden China, Indonesien, Japan und die USA angesehen. Bei den DAC-Verfahren werden Nordamerika (USA und Kanada), Norwegen und Großbritannien (UK) als Vorreiter angesehen (IEA 2022k).

Das weltweite Potential zur CO₂-Speicherung wird als sehr hoch eingeschätzt, variiert jedoch stark zwischen den Regionen. Es wird angenommen, dass in Ländern auf dem afrikanischen Kontinent sowie in Russland, Nord-Amerika und Australien das Potential zur Speicherung vergleichsweise hoch ist. Insbesondere tiefe Salzformationen und erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten haben die größte Kapazität und werden gegenwärtig als sehr geeignete Lagerstätten angesehen (IEA 2020). Die Entwicklung von CCU/CCS ist eine internationale Aufgabe, die im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit auch mit Hilfe von völkerrechtlichen Abkommen geregelt wird. Der Rahmen für den Export von CO₂ und die CO₂-Speicherung im Meeresgrund wird durch das Meeresschutzabkommen OSPAR und das London-Protokoll gesetzt. Innerhalb Europas gibt es grenzüberschreitende bi- oder multilaterale Anstrengungen, um den Technologiehochlauf und den grenzüberschreitenden Infrastrukturausbau zu beschleunigen. In diesem Zusammenhang hat die norwegische Regierung bereits mehrfach ihre Bereitschaft ausgedrückt, CO₂ aus ganz Europa aufzunehmen und unter der Nordsee zu speichern (BMWK 2022d).

3.2.5 TECHNOLOGIEGRUPPE 5: BIOMASSE

Technologiebeschreibung und Materialien: Biomasse wird zur Erzeugung von Strom, Wärme und als Antriebsmittel im Verkehrssektor genutzt. Man unterscheidet zwischen fester, flüssiger und gasförmiger Biomasse. Flüssige Kraftstoffe werden in Europa zu 5 % oder 10 % den fossilen Kraftstoffen beigemischt. Feste Biomasse, z. B. Holz, wird in Biomasse(heiz-)kraftwerken zur Strom- und Wärmeenergiegewinnung verfeuert (TRL 9; IEA 2021c). Gasförmige Biomasse wird häufig in Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt (TRL 9; IEA 2021c). In Deutschland geschieht dies überwiegend in Vor-Ort-Verstromungsanlagen. BHKW setzen sich grundsätzlich aus Verbrennungsmotor und Generator zusammen. Es stehen verschiedene Motorbauarten und Verbrennungsverfahren zur Verfügung. Meist werden Gas-Otto-Motoren in der oberen Leistungsklasse (über 250 kW_{el}) und Zündstrahlmotoren im unteren Leistungsbereich (bis 340 kW_{el}) eingesetzt. Des Weiteren können Mikrogasturbinen zur Stromgewinnung eingesetzt werden. Sie verursachen geringere Schadstoff- und Schallemissionen als Verbrennungsmotoren. Idealerweise wird die bei der Stromerzeugung anfallende Abwärme direkt genutzt (Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)). Flüssige Biomasse kann ebenfalls zur Strom- und Wärmeenergiegewinnung verbrannt werden, allerdings ist dieser Nutzungspfad weniger bedeutend als der Einsatz der flüssigen Biomasse als Kraftstoff im Verkehr (Bioethanol und Biodiesel). Biokraftstoffe, die auf flüssiger und gasförmiger Biomasse, beispielsweise Biodiesel, Pflanzenöle (Raps-, Soja- oder Palmöl), Bioethanol, Biomethan und Hydrierte Pflanzenöle (engl. „Hydrogenated Vegetable Oils“ (HVO)) basieren, stoßen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen rund 80 % weniger Treibhausgase aus (NOW 2022).

Biokraftstoffoptionen, wie synthetische Biomass-to-Liquid (BtL)-Kraftstoffe oder Bioethanol aus Zellulose, sind in fortgeschrittenen Forschungsstadien. Die Produktion synthetischer Kraftstoffe mit Hilfe des Power-To-Gas- oder des Power-To-Liquid-Verfahrens sowie deren Einsatz werden diskutiert und in Praxistests untersucht (Bundesverband Bioenergie e.V. 2023). Insbesondere die Fischer-Tropsch-Synthese wird für die Gewinnung von Kraftstoffen aus Biomasse diskutiert, da das Verfahren die Möglichkeit bietet, hochqualitative und sauber verbrennende Diesel und Kerosine herzustellen, die nicht auf Erdöl basieren (TRL 6; IEA 2021c). Dies ist insbesondere im Schwerlasttransport und der Luft- und Schifffahrt von Interesse (Duyckaerts et al. 2017; enArgus 2023).

Wertschöpfungskette: Die Wertschöpfungskette der Biomasse beginnt mit der Land- und Forstwirtschaft. Im Fall sog. (landwirtschaftlicher) Anbaubiomasse wird die Biomasse zur Energiegewinnung eigens erzeugt (öl- und stärkehaltige Pflanzen für Biokraftstoffe, Mais für Biogas, Kurzumtriebshölzer für thermische Anwendungen). Im Falle der Reststoffnutzung werden zum Beispiel biologische Altöle für Biokraftstoffe, landwirtschaftliche Reststoffe und Gülle für Biogas sowie Sägewerksrest- und Althölzer für thermische Anwendungen genutzt. Daraus folgen die drei Stufen der Wertschöpfungskette: (1) Anbau der primären Biomasse oder Nutzung der Reststoffe, (2) Transformation der Biomasse (Herstellung von Chemikalien, Pharmazeutika, Kunststoffen und Treibstoff) und (3) Nutzung der weiterverarbeitenden Biomasse in verschiedenen Bereichen, u. a. Chemie-Industrie und Energiewirtschaft (UBA 2019a; Kircher 2020).

Aufgrund von Bedenken bzgl. Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion sowie negativer Umwelteffekte und globaler Kompromisse im Bereich der Nachhaltigkeit wird inzwischen politisch versucht von einem Anbaubiomasse-basierten auf einen Reststoff-basierten Nutzungspfad umzuschwenken (UBA 2019a). Dies wird mit einer Reihe von Regelungen in den einzelnen Nutzungspfaden sowie auf nationaler (z. B. Maisdeckel), EU und internationaler Ebene (unterschiedliche Anrechnungsmöglichkeiten der THG-Minderung) umgesetzt. Schließlich sehen die seit Herbst 2022 vorliegenden Eckpunkte der Nationalen Biomassestrategie in Deutschland (BMWK et al. 2022) einen Vorrang der Ernährungssicherheit und der stoffliche Nutzung möglichst in Kreisläufen vor (BMWK et al. 2022, S. 6).

Marktentwicklungen der letzten Jahre: Im Jahr 2022 lag der Marktwert für Biokraftstoffe bei etwa 117 Mrd. USD weltweit (Precedence Research 2022). Die installierte Kapazität von Bioenergie insgesamt im Jahr 2022 lag weltweit bei etwa 149 GW. Die Kapazität von festen Biobrennstoffen und erneuerbaren Abfällen hat dazu etwa 125 GW beigetragen. Die Nutzung von Bagasse (faserige Abfälle des Zuckerrohrs) zur Energiegewinnung hat ihren Schwerpunkt in Südamerika – hier sind etwa 13 GW der weltweit installierten Kapazität von 21 GW zu finden. Der Schwerpunkt der Nutzung von erneuerbaren Siedlungsabfällen liegt in Asien und Europa, hier ist der Großteil der weltweit 22 GW installierten Kapazität zu finden. Auf andere feste Biobrennstoffe entfällt weltweit eine Kapazität von rund 82 GW. Die Kapazitäten von flüssigen Biokraftstoffen sind mit 2,5 GW deutlich geringer und in Europa bzw. der EU konzentriert. Als Vertreter des amerikanischen Kontinents werden lediglich 18 MW in Brasilien und 62 MW in den USA gelistet. Die weltweite Kapazität der Energiegewinnung aus Biogas lag 2022 bei rund 21 GW. 2022 ist China mit etwa 34 GW

installierter Nettoerzeugungskapazität im Bereich der Bioenergie weltweiter Marktführer. Gefolgt von Brasilien (17 GW), den USA (11 GW), Indien (10,6 GW) und Deutschland (9,9 GW, rückläufig). Insgesamt ist die gesamte installierte Kapazität in den 27 Mitgliedsstaaten der EU (33,8 GW) mit der in China vergleichbar (IRENA 2023a).

3.2.6 TECHNOLOGIEGRUPPE 6: ELEKTROMOBILITÄT

Technologiebeschreibung und Entwicklung: Weltweit befindet sich die Automobilindustrie im Wandel. Die Elektrifizierung des Verkehrs wird politisch gefördert und das Ende des Verbrennungsmotors ist in vielen Ländern politisch gewollt. Die öffentlichen Ausgaben und Subventionen für Elektrofahrzeuge (engl. „electric vehicles“ (EV)) sind bis 2021 auf fast 30 Mrd. USD gestiegen (IEA 2022c; Europäisches Parlament 14.02.2023). Im Jahr 2022 waren weltweit fast 20 Millionen Pkw-EVs, 1,3 Millionen kommerzielle EVs (Busse, Lieferwagen, Lkws, Landmaschinen und Baufahrzeuge) und mehr als 280 Millionen elektrisch betriebene Motorräder und -roller, Mofas und Dreiradfahrzeuge auf den Straßen in Nutzung (BNEF 2022c).

Wertschöpfungskette: Die Wertschöpfungskette von EVs umfasst die Stufen der Batteriefertigung, dargestellt in Kapitel 3.2.3, und wird durch die Produktion der Elektrofahrzeuge und die Integration der Batteriemodule in die EVs erweitert. Durch das Recycling von EVs werden kritischen Rohstoffe zurückgewonnen und die Batterien können zum Beispiel als Energiespeicher weiter- bzw. wiederverwertet werden (IEA 2022c, S. 147). Einen großen Teil der Wertschöpfung in EVs machen die Lithium-Ionen-Batterien aus (bis zu 40 %) (BMW 2023). Lithium-Ionen-Batterien haben ein TRL von 8 bis 11 und dominieren auf Grund ihrer hohen Energiedichte in der Herstellung von EVs (IEA 2021c, 2022c, S. 146).

Marktentwicklungen der letzten Jahre: Im Jahr 2021 wurden weltweit 18 Millionen Plug-in-Hybrid- und Elektrofahrzeuge verkauft (IRENA 2022e, S. 89). Dabei hat sich die Anzahl der verkauften Elektrofahrzeuge im Vergleich zum Vorjahr auf 6,6 Millionen Elektrofahrzeuge verdoppelt. Dieser Anstieg der Verkaufszahlen hat sich 2022 fortgesetzt, im ersten Quartal 2022 wurden bereits 2 Millionen Elektrofahrzeuge verkauft (IEA 2022c). Die steigende Nachfrage nach EVs treibt auch die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien in die Höhe. Der Markt für Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge hat mittlerweile ein Volumen von 27 Mrd. USD jährlich (Venditti 2021). Im Jahr 2021 wurden insgesamt 340 GWh an Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge nachgefragt, was einer Verdopplung der Nachfrage im Vergleich zu 2020 entspricht. Die durchschnittliche Kapazität der Batterien in Elektrofahrzeugen betrug 55 kWh (IEA 2022c, S. 139).

Asiatische Batteriehersteller dominieren den Markt der Batterien für EVs. Die zehn größten Hersteller nach Marktanteilen im Jahr 2021 sind alle in asiatischen Ländern ansässig, vor allem in China, Japan und Südkorea. Rund 70 % aller Batterien für Elektrofahrzeuge werden von den drei größten Herstellern produziert: CATL (32,5 %, China), LG Energy Solution (21,5 %, Südkorea) und Panasonic (14,7 %, Japan) produziert. CATL produziert Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien (LFP) für Tesla, Peugeot, Hyundai, Honda, BMW, Toyota, Volkswagen und Volvo. Panasonic zählt ebenfalls Tesla und Toyota zu seinen Kunden, während LG hauptsächlich Batterien für Jaguar, Audi, Porsche, Ford und GM

herstellt (Venditti 2021). Politische Entscheidungen und staatliche Investitionen machen eine Standortverlagerung der Batteriezellproduktion für Elektrofahrzeuge aus dem asiatischen Raum insbesondere in die Europäische Union, u. a. Deutschland, ab Mitte der 2020er-Jahre wahrscheinlich (Thielmann 2020; BMWK 2023).

Die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen wächst in China am schnellsten. 2021 wurden dort insgesamt 3,3 Millionen Elektrofahrzeuge verkauft. Die Verkaufszahlen in Europa wachsen ebenfalls stetig an: 2021 wurden 2,3 Millionen Elektrofahrzeuge verkauft. Die Verkaufszahlen in den USA steigen nach einem kurzzeitigen Nachfragerückgang ebenfalls wieder an und lagen 2021 bei 630.000 Elektrofahrzeuge. In vielen Schwellen- und Entwicklungsländern hingegen werden kaum Elektrofahrzeuge verkauft, da die Preise der wenigen verfügbaren Modelle für den Massenmarkt zu hoch sind. In Brasilien, Indien und Indonesien sind weniger als 0,5 % der verkauften Kraftfahrzeuge elektrisch (IEA 2022c).

Es wird erwartet, dass die jährliche Produktion von Elektrofahrzeugen von 3,4 Millionen im Jahr 2020 auf 12,7 Millionen im Jahr 2024 steigen wird; die Batterieproduktion würde im gleichen Zeitraum von 95,3 GWh auf 410,5 GWh zunehmen (IRENA 2022e, S. 301). Die steigende Nachfrage nach Elektrofahrzeugen treibt die Entwicklung neuer, leistungsfähigerer Batterietechnologien, unter anderem sogenannter Feststoffbatterien, an (Details hierzu s. Kapitel 3.2.3) (Fraunhofer ISI 2022).

Grundsätzlich ist die flächendeckende Einführung von Elektrofahrzeugen eng verknüpft mit dem Ausbau der Ladeinfrastruktur. Eine Herausforderung sind dabei die längeren Ladezeiten von EVs, welche ausreichend (Übernacht-) Ladestationen erforderlich machen und zudem eine Anpassung des Tank- und Ladeverhaltens der Nutzer:innen erfordern. Abhängig von der im Fahrzeug verbauten Technik und der Ladeleistung der Ladestation dauert ein Ladevorgang 20 Minuten bis mehrere Stunden. Ein Problem sind die unterschiedlichen Ladeanschlüsse, welche eine Ausstattung öffentlicher Ladestationen mit mehreren Stecksystemen erforderlich machen (VDI/VDE-Studie 2019). Es gibt zwei Arten von Ladestationen, die privaten und die öffentlichen. Um dem Zuwachs an EVs weltweit gerecht zu werden und mit den politisch angekündigten Zuwachsraten im Bereich der E-Mobilität mithalten zu können, ist bis 2030 ein jährlicher Zuwachs von 22 Millionen Ladestationen notwendig. Dies entspricht einem Ausbau um mehr als einer Verzwölfachung (IEA 2022c).

Es wird davon ausgegangen, dass private Ladestationen am Wohnort die Ladeinfrastruktur dominieren werden. Der Einbau und die Bereitstellung von Ladestationen in Wohngebieten werden daher u. a. in China und der EU durch politische Richtlinien unterstützt. Nichtsdestotrotz sind öffentliche Ladestationen elementar wichtig, um auch längere Distanzen mit EVs zurücklegen zu können. Die gezahlten Preise für Elektrizität sind an öffentlichen Ladestationen meist höher als an privaten. In China findet der Ausbau der Ladeinfrastruktur bezogen auf die Anzahl an öffentlichen Ladestationen (schnell und langsam) und die jährliche Wachstumsrate im weltweiten Vergleich am schnellsten statt (IEA 2022c).

3.2.7 TECHNOLOGIEGRUPPE 7: GRÜNER WASSERSTOFF

Technologiebeschreibung und Materialien: Wasserstoff gilt als ein wichtiger strategischer Bestandteil der Energiewende, da die Nutzung von Wasserstoff die Dekarbonisierung von Sektoren, die nur schwer zu elektrifizieren sind, wie zum Beispiel der Schwerindustrie und des Langstreckenverkehrs, insbesondere der Schiff- und Luftfahrt, ermöglichen kann. Zudem ermöglicht die Herstellung von Wasserstoff unter Nutzung von erneuerbaren Energien eine Kopplung mit dem Stromsektor und bietet durch die Möglichkeit der saisonalen Speicherung von Energie zusätzliche Flexibilität für die Integration variabler erneuerbarer Energien (IRENA 2022b).

Abhängig vom genutzten Herstellungsverfahren und abhängig von der politischen Definition wird Wasserstoff in verschiedene Kategorien eingeteilt. Laut EU-Vorgaben entsteht grüner Wasserstoff, wenn die Produktion des Wasserstoffs CO₂-frei erfolgt. Dies ist gegeben, wenn ausschließlich erneuerbare Energien für die Elektrolyse von Wasser genutzt werden. Blauer Wasserstoff entsteht, wenn das im Produktionsprozess aus fossilen Energien entstehende CO₂ gespeichert wird und nicht in die Atmosphäre gelangt (CCS). Dadurch wird die Produktion bilanziell als CO₂-neutral betrachtet. Im Gegensatz dazu wird bei der Herstellung von grauem Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen das CO₂ nicht gespeichert und gelangt ungenutzt in die Atmosphäre. Türkiser Wasserstoff wird über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) gewonnen. Hierbei entsteht fester Kohlenstoff. Das Verfahren kann unter der Bedingung, dass die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors aus erneuerbaren Energien erfolgt und der Kohlenstoff dauerhaft gebunden wird, CO₂-neutral sein (BMBF 2023). Wasserstoff, der entsteht, wenn Kernenergie zum Betrieb der Elektrolyseure genutzt wird, wird in manchen Farbenlehren als rosa Wasserstoff bezeichnet. Des Weiteren gibt es auch einige wenige natürliche Wasserstoffvorkommen, vornehmlich auf dem afrikanischen Kontinent, den sogenannten weißen Wasserstoff (Ruhwedel 2020). In der vorliegenden Studie liegt der Fokus der Analyse auf den Elektrolyseuren zur Gewinnung von grünem Wasserstoff.

Grüner Wasserstoff ist die nachhaltigste Technologie zur Wasserstofferzeugung (IRENA 2022b). Wichtigste Rohstoffe zur Herstellung des grünen Wasserstoffs selbst sind (reines) Wasser und der erneuerbare Strom als Energiequelle. Der erforderliche Reinheitsgrad des Wassers variiert je nach Technologie und kann sich auf die Lebensdauer der Elektrolyseure auswirken, wodurch wiederum die Wasserstoffkosten beeinflusst werden (IRENA 2020a, S. 40). Bei der Elektrolyse wird Wasser durch elektrische Energie in die Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten (Metz et al. 2022; Zenk et al. 2023). Es gibt unterschiedliche Elektrolyseverfahren, wobei die bisher marktfähigen Verfahren zum einen die alkalische Elektrolyse (AEL) mit einem TRL von 9 und zum anderen die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM) mit einem TRL von 8 sind (IEA 2021c). Die Verfahren unterscheiden sich vor allem in dem verwendeten Elektrolyt und in der Prozesstemperatur, wodurch unterschiedliche Materialanforderungen und Komponentenbedarfe der Elektrolyseure bedingt sind (IRENA 2020a; Zenk et al. 2023). Alkalische Anlagen haben ein relativ einfaches technisches Design und machen aktuell mit ca. 61 % den größten Anteil der weltweit installierten Kapazität aus. Der Nachteil von AEL-Anlagen ist, dass sie nur langsam auf Lastschwankungen reagieren können. So ist es wahrscheinlich, dass zukünftig die kostenintensiveren PEM-Anlagen eine Vorreiterrolle

einnehmen werden, da sie besser geeignet sind, auf eine fluktuierende Energieversorgung durch erneuerbare Energien mit stark schwankenden Versorgungsspitzen zu reagieren. Der weltweite Marktanteil von PEM-Anlagen beträgt aktuell ca. 31 % der installierten Kapazität (Ansari et al. 2022; Zenk et al. 2023).

Die Weiterentwicklung der Elektrolyse-Technologie wird den zukünftigen Preis für Wasserstoff maßgeblich mitgestalten. Auch wenn es schwer ist, die zukünftigen Preise für Metalle vorherzusagen, gibt es Bemühungen, den Bedarf an Platingruppenmetallen in PEM-Elektrolyseuren zu senken. Eine Verringerung des spezifischen Iridiumbedarfs pro MW um den Faktor zehn in den nächsten zehn Jahren scheint möglich zu sein (IRENA 2022e; IEA 2022k). Weltweit wird mit Hochdruck an alternativen Elektrolyse-Technologien geforscht, um Elektrolyseure effizienter und billiger zu machen, um die als erforderlich angesehene hohe Nachfrage nach Wasserstoff decken zu können und gleichzeitig die Wasserstoffanwendung ökonomisch attraktiver zu machen (IRENA 2022a). Zum Beispiel wurde in einem chinesischen Projekt eine Methode entwickelt, mit der Wasserstoff direkt aus Salzwasser gewonnen werden kann, wodurch die Zwischenstufe der Meerwasserentsalzung entfällt und die Wasserstoffkosten entsprechend sinken würden (Xie et al. 2022), oder es befanden sich im Jahr 2020 Elektrolyseure auf Basis von Anionenaustauschmembranen und Festoxid in der Entwicklung, denen ein hohes Potenzial zugesprochen wird, die Herstellungskosten für grünen Wasserstoff zu verringern (IRENA 2020a).

Wertschöpfungskette: Entlang der Wertschöpfungskette von Wasserstoff werden von der Produktion über den Transport, die Speicherung, die Aufbereitung bis hin zur Anwendung unterschiedliche Technologien benötigt. Das Herstellungsverfahren bestimmt die zur Produktion notwendige Technologie. Bei grünem Wasserstoff werden zur Produktion im ersten Schritt Technologien zur Erzeugung erneuerbarer Energien und Elektrolyseure benötigt (Zenk et al. 2023). Im Detail werden zur Herstellung von Elektrolyseuren, abhängig von der Art der Technologie, verschiedene Mineralien eingesetzt, insbesondere Nickel und Platingruppenmetalle. Für alkalische Elektrolyseure sind Nickel (800 Kilogramm pro Megawatt [kg/MW]), Stahl (10.000 kg/MW) und Aluminium (500 kg/MW) die wichtigsten Metalle. Bei den derzeitigen Metallpreisen ergeben sich daraus Kosten von etwa 25 USD pro Kilowatt (kW), was etwa 3,5 % der Gesamtkosten für alkalische Elektrolyseure entspricht. Bei PEM-Elektrolyseuren, die Platin (0,3 kg/MW) und Iridium (0,7 kg/MW) verwenden, ist die Situation etwas anders. Berücksichtigt man den Bedarf an Stahl, Aluminium und Titan, so machen die Metallkosten für PEM-Elektrolyseure mit 125 USD/kW derzeit etwa 12 % der Gesamtkosten für Elektrolyseure aus, was hauptsächlich auf die Kosten für Platin und Iridium zurückzuführen ist (IEA 2022k).

Für den Wasserstoffhandel erweitert sich die Wertschöpfungskette abhängig vom Zustand des Wasserstoffs um verschiedene Technologien, die zum Transport, Speicherung und Aufbereitung des Wasserstoffs gebraucht werden. Hierunter fallen unter anderem Salzkavernen (TRL 9 bis 10) und Speichertanks (TRL 11; IEA 2021c) zur Speicherung,

Pipelines, Tankschiffe und -laster zum Transport¹⁴ und Wasserstoffaufbereiter. Abschließende energetische Verwendung findet Wasserstoff (ebenfalls abhängig von seinem Zustand) zum Beispiel über Brennstoffzellen, über Wasserstoffverbrennungsmotoren oder auch in KWK-Anlagen, die auf Brennstoffzellentechnologie basieren (Zukunft Altbau 2018; IEA 2022k; Zenk et al. 2023). Zudem ist grüner Wasserstoff elementar für die Dekarbonisierung von Endenergieverbrauchern, für die es keine eindeutige technologische Lösung gibt und die sich nur schwer elektrifizieren lassen. Wasserstoff oder wasserstoffbasierte Kraftstoffe und weitere Folgeprodukte können potenziell, z. B. in der Luft- und Schifffahrt und der Stahl- und Chemieindustrie, eine Reduktion der THG-Emissionen ermöglichen. Allerdings befinden sich zum Beispiel, die Entwicklung von Anlagen zur wasserstoffbasierten Stahlproduktion noch ganz am Anfang (IEA 2022k, 2023b). Erste Anlagen, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden können, sollen im Jahr 2026 in Schweden (H2 Green Steel) und Deutschland (ThyssenKrupp) in Betrieb gehen. Die Anlage von ThyssenKrupp soll zunächst noch mit Erdgas befeuert und ab 2037 nur noch mit grünem Wasserstoff betrieben werden (Hartbrich 2023; Mayr 2023).

Marktentwicklungen der letzten Jahre: Die weltweite Produktionskapazität für Elektrolyseure liegt derzeit bei etwa 7 GW pro Jahr. Dementsprechend sind in den kommenden Jahren massive Investitionen in den Ausbau der Wasserstoffproduktionskapazitäten notwendig, um die angestrebten Ziele in der Wasserstoffproduktion erreichen zu können. Im Jahr 2021 deckten Elektrolyseure mit einer weltweit installierten Kapazität von etwa 510 MW nur 0,1 % des gesamten Wasserstoffbedarfs von 94 Mt ab (IEA 2022k, S. 168). Doch die Branche erlebt ein sehr dynamisches Wachstum, so stieg die weltweit installierte Kapazität an Elektrolyseuren um 70 % im Jahr 2021. Mit Blick auf die rund 460 Elektrolyseur-Projekte, die sich 2022 weltweit in der Entwicklung befanden, wird davon ausgegangen, dass die weltweite Produktionskapazität für Elektrolyseure im Jahr 2022 bereits auf rund 1,4 GW angewachsen sein dürfte. Davon ausgehend und unter Berücksichtigung der sich im Bau befindlichen und angekündigten Projekte könnte die weltweit Kapazität der Hersteller bis 2030 auf rund 134 bis 240 GW pro Jahr ansteigen (IEA 2022k, S. 168). Unter der Annahme, dass bis 2050 Netto-Null Emissionen erreicht werden (IEA NZE-Szenario), wird für 2030 eine installierte Kapazität der Elektrolyseure von bis zu 720 GW und für 2050 bis zu 3.670 GW für erforderlich erachtet (IEA 2022k, S. 136). Andere Studien und Szenarien gehen sogar von einer schnelleren Entwicklung aus (IRENA 2020a; BNEF 2022b).

¹⁴ Gerade zum Transport per Schiff sind eine Vielzahl von Optionen im Gespräch, die alle mit der geringen volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff und der möglichen Nutzung erprobter Technologien und bestehender Infrastruktur zu tun haben. So kann z. B. der Wasserstoff am Versandhafen verflüssigt und dann am Zielhafen regasifiziert werden, er kann chemisch an eine Trägersubstanz gebunden und wieder gelöst werden, er kann in Ammoniak umgewandelt und dann wieder aus dem Ammoniak abgespalten werden. Je nach gewähltem Pfad, aber teils auch unabhängig davon, kann auch die weitere Verteilung per Lkw unterschiedlich gestaltet werden. Zudem kann der Pfad die Verwendungstechnologien beeinflussen (IEA 2023a, 2019).

Aktuell haben bereits 17 Staaten ihre Wasserstoffstrategien oder Roadmaps veröffentlicht und etwa weitere 20 Länder sind dabei, Strategien zu entwickeln. Darunter sind große Industrienationen wie zum Beispiel China, Japan, Kanada, Australien oder die USA, einige EU-Staaten wie Deutschland, Frankreich, Italien, die Niederlande oder Spanien, aber auch viele Schwellen- und Entwicklungsländer wie Algerien, Brasilien, Marokko oder Tunesien. Inhaltlich gibt es große Differenzen zwischen den einzelnen Strategien. Grundsätzlich sind die lokale Nutzung und Verfügbarkeit von Wasserstoff und Rohstoffen, das Potenzial für erneuerbare Energien, der Industrialisierungsgrad sowie der Energiebedarf entscheidend für die Chancen und Herausforderungen der Länderstrategien. Auch planen die betreffenden Staaten mit unterschiedlichen Zeithorizonten bezüglich des Erreichens der Treibhausgasneutralität, was zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Tiefen der Dekarbonisierungsmaßnahmen führen kann. Ebenfalls gibt es Unterschiede in den Strategien mit Blick auf zukünftige Bedarfe an Rohstoff- bzw. Energieimporten. Die Wechselwirkung von Import- und Exportstrategien für Wasserstoff wird somit neue Handelsrouten eröffnen und die Wirtschaftsgeografie mit prägen (BMWK 2022b).

Eine trennscharfe Analyse von grünem Wasserstoff ist schwierig, da Wasserstoffkategorien, die kein oder wenig CO₂ im Herstellungsprozess verursachen bzw. CCS nutzen, unter dem Sammelbegriff „sauberer“ bzw. „emissionsarmer Wasserstoff“ zusammengefasst werden (IRENA 2020a; IEA 2022k; IRENA 2022e). Laut dem Bericht „Energy Technology Perspectives“ der Internationalen Energieagentur (IEA 2023a) wurden 2021 rund 0,5 Mt an emissionsarmen Wasserstoff hergestellt. Abhängig von den zukünftigen politischen Ambitionen und Investitionen in Wasserstofftechnologien wird angenommen, dass in einem Szenario, das die Treibhausgas-Neutralität bis 2050 anstrebt, die Produktion von emissionsarmem Wasserstoff im Jahr 2050 auf bis zu 450 Mt ansteigen könnte (IEA 2023a). In anderen Studien werden bereits für die Gegenwart höhere Mengen an produziertem, emissionsarmem Wasserstoff genannt und die für die Zukunft genannten Mengen sind ebenfalls höher (IRENA 2022e). Auf Grund der Unterschiede in der Definition von emissionsarmem Wasserstoff und verschiedener Annahmen in den Szenarien sind die Daten zu grünem Wasserstoff am aktuellen Rand schwer zu erfassen.

Im Bereich der Entwicklung und Produktion von Schlüsseltechnologien wie Elektrolyseanlagen hält Europa und insbesondere Deutschland aktuell eine Technologieführerschaft inne. Es wird davon ausgegangen, dass deutsche Anlagenbauern heutzutage bei der Elektrolyse für die Erzeugung von grünem Wasserstoff etwa ein Zehntel des Weltmarkts ausmachen (BMWK 2022b, S. 47). In Zukunft hängt die Entwicklung von Europas Stellung jedoch verstärkt von dem Wettbewerb mit Ländern, die günstigere Produktionsbedingungen und offensivere Praktiken zur Etablierung eigener Standards haben, ab. Hier sind unter anderem China, Japan oder die USA zu nennen. Zügige und zielgerichtete Förderungen und Regulierungen beeinflussen die Entwicklung des Wasserstoffmarktes maßgeblich (BMWK 2022b; Zenk et al. 2023).

3.2.8 TECHNOLOGIEGRUPPE 8: WASSERKRAFT

Technologiebeschreibung und Materialien: Seit 2.000 Jahren hat sich an der Grundidee der Energiegewinnung durch Wasserkraft nicht allzu viel geändert: Wasserkraft ist die Energie, die aus fließendem Wasser gewonnen wird (IRENA 2022c). Hierfür wird die

kinetische Energie, d. h. die Strömung des Wassers, oder die potenzielle Energie in nutzbare Energie umgewandelt. Durch die Strömung oder das Herabfallen eines Gefälles des Wassers, z. B. im Fall von Stauseen, wird ein Turbinenrad angetrieben, welches dann die kinetische oder potenzielle Energie in die verwendbare Energie umwandelt. Die erhaltene Energie kann dann für den Antrieb von Generatoren oder Maschinen verwendet werden (UBA 2019b; BMWK 2022c). Ein großer Vorteil von Wasserkraft ist, dass sie prinzipiell an jedem Gewässer genutzt werden kann, sofern ein ausreichendes Gefälle vorhanden ist und Wasserkraftwerke einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 90 % erreichen können (Gloor 2019; Voith 2023).

Wasserkraftwerke können anhand ihrer Funktionsweise unterschieden werden. Die gängigsten Wasserkraftwerke, die für die Stromerzeugung derzeit weltweit zum Einsatz kommen, sind das Speicherkraftwerk und das Laufwasserkraftwerk (TRL 11; IEA 2021c). Eher seltener kommt das Kleinwasserkraftwerk zum Einsatz (UBA 2014; BMWK 2022c). Speicherkraftwerke nutzen Stauseen, in denen das Wasser aufgestaut und bei Bedarf freigelassen wird. Eine Sonderform der Speicherkraftwerke stellen die Pumpspeicherkraftwerke da (TRL 11; IEA 2021c). Pumpspeicherkraftwerke machen sich in ihrer Funktionsweise die Schwerkraft zu Nutze, dafür wird in Zeiten günstiger Stromerzeugungsbedingungen Wasser aus einer tiefer gelegenen Wasserquelle, bspw. einem Fluss oder See, in ein höher gelegenes Reservoir gepumpt und zwischengespeichert. Liegt eine hohe Stromnachfrage vor, wird das höher gelegene Wasser freigelassen. Das Wasser fließt das Gefälle wieder hinunter und über eine Turbine wird die Bewegungsenergie in Strom umgewandelt. Im Allgemeinen kann zwischen einem „closed-loop“ und einem „open-loop“ Pumpspeicherkraftwerk differenziert werden. Bei den „closed-loop“-Speichern wird nur Wasser verwendet, das zuvor vom unteren in das obere Speicherbecken gepumpt wurde. Es gibt keinen (nennenswerten) natürlichen Wasserzufluss zu einem der beiden Speicherbecken. Beim „open-loop“ hingegen ist entweder das untere oder das obere der beiden Speicherbecken mit einem offenen Gewässer verbunden. Einige „open-loop“-Speicherkraftwerke können erhebliche Zuflüsse zum oberen Reservoir haben, was bedeutet, dass Strom erzeugt werden kann, ohne dass ein Hochpumpen von Wasser erforderlich ist. Sie fungieren dann wie eine Speicherkraftanlage ohne Pumpmöglichkeit (IHA 2018, S. 4; IRENA 2023c, S. 12). Wie viel Strom mit einem Pumpspeicherkraftwerk produziert werden kann, hängt von mehreren Faktoren ab. So spielt die Größe des Reservoirs eine Rolle aber auch die Größe der Turbine, die mit dem Wasser angetrieben wird (IHA 2022). Pumpspeicherkraftwerke können als Zwischenspeicher für überschüssige Energie fungieren und tragen somit zur Stabilität der Stromversorgung durch erneuerbare Energien bei (UBA 2014; BMWK 2022c).

Laufwasserkraftwerke unterscheiden sich in der Form von Speicherkraftwerken, dass die Energiegewinnung nicht aus dem Gefälle zwischen oberem und unterem Reservoir entsteht, sondern aus der natürlichen Fließbewegung des Wassers in Flüssen, Bächen und teilweise auch Stauseen. Die natürliche Strömung treibt wieder eine Turbine an, die mit einem Generator verbunden ist, der diese Bewegungsenergie in nutzbare Energie umwandelt (UBA 2014; BMWK 2022c).

Die technologische Entwicklung der Wasserkraftwerke ist zum jetzigen Stand quasi abgeschlossen. Innovationen fokussieren sich hauptsächlich auf die Verbesserung der Flexibilität z. B. durch die Optimierung und Weiterentwicklung von Turbinen und operativer Muster u. a. durch Digitalisierung. Einige Beispiele für Neuentwicklungen sind Energiespeicher in Verbindung mit drehzahlvariablen Turbinen, Generatoren mit stromgesteuerten Rotoren, neuartige Technologien für Kleinwasserkraft oder fischfreundliche Alternativen (Kougias et al. 2019, S. 2; IEA 2022e).

In den kommenden Jahren steht insbesondere die Modernisierung bestehender Wasserkraftwerke im Vordergrund. Der weltweite Wasserkraftwerkspark ist veraltet, teilweise sind die Anlagen schon über 30 Jahre alt und haben Schwierigkeiten unter den heutigen klimatischen Bedingungen zu arbeiten. Die Infrastruktur wird durch sich ändernde Klimamuster belastet und die Verschiebung von Niederschlagsmustern kann zu einem starken Rückgang der Kapazitätsauslastung führen. Um die vorhandenen Wasserkraftwerke in Zukunft problemlos nutzen zu können, sind bis 2030 Investitionen in Höhe von 127 Mrd. US-Dollar (vor allem in hochentwickelten Ländern) nötig (IEA 2021d; IRENA 2023c).

Wertschöpfungskette: Die Wertschöpfungskette von Wasserkraftwerken umfasst im Wesentlichen die Schritte (1) Anlagenproduktion (Turbinen), (2) Planung und Installation und (3) Anlagenbetrieb und Wartung. Hierbei wird davon ausgegangen, dass neue Projekte auf Systemebene geplant werden müssen, die möglicherweise andere miteinander verbundene Anlagen, ein ganzes Flusseinzugsgebiet oder sogar eine ganze Region umfassen können (IRENA 2023c, S. 38).

Marktentwicklungen der letzten Jahre: In den vergangenen 20 Jahren ist der Anteil der Wasserkraft an der globalen Stromgewinnung um 70 % angestiegen, so dass Wasserkraft heute nach Kohle und Gas den größten Anteil am globalen Energiemix für die Stromerzeugung ausmacht (IEA 2021d, S. 7). Weltweit betrug die maximale Kapazität von Wasserkraft (ohne Pumpspeicher) im Jahr 2014 etwa 1.176 GW und stieg in den darauffolgenden auf etwa 1.393 GW im Jahr 2022 an. Dies entspricht etwa 41 % der gesamten weltweiten Kapazitäten aus erneuerbaren Energiequellen. Damit ist Wasserkraft (ohne Pumpspeicher) die wichtigste erneuerbare Energiequelle (IRENA 2023a). Im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Energiequellen Wind und PV, die in den vergangenen Jahren weitergewachsen sind, ist die Wasserkraft in den letzten Jahren auf einem hohen, jedoch recht konstanten Niveau geblieben. Im Jahr 2019 wurde am meisten Strom mit Wasserkraft in China erzeugt. Mit einer Stromerzeugung aus Wasserkraft (exkl. Pumpspeicher) von 1.339 TWh lag China weltweit an der Spitze und damit auch weit vor den zweit- und drittplatzierten Kanada (383 TWh) und Brasilien (363 TWh). Deutschland produzierte im gleichen Jahr rund 25 TWh (IRENA 2023c, 2023b; CPI & IRENA 2023).

Aus finanzieller Sicht erreichte die weltweite Investition in Wasserkraft 2017 mit 26 Mrd. USD-Dollar ihren Höhepunkt, was auf eine massive Investitionstätigkeit der China Development Bank zurückzuführen ist. Seitdem schwankt das weltweite Investitionsvolumen zwischen sieben und neun Mrd. US-Dollar jährlich (CPI & IRENA 2023). Obwohl weltweit rund die Hälfte des wirtschaftlich nutzbaren Potenzials für Wasserkraft ungenutzt ist, hat sich der weltweite Ausbau der Wasserkraft in den letzten

Jahren verlangsamt. Gründe für einen verlangsamteten Ausbau sind, u. a. sehr lange Projektvorlaufzeiten mit aufwändigen Umweltprüfverfahren, die mögliche Investoren abschrecken. Zudem sind viele der für Wasserkraftwerke gut geeigneten Flächen (Kapazität über 10 MW) bereits erschlossen und werden bereits für die Stromerzeugung genutzt. Geeignete Flächen sind heute vielfach in wenig zugänglichen Gebieten gelegen, wodurch der Bau und die Inbetriebnahme von neuen Anlagen zusätzlich erschwert und verteuert wird. Besonders hoch ist das noch nicht erschlossene Wasserkraftpotenzial in Schwellen- und Entwicklungsländern. Hier beträgt das Potential fast 60 % (IEA 2021d, 2021f, S. 198; IRENA 2023c; CPI & IRENA 2023). Zudem führen weltweit anhaltende Dürreperioden, die durch den Klimawandel verstärkt werden, zu unsicheren zukünftigen Bedingungen für Wasserkraftwerke (IEA 2022k, S. 293).

Schätzungen der IEA zufolge können die Stauseen aller bestehenden (konventionellen) Wasserkraftwerke der Welt zusammengenommen rund 1.500 TWh elektrischer Energie speichern. Dies entspricht dem jährlichen Strombedarf der EU. Die Speicherkapazität aller verfügbaren Pumpspeicher liegt derzeit bei 8,5 TWh (IEA 2021d, 94f.).

3.2.9 TECHNOLOGIEGRUPPE 9: WÄRMESPEICHERSYSTEME

Technologiebeschreibung und Materialien: Wärmeenergiespeichersysteme bzw. thermische Energiespeichersysteme (TES) sind ein zentraler Punkt der Energiewende. Sie können zur Dekarbonisierung von Strom, Industrie, Heizung, Kühlung und Gebäuden beitragen. Der Einsatz von TES im Elektrizitätssektor hilft, die Einspeisung von höheren Anteilen an variabler Energie durch Solar- und Windenergie abzufedern und so die Flexibilität des Energienetzes zu erhöhen. Thermische Energiespeicherung funktioniert durch die Erhitzung bzw. Abkühlung eines Speichermediums, so dass die Energie zu einem späteren Zeitpunkt wieder freigegeben und verwendet werden kann. Ein späterer Zeitpunkt kann täglich, wöchentlich oder auch saisonal schwankend sein. Die Vorteile des Einsatzes von TES im Energiesystem sind somit eine Steigerung der Gesamteffizienz, höhere Zuverlässigkeit, besseren Wirtschaftlichkeit, Reduzierung der Investitions- und Betriebskosten und eine geringere Umweltverschmutzung, d. h. weniger CO₂-Emissionen (Sarbu & Sebarchievici 2018; IRENA 2020b).

Es gibt verschiedene Wärmespeichersysteme, die zum einen nach der Speicherdauer (Puffer-, Kurz- und Langzeitspeicher) und zum anderen nach dem grundlegenden Arbeitsprinzip (sensible, Latent- und thermodynamische Speicher) unterschieden werden. Pufferspeicher in Form von großen Wassertanks speichern Heizungswasser stunden- oder tageweise (TRL 11; IEA 2021c). Sie kommen meist in Kombination mit Wärmepumpen, Solarthermieanlagen oder BHKW zum Einsatz. Durch die Zwischenspeicherung der Wärme wird die Einschalthäufigkeit des Wärmeerzeugers reduziert und die Wärmeverteilung hydraulisch entkoppelt, wodurch sich z. B. der Wirkungsgrad verbessern lässt (BauNetz 2023). Kurzzeitspeichersysteme, die eine Speicherdauer von bis zu zwei Tagen ermöglichen, kommen hauptsächlich bei Holzkesseln, Solar- oder Brauchwasserspeichern zum Einsatz (BauNetz 2023). Sie werden häufig von der Industrie- oder in privaten Gebäuden sowie Fernwärme- und -kältenetzen eingesetzt (IRENA 2020b). Langzeitspeicher zur (saisonalen) Lastverschiebung und Kapazitätssicherung kommen im Energiesektor zum Einsatz. So kann überschüssige Energie, die z. B. während der

Sommermonate durch Solar- oder Geothermie gewonnen wurde, im Erdreich (engl. „borehole thermal energy storage“, TRL 9) oder im dort zirkulierenden Grundwasser (Aquiferspeicher; TRL 9, IEA 2021c) eingelagert werden. Damit kann das saisonale Ungleichgewicht zwischen Wärmeangebot und -nachfrage ausgeglichen werden (IRENA 2020b; BauNetz 2023).

Sensible Wärmespeicherung ist die einfachste Art der Speicherung von Wärmeenergie. Diese Art basiert auf der Speicherung von Wärmeenergie durch Erhitzen oder Abkühlen eines flüssigen oder festen Speichermediums (z. B. Wasser, Sand, geschmolzene Salze oder Gestein; TRL 9; IEA 2021c). Beim Ladevorgang wird dem Speichermedium Wärme zugeführt, so dass die Temperatur des Mediums ansteigt. Beim Entladen wird diese gespeicherte thermische Energie wieder abgegeben und z. B. zum Heizen genutzt. Dabei ist das beliebteste und kommerziellste Wärmespeichermedium Wasser, für das es eine Reihe von Anwendungen im Wohn- und Industriebereich gibt (Sarbu & Sebarchievici 2018; BauNetz 2023).

Latentwärmespeicher nutzen die Änderung des Aggregatzustandes von fest zu flüssig, oder umgekehrt (TRL 9; IEA 2021c). Die latente Wärme bleibt dabei im Stoff gebunden und wird durch physikalische Einwirkungen später wieder freigesetzt und nutzbar gemacht. Beispiele für in den Speichern genutzte Phasenwechselmaterialien sind z. B. Salzhydrate oder Paraffine zur Wärmespeicherung und Wasser oder wässrige Salzlösungen zur Kältespeicherung (BauNetz 2023). Ein Vorteil von Latentwärmespeichern ist, dass Wärme in einem nahezu gleichen Temperaturbereich gespeichert wird und so Wärme bei nahezu konstanter Temperatur aufgenommen oder abgegeben wird. Dies erhöht die Effizienz (Sarbu & Sebarchievici 2018).

Thermodynamische Speicher sind reversible Systeme, die in Sorptionsspeicher und Speicher mit reversiblen chemischen Bindungen unterteilt werden können. Sorptionsspeicher werden meist mit Wasser als Arbeitsmedium genutzt. Mit hoher Temperatur wird dem Medium Luft zugeführt, wodurch das im Medium enthaltene Wasser kondensiert. Der entstehende Dampf wird entzogen und in einem Kondensator wieder verflüssigt (das Wasser bleibt dort). Beim Entladen (Adsorption) verdampft das Wasser dann abermals durch Zuführen von Wärme, dieser Dampf legt sich an das Sorptionsmaterial (meist Stoffe mit großer innerer Oberfläche und hygroskopischen Eigenschaften wie Zeolithen oder Silikagele). Dabei wird Energie freigesetzt und Luft erwärmt. Speichersysteme mit reversiblen chemischen Bindungen befinden sich noch weitgehend im Forschungs- und Endwicklungsstadium (BauNetz 2023).

Derzeit ist thermische Energiespeicherung aus geschmolzenem Salz aufgrund der fortgeschrittenen technologischen Reife und der Anwendung bei CSP-Anlagen die am häufigsten verwendete Technologie in der Branche (IRENA 2020b, S. 18).

Wertschöpfungskette: Die Wertschöpfungskette von Wärmespeichersystemen umfasst abhängig von der genutzten Technologie verschiedene Stufen. Die Planung der Anlagen steht dabei an erster Stelle (1). Insbesondere bei großen thermischen Anlagen (z. B. Aquiferspeichern) müssen geeignete Standorte durch aufwendige Verfahren identifiziert werden. Es folgen der Bau bzw. die Herstellung inklusive der Herstellung des

Speichermediums und Installation der Anlagen (2) gefolgt vom Anlagenbetrieb und der Wartung (3) (IRENA 2020b).

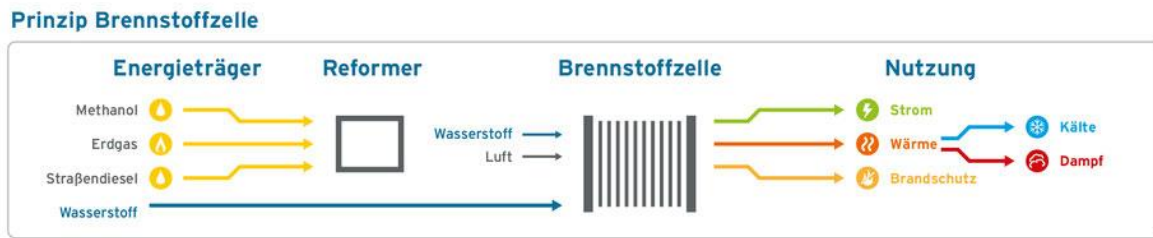
Marktentwicklungen der letzten Jahre: Der globale Markt für TES wurde im Jahr 2022 auf 4,4 Mrd. USD geschätzt und wird bis 2030 voraussichtlich eine Größe von 7,7 Mrd. USD erreichen (Research and markets 2023). Es wird ein Investitionsanstieg von 13 Mrd. USD (2019) auf 28 Mrd. USD (2030) erwartet (IRENA 2020b, S. 12). Die installierte Kapazität lag 2019 bei 234 GWh und es wird ein Anstieg auf über 800 GWh innerhalb eines Jahrzehnts erwartet. Auf Grund der fortgeschrittenen technologischen Reife werden Schmelzsaltzspeicher häufig im Energiesektor eingesetzt (insbesondere in konzentrierten Solarkraftwerken (CSP)). Bis 2030 werden voraussichtlich zwischen 491 und 631 GWh an installierter Schmelzsaltzkapazität ans Netz gehen. In naher Zukunft werden wahrscheinlich auch andere TES-Technologien kommerziell nutzbar werden, einschließlich Festkörper- und Flüssiglufthvarianten, die überschüssige Energie aus CSP, Photovoltaik (PV) und Wind speichern (IRENA 2020b, S. 12).

3.2.10 TECHNOLOGIEGRUPPE 10: BRENNSTOFFZELLEN-FAHRZEUGE

Technologiebeschreibung und Materialien: Alternative Antriebstechnologien und Kraftstoffe sind der Schlüssel, um die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor deutlich zu reduzieren. Hierbei werden neben den batterieelektrischen Antrieben (s. Kapitel 3.2.6) Brennstoffzellen-Fahrzeuge eine entscheidende Rolle spielen (BMVI 2021). Die Vorteile von Brennstoffzellen-Fahrzeugen gegenüber batteriebetriebenen Fahrzeugen ergeben sich aus der vergleichsweise hohen Energiedichte und Reichweite, sodass auch Langstreckenfahrten und kurze Betankungszeiten möglich sind. Brennstoffzellensysteme sind daher insbesondere für den Schwerlasttransport (über 15 Tonnen Eigengewicht, im Folgenden mit Lkw abgekürzt) oder Mobilitätssegmente wie Schifffahrt, Bahn und Luftfahrt interessant. Auf Grund des starken Preisfalls bei der Herstellung von Batterien und deren zunehmender Leistungsdichte und der damit entstehenden Konkurrenzsituation ist die zukünftige Wirtschaftlichkeit und Nutzung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen insbesondere im Pkw-Bereich ungewiss (Fraunhofer ISI & ISE 2019, S. 28; BMVI 2021; IEA 2023b; e4ships 2023).

Die Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle: Sie besteht aus einer Anode, an der der Brennstoff zugeführt wird, und einer Kathode, an der das Oxidationsmittel zugeführt wird (s. Abbildung 4). Der Brennstoff, z. B. Wasserstoff, reagiert mit einem Oxidationsmittel wie Sauerstoff. Die dabei entstehende Reaktionsenergie wird in elektrische Energie umgewandelt. Neben Strom wird bei dieser Reaktion Wärme freigesetzt. Somit ist die Brennstoffzelle ein Energiewandler und kein Energiespeicher (Noreikat 2014; e4ships 2023; Zukunft Gas 2023). Bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen reagiert der Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser und der dabei entstehende elektrische Strom wird in einem Elektromotor umgesetzt. In der Regel wird, z. B. bei Brennstoffzellen-Lkw eine Protonenaustauschmembran-Technologie zum Antrieb des Elektromotors und zum Laden der Fahrzeugbatterie verwendet (IEA 2023a; Fraunhofer Institut 2023).

Abbildung 4: Das Prinzip einer Brennstoffzelle



Quelle: e4ships 2023

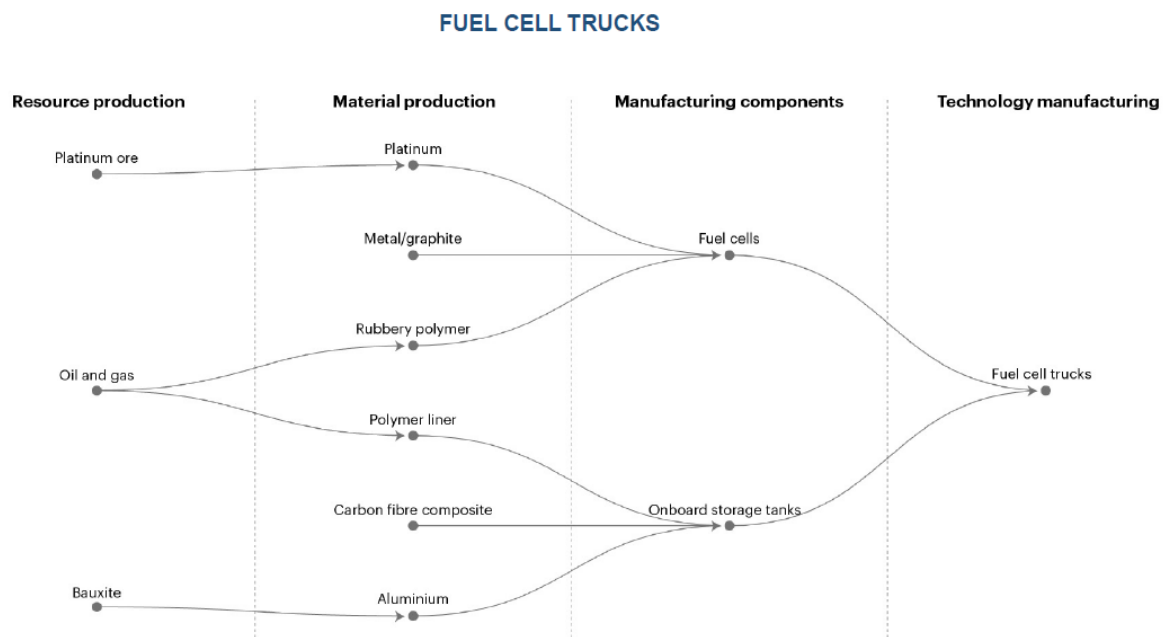
Die verschiedenen Brennstoffzellensysteme unterscheiden sich hauptsächlich durch die Kombinationen von Brennstoffen, Oxidanten, Elektrolyten, Elektroden (Anode (Pluspol) und Kathode (Minuspol)) und Bauformen. Hauptunterscheidungsmerkmal der unterschiedlichen Brennstoffzellentypen ist dabei der Elektrolyt (Noreikat 2014, S. 107):

1. Niedertemperaturbrennstoffzellen (< 300 °C): Alkalische Brennstoffzelle, Membran-Brennstoffzelle, Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (TÜV NORD 2023)
2. Mittel- und Hochtemperaturbrennstoffzellen (>500 °C): Phosphorsäure-Brennstoffzelle, Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle, oxidkeramische Brennstoffzelle (TÜV NORD 2023)

Mit Blick auf den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen gibt es die Schwierigkeit, die benötigte Infrastruktur aufzubauen, da im Gegensatz zu E-Fahrzeugen eine Betankung mit Wasserstoff (und anderen verwendbaren Brennstoffen) zu Hause nicht möglich ist. Dazu kommen hohe Produktionskosten, die einen breiten Einsatz von Brennstoffzellfahrzeugen erst ab einer hohen Stückzahl wirtschaftlich macht. Zudem gehören wichtige Rohmaterialien wie Kupfer, Nickel, Lithium, Kobalt, Mangan, Graphit, Silicium und Elemente der Platingruppe zu den sogenannten kritischen Mineralien (Noreikat 2014; Westerheide 2023; IEA 2023a, S. 52).

Wertschöpfungskette: Die Wertschöpfungskette der Brennstoffzellen und ihrer Komponenten mit Fokus auf die automobilen Nutzung umfasst (1) die Förderung der Rohstoffe, (2) die Membrane Electrode Assembly, (3) die Fertigung der Bipolarplatte, (4) die Stack- und Systemmontage und (5) das Recycling (BMVI 2021). Abbildung 5 zeigt, welche Rohstoffe bei der Herstellung von Brennstoffzellen-Lkws in den verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette zum Einsatz kommen (IEA 2023b).

Abbildung 5: Stufen der Wertschöpfungskette bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen am Beispiel Lkw (engl. "Fuel cell trucks")



IEA. CC BY 4.0.

Quelle: IEA 2023b, S. 32

Marktentwicklungen der letzten Jahre: Seit Jahrzehnten wird an der Entwicklung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (mit Wasserstoffantrieb) gearbeitet. Eine kommerzielle Nutzung von Brennstoffzellen-Pkws und -Lkws ist allerdings erst seit den letzten 10-15 Jahren möglich. In den letzten Jahren rückte dann verstärkt eine Nutzung der Technologie im Schwerlasttransport in den Fokus. Im Jahr 2021 wurden weltweit 900 Brennstoffzellen-Lkws verkauft. Mit 90 % der verkauften Lkws ist China der weltweit größte Absatzmarkt, gefolgt von der Schweiz (8 %). Die Hersteller von Brennstoffzellen-Lkws geben an, dass die derzeitige weltweite Produktionskapazität bei etwa 13.000 Lkws jährlich liegt. Dies würde bedeuten, dass es zurzeit weltweit erhebliche Leerkapazitäten und ein großes Potential gibt, die Produktion mit den bestehenden Anlagen kurzfristig zu erhöhen. Die führenden Unternehmen in der Lkw-Produktion sind: SAIC Hongyan mit einer angegebenen Kapazität von 3.000 Lkw pro Jahr (China), Hyundai mit 2.000 (Korea), Hyzon Motors mit 1.000 (US-amerikanisches Unternehmen mit Produktion in den Niederlanden) und Nikola (US-amerikanisches Unternehmen) mit einer veranschlagten Produktionskapazität von 2.500 Stück in den USA und 2.000 Stück in Deutschland. Bei einer Umsetzung der weltweit angekündigten Expansionspläne der Hersteller könnten im Jahr 2030 mehr als 90.000 Brennstoffzellen-Lkws pro Jahr produziert werden (IEA 2023b).

Der Brennstoffzellenmarkt bezogen auf alle Brennstoffzellen unabhängig von der Nutzung wird voraussichtlich von 3,36 Mrd. USD im Jahr 2021 auf 28,95 Mrd. USD im Jahr 2028 bei einer jährlichen Wachstumsrate von 36,0 % im Zeitraum von 2021 bis 2028 wachsen (Fortune Business Insight 2021). In der EU, den USA, Korea, Japan und China gibt es

ambitionierte Pläne und politische Initiativen, um die Produktion und Nutzung von Brennstoffzellen in den kommenden Jahren massiv auszuweiten (IEA 2023b).

Im Allgemeinen dominiert China die Massenproduktion sauberer Technologien aufgrund der geringen Produktionskosten im Land. Die restlichen Länder im asiatischen Raum fokussieren sich hingegen eher auf die Technologien, in denen sie ein hohes Wissen aufweisen können, hierzu gehören auch die Brennstoffzellen (IEA 2023b, S. 95). Die Kosten für Brennstoffzellen-Stacks sind in den letzten Jahren um etwa 50 % gesunken. So sind zum Beispiel auch die Anschaffungskosten für Brennstoffzellen-Stadtbusse seit 2006 um circa 80 % gesunken. Um jedoch eine Konkurrenzfähigkeit am Markt, z. B. im Vergleich zu batteriebetriebenen Fahrzeugen, zu erreichen, müssen die Kosten zukünftig weiter deutlich reduziert werden (Weichenhain et al. 2020, S. 23).

Die Nachfrage nach Wasserstoff als Brennstoff für Brennstoffzellen kann ein entscheidender Treiber für die Nachfrage und Produktion von grünem Wasserstoff sein, da hier mit bis zu 10 Euro pro Kilogramm deutlich höhere Preise erzielt werden können, als beispielsweise für Industriewasserstoff, der für zwei bis fünf Euro pro Kilogramm angeboten wird (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) 2020, S. 34).

3.2.11 TECHNOLOGIEGRUPPE 11: WÄRMEPUMPEN

Technologiebeschreibung und Materialien: Wärmepumpen erlauben die Nutzung von Umgebungswärme aus dem Erdreich, Grundwasser und Umgebungsluft oder Abwärme zum Heizen und Kühlen von Gebäuden. In dem Bestreben, einen THG-neutralen Gebäudebestand zu erreichen, sind Wärmepumpen eine Schlüsseltechnologie. Mit Wärmepumpen wird einer Wärmequelle auf niedrigem Temperaturniveau Energie entzogen, die dann auf ein höheres Temperaturniveau angehoben und beispielsweise an das Heizsystem eines Gebäudes abgegeben wird. Dieser Prozess läuft über vier Funktionseinheiten in einem Kreislauf: (1) Im Verdampfer nimmt ein flüssiges Arbeitsmedium (auch Kältemittel genannt) die notwendige Verdampfungswärme aus der Umgebung auf und geht dabei in den gasförmigen Zustand über. Im zweiten Schritt (2) erhöht der Verdichter den Druck des aufgewärmten, gasförmigen Arbeitsmedium und erhöht damit dessen Temperatur. Der Verdichter wird in der Regel über einen Elektromotor angetrieben. Im nächsten Schritt (3) überträgt der Verflüssiger (Kondensator) die Wärme als Nutzwärme an das Heizungswasser, dabei gibt das Arbeitsmedium die Wärme ab und kondensiert (wird wieder flüssig). Im letzten Schritt (4) entspannt das Expansionsventil das nun flüssige, aber noch unter Druck stehende Arbeitsmedium, so dass es weiter abkühlt und wieder in den Verdampfer einströmt, um erneut in den Kreislauf zu starten (UBA 2022b). Am gängigsten sind Luft-Luft-, Luft-Wasser-, Wasser- und Erdwärmepumpen, die seit vielen Jahren schon kommerziell genutzt werden (TRLs 7 bis 10, IEA 2021c; IEA 2023a).

Die Effizienz von Wärmepumpen ist im Vergleich zu fossilen Heizungen 3- bis 5-mal höher (IEA 2022i). Der Grad der Umweltfreundlichkeit von elektrisch betriebenen Wärmepumpen ist unter anderem abhängig von der Energiequelle. Unter der Bedingung, dass der elektrische Strom für den Betrieb von erneuerbaren Energien bereitgestellt wird, sinken die THG-Emissionen, die z. B. im Gebäudesektor (insbesondere beim Heizen) anfallen

nochmals. Des Weiteren bestimmt die Wahl des genutzten Kältemittels die Umweltfreundlichkeit der Wärmepumpen. THG-wirksame Kältemittel, wie z. B. teilfluorierte Kohlenwasserstoffe, haben eine schlechte Klimabilanz. Der Einsatz von klimafreundlichen Alternativen, z. B. Propan (R290), kann die THG-Emissionen geringhalten. Weitere Faktoren, die beim Einsatz von Wärmepumpen in Wohngebieten zu beachten sind, sind der erhöhte Luftdurchsatz im Winter und die Schallemissionen, die durch den Verdichter verursacht werden (UBA 2022b; IRENA 2022e).

In Zukunft wird eine stärkere Standardisierung der Wärmepumpen und die Automatisierung der Produktionslinien von entscheidender Bedeutung sein. Internationale Normen sollen standardisiert werden. Ebenfalls spielt die spezifische Auslegung der Geräte für bestimmte Temperaturbereiche und Kältemittel eine bedeutende Rolle in der Technologieentwicklung (IEA 2023a). In diesem Zusammenhang bietet die fortschreitende Digitalisierung großes Potential, den Einsatz von Wärmepumpen zum Heizen (und Kühlen) automatisiert an die Wetterverhältnisse anzupassen und so noch energieeffizienter zu gestalten (IRENA 2022e).

Wertschöpfungskette: Die Wertschöpfungskette für Wärmepumpen besteht im Wesentlichen aus den folgenden Stufen: (1) Der Herstellung der Wärmepumpen, (2) der technischen Beratung und Planung von Projekten/Systemen, (3) der Installation und Montage (v. a. (Bau-)Handwerk) und (4) Betrieb und Instandhaltung (Cambridge Econometrics & Element Energy 2018; Eunomia Research & Consulting Ltd 2020). Auch wenn die Herstellung von Wärmepumpen nicht lokal stattfindet, sind insbesondere bei der Planung, Installation und der Instandhaltung Fachkräfte vor Ort gefragt (Cambridge Econometrics & Element Energy 2018).

Marktentwicklungen der letzten Jahre: Der Markt für Wärmepumpen hat sich in den letzten Jahren rasant weiterentwickelt, da erkannt wurde, dass der Einsatz von Wärmepumpen essentiell für einen zielgerichteten Klimaschutz ist (UBA 2022b). In mehr als 30 Ländern, auf die mehr als 70 % des weltweiten Wärmebedarfs entfällt, gibt es finanzielle Anreize. Insbesondere in den wichtigsten Heizungsmärkten in Nordamerika (USA und Kanada), Europa sowie Nord- und Ostasien wird ihr Einsatz politisch verstärkt gefördert. Im Jahr 2021 waren weltweit ca. 190 Millionen Wärmepumpen installiert und deckten etwa 10 % des weltweiten Heizungsbedarf. Die Verkaufszahlen stiegen 2021 trotz Beeinträchtigungen der Lieferketten durch die Covid-19-Pandemie um 13 % auf ein Rekordniveau an. 2022 nahm der Absatz weiter zu (IEA 2022d, 2023b).

Im Jahr 2020 waren in Europa insgesamt 14,9 Millionen Wärmepumpen installiert. 2021 stieg der Absatz im Vergleich zu 2020 um rund 35 % auf über 2,2 Millionen neu installierter Wärmepumpen. 2021 waren innerhalb der EU die größten Märkte Frankreich (537.000 neu installierte Wärmepumpen in 2021), Italien (380.000) und Deutschland (178.000). Darauf folgten Spanien (149.000), Schweden (133.000), Finnland (129.000) und Norwegen (125.000). Auch 2022 kam es in der EU zu einem weiteren Anstieg des Jahresabsatzes von fast 38 % im Vergleich zum Vorjahr. Laut Schätzungen der „European Heat Pump Association“ wurden 2022 rund 3 Millionen Wärmepumpen in Europa verkauft, die Gesamtzahl der angeschlossenen Heizungswärmepumpen (Luft-Luft- sowie Sole- oder Wasser-Wasser-Wärmepumpen) liegt damit 2022 europaweit bei etwa 20 Millionen. Im

Vergleich von 2021 zu 2022 ist der Absatzmarkt in Polen (+102 %), Tschechien (+99 %) und den Niederlanden (+80 %) am stärksten gewachsen. Deutschland kommt auf +53 % in 2022 (IEA 2022c; IRENA 2022e, BUILT WORLD 2023).

2021 war im weltweiten Vergleich die Marktentwicklung in der EU am dynamischsten. Weitere im globalen Vergleich sehr dynamische Märkte sind die USA (+15 % mehr Absatz im Jahr 2021), Japan (+13 %) und China (+13 % für Luft-Wärmepumpen). Luft-Wärmepumpen machen mit einem Marktanteil von mehr als 60 % im Jahr 2021 den Großteil des globalen Absatzes aus. Erdwärmepumpen (oder geothermische Wärmepumpen) können Heizen und Kühlen mit höherer Effizienz als Luft-Wärmepumpen liefern, doch aufgrund ihrer höheren Kapitalkosten und der spezifischen Fähigkeiten und Techniken, die insbesondere für die Installation erforderlich sind, machen sie nur einen kleinen Teil des weltweiten Absatzes aus und nur etwa 2,5 % der in der EU installierten Wärmepumpen (IRENA 2022d; IEA 2022d).

Etwa die Hälfte der Wärmepumpen wird heute von Herstellern produziert, die auch Heizkessel herstellen, um Synergien bei Hydronik-Systemen zu nutzen. Die meisten Hersteller von Klimaanlage (AC) produzieren auch Luft-Wärmepumpen und expandieren ebenfalls, um das Hydronik-Segment abzudecken oder umgekehrt: Im Jahr 2021 befanden sich rund 75 % der Produktionskapazität für Wärmepumpen in den Händen von AC-Herstellern, oft in derselben Anlage, um die Synergien von Luft-Luft-Systemen zu nutzen. Um die THG-Emissionen bis 2030 stark zu reduzieren und Netto-Null-Emissionen bis 2050 zu erreichen, ist ein deutlicher Ausbau der Herstellerkapazitäten von Wärmepumpen unerlässlich. Allerdings ist eine Abschätzung der zukünftigen Marktentwicklung schwierig, da Expansionspläne der Hersteller nur teilweise öffentlich bekannt sind. In Europa haben 13 Hersteller aus Deutschland, Polen, Belgien, der Republik Türkei, Großbritannien, Frankreich, Schweden, der Slowakei und der Tschechischen Republik konkrete Expansionspläne veröffentlicht. 25 % der bekannten Ankündigungen kommen von japanischen Unternehmen, 2 % von Midea (chinesischer Hersteller) und der Rest von Unternehmen mit Hauptsitz in Europa. Die Realisierung aller angekündigten Investitionen würde die europäischen Produktionskapazitäten in diesem Jahrzehnt verdreifachen, was einem Anstieg der weltweiten Kapazitäten um etwa 35 % entspricht (IEA 2023a).

Zurzeit sind China, Japan und Korea Nettoexporteure von Wärmepumpen und Nordamerika und Europa Nettoimporteure. Die Produktionskapazität von Wärmepumpen ist geographisch gleichmäßiger verteilt als die von anderen sauberen Energietechnologien, die in Massenproduktion hergestellt werden. Mit 40 % werden zwar die meisten Wärmepumpen in China hergestellt und insgesamt wird erwartet, dass die Unternehmen in Ostasien die größten Produzenten bleiben werden. Nichtsdestotrotz wird ebenfalls mit einem erheblichen Kapazitätswachstum in Europa und Nordamerika gerechnet (IEA 2023a, S. 237 ff.).

3.3 KOMPONENTENAUSWAHL

Die weiteren Ausführungen zu Komponenten beziehen sich vornehmlich auf die weiteren Analysen im Gravity-Modell. Für die MLP-Analyse findet, wie oben in den Ausführungen

zur MLP-Analyse skizziert, eine eigenständige Datenerhebung statt. Allerdings sind für diese Erhebungen für die MLP-Analyse dann auch Restriktionen der Datenverfügbarkeit relevant, die bereits hier für die Gravity-Modellierung genannt sind. Zudem wird die Komponentenauswahl für die Verbindung von MLP-Analyse und quantitativer Modellierung relevant.

Die oben beschriebenen Technologien finden sich nicht konkret in offiziellen Statistiken wieder bzw. sind jene, bei denen das der Fall ist, nicht länderübergreifend vergleichbar verfügbar. Grundsätzlich ist ein hoher Detailgrad der ausgewiesenen Daten erforderlich, um die betrachtete Technologie hinreichend eindeutig zu identifizieren. Internationale Datenbanken, die Informationen über Produktionswerte ausweisen (z. B. OECD IO-Tabellen, UNIDO INDSTAT), stellen dagegen auf eine höhere Aggregationsebene ab, die die Technologien lediglich mutmaßlich umfasst. Für einzelne Länder mögen punktuell hinreichend niedrig aggregierte Daten verfügbar sein – so weist im deutschen Fall beispielsweise die Produktionserhebung des verarbeitenden Gewerbes produzierte Güter bis hin zur 9-Steller-Ebene des Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken (GP) aus –, die mangelnde Verfügbarkeit ähnlicher Daten anderer Länder und die eingeschränkte Vergleichbarkeit erschweren die Nutzung jedoch.

Eine Ausnahme in dieser Hinsicht stellt die Datenlage zu internationalen Handelsströmen dar. Die Datenbasis von UN Comtrade (2023) weist detaillierte Export- und Importdaten von nahezu 200 Ländern und Regionen aus, die auf Ebene der 6-Steller der Nomenklatur des Harmonisierten Systems (HS) prinzipiell ab 1962 vorliegen. Das Forschungsinstitut CEPII bereitet diese Rohdaten weiter auf, erzeugt symmetrische Handelsmatrizen, bereinigt Ausreißer und veröffentlicht sie in Form der BACI-Datenbank (CEPII 2023, Gaulier & Zignago 2010). Diese liegen in verschiedenen Versionen der HS-Klassifikation seit 1995 vor. Vor dem Hintergrund, dass es sich bei den im Projekt betrachteten Technologien um relativ neue Entwicklungen handelt, die sich tendenziell besser in neueren Versionen der HS finden lassen, und für die Analysen gleichzeitig ein möglichst langer Schätzzeitraum benötigt wird, wird für die sich anschließenden Arbeiten die HS07-Version der BACI-Daten verwendet.

Für die in Kapitel 3.1 ausgewählten Technologien wurden die in Tabelle 4 zusammengefassten Komponenten identifiziert. Obwohl die Handelsdaten in sehr differenziertem Detailgrad vorliegen, findet sich der überwiegende Teil der Technologien nicht als solche in der HS-Klassifikation wieder. Vielmehr können lediglich Informationen zu individuellen Teilen oder Komponenten aus diesen entnommen werden. Im Rahmen der Vorarbeiten ist es also notwendig, für jede Technologie hinreichend viele Komponenten zu identifizieren, die zusammengenommen den Gesamthandel einer Technologie beschreiben. Zu diesem Zweck wird eine Liste mit Komponenten erstellt, die grundsätzlich einer (oder mehrerer) Technologien zuzuordnen sind. Anschließend werden die Komponenten soweit möglich in der HS-Klassifikation identifiziert. Diese Identifikation erfolgt im Regelfall auf Basis der HS07 auf 6-Steller-Ebene, in Ausnahmefällen aber auch auf Basis der HS17, was eine Umschlüsselung auf die HS07 nach sich zieht.

Es ist wichtig zu betonen, dass eine Zuordnung eines 6-Stellers zu einer Technologie nicht bedeutet, dass eine Güterposition ausschließlich zu diesem Zweck verwendet/verbaut wird.

Die sogenannte Multiple-Use-Problematik äußert sich auf mehrere Arten: Zum einen kann eine verhältnismäßig allgemein oder vielfach genutzte Komponente (bspw. Schalttafeln, Kabel, ...) auch Bestandteil von nicht betrachteten Technologien sein. Zum anderen ist es auch möglich, dass eine Komponente zwar ausschließlich für eine bestimmte Technologie von Interesse ist, die betreffende 6-Steller-Güterposition aber noch weitere Komponenten enthält, die möglicherweise sogar den wertmäßig größten Anteil der Güterposition ausmachen. Da neuere Güter erst mit Verzögerung differenziert in der Statistik unterschieden werden, ist zu befürchten, dass letztere Problematik in diesem Fall gehäuft auftritt. Um der Multiple-Use-Problematik zu begegnen, erfolgt eine Bereinigung der ursprünglichen Liste auf Basis qualitativer Einschätzungen von verschiedenen Expert:innen.

Tabelle 4: Liste der ausgewählten Güterpositionen je Technologie

Technologie	Güterposition	Warenbezeichnung
Windenergie	730820	Türme und Gittermaste, aus Eisen oder Stahl
	850231	Stromerzeugungsaggregate, windgetrieben
	841280	Motoren und Kraftmaschinen (ausg. Dampfturbinen, Kolbenverbrennungsmotoren, Wasserturbinen, Wasserräder, Gasturbinen, Strahltriebwerke, Wasserkraftmaschinen, Hydromotoren und Druckluftmotoren sowie Elektromotoren)
	841290	Teile von nichtelektrischen Motoren und Kraftmaschinen, a.n.g.
	848340	Maschinengetriebe, auch in Form von Wechselgetrieben oder Schaltgetrieben oder Drehmomentwandlern (ausg. Zahnräder, Kettenräder und andere Kraftübertragungsvorrichtungen, gesondert gestellt); Kugelrollspindeln oder Rollenrollspindeln
	8482	Wälzlager "Kugellager, Rollenlager und Nadellager"; Teile davon (ausg. Stahlkugeln der Pos. 7326)
	848320	Lagergehäuse mit eingebautem Wälzlager, für Maschinen
Photovoltaik und konzentrierende Solarthermie	381800	Elemente, chemisch, und chemische Verbindungen, zur Verwendung in der Elektronik dotiert, in Scheiben, Plättchen oder ähnl. Formen bzw. in Form von Zylindern, Stäben usw. oder in Scheiben, Plättchen oder in ähnl. Formen geschnitten, auch poliert oder mit einer einheitlichen epitaxialen Schicht versehen (ausg. weiterbearbeitet, z. B. durch selektive Diffusion)

Technologie	Güterposition	Warenbezeichnung
	8486	Maschinen, Apparate und Geräte von der ausschließlich oder hauptsächlich zum Herstellen von Halbleiterbarren "boules", Halbleiterscheiben "wafers" oder Halbleiterbauelementen, elektronischen integrierten Schaltungen oder Flachbildschirmen verwendeten Art; in Anmerkung 9 C zu Kapitel 84 genannte Maschinen, Apparate und Geräte; Teile und Zubehör, a.n.g.
	903082	Instrumente, Apparate und Geräte zum Messen oder Prüfen von Halbleiterscheiben "wafers" oder Halbleiterbauelementen
	903141	Instrumente, Apparate und Geräte, optisch, zum Prüfen von Halbleiterscheiben "wafers" oder Halbleiterbauelementen oder zum Prüfen von Fotomasken und Reticles für die Herstellung von Halbleiterbauelementen
	854140	Halbleiterbauelemente, lichtempfindlich "einschl. Fotoelemente, auch zu Modulen zusammengesetzt oder in Form von Tafeln" sowie Leuchtdioden (ausg. photovoltaische Generatoren)
	840681	Dampfturbinen mit einer Leistung von > 40 MW (ausg. für den Antrieb von Wasserfahrzeugen)
	847989	Maschinen, Apparate und mechanische Geräte, a.n.g.
	850131	Gleichstrommotoren mit einer Leistung von > 37,5 W bis 750 W und Gleichstromgeneratoren mit einer Leistung von <= 750 W
	850132	Gleichstrommotoren und Gleichstromgeneratoren, mit einer Leistung von > 750 W bis 75 kW
	850133	Gleichstrommotoren und Gleichstromgeneratoren, mit einer Leistung von > 75 kW bis 375 kW
	850134	Gleichstrommotoren und Gleichstromgeneratoren, mit einer Leistung von > 375 kW
	850161	Wechselstromgeneratoren mit einer Leistung von <= 75 kVA
	850162	Wechselstromgeneratoren mit einer Leistung von > 75 kVA bis 375 kVA
	850163	Wechselstromgeneratoren mit einer Leistung von > 375 kVA bis 750 kVA

Technologie	Güterposition	Warenbezeichnung
	850164	Wechselstromgeneratoren mit einer Leistung von > 750 kVA
Batterien	850780	Akkumulatoren, elektrisch (ausg. ausgebrauchte sowie Blei-, Nickel-Cadmium- und Eisen-Nickel-Akkumulatoren)
	850790	Platten, Scheider "Separatoren" und andere Teile von elektrischen Akkumulatoren, a.n.g.
Carbon Capture Use and Storage (CCU/CCS)	381511	Katalysatoren, auf Trägern fixiert, mit Nickel oder einer Nickelverbindung als aktiver Substanz, a.n.g.
	381512	Katalysatoren, auf Trägern fixiert, mit Edelmetall oder einer Edelmetallverbindung als aktiver Substanz, a.n.g.
	381519	Katalysatoren auf Trägern fixiert, a.n.g. (ausg. mit Edelmetall oder einer Edelmetallverbindung oder mit Nickel oder einer Nickelverbindung als aktiver Substanz)
	711510	Katalysatoren in Form von Geweben oder Gittern, aus Platin
	842139	Apparate zum Filtrieren oder Reinigen von Gasen (ausg. für die Isotopentrennung sowie Luftansaugfilter für Kolbenverbrennungsmotoren)
Biomasse	841989	Apparate und Vorrichtungen, auch elektrisch beheizt, zum Behandeln von Stoffen durch auf einer Temperaturänderung beruhende Vorgänge, z. B. Heizen, Kochen, Rösten, Sterilisieren, Pasteurisieren, Dämpfen, Verdampfen, Kondensieren oder Kühlen, a.n.g. (ausg. Haushaltsapparate sowie Öfen und andere Apparate der Pos. 8514)
	381511	Katalysatoren, auf Trägern fixiert, mit Nickel oder einer Nickelverbindung als aktiver Substanz, a.n.g.
	381512	Katalysatoren, auf Trägern fixiert, mit Edelmetall oder einer Edelmetallverbindung als aktiver Substanz, a.n.g.
	381519	Katalysatoren auf Trägern fixiert, a.n.g. (ausg. mit Edelmetall oder einer Edelmetallverbindung oder mit Nickel oder einer Nickelverbindung als aktiver Substanz)
	711510	Katalysatoren in Form von Geweben oder Gittern, aus Platin

Technologie	Güterposition	Warenbezeichnung
	842139	Apparate zum Filtrieren oder Reinigen von Gasen (ausg. für die Isotopentrennung sowie Luftansaugsfilter für Kolbenverbrennungsmotoren)
Elektromobilität	850780	Akkumulatoren, elektrisch (ausg. ausgebrauchte sowie Blei-, Nickel-Cadmium- und Eisen-Nickel-Akkumulatoren)
	870390	Personenkraftwagen, einschl. Kombinationskraftwagen und Rennwagen, und andere Kraftfahrzeuge, ihrer Beschaffenheit nach hauptsächlich zur Personenbeförderung bestimmt, mit anderem Motor als Hubkolbenverbrennungsmotor (ausg. Schnee- und andere Spezialfahrzeuge der Unterpos. 8703.10)
	870290	Kraftfahrzeuge zum Befördern ≥ 10 Personen, einschl. Fahrer, mit anderem Motor als Kolbenverbrennungsmotor mit Selbstzündung "Diesel- oder Halbdieselmotor"
Wasserstoff	854330	Maschinen, Apparate und Geräte für die Galvanotechnik, Elektrolyse oder Elektrophorese
Wasserkraft	841011	Wasserturbinen und Wasserräder, mit einer Leistung von ≤ 1.000 kW (ausg. Wasserkraftmaschinen oder Hydromotoren der Pos. 8412)
	841012	Wasserturbinen und Wasserräder, mit einer Leistung von > 1.000 kW bis 10.000 kW (ausg. Wasserkraftmaschinen oder Hydromotoren der Pos. 8412)
	841013	Wasserturbinen und Wasserräder, mit einer Leistung von > 10.000 kW (ausg. Wasserkraftmaschinen oder Hydromotoren der Pos. 8412)
	841221	Wasserkraftmaschinen und Hydromotoren, linear arbeitend "Arbeitszylinder", hydraulische
	841229	Wasserkraftmaschinen und Hydromotoren (ausg. Wasserturbinen oder Wasserräder der Pos. 8410, Dampfturbinen und Wasserkraftmaschinen und Hydromotoren, linear arbeitend [Arbeitszylinder])
	841090	Teile von Wasserturbinen oder Wasserrädern, a.n.g.; Regler für Wasserturbinen

Technologie	Güterposition	Warenbezeichnung
Wärmespeichersysteme	841950	Wärmeaustauscher (ausg. Durchlauferhitzer, Heißwasserspeicher, Heizkessel sowie Apparate, bei denen der Wärmeaustausch nicht über eine Wandung stattfindet)
	847989	Maschinen, Apparate und mechanische Geräte, a.n.g.
Brennstoffzellen-Fahrzeuge	850790	Platten, Scheider "Separatoren" und andere Teile von elektrischen Akkumulatoren, a.n.g.
	381511	Katalysatoren, auf Trägern fixiert, mit Nickel oder einer Nickelverbindung als aktiver Substanz, a.n.g.
	381512	Katalysatoren, auf Trägern fixiert, mit Edelmetall oder einer Edelmetallverbindung als aktiver Substanz, a.n.g.
	711510	Katalysatoren in Form von Geweben oder Gittern, aus Platin
	870390	Personenkraftwagen, einschl. Kombinationskraftwagen und Rennwagen, und andere Kraftfahrzeuge, ihrer Beschaffenheit nach hauptsächlich zur Personenbeförderung bestimmt, mit anderem Motor als Hubkolbenverbrennungsmotor (ausg. Schnee- und andere Spezialfahrzeuge der Unterpos. 8703.10)
Wärmepumpen	841861	Wärmepumpen (ausg. Klimageräte der Pos. 8415)
	841950	Wärmeaustauscher (ausg. Durchlauferhitzer, Heißwasserspeicher, Heizkessel sowie Apparate, bei denen der Wärmeaustausch nicht über eine Wandung stattfindet)
Stromnetze	850422	Transformatoren mit Flüssigkeitsisolation, mit einer Leistung von > 650 kVA bis 10.000 kVA
	850423	Transformatoren mit Flüssigkeitsisolation, mit einer Leistung von > 10.000 kVA
	9032	Instrumente, Apparate und Geräte zum Regeln (ausg. Armaturen der Pos. 8481)
	8542	Schaltungen, elektronisch, integriert "IC-Schaltungen"

Quelle: eigene Tabelle auf Basis von WCO (2023)

4 LÄNDERAUSWAHL

In den quantitativen Modellen ist eine Vielzahl von Ländern abgebildet. Im Rahmen der MLP-Analyse muss die Länderzahl reduziert werden, um den zu erwartenden Recherche- und Analyseaufwand in praktikablen Grenzen zu halten. Deshalb ist eine Länderauswahl zu treffen. Für die Länderauswahl gilt – ähnlich wie für die Technologiefilterung –, dass ein Verfahren erforderlich ist, das eine Auswahl ermöglicht, ohne selbst eine vertiefte, langdauernde Analyse einzelner Länder vorauszusetzen. Dabei können zwar grundsätzlich je nach Technologiegruppe verschiedene Länder ausgewählt werden. Ein solches Vorgehen verbietet sich aber, da im Rahmen der MLP-Analyse vor allem im Kontext der Landscape-, aber auch der Regimeanalyse nicht-technologiespezifische Eigenheiten der Länder zu beachten sind, weshalb die Gesamtzahl der Länder über alle betrachteten Technologiegruppen hinweg nicht zu groß werden darf. Gleichzeitig ist aber darauf zu achten, dass wahrscheinlich sehr bedeutende Länder für einzelne Technologiegruppen nicht ausgeschlossen werden, da die MLP-Analyse ansonsten von vorneherein an Aussagekraft verliert.

Als naheliegender Indikator kommt grundsätzlich die Produktion in einem Land in der jüngeren Vergangenheit in Betracht. Wie in Abschnitt 0 dargelegt, sind Produktionsdaten aber nicht ohne Weiteres verfügbar. Deshalb wird auf Exportdaten fokussiert, die dann für einzelne Technologiegruppen anzeigen, wie bedeutend ein Land für den einschlägigen Welthandel ist, was generell eine hohe Wettbewerbsfähigkeit bei der Produktion der Technologien indiziert. Dabei ergeben sich zwei inhaltliche Probleme. Das erste ist: Bei noch nicht oder noch nicht länger marktlich eingeführten Technologien sind aufgrund des noch relativ unbedeutenden Weltmarktvolumens Einschätzungen der Wettbewerbsfähigkeit über den aktuellen internationalen Handel schwierig oder die Wettbewerbsfähigkeit an sich ist nicht als stabil anzusehen. Dem wird teils dadurch entgegengewirkt, dass in den verwendeten Klassifikationen auch verwandte Technologien oder anders produzierte Produkte mit einbezogen sind, so dass Erfahrungen mit ähnlichen Prozessen berücksichtigt werden, die dann einen gewissen Vorteil bei der Produktion der eigentlich interessierenden Technologie begründen. Das zweite inhaltliche Problem ist: Mit der Verwendung von Export- statt Produktionsdaten wird nicht berücksichtigt, inwieweit einzelne Länder bestimmte Technologiegruppen für den heimischen Markt produzieren, was ebenfalls wettbewerbsfähige Kosten indizieren kann. Diesem Problem kann im Zuge der Länderauswahl nicht begegnet werden, im Rahmen der MLP-Analyse wird dies aber konzeptionell adressiert. Auch kann nur begrenzt eine Aussage dazu getroffen werden, inwieweit ein Re-Export von Importen stattfindet. Zu deren Abgrenzung werden letztlich die in den Handelsdaten implizierten Regeln für die Bestimmung des Herkunftslandes herangezogen. Daneben ist auch auf ein datentechnisches Problem hinzuweisen: Wie in Abschnitt 0 ausgeführt, sind auch in den Handelsdaten einschlägige, den Technologiegruppen eineindeutig zuzuordnende Güterpositionen nicht zu finden. Für die Länderauswahl muss daher auf diejenigen Technologiegruppen fokussiert werden, denen gut passende Güterpositionen entsprechen. Nach diesen Vorbemerkungen wird nun das konkrete Vorgehen bei der Länderauswahl beschrieben.

Die Exporte werden mittels UN Comtrade-Daten (abgerufen über WITS (2021)) quantifiziert. Eine Übersicht über die herangezogenen Positionen zeigt Tabelle 5, wo ergänzend auch die im Weiteren zur Textvereinfachung verwendeten Kurzbezeichnungen aufgeführt sind. An dieser Stelle soll kurz darauf eingegangen werden, wie die Auswahl zustande gekommen ist: Wasserturbinen, windgetriebene Stromerzeugungsaggregate, PV-Zellen und Kraftwagen mit alternativen Antrieben waren ebenso wie eine Unterkategorie der hier aufgeführten Batterien bereits Gegenstand eines anderen Projekts der GWS (vgl. Lehr et al. 2020). Diese Positionen enthalten deshalb sehr sicher technologiegruppenrelevante Güter. Wie viele andere Güterpositionen dies jedoch ebenfalls tun und wie repräsentativ der ausgewählte 4- oder 6-Steller ist, lässt sich nicht ohne weiteres sagen. Wasserstoff war bislang kein Gegenstand der Untersuchungen auf Basis von Handelsdaten, scheint in der Statistik aber relativ klar ausgewiesen zu sein. Bei Wärmepumpen und Elektrolyseuren erfolgt die Auswahl einzig basierend auf den „self-explanatory texts“ der HS2007-Klassifikation; sie ist deshalb mit Vorsicht zu betrachten.

Tabelle 5: Für die Länderauswahl verwendete Güterpositionen in den COMTRADE-Daten

HS 4-/6-Steller	Beschreibung	Im Weiteren verwendete Kurzbeschreibungen
2804	Wasserstoff	Wasserstoff
8410	Wasserturbinen, Wasserräder und Regler dafür; Teile davon (ausg. Wasserkraftmaschinen oder Hydromotoren der Pos. 8412)	Wasserkraftanlagen
8506	Primärelemente und Primärbatterien, elektrisch (ausg. ausgebrauchte); Teile davon	Batterien
841861	Wärmepumpen (ausg. Klimageräte der Pos. 8415)	Wärmepumpen
850231	Stromerzeugungsaggregate, windgetrieben	Windkraftanlagen
854140	Halbleiterbauelemente, lichtempfindlich "einschl. Fotoelemente, auch zu Modulen zusammengesetzt oder in Form von Tafeln" sowie Leuchtdioden (ausg. photovoltaische Generatoren)	PV
854330	Maschinen, Apparate und Geräte für die Galvanotechnik, Elektrolyse oder Elektrophorese	Elektrolyseure
870390	Personenkraftwagen, einschl. Kombinationskraftwagen und Rennwagen, und andere Kraftfahrzeuge, ihrer Beschaffenheit nach hauptsächlich zur Personenbeförderung bestimmt, mit anderem Motor als Hubkolbenverbrennungsmotor (ausg. Schnee- und andere Spezialfahrzeuge der Unterpos. 8703.10)	Elektro-PKW

Quelle: eigene Tabelle auf Basis von WCO (2023)

Die Exportdaten aus Comtrade werden differenziert nach Reporter|Product|Partner|Flow|Year in 1.000 USD ausgewiesen. Die einzelnen Ströme wurden nach Reporter-Ländern aggregiert und in Folge für die Jahre 2015-2020 eine nach Größe geordnete Liste der größten Exportländer je Güterposition erstellt. Daraus wurden für jedes Jahr diejenigen Länder identifiziert, die kumuliert erforderlich sind, um 70 % und 90 % des Weltexportvolumens abzudecken. Die längere Zeitreihe ist angezeigt, da für die letzten Jahre unter Umständen noch nicht alle Meldungen für einzelne Länder/Produktgruppen vorliegen und dadurch zudem vermieden wird, dass Ausreißer in einzelnen Jahren das Ergebnis der Auswertung beeinträchtigen.

In Tabelle 6 wird ein Überblick über die Mindestanzahl an Ländern gegeben, die betrachtet werden müssen, um kumuliert mindestens 70 % bzw. 90 % der weltweiten Exporte in allen betrachteten Jahren zu erfassen. Im Durchschnitt über alle Technologien müssen dabei 8 bzw. 15 Länder pro Technologie betrachtet werden. Die Anzahl unterscheidet sich jedoch erheblich nach Technologien. So ist insbesondere für v. a. Windkraftanlagen und PV eine relativ geringe Anzahl an Ländern erforderlich, was sich auch in einem relativ hohen Herfindahl-Index für diese beiden Technologien widerspiegelt. Für Wärmepumpen ergeben sich – trotz deutlich niedrigerem Herfindahl-Index – ähnliche Werte wie für PV. Gerade für eine Abdeckung von 90 % müssten für die anderen Technologien erheblich mehr Länder betrachtet werden. Insgesamt tauchen über alle Technologien hinweg 62 bzw. 117 Ländernennungen für eine 70 %- bzw. 90 %-Abdeckung auf. Allerdings verbergen sich hinter diesen Zahlen eine erhebliche Anzahl von mehrfachgenannten Ländern. Bereinigt man die Zahlen um Mehrfachnennungen, so ergeben sich 28 bzw. 40 verschiedene Länder. Wie oben erläutert, erscheint es sinnvoll, besonders diejenigen Länder näher zu betrachten, die für mehrere Technologiegruppen relevant sind. Umgesetzt wird dies durch die Anforderung, dass ein Land in den betrachteten Jahren für mindestens zwei Technologiegruppen relevant sein muss. Damit reduziert sich die Länderzahl bei einer geforderten Abdeckung von 70 % und 90 % erheblich auf 12 bzw. 25, was darauf hindeutet, dass sich die Länderlisten technologieabhängig merklich unterscheiden. Da mit den Kriterien 70 % der weltweiten kumulierten Exporte für mindestens zwei Güterpositionen die großen Player gut erfasst scheinen und 12 Länder zudem für die Recherche eine handhabbare Zahl ist, werden diese Kriterien angewendet (s. Tabelle 8). Um einen Überblick zu gewähren, sind in Tabelle 7 die für eine 70-prozentige Abdeckung relevanten Länder nach Güterpositionen dargestellt.

Tabelle 6: Überblick über Länderanzahlen in Exportdaten für die einzelnen Technologien nach Abdeckungsgrad des Weltexportvolumens

Betrachtete Jahre: 2015-2020	Abdeckung 70 % der weltweiten Exporte	Abdeckung 90 % der weltweiten Exporte*	Herfindahl-Index im Jahr 2020
Batterien	9	16	0,125
Elektrolyseure	7	20	0,119
Elektro-PKW	9	16	0,120
Wärmepumpen	6	13	0,115

Betrachtete Jahre: 2015-2020	Abdeckung 70 % der weltweiten Exporte	Abdeckung 90 % der weltweiten Exporte*	Herfindahl-Index im Jahr 2020
Wasserkraftanlagen	11	16	0,101
Wasserstoff	10	18	0,094
PV	7	12	0,215
Windkraftanlagen	3	6	0,208
Summe	62	117	
davon verschiedene Länder	28	40	
davon Länder, die für min. 2 Technologien relevant sind	12	25	

* enthält auch die Anzahl der Länder, die für eine 70%ige Abdeckung erforderlich sind.

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 7: Matrix Länder-Technologien für die aus einer mindestens 70%-Abdeckung der Weltexporte resultierende Länderliste* (dunkel eingefärbt: Element relevant)

	Batterien	Elektrolyseure	Elektro-PKW	Wärmepumpen	Wasserkraftanlagen	Wasserstoff	PV	Windkraftanlagen
AUT	0	0	0	0	X	0	0	0
BEL	X	0	X	0	0	0	0	0
BRA	0	0	0	0	X	X	0	0
CHE	0	0	0	0	X	0	0	0
CHN	X	X	0	X	X	X	X	0
CZE	0	0	0	0	X	0	0	0
DEU	X	X	X	X	X	X	X	X
DNK	0	0	0	0	0	0	0	X
FRA	0	0	X	X	X	0	0	0
GBR	0	0	X	0	0	0	0	0
HKG	X	X	0	0	0	0	X	0
IDN	X	0	0	0	0	0	0	0
IND	0	0	0	0	X	0	0	0
ITA	0	X	0	X	X	0	0	0
JPN	X	X	X	X	0	X	X	0
KOR	0	0	X	0	0	X	X	0
MYS	0	0	0	0	0	X	X	0

	Batterien	Elektrolyseure	Elektro-PKW	Wärmepumpen	Wasserkraftanlagen	Wasserstoff	PV	Windkraftanlagen
NLD	0	0	X	0	0	X	0	X
NOR	0	0	0	0	0	X	0	0
POL	X	0	0	0	0	0	0	0
QAT	0	0	0	0	0	X	0	0
SGP	X	0	0	0	0	0	0	0
SVK	0	0	X	0	0	0	0	0
SVN	0	0	0	0	X	0	0	0
SWE	0	0	0	X	0	0	0	0
THA	0	X	0	0	0	0	0	0
USA	X	X	X	0	X	X	0	0
VNM	0	0	0	0	0	0	X	0

* Länderabkürzungen nach ISO 3166 ALPHA 3.

Quelle: eigene Darstellung

Wie erwähnt besteht bei dieser Art der Auswahl das Problem, dass man nach dieser Filterung mitunter für einzelne Technologien sehr bedeutende Länder ausschließen könnte. Dies gilt insbesondere, wenn für die Länderauswahl der relativ geringe Schwellenwert eines Gesamtexportanteils von 70 % verwendet wird.

Für die Analyse, ob noch zusätzliche Länder für einzelne Technologien betrachtet werden sollen, ist ein Schwellenwert festzulegen. Dieser wird so bestimmt, dass ergänzend Länder betrachtet werden, die für eine Güterposition in mindestens einem der betrachteten Jahre (2015–2020) einen Weltexportanteil von mindestens 10 % auf sich vereinen. Aus den Daten ergeben sich dann drei relevante Länder-Güter-Kombinationen: Dänemark-Windkraftanlagen, Spanien-Windkraftanlagen und Österreich-Wasserkraftanlagen. Diese drei Länder werden deshalb zusätzlich zu den 12 bereits ausgewählten Ländern betrachtet, jedoch nur für die zu den genannten Güterpositionen gehörenden Technologiegruppen. Tabelle 8 listet die letztendliche Auswahl von Ländern und betrachteten Technologiegruppen für die MLP-Analyse entsprechend der zu Beginn des Abschnitts genannten Begründung auf. Die Länder sind auch im GINFORS-Gravity-Ansatz-Modellverbund einzeln abgebildet, so dass für sie eine Verbindung von MLP-Analyse mit der quantitativen Modellierung möglich ist.

Tabelle 8: Überblick über die für die weitere MLP-Analyse ausgewählten Länder nach Technologiegruppen

Länder	Für folgende Technologiegruppen
Belgien	Alle
Brasilien	Alle
China	Alle
Deutschland	Alle
Frankreich	Alle
Hong Kong	Alle
Italien	Alle
Japan	Alle
Republik Korea (Südkorea)	Alle
Malaysia	Alle
Niederlande	Alle
USA	Alle
Österreich	Nur Wasserkraft
Dänemark	Nur Windenergie
Spanien	Nur Windenergie

Quelle: eigene Darstellung

5 AUSBLICK

Die dargestellten methodischen Ansätze werden für die ausgewählten Technologien und Länder im weiteren Projektverlauf eingesetzt. Das Gravity-Modell wird für die dargestellten Technologien für zentrale Komponenten weiter spezifiziert und in einem separaten wissenschaftlichen Papier ausführlich beschrieben. In GINFORS-E werden außerdem für die oben aufgeführten Technologien, die im Modell aufgrund der bisherigen Sektorstrukturen abgrenzbar sind, zusätzliche spezifische Kostenstrukturen berücksichtigt, sofern entsprechende Inputvektoren schon vorliegen (O’Sullivan & Edler 2020; Aigner et al. 2023) oder anhand der Technologieinformationen gebildet werden können. Dies ist für die erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung in jedem Fall ebenso möglich wie für die Elektromobilität. Für weitere Technologien bleibt dies zu prüfen.

Auf Basis dieser Länder- und Technologieauswahl setzt auch die MLP-Analyse an. Als erstes werden dabei Kriterien für die MLP-Analyse bestimmt und ihnen entsprechende Indikatoren zugeordnet (siehe auch Tabelle 1 oben). Für diese Indikatoren sind dann nach Ländern und Technologiegruppen Daten zu erheben. Wesentlich ist dabei, auch im Unterschied zu den obigen Ausführungen in diesem Bericht, so weit als möglich, länderspezifische Daten zu erhalten. Denn zum einen soll mit ihnen diskutiert werden, inwieweit sich Länder auf bestimmte Technologiegruppen spezialisieren, zum anderen und wichtigerem soll für eine Technologiegruppe eingeschätzt werden, inwieweit die Bedingungen im Vergleich zu jenen in anderen Ländern förderlich sind, diese Technologie in einem Land zu produzieren. Dabei kommen sowohl Technology-push- als auch Technology-pull-Bedingungen in Betracht. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Frage, inwieweit Leitmärkte in einzelnen Ländern vorhanden sind oder entstehen, die einen „virtuous circle“ zwischen Nachfrage und Produktion in einem Land entstehen lassen könnten. Dabei sind auch die unterschiedlichen technologischen Reifegrade der verschiedenen Technologien/Technologiegruppen zu beachten.

Die Erhebung länder- und gleichzeitig technologiespezifischer Daten dürfte sich allerdings häufig als sehr schwierig erweisen, wodurch je nach Indikator, Technologiegruppe und Land mehr oder weniger große Lücken entstehen könnten. Der genaue Sachverhalt wird im geplanten gesonderten Bericht zur Datenerhebung detailliert ausgeführt werden. Die grundsätzliche Konzeption kann dessen ungeachtet beibehalten werden, obgleich für einzelne Länder-Technologiegruppen-Kombinationen die weitere Analyse erschwert werden dürfte und im Einzelfall das konkrete weitere Vorgehen dann noch genauer geplant werden muss.

Die erste MLP-Analyse auf Basis dieser quantitativen Indikatoren zielt auch darauf ab, Länder-Technologiekombinationen begründet auszuwählen, für die dann mittels vertiefter Regime- und Landscape-Analysen die jeweiligen Bedingungen für eine Technologiegruppe in den ausgewählten Ländern diskutiert wird. Auf dieser Basis wird dann eingeschätzt, inwieweit die betrachteten Länder für diese Technologie eine relativ attraktive Produktionsstätte sein dürften, und es werden Szenarien entwickelt, die sowohl die veränderte Nachfrage als auch die veränderten Produktionsbedingungen im Vergleich zu einem Referenzszenario benennen. Diese werden quantifiziert und sodann in den

Modellverbund Gravity-Modell/GINFORS-E eingespeist, um eine hieraus resultierende veränderte weltwirtschaftliche Arbeitsteilung abzuschätzen. Die Schnittstellen zwischen MLP-Analyse und quantitativer Modellierung sind bereits grob abgestimmt. Es zeichnet sich ab, dass neben Nachfrageveränderungen in einzelnen Ländern auch angebotsseitige Modelleingriffe erfolgen – z. B. bei den Produktionskosten –, um Leitmarktaspekte adäquat abbilden zu können. An der Schnittstelle zwischen MLP-Analyse und Modellen wird auch den herausgearbeiteten Komponenten eine große Bedeutung zukommen.

Letztlich soll durch die Verknüpfung von MLP-Analyse mit der quantitativen Modellierung in dem um den Gravity-Ansatz erweiterten GINFORS-E-Modell die Frage beantwortet werden, inwiefern sich durch Spezialisierung auf bestimmte Technologien und/oder bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Transformation Wertschöpfungsketten verlagern und welche ökonomischen Effekte damit einhergehen. Dies wird v. a. auch vor dem Hintergrund geschehen, dass die jeweiligen Handelspartner ebenfalls bestimmte Transformationsstrategien verfolgen, der Effekt der eigenen Transformation also auch vom Verhalten der Handelspartner abhängt.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- Aigner, M., Aliabadi, D. E. & Amri-Henkel, A. (2023): Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr – Kurzbericht zur "Roadmap für strombasierte Kraftstoffe".
- Alkan, B., Vera, D. A., Ahmad, M., Ahmad, B. & Harrison, R. (2018): Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review. *European Journal of Industrial Engineering* (12), S. 116–150. <https://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/EJIE.2018.089883>.
- Ansari, D., Grinschgl, J. & Pepe, J. M. (2022): Elektrolyseure für die Wasserstoffrevolution – Herausforderungen, Abhängigkeiten und Lösungsansätze. Hg. v. Stiftung Wissenschaft und Politik -SWP- Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit. SWP-Aktuell. https://www.swp-berlin.org/publications/products/aktuell/2022A58_Wasserstoffrevolution.pdf, abgerufen am 10.02.2023.
- Batterieforum Deutschland (2023): Batterie-Kompodium. <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/blei-saeure-batterien/>, zuletzt aktualisiert am 10.01.2023, abgerufen am 10.01.2023.
- BauNetz (2023): Wärmespeicherung | Gebäudetechnik | Heizung | Baunetz_Wissen. <https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/fachwissen/heizung/waermespeicherung-3319001>, abgerufen am 04.05.2023.
- Bianchi, F. & Squazzoni, F. (2020): Modelling and social science – Problems and promises. In: Moallemi, E. A. & De Haan, F. (Hg.): *Modelling transitions. Virtues, vices, visions of the future*. Routledge Studies in Sustainability Transitions Ser. Routledge, London, New York. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780429056574-5/modelling-social-science-federico-bianchi-flaminio-squazzoni>.
- BloombergNEF (BNEF) (2022a): A Year of Breakthroughs and Setbacks for the Race to Net Zero, in Five Charts | BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/a-year-of-breakthroughs-and-setbacks-for-the-race-to-net-zero-in-five-charts/>, zuletzt aktualisiert am 20.12.2022, abgerufen am 03.05.2023.
- BloombergNEF (BNEF) (2022b): Hydrogen - 10 Predictions for 2022 | BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/hydrogen-10-predictions-for-2022/>, zuletzt aktualisiert am 24.01.2022, abgerufen am 29.03.2023.
- BloombergNEF (BNEF) (2022c): Electric Vehicle Outlook 2022 – Executive Summary. <https://bnef.turtl.co/story/evo-2022/page/1?teaser=yes>, abgerufen am 03.05.2023.
- BloombergNEF (BNEF) (2023): 1H 2023 Energy Storage Market Outlook | BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook/>, zuletzt aktualisiert am 22.03.2023, abgerufen am 03.05.2023.
- BUILT WORLD (Hg.) (2023): Wärmepumpen EU-Rekord im Jahr 2022: 3 Millionen verkaufte Einheiten – Building Technology. Unter Mitarbeit von Jonas Haberkorn, zuletzt aktualisiert am 24.08.2023, abgerufen am 24.08.2023.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2023): Wasserstoff-Leitprojekte – Wissenswertes. <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/wissenswertes>, zuletzt aktualisiert am 08.09.2023, abgerufen am 08.09.2023.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2021): GreenTech made in Germany 2021 – Umwelttechnik-Atlas für Deutschland.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2021): Positionspapier "Brennstoffzelle" – AG 4 - Zwischenbericht. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität. https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/04/NPM_AG4_Positionspapier_Brennstoffzelle.pdf, abgerufen am 04.08.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022a): Concentrated Solar Power (CSP) - Solare Energie rund um die Uhr – Marktanalysen. Sektoranalyse. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Mittelstand Global Exportinitiative Energie. <https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Marktanalysen/2022/studie-dcsp-solare-energie-rund-um-die-uhr.html>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2023, abgerufen am 04.05.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022b): Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie, Berlin. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Downloads/fortschrittsbericht-der-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=2, abgerufen am 10.02.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022c): Wasserkraft. <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Technologien/Wasserkraft/wasserkraft.html>, zuletzt aktualisiert am 26.07.2023, abgerufen am 26.07.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022d): Evaluierungsbericht zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) – Bericht der Bundesregierung. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.pdf?__blob=publicationFile&v=10, abgerufen am 06.03.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023): Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html>, zuletzt aktualisiert am 05.01.2023, abgerufen am 05.01.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2022): Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS). https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/eckpunkte-nationale-biomassestrategie-nabis.pdf?__blob=publicationFile&v=4, abgerufen am 23.08.2023.

Bundesnetzagentur (2023a): Solar Aufdach – Beendete Ausschreibungen/Statistiken. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreib>

ungen/Solaranlagen2/BeendeteAusschreibungen/start.html, zuletzt aktualisiert am 25.01.2023, abgerufen am 25.01.2023.

Bundesnetzagentur (2023b): Solar Freifläche – Beendete Ausschreibungen/Statistiken. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Solaranlagen1/BeendeteAusschreibungen/start.html>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2023, abgerufen am 25.01.2023.

Bundesnetzagentur (2023c): Windenergieanlagen an Land – Beendete Ausschreibungen/Statistiken. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Wind_Onshore/BeendeteAusschreibungen/start.html, zuletzt aktualisiert am 25.01.2023, abgerufen am 25.01.2023.

Bundesverband Bioenergie e.V. (2023): Kraftstoffe. <https://www.bioenergie.de/themen/klima>, zuletzt aktualisiert am 31.05.2023, abgerufen am 31.05.2023.

Cambridge Econometrics & Element Energy (2018): A study on Low Carbon Value Chains and Economic Growth. <https://www.camecon.com/wp-content/uploads/2018/12/YNYER-Low-Carbon-Value-Chains-and-Economic-Growth-Final-Report.pdf>, abgerufen am 08.05.2023.

Centre d'études prospectives et d'informations internationales (CEPII) (2023): BACI database. http://cepii.fr/CEPII/en/bdd_modele/bdd_modele_item.asp?id=37, abgerufen am 22.08.2023.

Climate Policy initiative (CPI) & International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023): Global landscape of renewable energy finance 2023, Abu Dhabi. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_CPI_Global_RE_finance_2023.pdf?rev=8668440314f34e588647d3994d94a785, abgerufen am 28.07.2023.

De Haan, F. J., Martínez Arranz, A. & Spekking, W. (2020): Data-driven transitions research – Methodological considerations for event-based analysis. In: Moallemi, E. A. & De Haan, F. (Hg.): Modelling transitions. Virtues, vices, visions of the future. Routledge Studies in Sustainability Transitions Ser. Routledge, London, New York. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780429056574-12/data-driven-transitions-research-fjalar-de-haan-alfonso-mart%C3%ADnez-arranz-wouter-spekkink>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralitaet.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2022): Entwurf einer industriepolitischen Strategie für erneuerbare Energien und Stromnetze – Abschlussbericht - Erkenntnisse aus dem Stakeholderdialog industrielle Produktionskapazitäten für die Energiewende (StiPE). Unter Mitarbeit von Philine Wedell, Joscha Müller, Shervin Balali, Philipp Barthel, Mirko Bolsenbroek, Tibor Fischer et al. im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/stakeholderdialog->

industrielle-produktionskapazitäten-für-die-energie-wende.pdf?__blob=publicationFile&v=6, abgerufen am 08.03.2023.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (Hg.) (2020): Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. https://elib.dlr.de/137796/1/DLR_Wasserstoffstudie_Teil_1_final.pdf, abgerufen am 07.08.2023.

DOE Global Energy Storage Database (2023). <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html>, zuletzt aktualisiert am 03.05.2023, abgerufen am 03.05.2023.

Duyckaerts, N., Jeske, K., Schüth, F. & Prieto, G. (2017): Neue Möglichkeiten der Treibstoffproduktion aus unkonventionellen Ausgangsstoffen durch 3D-Bildgebung auf Nanaoskala. Max-Planck-Institut für Kohlenforschung. Forschungsbericht. https://www.mpg.de/11725569/_jb_2017, zuletzt aktualisiert am 16.08.2023, abgerufen am 16.08.2023.

e4ships (2023): Prinzip Brennstoffzelle. <https://www.e4ships.de/deutsch/hintergrund/prinzip-brennstoffzelle/>, zuletzt aktualisiert am 07.08.2023, abgerufen am 07.08.2023.

enArgus (Hg.) (2023): Wiki: Fischer-Tropsch-Synthese. https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d3759-2/*/*Fischer-Tropsch-Synthese.html?op=Wiki.getwiki, zuletzt aktualisiert am 16.08.2023, abgerufen am 16.08.2023.

Eunomia Research & Consulting Ltd (2020): Heat pump manufacturing supply chain research project report – Final report. Department for Business, Energy and Industrial Strategy, UK. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/943712/heat-pump-manufacturing-supply-chain-research-project-report.pdf, abgerufen am 08.05.2023.

Europäisches Parlament (14.02.2023): Fit für 55: neue Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ab 2035 emissionsfrei. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20230210IPR74715/fit-fur-55-neue-pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge-ab-2035-emissionsfrei>, abgerufen am 03.05.2023.

European Commission (2017): Technology readiness level: guidance principles for renewable energy technologies: final report. Unter Mitarbeit von Directorate-General for Research and Innovation (European Commission). Publications Office. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d5d8e9c8-e6d3-11e7-9749-01aa75ed71a1/language-en>.

European Patent Office (EPO) and the International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022a): Patent insight report – Innovation trends in electrolyzers for hydrogen production. EPO, Vienna. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_EPO_Electrolysers_H2_production_2022.pdf?rev=647d930910884e51b60137bcf5a955a6, abgerufen am 07.02.2023.

- Fortune Business Insight (Hg.) (2021): Marktgröße und Wachstumsbericht für Brennstoffzellen, 2028. <https://www.fortunebusinessinsights.com/de/industrieberichte/markt-f-r-brennstoffzellen-100733>, zuletzt aktualisiert am 04.08.2023, abgerufen am 04.08.2023.
- Fraunhofer Institut (Hg.) (2023): Wasserstoff - so bleiben wir mobil – Ist die Brennstoffzelle als Autoantrieb ausgereift? <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/wasserstoff-so-bleiben-wir-mobil/autoantrieb-brennstoffzelle.html>, zuletzt aktualisiert am 04.08.2023, abgerufen am 04.08.2023.
- Fraunhofer ISE (2022): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 4.12.2022. Unter Mitarbeit von Harry Wirth. Download von www.pv-fakten.de, abgerufen am 15.12.2022.
- Fraunhofer ISI (2022): Solid-State Battery Roadmap 2035+. Unter Mitarbeit von Dr. Thomas Schmaltz, Tim Wicke, Dr. Lukas Weymann, Philipp Voß, Dr. Christoph Neef und Dr. Axel Thielmann. <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/79b08eef-d5c7-422e-a429-7761e6c3491f/content>, abgerufen am 06.01.2023.
- Fraunhofer ISI & ISE (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Hg. v. Fraunhofer, Karlsruhe, Freiburg. https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/pressemitteilungen/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf, abgerufen am 07.08.2023.
- Gaulier, G. & Zignago, S. (2010): BACI: International Trade Database at the Product-Level. The 1994-2007 Version. Hg. v. CEPII. CEPII Working Papers 23. <http://www.cepii.fr/CEPII/fr/publications/wp/abstract.asp?NoDoc=2726>, abgerufen am 22.08.2023.
- Geels, F. W. (2002): Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy* Volume 31 (8), S. 1257–1274. DOI: 10.1016/S0048-7333(02)00062-8.
- Geels, F. W. (2005): Processes and patterns in transitions and system innovations: Refining the co-evolutionary multi-level perspective. *Technological Forecasting and Social Change* Volume 72 (6), S. 681–696. DOI: 10.1016/j.techfore.2004.08.014.
- Geels, F. W. (2014): PATHWAYS project: Exploring transition pathways to sustainable, low carbon societies – Deliverable D2.1: Analysis of green nicheinnovations and their momentum in the two pathways; Main report: Introduction and findings.
- Geels, F. W. (2018): Disruption and low-carbon system transformation: Progress and new challenges in socio-technical transitions research and the Multi-Level Perspective. *Energy Research & Social Science* 37, S. 224–231. DOI: 10.1016/j.erss.2017.10.010.
- Geels, F. W., Kern, F., Fuchs, G., Hinderer, N., Kungl, G., Mylan, J., Neukirch, M. & Wassermann, S. (2016): The enactment of socio-technical transition pathways: A reformulated typology and a comparative multi-level analysis of the German and UK low-carbon electricity transitions (1990–2014). *Research Policy* 45 (4), S. 896–913. DOI: 10.1016/j.respol.2016.01.015.

- Geels, F. W. & Schot, J. (2007): Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy* 36 (3), S. 399–417. DOI: 10.1016/j.respol.2007.01.003.
- Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T. & Sorrell, S. (2017): The Socio-Technical Dynamics of Low-Carbon Transitions. *Joule* 1 (3), S. 463–479. DOI: 10.1016/j.joule.2017.09.018.
- Global CCS Institute (2022): Global Status of CCS 2022. https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/11/Global-Status-of-CCS-2022_Download.pdf, abgerufen am 05.05.2023.
- Gloor, R. (2019): Wasserkraft. <https://energie.ch/wasserkraft/>, zuletzt aktualisiert am 27.08.2019, abgerufen am 31.07.2023.
- Hartbrich, I. (2023): H2 Green Steel baut das elektrisierte Stahlwerk – Wasserstoff in der Stahlindustrie. *VDI Nachrichten*, 25.01.2023. <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/h2-green-steel-baut-das-elektrisierte-stahlwerk/>, abgerufen am 23.08.2023.
- Hogrefe, J. (2021): Solare Energie rund um die Uhr – Concentrated Solar Power (CSP). Hg. v. Deutscher Industrieverband Concentrated Solar Power (DCSP). gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin. https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Marktanalysen/2022/studie-dcsp-solare-energie-rund-um-die-uhr.pdf?__blob=publicationFile&v=1, abgerufen am 04.05.2023.
- Hühn, S. (2021): Batterie: Die größten Energiespeicher der Welt. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/batterie-die-groessten-energiespeicher-der-welt/>, zuletzt aktualisiert am 28.06.2021, abgerufen am 05.01.2023.
- Innovation Centre (2023): Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park. <https://mbrsic.ae/en/about/mohammed-bin-rashid-al-maktoum-solar-park/>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2023, abgerufen am 04.05.2023.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability – Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von H.-O Rama, Debra Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, Katja Mintenbeck, A. Alegría et al. Hg. v. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA. https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf, abgerufen am 08.09.2023. DOI: 10.1017/9781009325844.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023): Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report – Summary for Policymakers. https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf, abgerufen am 30.03.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2020): Energy Technology Perspectives 2020 – Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, CCUS in clean energy transition.

- International Energy Agency (IEA) (2021a): About CCUS – Analysis – Playing an important and diverse role in meeting global energy and climate goals. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>, zuletzt aktualisiert am 04.04.2023, abgerufen am 04.04.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2021b): Energy Technology Perspectives 2020 – Revised version.
- International Energy Agency (IEA) (2021c): ETP Clean Energy Technology Guide. <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>, abgerufen am 16.08.2022.
- International Energy Agency (IEA) (2021d): Hydropower Special Market Report. https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf, abgerufen am 28.07.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2021e): Is carbon capture too expensive? Unter Mitarbeit von Adam Baylin-Stern und Niels Berghout. Hg. v. IEA. <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>, zuletzt aktualisiert am 04.04.2023, abgerufen am 05.04.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2021f): World Energy Outlook 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>, abgerufen am 26.07.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022a): Average auction prices for solar PV by region and commissioning date, 2016-2022 – Charts – Data & Statistics - IEA. IEA, Paris. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-auction-prices-for-solar-pv-by-region-and-commissioning-date-2016-2022>, zuletzt aktualisiert am 26.10.2022, abgerufen am 13.01.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022b): Carbon capture, utilisation and storage – Energy system overview. <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage-2>, zuletzt aktualisiert am 04.04.2023, abgerufen am 04.04.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022c): Global EV Outlook 2022, Paris. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>, abgerufen am 14.12.2022. DOI: 10.1787/c83f815c-en.
- International Energy Agency (IEA) (2022d): Heat Pumps. International Energy Agency, Paris. <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>, zuletzt aktualisiert am 08.05.2023, abgerufen am 08.05.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022e): Hydropower. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydropower>, zuletzt aktualisiert am 30.07.2023, abgerufen am 31.07.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022f): Securing Clean Energy Technology Supply Chains, Paris. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0fe16228-521a-43d9-8da6->

- bbf08cc9f2b4/SecuringCleanEnergyTechnologySupplyChains.pdf, abgerufen am 13.12.2022. DOI: 10.1787/be931bdc-en.
- International Energy Agency (IEA) (2022g): Solar PV, Paris. <https://www.iea.org/reports/solar-pv>, zuletzt aktualisiert am 13.01.2023, abgerufen am 13.01.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022h): Special Report on Solar PV Global Supply Chains, Paris. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>, abgerufen am 12.12.2022. DOI: 10.1787/9e8b0121-en.
- International Energy Agency (IEA) (2022i): The Future of Heat Pumps – World Energy Outlook Special Report. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4713780d-c0ae-4686-8c9b-29e782452695/TheFutureofHeatPumps.pdf>, abgerufen am 08.09.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022j): Wind Electricity, Paris. <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>, zuletzt aktualisiert am 05.01.2023, abgerufen am 05.01.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022k): World Energy Outlook 2022, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022?language=de>, abgerufen am 07.12.2022.
- International Energy Agency (IEA) (2023a): Energy Technology Perspectives 2023. IEA - International Energy Agency, Paris. DOI: 10.1787/7c6b23db-en.
- International Energy Agency (IEA) (2023b): Energy Technology Perspectives 2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>, abgerufen am 04.08.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2023c): Photovoltaic Power Systems Programme – Annual Report 2022. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/PVPS_Annual_Report_2022_v7-1.pdf, abgerufen am 04.05.2023.
- International Hydropower Association (IHA) (2018): The world's water battery: – Pumped hydropower storage and the clean energy transition. https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/5fa80177d7fd2673249b3471_the_worlds_water_battery_-_pumped_storage_and_the_clean_energy_transition_2_1.pdf, abgerufen am 28.07.2023.
- International Hydropower Association (IHA) (2022): Hydropower Status Report. https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594_IHA202212-status-report-02.pdf, abgerufen am 26.07.2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2017): Renewable Energy Benefits – Leveraging local capacity for onshore wind. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Jun/IRENA_Leveraging_for_Onshore_Wind_2017.pdf?rev=81edbccc6ba534936a4b6d0360e519df1, abgerufen am 25.01.2023.

- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2018): Renewable Energy Benefits – leveraging local capacity for offshore wind. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/May/IRENA_Leveraging_for_Offshore_Wind_2018.pdf?rev=b341ac3b99e4481e826ba49f6b20c87e, abgerufen am 25.01.2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2019): Future of Wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects – A Globale Energy Transformation paper. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020a): Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolysers to meet the 1.5C climate goal, Abu Dhabi.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020b): Thermal energy storage – Innovation outlook, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>, abgerufen am 08.09.2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022b): Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part III – Green hydrogen cost and potential, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Global_Hydrogen_Trade_Costs_2022.pdf?rev=00ea390b555046118cfe4c448b2a29dc, abgerufen am 07.02.2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022c): Hydropower. Hg. v. International Renewable Energy Agency (IRENA). <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydropower>, zuletzt aktualisiert am 26.07.2023, abgerufen am 26.07.2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022d): Renewable solutions in end-uses: Heat pump costs and markets, Abu Dhabi. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Nov/IRENA_Heat_Pumps_Costs_Markets_2022.pdf?rev=c15398a3f7c445acbd45a69def9fa9fc, abgerufen am 07.12.2022.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022e): World Energy Transitions Outlook 2022 – 1.5°C Pathway, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf?rev=353818def8b34effa24658f475799464, abgerufen am 07.12.2022.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023a): Renewable Energy Capacity Statistics 2023, Abu Dhabi. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2023.pdf?rev=d2949151ee6a4625b65c82881403c2a7, abgerufen am 26.07.2023.

- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023b): Renewable Energy Statistics 2023, Abu Dhabi. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2023.pdf?rev=7b2f44c294b84cad9a27fc24949d2134.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023c): The changing role of hydropower: Challenges and opportunities, Abu Dhabi. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Changing_role_of_hydropower_2023.pdf?rev=85b54f8dd8794f8fbc6270b5a1e0b92a, abgerufen am 26.07.2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) & International Labour Organization (ILO) (2022): Renewable energy and jobs – Annual review 2022, Abu Dhabi, Geneva. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_823807.pdf, abgerufen am 25.01.2023.
- Kermanshachi, S., Dao, B., Shane, J. & Anderson, S. (2016): Project Complexity Indicators and Management Strategies – A Delphi Study. *Procedia Engineering* 145, S. 587–594. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.048.
- Kircher, M. (2020): Wertschöpfungsketten. In: Kircher, M. (Hg.): *Bioökonomie im Selbststudium. Wertschöpfungsketten und Innovationspotenzial. Zertifikatskurs Bioökonomie*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 25–38.
- Köhler, J. (2020): Modelling the multi-level perspective – The MATISSE agent-based model. In: Moallemi, E. A. & De Haan, F. (Hg.): *Modelling transitions. Virtues, vices, visions of the future*. Routledge Studies in Sustainability Transitions Ser. Routledge, London, NewYork.
- Köhler, J., De Haan, F., Holtz, G., Kubeczko, K., Moallemi, E. A., Papachristos, G. & Chappin, E. (2018): Modelling Sustainability Transitions: An Assessment of Approaches and Challenges. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, The 21. DOI: 10.18564/jasss.3629.
- Köhler, J., Geels, F. W., Kern, F., Markard, J., Onsongo, E., Wieczorek, A., Alkemade, F., Avelino, F., Bergek, A., Boons, F., Fünfschilling, L., Hess, D., Holtz, G., Hyysalo, S., Jenkins, K., Kivimaa, P., Martiskainen, M., McMeekin, A., Mühlemeier, M. S., Nykvist, B., Pel, B., Raven, R., Rohracher, H., Sandén, B., Schot, J., Sovacool, B., Turnheim, B., Welch, D. & Wells, P. (2019): An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 31, S. 1–32. DOI: 10.1016/j.eist.2019.01.004.
- Köhler, J. & Holtz, G. (2020): Transitions modelling – Status, challenges and strategies. In: Moallemi, E. A. & De Haan, F. (Hg.): *Modelling transitions. Virtues, vices, visions of the future*. Routledge Studies in Sustainability Transitions Ser. Routledge, London, NewYork. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780429056574-3/transitions-modelling-jonathan-k%C3%B6hler-georg-holtz>.

- Köhler, J., Turnheim, B. & Hodson, M. (2020): Low carbon transitions pathways in mobility: Applying the MLP in a combined case study and simulation bridging analysis of passenger transport in the Netherlands. *Technological Forecasting and Social Change* 151 (119314). DOI: 10.1016/j.techfore.2018.06.003.
- Kougias, I., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, S., Lundin, U., Moro, A., Muntean, S., Novara, D., Pérez-Díaz, J. I., Quaranta, E., Schild, P. & Theodossiou, N. (2019): Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109257.
- Lehr, U., Banning, M., Edler, D. & Flaute, M. (2020): Analyse der deutschen Exporte und Importe von Technologiegütern zur Nutzung erneuerbarer Energien und anderer Energietechnologiegüter – Endbericht. GWS Research Report 2020/02, Osnabrück. <https://papers.gws-os.com/gws-researchreport20-2.pdf>.
- Lutz, C., Meyer, B. & Wolter, M. I. (2010): The global multisector/multicountry 3-E model GINFORS. A description of the model and a baseline forecast for global energy demand and CO 2 emissions. *International Journal of Global Environmental Issues* 10 (1/2), S. 25–45.
- Matschoss, P. (2004): Flexible climate policy mechanisms and induced technical change. Zugl.: Oldenburg, Univ., Diss., 2004. Bis Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, Oldenburg.
- Mayr, J. (2023): Grüner Stahl: EU genehmigt Milliarden-Beihilfe für Thyssenkrupp. [tagesschau.de](https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/gruener-stahl-thyssenkrupp-100.html), 20.07.2023. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/gruener-stahl-thyssenkrupp-100.html>, abgerufen am 23.08.2023.
- Mendoza, N., Mathai, T., Boren, B., Roberts, J., Niffenegger, J., Sick, V., Zimmermann, A. W., Weber, J. & Schaidle, J. (2022): Adapting the Technology Performance Level Integrated Assessment Framework to Low-TRL Technologies Within the Carbon Capture, Utilization, and Storage Industry, Part I. *Front. Clim.* 4. DOI: 10.3389/fclim.2022.818786.
- Merten, F., Schüwer, D., Horst, J. & Matschoss, P. (2018): Technologiebericht 7.4 Systemintegration, -innovation und -transformation innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-70680>.
- Metz, S., Smolinka, T., Bernäcker, C. I., Loos, S., Rauscher, T., Röntzsch, L., Arnold, M., Görne, A. L., Jahn, M., Kusnezoff, M., Kolb, G., Apfel, U.-P. & Doetsch, C. (2022): Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse und weitere Verfahren. In: Neugebauer, R. (Hg.): *Wasserstofftechnologien*. Springer eBook Collection. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 207–258.
- Modrak, V. & Soltysova, Z. (2017): Novel Complexity Indicator of Manufacturing Process Chains and Its Relations to Indirect Complexity Indicators. *Complexity*. <https://doi.org/10.1155/2017/9102824>.
- Müller, A. (2018): Rohstoffe für die Energiewende – Menschenrechtliche und ökologische Verantwortung in einem Zukunftsmarkt. Unter Mitarbeit von Dr. Bernd Bornhorst,

- Armin Paasch, Antje Kathrin Schroeder. Hg. v. Bischöfliches Hilfswerk Misereor e.V., Aachen. <https://www.misereor.de/fileadmin/publikationen/studie-rohstoffe-fuer-die-energiewende.pdf>, abgerufen am 02.01.2023.
- Noreikat, K. E. (2014): Brennstoffzelle. In: Tschöke, H. (Hg.): Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch Ser. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Now-GmbH.de (NOW) (2022): Factsheet Biokraftstoffe. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/NOW_Factsheet-Biokraftstoffe.pdf, abgerufen am 08.09.2023.
- O’Sullivan, M. & Edler, D. (2020): Gross Employment Effects in the Renewable Energy Industry in Germany – An Input-Output Analysis from 2000 to 2018. Sustainability 12 (15). DOI: 10.3390/su12156163.
- Papachristos, G., Sofianos, A. & Adamides, E. (2013): System interactions in socio-technical transitions: Extending the multi-level perspective. Environmental Innovation and Societal Transitions 7, S. 53–69. DOI: 10.1016/j.eist.2013.03.002.
- Precedence Research (Hg.) (2022): Biofuels Market Size, Share & Growth Analysis Report – By Fuel Type (Biodiesel and Ethanol), By Feedstock (Coarse Grain, Sugar Crop, Vegetable Oil, Jatropha, Molasses) - Global Industry Analysis, Trends, Revenue, Segment Forecasts, Regional Outlook 2022 - 2030. <https://www.precedenceresearch.com/biofuels-market>, zuletzt aktualisiert am 24.08.2023, abgerufen am 24.08.2023.
- Research and markets (Hg.) (2023): Thermal Energy Storage (TES): Global Strategic Business Report. <https://www.researchandmarkets.com/reports/3440898/thermal-energy-storage-tes-global-strategic>, zuletzt aktualisiert am 07.08.2023, abgerufen am 07.08.2023.
- Roberts, D. & Brown, S. (2022): The economics of firm solar power from Li-ion and vanadium flow batteries in California. MRS Energy & Sustainability 9 (2), S. 129–141. DOI: 10.1557/s43581-022-00028-w.
- Ruhwedel, S. (2020): Die Farben des Wasserstoffs. <https://h2-news.eu/energieversorgung/die-farben-des-wasserstoffs/>, zuletzt aktualisiert am 13.11.2020, abgerufen am 08.02.2023.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2016): Umweltgutachten 2016 – Impulse für eine integrative Umweltpolitik. Unter Mitarbeit von Martin Faulstich, Karin Holm-Müller, Harald Bradke, Christian Calliess, Heidi Foth, Manfred Niekisch und Miranda Schreurs.
- Sarbu, I. & Sebarchievici, C. (2018): A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability 10 (1), S. 191.
- SolarPower Europe (2022): Global Market Outlook – for Solar Power 2022-2026. https://api.solarpowereurope.org/uploads/Solar_Power_Europe_Global_Market_Outlook_report_2022_2022_V2_07aa98200a.pdf, abgerufen am 16.12.2022.

- Thielmann, A. (2020): Chinas Batterieindustrie im globalen Aufschwung. Hg. v. Stiftung Energie & Klimaschutz. <https://www.energie-klimaschutz.de/chinas-batterieindustrie-im-globalen-aufschwung/>, zuletzt aktualisiert am 18.05.2020, abgerufen am 05.01.2023.
- Tinbergen, J. (1962): Shaping the World Economy – Suggestions for an International Economic Policy. The Twentieth Century Fund.
- Trutnevyte, E., Barton, J., O’Grady, Á., Ogunkunle, D., Pudjianto, D. & Robertson, E. (2014): Linking a storyline with multiple models: A cross-scale study of the UK power system transition. *Technological Forecasting and Social Change* 89, S. 26–42. DOI: 10.1016/j.techfore.2014.08.018.
- TÜV NORD (Hg.) (2023): Wasserstoff Brennstoffzelle - Wasserstoff. <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoff-brennstoffzelle/>, abgerufen am 31.07.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2014): Energie aus Wasserkraft. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/energie-aus-wasserkraft#die-rolle-der-wasserkraft-bei-der-energiewende>, zuletzt aktualisiert am 03.01.2023, abgerufen am 03.01.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019a): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor) – Abschlussbericht. Texte 115/2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24_texte_115-2019_biorest.pdf, abgerufen am 08.09.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019b): Nutzung von Flüssen: Wasserkraft. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/fluesse/nutzung-belastungen/nutzung-von-fluessen-wasserkraft#wasserkraftnutzung-global>, zuletzt aktualisiert am 26.07.2023, abgerufen am 26.07.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019c): Seltene Erden in Permanentmagneten – Factsheet, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet-magnetmaterialien_fi_barrierefrei.pdf, abgerufen am 3.1.23.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021a): Photovoltaik, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik#photovoltaik>, zuletzt aktualisiert am 29.12.2022, abgerufen am 29.12.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021b): Windenergie an Land, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie-an-land#strom>, zuletzt aktualisiert am 03.01.2023, abgerufen am 03.01.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022a): Carbon Capture and Storage. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#grundlegende-informationen>, zuletzt aktualisiert am 08.09.2023, abgerufen am 08.09.2023.

- Umweltbundesamt (UBA) (2022b): Umgebungswärme und Wärmepumpen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen#umgebungsw%C3%A4rme>, zuletzt aktualisiert am 03.01.2023, abgerufen am 03.01.2023.
- UN Comtrade (2023): Trade Data. <https://comtradeplus.un.org/TradeFlow>, abgerufen am 18.08.2023.
- VDI/VDE Innovation + Technik (Hg.) (2021a): Ökosystem der Batteriezellfertigung in Europa – Netzwerkstrukturen als Grundlage für Wissenstransfer und Wertschöpfungspartnerschaften. Unter Mitarbeit von Jan-Hinrich Gieschen, Aiko Bünting, Sebastian Kruse, Frederik Vorholt, Stefan Wolf, Carolin Zachäus, Berlin.
- VDI/VDE Innovation + Technik (Hg.) (2021b): Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung in Europa – Wie nachhaltig sind Batterien und Elektromobilität wirklich?, Berlin.
- VDI/VDE-Studie (Hg.) (2019): Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge – Bedeutung für die Elektromobilität.
- Venditti, B. (2021): Ranked: The Top 10 EV Battery Manufacturers. <https://elements.visualcapitalist.com/ranked-top-10-ev-battery-makers/>, zuletzt aktualisiert am 25.09.2021, abgerufen am 10.01.2023.
- Viebahn, P., Kobiela, G., Zelt, O., Wietschel, M., Hirzel, S., Horst, J. & Hildebrand, J. (2018a): Technologien für die Energiewende: Kriterienraster – Teilbericht 1 zum Teilprojekt A im Rahmen des strategischen BMWi-Leitprojekts "Trends und Perspektiven der Energieforschung". Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; Zukünftige Energie- und Industriesysteme. Wuppertal Report, Wuppertal. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-70812>.
- Viebahn, P., Zelt, O., Fishedick, M., Hildebrand, J., Heib, S., Becker, D., Horst, J., Wietschel, M. & Hirzel, S. (2018b): Technologien für die Energiewende: Politikbericht – Teilprojekt A im Rahmen des strategischen BMWi-Leitprojekts „Trends und Perspektiven der Energieforschung“. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI); Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (izes), Wuppertal Institut. Wuppertal Report 14, Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- Viebahn, P., Zelt, O., Fishedick, M., Wietschel, M., Hirzel, S. & Horst, J. (Hg.) (2018c): Technologien für die Energiewende: Technologiebericht - Band 1 – Teilbericht 2 zum Teilprojekt A im Rahmen des strategischen BMWi-Leitprojekts "Trends und Perspektiven der Energieforschung".
- Viebahn, P., Zelt, O., Fishedick, M., Wietschel, M., Hirzel, S. & Horst, J. (Hg.) (2018d): Technologien für die Energiewende: Technologiebericht - Band 2 – Teilbericht 2 zum Teilprojekt A im Rahmen des strategischen BMWi-Leitprojekts "Trends und Perspektiven der Energieforschung".
- Voith (Hg.) (2023): Wasserkraft - einfach erklärt. <https://voith.com/corp-de/wasserkraft-einfach-erklart.html>, zuletzt aktualisiert am 28.07.2023, abgerufen am 28.07.2023.
- Weichenhain, U., Lange, S., Koolen, J., Benz, A., Hartmann, S., Heilert, D., Henninger, S. & Kallenbach, T. (2020): Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie

- in Baden-Württemberg. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf, abgerufen am 07.08.2023.
- Westerheide, C. (2023): Solaris liefert zehn Brennstoffzellen-Busse nach Bayern. Hg. v. [electrive.net](https://www.electrive.net). <https://www.electrive.net/2023/08/03/solaris-liefert-zehn-brennstoffzellen-busse-nach-bayern/>, zuletzt aktualisiert am 03.08.2023, abgerufen am 04.08.2023.
- World Customs Organization (WCO) (2023): HS Nomenclature 2007 Edition. https://www.wcoomd.org/en/topics/nomenclature/instrument-and-tools/hs_nomenclature_previous_editions/hs_nomenclature_table_2007.aspx, abgerufen am 23.08.2023.
- World Integrated Trade Solution (WITS) (2021): International merchandise trade, tariff and non-tariff measures (NTM) data. <https://wits.worldbank.org/>, abgerufen am 08.10.2021.
- Xie, H., Zhao, Z., Liu, T., Wu, Y., Lan, C., Jiang, W., Zhu, L., Wang, Y., Yang, D. & Shao, Z. (2022): A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation. *Nature* 612 (7941), S. 673–678. DOI: 10.1038/s41586-022-05379-5.
- Yotov, Y. V., Piermartini, R., Monteiro, J.-A. & Larch, M. (2016): An Advanced Guide to Trade Policy Analysis – The Structural Gravity Model.
- Zenk, J., Ronsiek, L., Schur, A. C., Hupp, J., Schneemann, C., Mönning, A. & Schroer, J. P. (2023): Exportpotenziale von Wasserstofftechnologien. 1. Aufl. Hg. v. Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), Bonn. <https://res.bibb.de/vet-repository/780966>, abgerufen am 03.02.2023.
- Zukunft Altbau (2018): Stationäre Brennstoffzellen-Anwendung – Erdgas umweltfreundlicher nutzen. Hg. v. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. https://www.zukunftaltbau.de/fileadmin/user_upload/Materialien/Einstiegsbroschuer_e_Brennstoffzelle_Zukunft_Altbau2018.pdf, abgerufen am 10.02.2023.
- Zukunft Gas (Hg.) (2023): Funktionsprinzip Brennstoffzelle. <https://gas.info/gas-im-energiemix/gebäude/heizungen-im-vergleich/heizung-brennstoffzelle/funktionsprinzip-brennstoffzelle>, zuletzt aktualisiert am 31.07.2023, abgerufen am 31.07.2023.

7 ANHANG

Anhang 1: TRL-Skala nach IEA

	TRL	
Konzept	1	Erste Idee Grundprinzipien sind definiert
	2	Anwendung formuliert Konzept und Anwendung der Lösung sind formuliert
	3	Konzept bedarf Validierung Lösung muss als Prototyp entwickelt und angewendet werden
Kleiner Prototyp	4	Früher Prototyp Prototyp unter Testbedingungen erprobt
Großer Prototyp	5	Großer Prototyp Komponenten, die sich unter Einsatzbedingungen bewährt haben
	6	Vollständiger Prototyp Prototyp hat sich unter Einsatzbedingungen bewährt
Demonstration	7	Vorkommerzielle Demonstration Lösung funktioniert unter den erwarteten Bedingungen
	8	Erstmalige kommerzielle Nutzung Kommerzielle Demonstration, Einsatz in vollem Umfang in der endgültigen Form
Frühe Einführung	9	Kommerzieller Betrieb in relevanter Umgebung Lösung ist kommerziell verfügbar, muss evolutionär verbessert werden, um wettbewerbsfähig zu bleiben
	10	Integration in großem Maßstab erforderlich Die Lösung ist kommerziell und wettbewerbsfähig, erfordert aber weitere Integrationsanstrengungen
Marktreife	11	Nachweis der Stabilität erreicht Vorhersehbares Wachstum

Quelle: in Anlehnung an IEA (2021b)