



Institut für ZukunftsEnergie-
und Stoffstromsysteme

Dr. Uwe Klann
Dr. Patrick Matschoss
Henrik Mantke
Jan Hildebrand

Modellierung von Leitmärkten für Umweltechnologien und MLP-Ansatz – wo finde ich die Daten?

(Teilveröffentlichung aus dem Projekt Low Carbon Leakage (LCL))

Herausgeber

IZES gGmbH
Altenkesseler Straße 17, A1
66115 Saarbrücken
www.izes.de

Autor*innen

Dr. Uwe Klann, klann@izes.de
Dr. Patrick Matschoss, matschoss@izes.de
Henrik Mantke, mantke@izes.de
Jan Hildebrand, hildebrand@izes.de

Das Papier entstand im Rahmen der Arbeiten am Projekt „Wertschöpfungsketten und Markt- und Diffusionsbarrieren in einem erweiterten makroökonomischen und Handelsmodell-Rahmen: Akteursverhalten in Leitmärkten, Handelsstrukturen und struktureller Wandel im Kontext unterschiedlicher Transformationsgeschwindigkeiten – Kurzform „LowCarbonLeakage“ (LCL). Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Projektnummer FKZ 03EI1024)

Projektpartner: GWS GmbH, Heinrichstr. 30, 49080 Osnabrück

Publikationsnachweis

Klann, U.; Matschoss, P.; Mantke, H.; Hildebrand, J. (2025): Modellierung von Leitmärkten für Umwelttechnologien und MLP-Ansatz – wo finde ich die Daten? (Teilveröffentlichung aus dem Projekt Low Carbon Leakage (LCL)). IZES gGmbH Schriftenreihe | 2025_1 IZES gGmbH, Saarbrücken

Bildnachweis

Titelbild mit freundlicher Genehmigung der Gesellschaft für Wirtschaftliche Struktur-
forschung mbH (GWS)

Die **IZES gGmbH Schriftenreihe** soll mit den Themen des Instituts vertraut machen, Forschungsergebnisse präsentieren, zu fachlicher Auseinandersetzung und kritischer Diskussion einladen.

Berlin und Saarbrücken, August 2025
ISSN 2943-8101
ISBN 978-3-911471-02-2

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	4
1 Einleitung	5
1.1 Projektkontext und Einordnung.....	5
1.2 Zentrale Literatur.....	9
2 Operationalisierung des Konzepts einer datenbasierten MLP-Analyse als Vorbereitung für die Datenerhebung.....	10
2.1 Vom Konzept einer datenbasierten MLP-Analyse zu Indikatoren.....	10
2.2 Übersicht über ausgewählte Länder und Technologien.....	13
2.3 Allgemeines Vorgehen	16
3 Übersicht zu Vorgehen und Herausforderungen der Datenerhebung nach Kriterien.....	19
3.1 Vorbemerkung	19
3.2 Kriterium 1: Politische Ziele	21
3.2.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren.....	21
3.2.2 Grundsätzliches Vorgehen	21
3.2.3 Schwierigkeiten der Datenerhebung	22
3.2.4 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick.....	23
3.2.5 Zentrale Literatur zu Kriterium 1.....	24
3.3 Kriterium 2: Öffentliche R&D-Ausgaben	25
3.3.1 Zum IEA-Datensatz.....	26
3.3.2 Datensammlung zu den nicht in der IEA-Datenbank vertretenen Ländern.....	48
3.3.3 Zusammenfassung	52
3.3.4 Literatur zu Kriterium 2	53
3.4 Kriterium 3: Öffentliche Förderung	56
3.4.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren.....	56
3.4.2 Allgemeines Vorgehen.....	58
3.4.3 Schwierigkeiten der Datenerhebung	60
3.4.4 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick.....	65
3.4.5 Literatur zu Kriterium 3:	68
3.5 Kriterium 5: Kosteneffizienz	69
3.5.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren.....	69

3.5.2	Grundsätzliches Vorgehen	71
3.5.3	Schwierigkeiten der Datenerhebung	72
3.5.4	Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick.....	74
3.5.5	Zentrale Literatur zu Kriterium 5.....	76
3.6	Kriterium 6: inländische Wertschöpfung	79
3.6.1	Beschreibung der gesuchten Indikatoren	79
3.6.2	Grundsätzliches Vorgehen	80
3.6.3	Schwierigkeiten der Datenerhebung	83
3.6.4	Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick.....	87
3.6.5	Zentrale Literatur zu Kriterium 6.....	87
3.7	Kriterium 7: Akzeptanz.....	91
3.7.1	Beschreibung der gesuchten Indikatoren	91
3.7.1	Grundsätzliches Vorgehen	92
3.7.2	Herausforderung der Datenerhebung	94
3.7.3	Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick.....	95
3.7.4	Zentrale Literatur zu Kriterium 7.....	96
3.8	Kriterium 9: Abhängigkeit von Infrastrukturen	104
3.8.1	Stromnetze	104
3.8.2	Wärme-/Kältenetze	117
4	Ergebnis und Ausblick	127
4.1	Ergebnisse nach Kriterien	127
4.2	Ausblick: Datenrecherche und datenbasierter MLP-Ansatz	131
4.3	Literatur zu „Ergebnis und Ausblick“	133

Abstract

Das vorliegende Papier behandelt die Datenrecherche im Rahmen des Projekts „Low Carbon Leakage (LCL), in dem die Frage untersucht wird, unter welchen Bedingungen sich Wertschöpfungsketten (WSK) für energiewende-relevante Technologien (Leitmärkte) herausbilden und ggfs. international verlagern. Dabei werden einerseits quantitative Modelle zur Abbildung von Effekten auf Makroökonomie und internationalen Handel genutzt. Andererseits wird der verbal orientierte Multi-level-Perspective (MLP-) Ansatz genutzt, um die politischen, sozialen und regulatorischen Dimensionen der Innovation und Diffusion neuer Technologien abzubilden. Die Ableitung und Erhebung quantitativer Indikatoren stellt ein Bindeglied zwischen qualitativer MLP und quantitativer Modellierung dar und bildet den Fokus des vorliegenden Papiers. Die letztlich erhobenen Indikatoren – zum Beispiel zu politischen Zielen, Kosten, Akzeptanz, Infrastruktur - sind dabei nicht nur für einen MLP-Ansatz relevant, sondern können auch für andersgeartete Analysen bedeutend sein.

Die Recherche nach Indikatoren, die länder- *und* technologiespezifisch sind, hat sich als herausfordernder herausgestellt, als ursprünglich gedacht und die Ergebnisse müssen teils als ernüchternd bezeichnet werden. Inhaltlich zeigt sich, dass energiebezogene Daten – auch wegen der Vergleichbarkeit – noch am ehesten über multilaterale Organisationen wie der IEA/OECD und IRENA, d.h. deren Datenbanken und Meta-Studien, zu erlangen sind. Recherchen in wissenschaftlichen Einzelpublikationen waren weniger zielführend. Prozessual betrachtet hat die Recherche mehr Zeit in Anspruch genommen als ursprünglich veranschlagt und das Verfahren musste mehrfach geändert werden. So wurde mehrfach zwischen länder- und indikatoren-basierter Recherche gewechselt (letztlich war die Vorteilhaftigkeit von Indikator zu Indikator unterschiedlich). Zusätzlich erwiesen sich Recherchen für Länder mit anderweitigen, Europäern i. Allg. nicht vertrauten Schriftzeichen als schwierig. Dem konnte, z.B. durch den Einsatz muttersprachlichen Personals (soweit akquirierbar), nur mit begrenztem Erfolg begegnet werden. Daneben wurden Übersetzungsprogramme verwendet, was sich teils ebenfalls als zeitaufwändig erwies. Schließlich wurden Daten der Fokustechnologien PV, Wind, batterieelektrischen PKW und H₂-Elektrolyseure in den Fokusländern Deutschland und den weltweit wichtigsten Hersteller- und Nutzungsländern China, Japan und USA (sowie Dänemark für Wind) zur Modell-Simulation genutzt (Vorgehen und Ergebnisse in Hembach-Stunden et al. 2024).

1 Einleitung

1.1 Projektkontext und Einordnung

Das vorliegende Papier ist im Rahmen des BMWi / BMWK-geförderten Projekts „Low Carbon Leakage“¹ (LCL). Es behandelt die Datenerhebung für und damit die quantitative Operationalisierung des im Projekt verwendeten und weiterentwickelten Multi-Level-Perspective- (MLP-) Ansatzes. Dadurch wurde eine Integration des an sich deskriptiven bzw. verbal orientierten MLP-Ansatzes in eine quantitative Modellierung ermöglicht. Die Definition quantitativer Indikatoren und die Recherche und Datenerhebung dazu stellt die Schnittstelle zwischen MLP-Ansatz und Modellierung dar und ist Gegenstand des vorliegenden Papiers. Zu den methodischen Grundlagen und zum grundsätzlichen Vorgehen der Verbindung von MLP-Analyse und quantitativer Modellierung (Banning et al. 2023) sowie zu den quantitativen Ergebnissen (Hembach-Stunden et al. 2024) wurden bereits Papiere veröffentlicht.

Zum Projekthintergrund

Gegenstand des LCL-Projekts war die Frage, unter welchen Bedingungen sich Wertschöpfungsketten (WSK) für Energiewende-relevante Technologien (Leitmärkte) herausbilden und unter welchen Umständen sich diese eventuell international verlagern, vor allem angesichts der Tatsache, dass auch in anderen Ländern ähnliche Transformationen wie in Deutschland stattfinden. D.h. im Gegensatz zur bekannten Carbon-Leakage-Debatte, die seit Jahren (bzw. Jahrzehnten) vor allem mit Blick auf etablierte energieintensive Technologien geführt wird, hat das LCL-Projekts die „neuen“ Technologien mit besonderer Relevanz für die Transformation (erneuerbare Energien, Elektromobilität, Wasserstoff etc.) zum Gegenstand.

In der Carbon-Leakage-Diskussion wird die Frage gestellt, inwieweit durch eine ambitionierte Klimaschutzpolitik in einem Land treibhausgasintensive Branchen ihren Standort in diesem Land aufgeben und deren Produktion anderweitig bei ähnlichen Treibhausgasemissionen übernommen wird. Falls dies in einem großen Umfang geschieht, verringern die Klimaschutzmaßnahmen in einem Land zwar die Treibhausgasemissionen in dessen Territorium. Die weltweiten Emissionen gehen aber um deutlich weniger zurück; sie werden teils oder vornehmlich räumlich verlagert. Der Umfang, in dem dies geschieht, wird „Carbon-Leakage“ genannt. Das Land, das mit Klimaschutzmaßnahmen vorangeht, schwächt damit mitunter die heimische

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); Fördermittelgeber: BMWi/BMWK, Förderkennzeichen 03E11024A (IZES) und 03E11024B (GWS)

treibhausgasintensive Industrie ohne nennenswertes zum Klimaschutz beizutragen. Die Carbon-Leakage-Diskussion ist demgemäß aufgrund ihrer Fragestellung auf potentielle wirtschaftliche Nachteile und ausbleibende Klimaschutzerfolge einer relativ ambitionierten Klimaschutzpolitik in einem Land fokussiert.

Eine relativ ambitionierte Klimaschutzpolitik eines Landes kann jedoch auch ökonomische Vorteile für ein Land bringen und gleichzeitig den weltweiten Klimaschutz fördern. Dies kann dann entstehen, wenn gegenwärtig und zukünftig erforderliche Klimaschutztechnologien noch nicht ausgereift sind, sondern sich noch in der Entwicklungs-, Innovations- oder Diffusionsphase befinden. Eine ambitionierte Klimaschutzpolitik kann dann die Nachfrage nach diesen Technologien erhöhen. Dadurch erhöht sich auch die die Innovations- und Diffusionsgeschwindigkeit. Mit zunehmender Geschwindigkeit können schnellere Kostensenkungen erreicht werden. Dadurch wird eine Klimaschutztechnologie weltweit ökonomisch attraktiver. Das vorangehende Land trägt damit zu einem weltweit beschleunigten Klimaschutz bei. Gleichzeitig kann es damit, sofern die Technologie im eigenen Land produziert wird, einen Wettbewerbsvorteil im Vergleich zu anderen Ländern mit einer weniger ambitionierten Klimaschutzpolitik in der Produktion dieser Technologien erreichen (das Land hat dann einen „Leitmarkt“). Der Wettbewerbsvorteil kann mit einem weltweit steigenden Einsatz dieser Technologien, die dann bevorzugt im vorangeschrittenen Land produziert werden, in ökonomische Vorteile münden. Insgesamt kann sich also eine positive Rückkopplung zwischen ambitionierter Klimaschutzpolitik und ökonomischem Erfolg eines Landes einstellen. Mit geringen oder nachlassenden Klimaschutzambitionen kann damit auch der Aufbau eines Industriezweigs behindert beziehungsweise dessen Verlagerung in andere Länder verursacht werden. Ein solcher Prozess wird „Low Carbon Leakage“ genannt. Aufgrund der positiven Rückkopplungen kann ein Aufholen des Vorsprungs eines anderen Landes erschwert werden².

Das Gesamtprojekt widmet sich der Frage, inwieweit für die untersuchten Technologien ein Low Carbon-Leakage aufgetreten ist oder auftreten könnte. Die Untersuchung ist zukunftsorientiert und betrachtet einen Zeitraum bis 2040. Damit kann man die Fragen auch umformulieren zu: Wie sind die Bedingungen für die Entwicklung für Leitmärkten in verschiedenen Ländern einzuschätzen und welche Bedeutung könnte dem Aufbau von Leitmärkten für die Wahl internationale Produktionsstandorte für Energiewendetechnologien zukommen?

² Für Genaueres und Ausführlicheres inklusive Quellenangaben s. Hembach-Stunden et al. 2024 und Banning et al. 2023.

Einordnung ins Gesamtprojekt

Um diese Fragen zu beantworten, werden einerseits quantitative Modelle zur Abbildung von Effekten auf Makroökonomie und internationalen Handel genutzt. Andererseits werden mit dem MLP-Ansatz politische und soziale Dynamiken abgebildet, die mit einer so fundamentalen Transformation häufig einhergehen und gleichzeitig mitunter eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Transformation sind. Der MLP-Ansatz wird dazu mit den quantitativen Modellen verknüpft und zwar letztlich vornehmlich via Diffusionsfunktionen. Damit erhält man anstatt rein technoökonomisch betrachtet „optimaler“ Übergangspfade gewissermaßen „politisch realistischere“ Übergangspfade (s. Hembach-Stunden et al. 2024)³.

Der MLP-Ansatz wird demnach dazu verwendet, um die Bedingungen für Innovationen und Diffusionen für die betrachteten Technologien auch vergleichend in den betrachteten Ländern zu erfassen. Diese Bedingungen sind vielfältig und gleichzeitig verändert mit fortschreitender Diffusion eine Technologie auch die Umgebung, in die sie diffundiert, was auf die Diffusionsgeschwindigkeit selbst zurückwirken kann. Der MLP-Ansatz wurde entwickelt, um derartige Bedingungen strukturiert im Systemkontext zu betrachten. Ursprünglich war er dabei historisch orientiert und argumentierte verbal. Zwei Richtungen einer generell zu beobachteten Weiterentwicklung dieses Ansatzes werden in diesem Projekt verfolgt: Zum ersten ist dies ein Beitrag zur Nutzung des ursprünglich für historische Analysen entwickelten Ansatzes für eine prospektive Szenarienanalyse. Zum zweiten wird eine indikatorenbasierte Analyse angestrebt, die eine Betrachtung mehrere Technologien und Länder ermöglicht⁴. Hierfür wurde ein passender Indikatorensatz entwickelt (s. Abschnitt 2.1 und ausführlicher Banning et al. 2023).

Voraussetzung für die weitere Implementierung war dann die Sammlung der ausgewählten Indikatoren für die Länder und Technologien. Hierzu erfolgte eine Datenrecherche. Das vorliegende Papier hat das Ziel, Auskunft über die Datenrecherche zu diesen Indikatoren zu geben. D. h. es erfolgt ein allgemeiner Überblick über die Verfügbarkeit grundlegender öffentlich zugänglicher und vergleichbarer länder- und technologiespezifischer Daten. Die Verfügbarkeit von Daten mit gefundenen und ausgewerteten Quellen als auch die Herausforderungen der

³ Als ein Ergebnis der Analyse derartiger Pfade in quantitativen Modellläufen ergab sich z.B., dass bereits relativ fortgeschrittene Technologien (z.B. PV) vornehmlich wie etablierte Handelswaren aufzufassen sind und sich die Wahl eines weltweiten Produktionsstandorts inzwischen an üblichen ökonomischen Bedingungen orientiert und kaum mehr von einem First-Mover-Vorteil beeinflusst wird. Die internationale Arbeitsteilung ist deshalb auch nurmehr schwierig durch politische Maßnahmen merklich zu beeinflussen. Für junge, noch nicht ausgereifte Technologien (Wasserstoff-Elektrolyseure, batterieelektrisch PKW) hingegen, könnten merkliche Produktionseffekte in einem Land durch den Aufbau eines nationalen Leitmarktes und entsprechende politische Entscheidungen entstehen. Für eine derartige Wirkung erscheint der deutsche Markt als Leitmarkt gerade im Vergleich zum chinesischen oder us-amerikanischen Markt als eher klein. Dies könnte ein EU-weit koordiniertes Vorgehen beheben. Zu diesen und weiteren Ergebnissen s. Hembach-Stunden et al. 2024).

⁴ Zu Näherem und einer Einordnung in die Literatur siehe Hembach-Stunden et al. (2024)

Recherche und mögliche Probleme mit gefundenen Daten sind Gegenstand dieses Papiers. Dabei wurden öffentlich zugängliche und international vergleichbare Indikatoren gesucht. Aufgrund der Indikatorenauswahl ist davon auszugehen, dass eine solche Abhandlung nicht nur für an MLP-Analysen Interessierte informativ ist. Vielmehr dürften die Erfahrungen für eine Vielzahl von Untersuchungen zu Energiewendetechnologien im internationalen Kontext relevant sein. Die Indikatoren beinhalten z. B. quantitative politische Ziele, Fördersätze für Technologien, Einschätzungen zur erforderlichen Infrastruktur und manches mehr. Eine Übersichtsliste findet sich in Tabelle 1 (Abschnitt 2.1).

Für die Datenrecherche hat sich als besondere Herausforderung die Tatsache erwiesen, dass die erhobenen Indikatoren gleichzeitig länder- *und* technologiespezifisch sein müssen. Auch die Vergleichbarkeit länderspezifischer Daten war häufig nicht gegeben bzw. zu erschließen – teils auch dann, wenn sie aus derselben Quelle stammten. Die Komplexität der Datenerhebung hat zu mehrfachen Änderungen des Verfahrens während der Recherche (länder- vs. Indikatoren-basiert, studentisches vs. wiss. Personal) geführt. Neben dem wissenschaftlichen Beitrag zur Datenverfügbarkeit sehen die Autoren vor allem auch den Nutzen des Papiers darin, die Erfahrungen zum wenig beleuchteten (und Schwierigkeiten mit dem) Thema Datenerhebung zu teilen. Welchen Beitrag die künstliche Intelligenz zu derartigen Recherchen leisten kann, muss in späteren Projekten geklärt werden.

Zum Aufbau des Papers

Da die Daten- und zugehörige Literaturrecherche das zentrale Thema des vorliegenden Papiers darstellt, befinden sich einzelne Literaturverzeichnisse in den Abschnitten, in denen die Daten jeweils behandelt werden. D.h. es wurde von der Konvention eines integrierten Literaturverzeichnisses am Ende abgesehen und führt dazu, dass gleiche Bezeichnungen (z.B. „IEA 2022b“) in den verschiedenen Abschnitten unterschiedliche Quellen bezeichnen können.

Das Papier ist wie folgt strukturiert: In Kapitel 2 wird das grundsätzliche Vorgehen erläutert. Dazu zählt die Ableitung quantifizierbarer Indikatoren aus den Kriterien des MLP-Konzepts, die Auswahl der zu analysierenden Länder und Technologien sowie der allgemeine Ablauf des Recherchegangs. In Kapitel 3 wird die Recherche Kriterien-weise, überwiegend nach einem einheitlichen Schema (Ausnahme: Kriterium 2), dargestellt. In Kapitel 4 wird schließlich eine Zusammenfassung und Bewertung vorgenommen.

1.2 Zentrale Literatur

Wie erwähnt, wurden im Rahmen des Projekts bereits Papiere veröffentlicht und das vorliegende Papier ist in diesem Zusammenhang zu sehen. Die methodischen Grundlagen – einschließlich des MLP-Ansatzes und dessen quantitativer Weiterentwicklung – wurden ausführlich im folgenden Papier beschrieben:

Banning, M., Becker, L., Hembach-Stunden, K., Horst, J., Klann, U., Lutz, C., Matschoss, P. (2023): Zentrale Technologien und Länder der globalen grünen Transformation. Methoden und Analysen vor dem Hintergrund des „Low Carbon Leakage“-Risikos. *GWS Research Report 2023/07*

Die Projektergebnisse – einschließlich der Ergebnisse des quantifizierten MLP-Ansatzes – wurden im folgenden Papier beschrieben:

Hembach-Stunden, K. Banning, M., Becker, L., Lutz, C., Matschoss, P., Klann, U., Horst, J. (2024): Future Installation, Production and Global Trade of Clean Energy Technologies. *Sustainability* 2024, 16(23), 10482. <https://doi.org/10.3390/su162310482>

Das vorliegende Papier stellt mit der Darstellung über die Datenrecherche das Bindeglied zwischen den vorgenannten dar. Es stützt sich soweit möglich auch auf diese beiden Papiere.

2 Operationalisierung des Konzepts einer datenbasierten MLP-Analyse als Vorbereitung für die Datenerhebung

Zunächst werden quantitative Indikatoren (Tabelle 1) zur Recherche aller Kombinationen aus Technologien (Tabelle 2) und ausgewählten Ländern (Tabelle 3) abgeleitet. Im Anschluss wurden 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 erfolgte auf Grundlage der zu den in Tabelle 1 genannten Indikatoren gesammelten Daten. Allerdings konnten für einzelne Indikatoren trotz hohem Rechercheaufwand nur eingeschränkt die hier erforderlichen 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.

2.1 Vom Konzept einer datenbasierten MLP-Analyse zu Indikatoren

Zur Erfassung regulativ-politisch bedingter Übergangsdynamiken etc. und damit einhergehende Abweichungen von Modelltypischen „idealen“ Referenzpfaden wurde der MLP-Ansatz nach Geels (2002, 2005, 2018) genutzt und quantitativ weiterentwickelt. In einem verbal-analytischen, häufig auf Fallstudien basierendem Rahmen wird im MLP-Ansatz untersucht, unter welchen Voraussetzungen Innovationen ihre Nische verlassen und zur neuen dominanten Technologie werden können. Es werden drei Ebenen und vier zeitliche Phasen der gesellschaftlichen Durchdringung neuer Technologien unterschieden. Die in diesem Kontext wichtigste Ebene ist die sog. Regimeebene, deren Konfiguration entscheidend dafür ist, ob und wie schnell eine Technologie die Nische (erste Ebene) verlässt. Kennzeichnend für diese mittlere soziotechnische Regime-Ebene ist, dass der Erfolg neuer Technologien bzw. Technologiepfade neben der Technologie selber auch von marktlichen und rechtlichen Regeln sowie Akteurs- und Nutzungskonstellation und politischen Zielen (vgl. Regimedimensionen Tabelle 1) abhängig ist. Ursprünglich zur Ex-Post-Analyse „ungewollter“ Transformationen angewandt, wird der MLP-Ansatz inzwischen auch für die Analyse politisch gesteuerter Transformationen (Energiewende) genutzt. Dadurch gewinnt die politische Dimension der Transformation, wie z. B. Widerstände gegen die Einführung neuer Marktregeln etc., an Bedeutung. Die Dimensionen des sozio-technischen Regimes weisen eine große Übereinstimmung mit anderen multi-kriteriellen Bewertungen von Technologien für die Energiewende auf und wurden – mit leichten Anpassungen – zur Umsetzung des MLP-Konzepts übernommen und durch Recherche-Indikatoren konkretisiert (Tabelle 1) (vgl. Banning et al 2023, S. 6ff. mit weiteren Verweisen; m.w.V.).

Regimedimensionen (nach Geels 2018)	Kriterien (Nummer)	Indikatoren*
„Politik/Regulierung“	1: Politische Ziele	Quantitative Ziele (z.B. Ausbauziele)
„Politik/Regulierung“ und „Wissenschaft“	2: RD&D-Ausgaben	öffentliche RD&D-Ausgaben
„Politik/Regulierung“	3: Öffentliche Förderung	Budgets, Höhe... spezifischer Fördersätze
„Märkte/Nutzerpräferenzen“	4: Marktpotentiale	Verwendung (wiederholt als Filter im Rahmen der Technologie/Länderauswahl eingesetzt, dann für Ausbauszenarien weiter vertieft)
„Technologie“ und „Industrie“	5: Kosteneffizienz	Gestehungskosten (u. Analoges), spez. Investitionskosten
„Märkte/Nutzerpräferenzen“	6: Inländische Wertschöpfung	BWS. Ersatzweise: Produktionsmengen/-kapazitäten, Anzahl Arbeitnehmer
„Kultur“ und „Märkte/Nutzerpräferenzen“	7: Akzeptanz	Auswertung einschlägiger Literatur, dann Einschätzung auf Ordinalskala
„Industrie“	8: Pfadabhängigkeiten	Planungs-, Bauzeiten, Nutzungsdauern
„Technologie“	9: Abhängigkeit v. Infrastruktur	Technologiespezifische Anforderung an Netze berücksichtigt? (Auswertung Netzzustand, Netzausbaupläne (Strom, Wärme))
	10: Weitere Rahmenbedingungen	Offene Kategorie für länderspezifische Besonderheiten

**jeweils gleichzeitig länder- und technologiespezifisch*

Quelle: Banning et al. (2023), bearbeitet; erweitert in Hembach-Stunden et al. (2024)

Tabelle 1: Von Regimedimensionen zu Indikatoren

Die beschriebenen Indikatoren waren für alle Länder/Technologien-Kombinationen zu recherchieren. Ausgenommen sind Kriterien 4, 8 und 10.

Das Kriterium 4 „Marktpotentiale“ wurde für die letztlich für eine quantitative Analyse ausgewählten Länder und Technologien durchaus erfasst⁵. Dies erfolgte aber nicht im Rahmen der Datenrecherche, sondern im Rahmen der Integration der MLP-Analyse mit der quantitativen Analyse via Diffusionsfunktionen. Grundsätzlich wurden dabei einschlägige Szenarioanalysen oder langfristige Ausbauziele für die relevanten Technologie-Länder-Kombination betrachtet. Ausgewählt wurden diejenigen Szenarien und Werte, die den stärksten zukünftigen Ausbau der jeweiligen Technologien zeigten. Diese Werte können als Repräsentation „optimaler“ Bedingungen aufgefasst werden. Durch diese wurden Diffusionsfunktionen gelegt (sogenannte „base paths“). Auf Basis der erkannten Hemmnisse aus der Analyse anderer Kriterien wurden dann die Diffusionsgeschwindigkeit in diesen Funktionen reduziert, um Ausbaupfade nach MLP-Analyse zu erhalten. Das genaue Vorgehen wird in Hembach-Stunden et al. 2024 beschrieben; dort - in „Supplementary Material“ - finden sich für die für „base paths“ verwendeten Quellen (Tabelle S3) sowie die Parameter der Diffusionsfunktionen (Tabelle S4; inklusive der angesetzten langfristigen jährlichen Zubauzahlen; dort Parameter „B_m“). Aufgrund dieses besonderen Vorgehens, in dem auch nur für eine Teilmenge der Länder und Technologiegruppen Daten erhoben wurden, die für andere Kriterien Gegenstand der Datenrecherche waren, wird das Vorgehen zu diesem Kriterium in diesem Paper nicht ausführlich dargestellt. Gewisse Einblicke zu Marktentwicklung und -potentialen für ein breiteres Technologiespektrum gewährt auch Banning et al. 2023 Abschnitt 3.2.

Die Indikatoren zum Kriterium 8 (Pfadabhängigkeiten) wurden nicht systematisch erhoben, da sich sehr schnell zeigte, dass sie – wenn überhaupt – nicht systematisch in der geforderten Auflösung zu finden waren. Es waren überwiegend nur einzelne verstreute Hinweise, häufig bezogen auf Einzelprojekte, zu finden. Für die vertiefte, quantitative Analyse wurde jedoch die Nutzungsdauer der jeweiligen Technologie aus anderweitigen Quellen angesetzt. Damit sind in diesem Schritt des Vorgehens – insbesondere in dann erfolgenden Szenariorechnungen - verschiedene Zeitbedarfe und Alter bestehender Anlagen insoweit implizit erfasst, als sie in der jeweiligen Modellierung berücksichtigt werden.

Das Kriterium 10 (Weitere Rahmenbedingungen) ist ein Platzhalter. Diesem Kriterium wurden keine konkreten Indikatoren zugeordnet. Vielmehr wurden wichtige Besonderheiten, auf die man im Zuge der Recherche zu anderen Kriterien stieß, aufgenommen; dann aber im Kontext

⁵ Nicht zuletzt aufgrund der im Weiteren dargelegten Rechercheprobleme musste letztlich die quantitative Modellanalyse auf eine Auswahl an Technologien und Länder beschränkt werden.

der jeweiligen anderen Kriterien. So konnten sie in der Weiterverarbeitung der Daten berücksichtigt werden. Im Weiteren wird dieses Kriterium nicht mehr weiter berücksichtigt, da es aufgrund seiner Definition und der Art der Sammlung nicht systematisch abgehandelt werden kann.

2.2 Übersicht über ausgewählte Länder und Technologien

Daten zu den aufgeführten Indikatoren wurden für jede Land/Technologiekombination gesucht. Erforderlich dafür war eine erste Auswahl an Ländern und Technologien. Beides wird in Banning et al. (2023) erläutert. Hier wird ein kurzer Überblick über die Ergebnisse gegeben.

Aus einer ursprünglich aus ca. 450 Technologien bestehenden Teilliste, die vornehmlich auf einer IEA-Liste beruht, wurde nach verschiedenen Kriterien (z.B. Bedeutung für den Klimaschutz, Entwicklungsstand der Technologie) Technologien gefiltert und diese dann zu Technologiegruppe zusammengefasst. Letztlich verblieben die elf dargestellten Technologiegruppen (Banning et al. 2023, Kapitel 3).

Windenergie	Biomasse	Wärmespeichersysteme
Solarenergie (PV, CSP)	E-Mobilität	Brennstoffzellen-Fahrzeuge
Batteriespeicher	Wasserstoff	Wärmepumpen
CCU/CCS	Wasserkraft	

Quelle: Banning et al. (2023)

Tabelle 2: Übersicht über die für die Datenerhebung vorausgewählten Technologiegruppen

Für die Länderauswahl wurde die Bedeutung der Länder im internationalen Handel für diesen Technologiegruppen zuzuordnenden Gütern herangezogen, da ein hoher Anteil am Export eine Wettbewerbsfähigkeit und eine gewisse Bedeutung der Produktion der einschlägigen Technologien indiziert. Falls da so ist, werden Länder gewählt, für die eine besonders günstige Ausgangsposition zu vermuten ist, um als Standorte für eine zukünftige starke Produktionserhöhung zu dienen. Dabei wurden Länder ausgewählt, die für mehrere der Technologiegruppen bedeutend sind, sowie im Einzelfall ergänzend für einzelne Technologiegruppen sehr wichtige Länder. Das Ergebnis zeigt Tabelle 3. Für weitere Details zur Methode der Länderauswahl vgl. Banning et al. (2023, Kapitel 4). Diese Art der Auswahl erfolgte auch, da sich zeigte, dass eine gebündelte Datenrecherche für viele Technologiegruppen in einem Land weniger aufwändig ist, als eine breite Streuung über eine größere Anzahl an Ländern, die sich z.B. ergäben hätte, wenn man für jede Technologiegruppe die jeweils wichtigsten Länder nach Exportanteilen angesetzt hätte. Dies liegt daran, dass in einem Land häufig gleiche Organisation und Quellen relevantes für mehrere Technologiegruppen enthalten. Das gilt zum Beispiel für Quellen zu

Fördermechanismen für erneuerbare Energien im Strombereich, die häufig mehrere Technologien umfassten. Ähnlich ist z.B. die Infrastruktur eines Landes für mehrere Technologiegruppen relevant.

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: Banning et al. (2023)

Tabelle 3: Übersicht über die für die Datenerhebung vorausgewählten Länder

Diese ursprüngliche Auswahl an Ländern und Technologien wurde dann für die vertiefte Untersuchung und quantitative Erfassung entsprechend Quelle: eigene Berechnungen basierend auf COMTRADE-Daten. Zur Zuordnung der Waren nach Außenhandelsstatistik zu den Technologien s. Banning et al (2023)

Tabelle 4 weiter fokussiert, um den Aufwand der weiteren Bearbeitung – Bewertung der Kriterien für jede Land-Technologiegruppen-Kombination sowie entsprechende Quantifizierung von Ausbauszenarien – zu begrenzen und gleichzeitig aufgetretenen Datenproblemen gerecht zu werden. Die Anzahl der auszuwählenden Technologien und Länder wurde dabei auf jeweils vier begrenzt. Die Kriterien für die Auswahl der Technologien waren inhaltlich:

- Gegenwärtiges und zukünftig plausibles (weltweites) Marktvolumen, wobei maßgeblich auf die Analysen in Banning et al. (2023) zurückgegriffen wurde;
- Wie gut ist ein Leitmarkt in Deutschland vorstellbar?
- Die ausgewählten Technologien sollen sowohl welche enthalten, die eher am Beginn der Markteinführung stehen, als auch solche, deren Markteinführung bereits weiter fortgeschritten ist.

Andererseits flossen Ergebnisse der Datensammlung sowie die erwarteten Aufwendungen für eine Vertiefung der jeweilige Technologiegruppe ein, also prozessorientierte Kriterien. Leitkriterien waren dabei:

- Umfang der Daten für eine Technologiegruppe in der Datenbank;
- Mögliche Synergien bei Deep Dives zwischen Technologiegruppen;
- Heterogenität der Technologiegruppe.

Bei der Frage nach der Heterogenität der Technologiegruppe wurde auch berücksichtigt, inwieweit es sinnvoll ist, die Technologiegruppe auf wesentliche, relativ einheitliche Technologien zu reduzieren. Als Resultat wurden die vier Technologien („Fokustechnologien“) in *Tabelle 4* ausgewählt. Mit dieser Auswahl sind einerseits relative neue (Elektrolyseure, batterieelektrische Fahrzeuge) und relativ etablierte (PV, Windkraftanlagen) Technologien enthalten.

Daneben stellen sich auch je nach Technologie unterschiedliche grundsätzliche industriepolitische Fragen für Deutschland: Für PV-Anlagen ist die Frage vornehmlich, inwieweit es gelingen kann Produktion nach Deutschland zurückzuholen, während für Windkraft eher die Frage ist, inwieweit die Erzeugung in Deutschland zu halten oder auszubauen ist. Die Technologie batterieelektrische PKW ist vor dem Hintergrund der sehr bedeutsamen Industrie für konventionelle PKW in Deutschland zu sehen. Für H₂-Elektrolyseure geht es hingegen um den Aufbau einer - zumindest im für die Zukunft als erforderlich erachteten Umfang – weitgehend neuen Produktion.

Mit der Auswahl dieser Technologien wurden – außer für Windkraft – nur Teile der Technologiegruppen übernommen, um die Heterogenität einzuschränken. Dabei wurde vor allem darauf geachtet, die ökonomisch bedeutsamsten Techniken innerhalb der Technologiegruppe zu erfassen. Z.B. wurde die Technologiegruppe „Solar“ auf PV reduziert und damit konzentrierende Solarstromerzeugung (CSP) ausgeschlossen, da CSP nach allen Szenarien eine im Vergleich zu PV sehr geringe zukünftige Bedeutung zugeschrieben wird. Ähnlich verhält es sich mit der Fokussierung auf batterieelektrische PKW.

In Bezug auf die Länderauswahl aus den ursprünglich ausgewählten Ländern wurden neben dem gesetzten Deutschland letztlich die drei weiteren größten Volkswirtschaften der Welt ge-

wählt, die tendenziell auch die potenziell größten Leitmärkte stellen. Dabei kann nicht ausgeschlossen werden, dass für Japan und einzelne Technologien anderen aus der ursprünglichen Länderliste in verschiedener Hinsicht eine größere Bedeutung zukommt. Zur Hebung von Synergien wurde Japan aber trotzdem für alle Technologien ausgewählt. Für Windkraft wurde jedoch die sehr große Bedeutung von Dänemark als Produzent festgestellt. Deshalb wurde für Windkraft Dänemark ergänzend in die Liste der vertieft zu untersuchenden Ländern („Fokusländer“) aufgenommen.

	PV-Anlagen	Windkraftanlagen (on- und offshore)	Batterieelektrische PKW	H ₂ -Elektrolyseure
China	35%-47%	4%-14%	1%-2%	19%-22%
Deutschland	4%-7%	25%-36%	13%-25%	10%-20%
Japan	6%-9%	0%-1%	2%-31%	15%-20%
USA	2%-3%	0%-2%	10%-35%	5%-8%
Dänemark	-	30%-44%	-	-

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf COMTRADE-Daten. Zur Zuordnung der Waren nach Außenhandelsstatistik zu den Technologien s. Banning et al (2023)

Tabelle 4: Für vertiefte und quantitative Analyse ausgewählte Fokusländer und -technologien basierend auf technologiespezifischen globalen Exportanteilen (min-max) im Zeitraum 2015-2020

Generell wurden die Daten für die ersten, längeren Technologie- und Länderlisten gesucht. Die Ausnahmen sind: Zum einen das Kriterium 7 (Akzeptanz). Hier wurden nur Fokusländer und -technologien betrachtet und das Vorgehen wie im vorliegenden Papier dargestellt. Zum anderen wurde das Kriterium 4 (Marktpotential) an verschiedenen Stellen in monetärer Form als Filterkriterium verwendet und in Form von Mengeneinheiten dann in der Quantifizierung von Ausbaupfaden, die nicht Gegenstand dieses Papiers ist, detailliert betrachtet. Die grundlegenden Daten zur Bestimmung des Kriteriums 4 (Marktpotential) sind Hembach-Stunden et al. (2024; supplementary materials) zu entnehmen.

2.3 Allgemeines Vorgehen

Für die Suche wurde je nach Kriterium verschieden vorgegangen. Aber einige generelle Punkte der Vorgehensweise können hier schon skizziert werden.

- Inhaltlich wurde grundsätzlich versucht über internationale Datenbanken oder Studien zu starten. Dies hat den Vorteil, dass eine gewisse Konsistenz und Vergleichbarkeit der Daten gesichert ist;
- Ergänzend wurden weitere Quellen gesucht, um Datenlücken zu füllen.

Aufgrund der verschiedenen Eigenschaften der gesuchten Indikatoren verändert sich das Verhältnis zwischen diesen beiden Vorgehen. So ist für einen Vergleich von Kosten (Kriterium 5) zwischen Ländern entscheidend, dass die Quellen vergleichbare Ansätze wählen, da ansonsten aufgrund der vielfältigen Parametrisierungen ein Vergleich kaum möglich ist. Auch können sich total cost of ownership (TCOO) im Bereich Mobilität je nach verwendeter Fahrzeugspezifikation (z.B. welches Modell) und angenommene Fahrstrecke pro Jahr erheblich unterscheiden, wodurch eine Datensammlung aus Studien für bestimmte Fahrzeuge und einzelne Länder wenig sinnvoll ist. Für dieses Kriterium wurde eine Suche in ergänzenden Quellen deshalb nur sparsam eingesetzt. Andererseits erfordert z.B. Kriterium 3 (öffentliche Förderung) eine hohe Aktualität, die in Übersichtsstudien und – wie sich zeigte – auch in Datenbanken nicht gewährleistet ist. Deshalb waren hier weitere Quellen, namentlich Webseiten staatlicher Organisationen, von sehr großer Bedeutung. Daneben ist anzumerken, dass die Kriterien 1 (politische Ziele) und 3 (öffentliche Förderung) die besondere Schwierigkeit aufweisen, dass eine Datenlücke sowohl bedeuten kann, dass es für diese Technologie/Land-Kombination nichts Relevantes gibt oder dass nur noch nichts gefunden wurde. Demnach war hier also jeweils zu entscheiden, wann die Suche abubrechen ist. Besonders für Kriterium 3 (öffentliche Förderung) gilt dies zusätzlich auch für die Frage, ob tatsächlich alle wesentlichen einschlägigen Fördermaßnahmen gefunden wurden. Genaueres hierzu ist für diese beiden Kriterien in den jeweiligen Ausführungen zu finden.

Praktisch wurde für jedes Kriterium eine Excelmaske erstellt, die dann für jede Land/Technologiekombination auszufüllen war. Auf Basis der Erfahrungen zu Anfang der Suche und dabei mitunter auftretenden unvorhergesehen Fragen, wurden diese Masken dann gegebenenfalls überarbeitet. Letztlich wurde dann für jedes Kriterium für alle Technologiegruppen und Länder die gleiche Maske verwendet.

Die recherchierten Daten wurden nach der Recherche unter Beibehaltung der Struktur der Excel-Masken in eine Datenbank (SQL light) eingepflegt, die einen schnellen, zielgerichteten Zugriff für die weitere Analyse ermöglichte. Im Zuge der Integration in die Datenbank wurde zum einen geprüft, ob Fehler in den Daten zu vermuten sind, die dann gegebenenfalls korrigiert wurden, zum anderen wurden aber vor allem Maßeinheiten soweit sinnvoll vereinheitlicht, um Vergleiche zu vereinfachen oder zu ermöglichen. Das betrifft insbesondere Währungseinheiten, die auf Euro mit der Preisbasis 2019 umgerechnet wurden. Die Umrechnungsfaktoren

wurden aus den Referenzwechselkursen der jeweiligen Währungen für das Jahr 2019 sowie Angaben zum BIP-Deflator für die einschlägigen Länder über den relevanten Zeitraum bestimmt⁶. Die Werte wurden also für jede Währung zuerst auf das Jahr 2019 basiert und anschließend in Euro umgerechnet. Der BIP-Deflator wurde herangezogen, da er aufgrund des unterliegenden Warenkorbs für die Projektzwecke als besser geeignet erscheint als insbesondere ein Konsumentenpreisindex, da nicht hauptsächlich Entscheidungen der privaten Haushalte untersucht werden.

Grundsätzlich wurden zur besseren Vergleichbarkeit Daten für mehrere Länder aus einer Quelle bevorzugt. Unternehmensdaten wurden gemeinhin als ungeeignet betrachtet, da diese nach Unternehmen und deren Hauptsitzland veröffentlicht sind und der Erfolg eines Unternehmens nicht mit dem industriepolitischen Erfolg eines Landes gleichzusetzen ist.

⁶ Die Referenzwechselkurse sind unter <https://www.bundesbank.de/de/statistiken/wechselkurse> (abgerufen Juli 2022) zu finden. Der BIP-Deflator stammt für vergangene Jahre aus <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.DEFL.KD.ZG> (abgerufen am 25.05.2022) und für zukünftige Jahre aus https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2023/April/weo-report?c=122,124,223,924,128,132,134,532,136,158,542,548,138,184,111,&s=NGDP_D.&sy=2010&ey=2028&ssm=0&scsm=1&ssc=0&ssd=1&ssc=0&sic=0&sort=country&ds=.&br=1 (Stand April 2023, abgerufen am 06.07.2023)..

3 Übersicht zu Vorgehen und Herausforderungen der Datenerhebung nach Kriterien

3.1 Vorbemerkung

Im Folgenden wird für die einzelnen Kriterien die Datenerhebung für die jeweiligen Indikatoren getrennt beschrieben, da sich die jeweiligen Quellen und auch die jeweiligen Schwierigkeiten stark unterscheiden. Wichtig ist dabei, vor allem den aktuellen Zustand, gegebenenfalls auch Projektionen und schließlich - soweit verfügbar - Werte für die Vergangenheit zu erfassen. Für ein einzelnes Kriterium kann aber diese Bedeutung der Zeitskala aus inhaltlichen Gründen variieren.

Häufig – vor allem für das Kriterium 3 (öffentliche Förderung) – erwiesen sich Recherchen für Länder mit anderweitigen, Europäern i. Allg. nicht vertrauten Schriftzeichen als schwierig. Dabei ist weniger an Sprachprobleme an sich zu denken, die auch für andere Länder mehr oder weniger auftraten und mit üblicher Software (vor allem „DeepL“) mit einem gewissen Mehraufwand weitgehend zu beheben waren, als an Probleme der Mustererkennung, die weitere Vertiefungen beeinträchtigte. Zur Verdeutlichung sei ein Beispiel gegeben: Recherchierende hatten grundsätzlich kein Problem, den Begriff „Wärmepumpe“ in den erforderlichen europäischen Sprachen zu identifizieren und für weitere Suchen zu verwenden. Dies war z.B. für japanische Schriftzeichen schwieriger. Auch eine erste, schnelle Einordnung der nach einer Identifikation der Schriftzeichen für „Wärmepumpe“ erfolgten weiteren Suche wurde dadurch erschwert. Teils konnte dem entgegengewirkt werden, indem MuttersprachlerInnen (chinesisch) an den Recherchen beteiligt wurden⁷. Dies war jedoch nicht dauerhaft und nicht für alle hier relevanten Länder (insbesondere China, Japan, Republik Korea) möglich. Für die Länder, die stark im Fokus weltweiter energiewirtschaftlicher Analysen stehen (hier: China und teils Japan), konnte die Schwierigkeit verringert werden, indem auf einschlägige Länderstudien zugegriffen wurde. Zudem wurde für diese Länder für einzelne Kriterien auch Artikel in der nicht-wissenschaftlichen Fachpresse berücksichtigt.

Für alle Länder und Technologien wurden dabei Zahlen auf der Landesebene gesucht. Werte für Bundesstaaten oder Provinzen wurden aufgrund des dadurch erforderlichen sehr hohen Mehraufwands nicht erhoben. Die einzige Ausnahme ist für einige Kriterien Belgien, da dort die Kompetenz für Energiepolitik ganz überwiegend bei den Provinzen liegt. Durch dieses Vorgehen entstehen gerade für die USA, aber auch für China, durchaus nennenswerte Lücken,

⁷ Zur Verringerung von Sprachproblemen wurden im Zuge der Recherche zumindest vorübergehend auch Muttersprachler für Malaysisch und Portugiesisch hinzugezogen.

da einzelne Bundesstaaten bzw. Provinzen auch im Vergleich zu anderen betrachteten Staaten relativ groß sein können.

Da je nach Kriterium deutlich unterschiedliche Quellen verwendet wurden, werden Literaturquellen jeweils am Ende der Texte zu einzelnen Kriterien aufgeführt, wobei beispielhafte Quellen für einzelne Eintragungen mit ihrem Link mitunter nur in Fußnoten genannt werden. Auch dies soll eine gewisse Übersichtlichkeit wahren, da ansonsten – gerade für Kriterien 5 (öffentliche Förderung) und 6 (Wertschöpfung) – eine Fülle von einzelnen Links erheblich erschweren würde, grundlegende Literatur zu finden. Betrachtete Quellen, die nicht weiterhalfen, wurden aufgrund ihrer sehr hohen Anzahl nicht dokumentiert.

Aufgrund des Aufwands der Datenerhebung zog sich der Prozess über einen längeren Zeitraum hin (Juli 2022 bis August 2023). Da Daten für einzelne Kriterien jeweils für sich und dann jeweils entweder eine Technologie nach der anderen oder ein Land nach dem anderen erhoben wurden, resultiert daraus für verschiedene Kriterien ein etwas unterschiedlicher Zeitstand der Datenbankeintragungen. Berücksichtigt man zudem die Verzögerung, mit der Daten in einzelnen Quellen veröffentlicht werden, so beziehen sich letztlich einige Daten auf den Stand 2021, überwiegend konnte aber ein Stand 2022 oder – seltener – Anfang 2023 erreicht werden. Eine durchgängige Aktualisierung des kompletten Datensatzes auf Mitte 2023 war aufgrund des sehr hohen damit verbundenen Aufwands nicht praktikabel. Für die Fokusbänder und -technologien (Tabelle 4) konnten im Zuge der Auswertung im November bis Dezember 2023 in Einzelfällen noch erkennbare Lücken geschlossen und Daten aktualisiert werden.

Da einzelne Daten mitunter Besonderheiten aufwiesen oder nicht eindeutig waren, wurde in den Suchmasken stets auch ein „Anmerkung“-Feld eingefügt, in die dann Näheres – sei es zur Ergänzung oder als mögliche Probleme – eingetragen werden konnte, was dann bei der Auswertung auch berücksichtigt werden konnte.

Für alle Kriterien wird im Folgenden grundsätzlich der gleiche Aufbau der Beschreibung gewählt, der aber für ein einzelnes Kriterium, soweit erforderlich oder hilfreich, im Einzelfall ein wenig modifiziert werden kann: Für jedes Kriterium werden zuerst die gesuchten Indikatoren und danach das grundsätzliche Vorgehen der Datenrecherche beschrieben. Schließlich werden die Schwierigkeiten bei der Recherche benannt, die sich je nach Land und Technologie unterscheiden können. Schließlich wird eine Zusammenfassung gegeben, in der auch die Verwendbarkeit der erhobenen Daten in einer Indikatoren-basierten MLP-Analyse eingeschätzt wird.

3.2 Kriterium 1: Politische Ziele

3.2.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren

Zum Kriterium 1 (politische Ziele) wurden alle Indikatoren gesucht, die offizielle Regierungsorganisationen verbindlich und öffentlich als zukünftig wünschenswerte Bestands-, Stromgrößen oder Anteile nannten. Bei „verbindlich“ ist eine gewisse Unschärfe nicht zu vermeiden, da es sich im einen Extrem um Gesetze und im anderen Extrem um Äußerungen eines Regierungsmitglieds handeln kann. Hier wurde darauf geachtet, dass zumindest eine Nennung in relevanten Dokumenten – wie z.B. staatlichen Roadmaps für einzelne Technologien – vorliegt. Bei „Bestands-, Stromgrößen oder Anteile“ kann es sich konkret - hier am Beispiel PV für das Jahr 2030 - handeln um: Bestand in GW im Jahr 2030; Stromerzeugung durch PV im Jahr 2030 oder jährlicher Zubau in den Jahren bis 2030: Anteil PV an der Leistung oder an der Stromerzeugung im Jahr 2030. Ergänzend wurden, sofern vorhanden, Ziele für zukünftig zu erreichenden Kosten oder Effizienzwerte einer Technologie aufgenommen. Daneben wurden auch Zahlen aufgenommen, die nicht spezifisch für eine Technologiegruppe sind, sondern vielmehr mehrere umfassen (z.B. Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2030). Im Falle der EU wurde neben einschlägigen Zielen einzelner Mitgliedstaaten auch EU-weite Ziele berücksichtigt. Zudem wurden auch vergangene Ziele eingetragen, um dann durch einen Vergleich mit IST-Werten festzustellen, inwieweit ein Land Ziele aus der Vergangenheit tatsächlich erreichte (z.B. 2008 veröffentlichte Ziele für den PV-Bestand im Jahr 2020).

Geplante Mengen für eine Förderung via Ausschreibungen wurden ebenfalls hier erfasst, da sie politisch gewollte verbindliche zukünftige Mengen implizieren. Weitere Eigenschaften von Ausschreibungen wurden unter dem Kriterium 3 (öffentliche Förderung) gesammelt. Die Datensammlung bezog sich dabei auf alle zu den jeweiligen Technologiegruppen gehörenden Einzeltechnologien, also z.B. für E-Mobility auf verschiedene Arten von Straßenfahrzeugen und verschiedene Arten von Lademöglichkeiten (z.B. Schnellladestellen und Ladepunkte in Wohnhäusern).

3.2.2 Grundsätzliches Vorgehen

Als grundlegende Datenquelle dienten verschiedene Berichte von REN21 sowie dazugehörige „Data Packs“⁸, wobei im Zweifel auch die dort verlinkten Quellen gesichtet wurden. Ältere Berichte wurden herangezogen, um vergangene Ziele und deren Erreichung einschätzen zu können. Nach Ländern wurden insbesondere für Malaysia und Hong Kong ergänzend Regierungs-

⁸ REN21 (2008, 2009, 2020, 2020a, 2021, 2021a, 2022, 2022a).

webseiten durchgegangen, weil zu erwarten war, dass diese Länder in den Berichten nur unzureichend erfasst werden⁹. Da die REN21-Berichte zudem auf erneuerbare Energien fokussieren und gleichzeitig einige Technologien sehr früh im Entwicklungsstadium stehen, und mit hin gerade für diese schnelle Änderungen bei Zielvorstellungen zu erwarten waren, wurden für die Technologiegruppen Wasserstoff und CCU/CCS ergänzende Quellen hinzugezogen.

Für CCU/CCS konnten nur für wenige Länder Ziele gefunden werden. Als generelle Literatur wurde IEA (2020, 2023), insbesondere sofern es Hinweise auf mögliche Ziele gab, ergänzend nationale Dekarbonisierungsstrategien¹⁰ und andere Quellen¹¹ durchgesehen. Als Ergebnis der Datensuche ist aber festzuhalten, dass für CCU/CCS bis 2022 und Anfang 2023 nur in Ausnahmefällen politische Ziele zu finden waren.

Für Wasserstoff wurde ergänzend zu den REN21-Quellen (s.o.) ausgewertet: IEA (2021, 2021a, 2021b, 2022) IRENA (2022, 2022a) und OECD (2022). Auch für diese Technologiegruppe wurden ergänzend vertiefende Quellen gesucht und verwendet¹². Im Fall von Wasserstoff ist zudem zu erwähnen, dass hier auch Ziele, die die Technologiegruppe Brennstoffzellenfahrzeuge betreffen, gefunden und dann auch dort eingetragen wurden. Für diese Technologiegruppe bestehen auch Überschneidungen mit E-Mobility, die in der Datenrecherche genutzt wurden.

Die systematische Suche der Indikatoren zu diesem Kriterium fand etwa September 2022 bis Januar 2023 statt. Gewisse Ergänzungen und Aktualisierungen (s Abschnitt 3.2.3) erfolgten längstens bis Ende Juli 2023 und für die Fokusländer und -technologie in Einzelfällen bis Ende 2023.

3.2.3 Schwierigkeiten der Datenerhebung

Für das Kriterium 1 (politische Ziele) – wie ansonsten nur noch für das Kriterium 3 (öffentliche Förderung) – besteht die grundsätzliche Schwierigkeit, dass eine Leerstelle in den gefundenen Daten nicht eindeutig zu interpretieren ist. Zum einen kann sie besagen, dass es ein relevantes

⁹ Aber auch für andere Länder wurden in Einzelfall Strategiepapiere/Roadmaps oder aktuelle Regierungsverlautbarungen herangezogen, sofern sich Hinweise ergaben, dass etwas zu finden sein dürfte, wozu teils Recherchen zu einem Land zu diesem Kriterium für jeweils andere Technologiegruppen oder Recherchen zu anderen Kriterien beitragen. Grundsätzlich wurden auch aktuelle Länderberichte an die UNFCC gescreent (z.B. mit Erfolg für CCU/CCS, Republik Korea: The Government of the Republic of Korea (December 2020): 2050 carbon neutral strategy of the Republic of Korea. Towards a sustainable and green society, S.58).

¹⁰ Z.B. für Japan: https://www.meti.go.jp/english/press/2020/pdf/1225_001b.pdf (abgerufen am 13.01.2023).

¹¹ Z.B. für China: Jiang et al. (2020), <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/us-china-roundtable-carbon-capture-utilization-and-storage/> (abgerufen am 30.März 2023) und ADB (2022).

¹² Z.B. für die USA <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production> (abgerufen am 01.02.2023), Malaysia (https://www.sinarharian.com.my/article/174048/EDISI/Sarawak-bakal-pengeluar-hidrogen-terbesar-di-Asia-Tenggara?fbclid=IwAR1VgCdotuua1n_1aL5fqHiWkXjqTojrmX6cbs0qiPLix12YR_SKDYy7Fg, abgerufen am 31.01.2023) oder China (<https://energyiceberg.com/national-hydrogen-development-plan/>, abgerufen am 27.01.2023).

Ziel für diese Technologiegruppe in diesem Land nicht gibt. Zumal es unwahrscheinlich ist, auf eine Quelle zu stoßen, die explizit aussagt, dass für eine bestimmte Technologien in einem bestimmten Land keine politischen Ziele existieren (zumindest wurde kein solcher Fall gefunden). Zum anderen kann sie aber auch bedeuten, dass einschlägige Belege für existierende politische Ziele nur noch nicht gefunden wurden. Aufgrund dieser Uneindeutigkeit wurde die systematische Suche nach Durchlauf des oben beschriebenen Vorgehens bei fehlenden Daten nicht weitergeführt; das Vorgehen diente also faktisch als Abbruchkriterium.

Zudem ist die Aktualität von Zielen für die Zukunft fraglich, da sie sehr schnell in die eine oder andere Richtung geändert werden können. Es wurde kein handhabbares Verfahren gefunden, das generell eine Aktualität sichern könnte. Eine gewisse Aktualität konnte dadurch gewährt werden, dass bei den zeitlich nach den Suchen zu diesem Kriterium angesetzten Recherchen zu den Kriterien 3 (öffentliche Förderung) und 9 (Infrastruktur) dort zu findende Zielangaben mit den bereits vorhandenen Zielen abgeglichen und letztere gegebenenfalls geändert oder ergänzt wurden. Dieses Verfahren trug auch zu einer Vervollständigung der Daten bei.

Abgesehen von den in der Einleitung zu Abschnitt 3 genannten allgemeinen Schwierigkeiten zu Ländern, traten für einzelne Länder keine besonderen, durch das Vorgehen nicht adressierten Schwierigkeiten auf.

In diesem Kriterium sind auch für einzelne Technologiegruppen keine besonderen Schwierigkeiten auszumachen, da es gut möglich ist, dass es für Technologiegruppen, für die wenige Ziele gefunden wurden – v. a. „stationäre Batteriespeicher“, „Wärmespeicher“ und „CCU/CCS“ –, in der Tat aktuell kaum Ziele gab.

Für die Indikatoren-basierte MLP-Analyse sind die Daten zu Kriterium 1 als relativ unproblematisch einzuschätzen. Die in Bezug auf Vollständigkeit und Aktualität genannten Schwierigkeiten sind aber nicht komplett auszuräumen, was auch erschwert, mögliche Probleme aus der Verwendung des erstellten Datensatzes für die MLP-Analyse abschließend einzuschätzen.

3.2.4 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick

In der Definition eines „politischen Ziels“ ist eine gewisse Verbindlichkeit zu fordern. Faktisch besteht mehr oder weniger ein Kontinuum zwischen per Gesetz festgelegten – und damit sehr verbindlichen Zielen - und unverbindlichen Äußerungen eines Regierungsmitglieds oder einer staatlichen Organisation. Für die Datenerhebung besteht deshalb ein gewisser Graubereich, in dem es schwierig ist, Quellenangaben eindeutig und konsistent einzuordnen. Durch erläuternde Ergänzungen der Einträge wurde versucht, dieses Problem in den Griff zu bekommen. Vollständigkeit und Aktualität zu sichern, ist aber die wesentliche Schwierigkeit. Es wurden auch keine öffentlich zugänglichen Sammlungen gefunden – auch nicht für einzelne Länder

oder einzelne Technologiegruppen –, die dies leisten würden. Für bedeutende Länder kommen einzelne Veröffentlichung nahe heran, wobei aber die Zeitverzögerungen zwischen jeweiligen inhaltlichen Redaktionsschlüssen für Daten, Veröffentlichung und Nutzung zu beachten ist. Für den Bereich erneuerbare Energien erwiesen sich REN21-Veröffentlichungen - insbesondere die Data Packs – für länderspezifische Daten als sehr hilfreich. Allerdings sind auch hier zum einen ein Blick in die dort verlinkten Quellen und zum anderen – auch je nach Inhalt der Links – ergänzende, dann sehr zielgerichtete Recherchen anzuraten.

Gegenwärtig ist vom Vorgehen her kein Weg absehbar, der eine zukünftige Erhebung derartiger Daten z.B. für weitere Länder oder Technologien vereinfacht. Allerdings ist es möglich, dass der Arbeitsaufwand künftig durch den Einsatz KI-basierter Verfahren reduziert werden kann.

3.2.5 Zentrale Literatur zu Kriterium 1

ADB (Asian Development Bank) (2022): Road map update for carbon capture, utilization, and storage demonstration and deployment in the People's Republic of China.

IEA (2021): Hydrogen in North-Western Europe. A vision towards 2030. Paris.

IEA (2021a): Hydrogen TCP. 2021 Annual Report. Tasks & Member updates. Paris.

IEA (2021b): Global hydrogen review 2021. Paris.

IEA (2022): Global hydrogen review 2022. Paris.

IRENA (2022): Green hydrogen for industry. A guide to policy making. Abu Dhabi.

IRENA (2022a): Green hydrogen cost reduction. Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal. Abu Dhabi.

Jiang, K. et al. (2020): China's carbon capture utilization and storage (CCUS) policy: A critical review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 119. doi:10.1016/j.rser.2019.109601

OECD (2022): Innovation and industrial policies for green hydrogen. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 125, OECD Publishing. Paris.

<https://doi.org/10.1787/f0bb5d8c-en>.

REN21 (2008) Renewables 2007 global status report, Paris: REN21 Secretariat and Washington, D.C., Worldwatch Institute.

REN21 (2009) Renewables global status report, 2009 update, Paris: REN21 Secretariat.

REN21 (2020) Renewables 2020 global status report, Paris: REN21 Secretariat.

REN21 (2020a): GSR 2020 Data Pack, Paris: REN21 Secretariat.

REN21 (2021) Renewables 2021 global status report, Paris: REN21 Secretariat.

REN21 (2021a): GSR 2021 Data Pack, Paris: REN21 Secretariat.

REN21 (2022) Renewables 2022 global status report, Paris: REN21 Secretariat.

REN21 (2022a): GSR 2022 Data Pack, Paris: REN21 Secretariat.

3.3 Kriterium 2: Öffentliche R&D-Ausgaben

Ein weiterer Indikator für den datenbasierten MLP-Ansatz sind die öffentlichen¹³ Ausgaben für Forschung, Entwicklung und Demonstrationen (RD&D) (zu Kriterium 2 „RD&D-Ausgaben“) der einzelnen Länder für die betrachteten Technologiegruppen, wobei eine Aufteilung in R&D- und in Demonstrationsdaten wünschenswert ist, da Demonstrationen anwendungsnäher sind und als Bindeglied zu einer möglichen Markteinführung dienen können. Allerdings war eine getrennte Erfassung von Daten zu Ausgaben für Demonstration im Allgemeinen nicht möglich. Markteinführungsmaßnahmen werden in Kriterium 3 (siehe unten) thematisiert. RD&D-Daten sind zum einen für den möglichen Übergang gegenwärtig noch in Nischen angesiedelter Technologien in das Regime und zum anderen für den Erhalt oder die Entwicklung der Wettbewerbsfähigkeit der Produktion in einzelnen Ländern von bereits im Regime etablierten Technologien relevant.

Ausgewertet wurde vornehmlich der Datensatz der IEA zu RD&D-Ausgaben für Energietechnologien¹⁴. Ziel war es festzustellen, inwieweit die dortigen Daten gut für Regimeanalysen geeignet sind. Dabei stehen zwei Auswertungsmöglichkeiten im Vordergrund:

1. Ein Ländervergleich für die gleiche Technologiegruppe, die das Verhältnis der RD&D-Ausgaben zwischen den Ländern erkundet. Ziel ist es dabei, die Länder zu bestimmen, die besonders viel in RD&D für eine Technologiegruppe investieren.
2. Daneben ist eine Auswertung sinnvoll, die zeigt, inwieweit sich ein einzelnes Land bei den RD&D-Ausgaben auf bestimmte Technologiegruppen spezialisiert. Damit werden die Technologiegruppen in einem Land bestimmt, die dort relativ hohe Ausgaben auf sich vereinen.

Die IEA-Datenbank enthält nicht alle für eine nähere Betrachtung ausgewählte Länder. Nichtsdestotrotz kann eine Analyse der Daten für die enthaltene Länder ermöglichen, die Brauchbarkeit dieser Daten einzuschätzen und auf mögliche Probleme aufmerksam zu machen. Für die nichtenthaltenen Länder wurde versucht, entsprechende Daten aus anderweitigen Quellen zu erheben, die sich dann idealerweise an die Systematik der IEA-Daten anlehnen sollten, um vergleichbare Werte zu generieren. Tabelle 5 zeigt die in der IEA-Datenbank zu findenden Länder unter den ausgewählten Ländern. Nicht enthalten sind China, Hong Kong und Malaysia. Für Brasilien sind gewisse Daten grundsätzlich in Anlehnung an die IEA-Systematik verfügbar.

¹³ „Öffentliche“ Ausgaben wurden gewählt, da private Ausgaben in der erforderlichen Gliederungstiefe kaum zu erhalten waren und die öffentlichen Ausgaben ergänzend die Haltung der jeweiligen kompetenten politischen Organisationen abbilden, die für die Regimeanalyse besonders relevant ist.

¹⁴ Verwendet wurde die Ausgabe vom Oktober 2021. s. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-technology-rd-and-d-budget-database-2>, (abgerufen 03.2022).

Da diese Daten aber nicht in der IEA-Datenbank enthalten sind, wird Brasilien im Kontext der genannten anderen drei Ländern thematisiert.

Zuerst werden nun die IEA-Daten für die einschlägigen Länder nach Tabelle 5 besprochen. Auf die IEA-Datenbank wird ausführlicher eingegangen, da sich hier zeigt, dass es auch dann zu erheblichen Problemen kommen kann, wenn eine nach ihrer Systematik grundsätzlich geeignete Datenbasis vorhanden ist. Die Datensammlung für die anderen vier genannten Länder wird anschließend besprochen.

3.3.1 Zum IEA-Datensatz

Nach einer Darstellung und Diskussion der grundsätzlichen Abgrenzung im IEA-Datensatz wird die Zuordnung der Technologiegruppen zu den Technologien laut der IEA-Systematik behandelt. Schließlich werden die IEA-Daten diskutiert, wobei zum einen der internationale Vergleich für eine Technologiegruppe und zum anderen der Vergleich verschiedener Technologiegruppen für einzelne Länder behandelt werden. Dabei wird auf mögliche Probleme fokussiert, für die dann nicht jeder Einzelfall, in dem sie auftreten, benannt wird. Vielmehr werden zum Verständnis prägnante Einzelbeispiele aufgezeigt. Neben der bereits erwähnten IEA-Datenquelle werden dafür ergänzend noch das einschlägige IEA-Manual, die dazugehörige IEA-Dokumentation sowie die „ausgewählten Daten“ der IEA betrachtet¹⁵.

Länder*	Betrachtet?	Technologiegruppen**
Belgien	Ja	Alle
Brasilien	Keine Werte in hinreichender Tiefe (2-Steller oder mehr)***, anderweitige Recherche	-
China	Nicht im IEA-Datensatz, anderweitige Recherche	-
Deutschland	Ja	Alle
Frankreich	Ja	Alle
Hong Kong	Nicht im IEA-Datensatz, anderweitige Recherche	-
Italien	Ja	Alle
Japan	Ja	Alle
Südkorea	Ja	Alle
Malaysia	Nicht im IEA-Datensatz, anderweitige Recherche	-

¹⁵ Die Quellen werden im Weiteren wie in diesem Satz benannt. Sie sind zu finden unter [Energy Technology RD&D Budgets - Data product - IEA](#), letzter Abruf im Mai 2022. Siehe auch Literaturverzeichnis.

Länder*	Betrachtet?	Technologiegruppen**
Niederlande	Ja	Alle
USA	Ja	Alle
Dänemark	Ja	Windkraft
Österreich	Ja	Wasserkraft
Spanien	Ja	Windkraft

* Zur Länderauswahl s. anderweitig. Dort auch Begründung der technologiegruppenspezifischen Betrachtung von Dänemark, Österreich und Spanien.

** Die Technologiegruppen sind: Windenergie, Solarenergie, Batterien, CCUS und CO₂-Infrastruktur, Biomasse, Elektromobilität, Wasserstoff, Wasserkraft, Wärmespeicher, Brennstoffzellenfahrzeuge, Wärmepumpen, Effizienz in den Industriesektoren, Stromübertragung und -verteilung, Gebäudetechnologien. Zu Auswahl und genauerem Inhalt s. anderweitig.

*** 2-Steller nach der Systematik des IEA-Datensatzes. Je höher die Anzahl der Stellen desto größer ist die Anzahl der unterschiedenen Technologien. Die höchste Auflösung sind in dem Datensatz 4-Steller. Eine Auflösung nach 2-Steller ist für die genauere Erfassung der vieler Technologiegruppen zu gering (Näheres s. unten, insbesondere Tabelle 6).

Tabelle 5 In der Analyse der öffentlichen RD&D-Ausgaben nach IEA berücksichtigte Länder und Technologiegruppen

3.3.1.1 Grundsätzliches zur Erfassung, Definition und Abgrenzung der verwendeten IEA-RD&D-Daten

Eine Beschreibung der Konzepte und Abgrenzungen der IEA RD&D-Daten liefert vor allem „IEA-Manual“ und ergänzend „IEA-Dokumentation“. Für einzelne Details ist auch das Blatt „Info on national data systems“ in „IEA-ausgewählte Daten“ von Interesse. Im Folgenden werden in dem Kontext entscheidende Sachverhalte benannt, eine komplette Übersicht soll hier nicht gegeben werden. Bei Interesse an einer generellen Vertiefung sei insbesondere auf das „IEA-Manual“ verwiesen, spezielle Informationen zu einzelnen Ländern sind in „IEA-Dokumentation“ zu sehen.

Die IEA-Daten beziehen sich auf staatliche Haushalte. Dabei werden vorläufige Daten für aktuelle Jahre auf Basis des für das nächste Jahr geplanten Haushalts nach dessen Bewilligung durch das Parlament¹⁶ empfohlen, die dann für die endgültige Nennung, um die sich während des laufenden Jahres ergebenden, parlamentarisch entschiedenen Haushaltsänderungen zu bereinigen sind.

Mit dieser Orientierung auf öffentliche Haushalte (GBAORD¹⁷) – und generell Mittelgeber – unterscheiden sich die IEA-Zahlen konzeptionell von den ebenfalls zu findenden Zahlen, die

¹⁶ „Budgetary stage IV“ nach IEA-Manual (S. 27), Überarbeitung auf Basis der Stage v (im Text beschrieben), wobei für einzelne Staaten auch spätere Stufen verendet werden (z.B. tatsächlich erfolgte Auszahlungen). Von der IEA werden dort sieben Stufen eines Haushaltsprozesses unterschieden.

¹⁷ „Government budget appropriations or outlays for RD&D“

auf Meldungen der Forschenden, die Empfänger sind, basieren („gross expenditure in R&D“ (GERD), wobei auf der Empfängerseite auch auf öffentliche Mittel fokussiert werden kann („government-financed GERD“)¹⁸. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass GERD die im jeweiligen Land durchgeführten Forschungsarbeiten abbildet, während in GBAORD auch Zahlungen an ausländische Forschungseinrichtungen enthalten sind und Zahlung ausländischer Staatsorganisationen an inländische Forschungseinrichtungen nicht enthalten sind. Daneben enthalten GERD-Zahlen auch die Auszahlungen lokaler Einrichtungen, die bei GBOARD außer Acht gelassen werden und mitunter fehlen dort auch Daten zu „provincial ... government“¹⁹. Diese Aspekte verweisen darauf, dass grundsätzlich GERD besser geeignet erscheint, wenn die Frage ist, wie stark die Forschung an einer Technologie in einem Land gefördert wird. GBOARD misst eher wie stark sich eine Regierung in der Forschungsförderung für eine Technologie engagiert.

Bei GBOARD entsteht in diesem Zusammenhang die Frage, wie EU-Forschungsmittel behandelt werden. Im Falle von GERD würden sie dem Land zugerechnet, in dem die empfangenden Forschungseinrichtungen tätig sind. Im Fall von nationalen Forschungsmittel, die zusammen mit EU-Mittel für ein Projekt ausgegeben werden, sind die nationalen Mittel zu berücksichtigen. Was ist aber mit den im EU-Haushalt für eine Forschungsförderung eingestellten Mitteln? Um Doppelzählungen zu vermeiden, kommen zwei Alternativen in Betracht: Zum einen könnten sie im Umfang der Beiträge einzelner Staaten zum EU RD&D-Budget im Energiebereich verbucht werden. Zum anderen könnte das EU RD&D-Budget unter „EU“ verbucht werden und bei den Mitgliedsstaaten deren budgetierten Beiträge zum entsprechenden EU-Budget außer Acht gelassen werden. Gewählt wird von der IEA der zweite Weg (IEA-Manual, S. 19)²⁰. Damit erhält man Zahlen für die RD&D-Ausgaben im Energiebereich für die EU. Die entsprechenden Werte werden aber – konsistent zum GBOARD-Konzept – nicht auf die empfangenden Mitgliedsstaaten aufgeteilt. Betrachtet man nur die Angaben von EU-Mitgliedstaaten mit denen für andere Staaten, ergibt sich daraus ein Bias unbekannter Größe zuungunsten von Mitgliedstaaten, da

¹⁸ S. IEA-Manual S.17.

¹⁹ Zu dem Abschnitt s. IEA-Manual S.20. In den IEA-Daten sollen Ausgaben der Zentral- bzw. Bundesebene ebenso betrachtet werden wie diejenigen auf „country's first administrative subdivision level“.

²⁰ Eine andere Frage ist, inwieweit sich die an die IEA meldenden Länder an das IEA-Konzept halten. Nach „IEA-Dokumentation“ (S.19) beinhalten z.B. die Zahlen Belgiens die Zahlung an die EU für deren Energieforschungsprogramme. Nach „ausgewählte Daten“ (Blatt „Info on national data systems“) ist dies bei mehreren EU-Ländern der Fall, von den aber nur Belgien unter die hier explizit berücksichtigten Länder fällt. Bei einigen von ihnen fehlt dort auch ein Eintrag, was darauf hindeutet, dass sich die IEA nicht völlig sicher ist, wie diese Staaten vorgehen. Generell sollte man sich nicht darauf verlassen, dass alle Länder sich bei ihren Meldungen an die IEA an die Vorgaben der IEA halten. Ein weiterer Sachverhalt, wo das nicht durchgehend der Fall ist, kommt weiter unten.

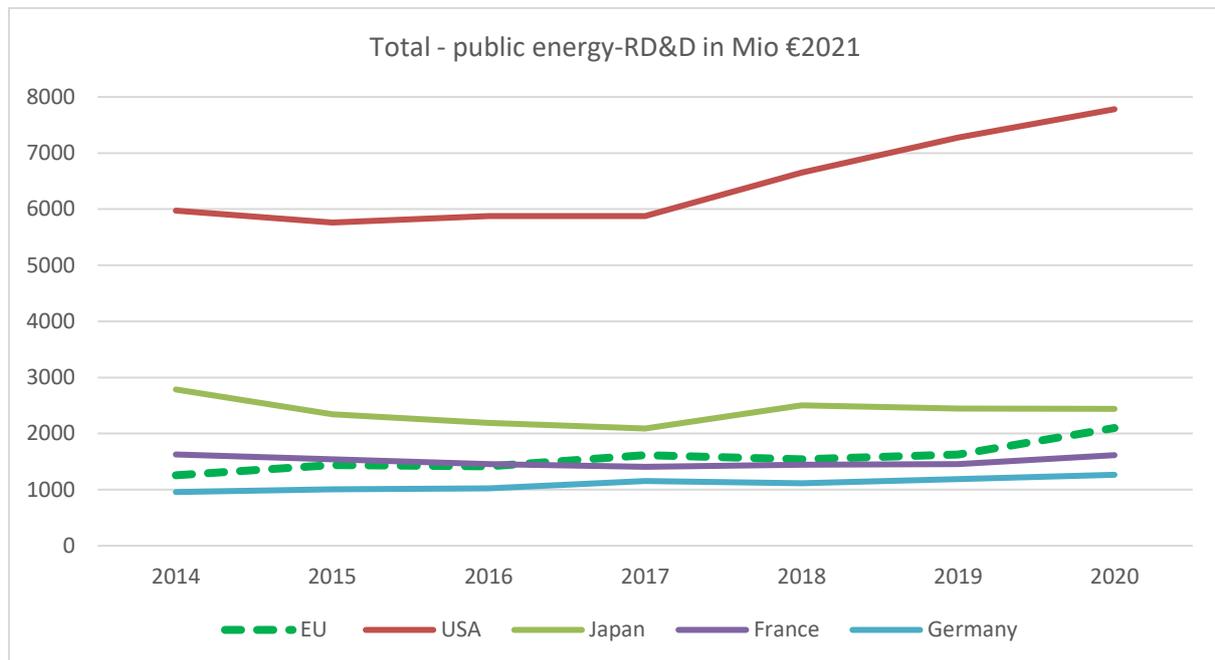
die gesamte EU-Förderung nicht – also weder auf der Budgetseite des Staates noch auf der Empfängerseite – berücksichtigt wird.

Die Frage, ob dies quantitativ bedeutend ist, kann anhand von Abbildung 1 bis Abbildung 5 beantwortet werden, die auf technologisch aggregierter²¹ Ebene die einschlägigen öffentlichen RD&D-Ausgaben der EU in den letzten Jahren zeigen und mit den entsprechenden Ausgaben der USA, Japans, Deutschlands und Frankreichs vergleichen. Zuerst können zur Übersicht die gesamten Ausgaben für die Energietechnologieforschung und -entwicklung betrachtet werden (Abbildung 1), die also auch Ausgaben für hier nicht relevante Technologien – z.B. fossile und nukleare - beinhalten. Demnach bewegen sich die EU-Ausgaben etwa auf dem Niveau derer von Frankreich und Deutschland, übersteigen diese aber mit rund 2,1 Mrd. €2021 am aktuellen Rand merklich, so dass sie sich an die ansonsten höheren Werte für Japan annähern. Für die USA sind erheblich höhere Zahlen zu finden, die grob dem vierfachen der EU-Werte entsprechen. Die Ausgaben der EU liegen damit in einer Größenordnung, die ihre Vernachlässigung als nicht mehr angemessen erscheinen lässt. Zur Absicherung und Präzisierung der Aussage werden nun noch die Werte für die hier betrachteten Technologiegruppen relevanten IEA-Gruppen angesehen. Für die IEA-Gruppe Energieeffizienz (s. Abbildung 2) sehen die relativen Werte für die EU-Ausgaben ähnlich aus wie für die gesamten Ausgaben, nur dass das EU-Budget sowohl im Verhältnis zum deutschen und französischen als auch zum japanischen etwas höher liegt. Dies verstärkt sich für die IEA-Gruppe „renewables“ (s. Abbildung 3), für die die EU-Ausgaben für die meisten Jahre die Ausgaben Japans übersteigen und auch – relativ betrachtet – deutlich dichter an die US-amerikanischen Werte heranrücken. Für die IEA-Gruppe „hydrogen and fuel cells“ (s. Abbildung 4) bewegen sich die Größen von EU und der USA in ähnlicher Bandbreite mit japanischen Ausgaben, die am aktuellen Rand deutlich höher sind. Auch das Verhältnis EU-Ausgaben zu den Ausgaben Frankreichs oder Deutschlands erhöht sich merklich. Schließlich wird in der IEA-Gruppe „other power & storage technologies“ (s. Abbildung 5) die EU gar führend, dicht gefolgt von der USA, mit sehr viel geringeren Werten für Japan, das insgesamt wenig vor Deutschland liegt. Das Verhältnis der EU-Ausgaben zu den Ausgaben Frankreichs und Deutschlands hat sich weiter erhöht.

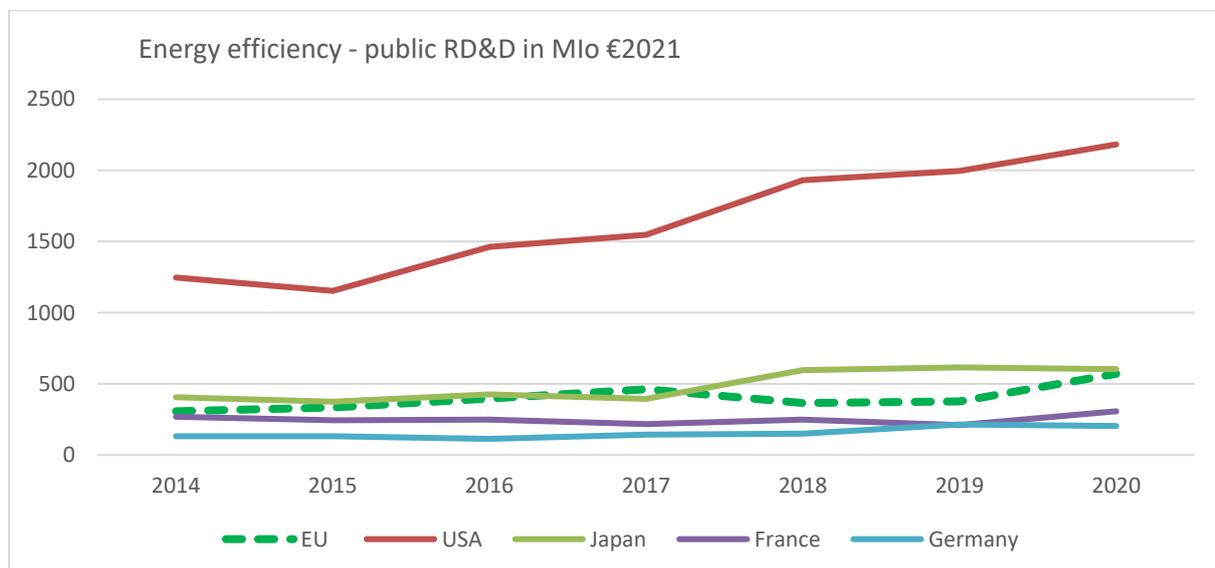
Durch die Betrachtung der IEA-Gruppen verfestigt sich der ursprüngliche Eindruck, dass die EU-Ausgaben im Vergleich zu denen anderer großer Länder (Japan und USA) und von großen

²¹ Neben den gesamten RD&D-Ausgaben für Energietechnologien werden auch hier besonders relevante 1-Steller (nach IEA: „Group“) gezeigt. Im Weiteren werden diese IEA-Gruppen genannt. Generell ist zu unterscheiden zwischen Technologien nach IEA-Systematik und „Technologiegruppen“. Letzteres bezieht sich stets auf die für das Projekt erarbeitete Technologieliste.

Mitgliedstaaten (Deutschland und Frankreich) nicht zu vernachlässigen sind. Dies gilt besonders für die IEA-Gruppen „hydrogen and fuel cells“ und „other power & storage technologies“²².

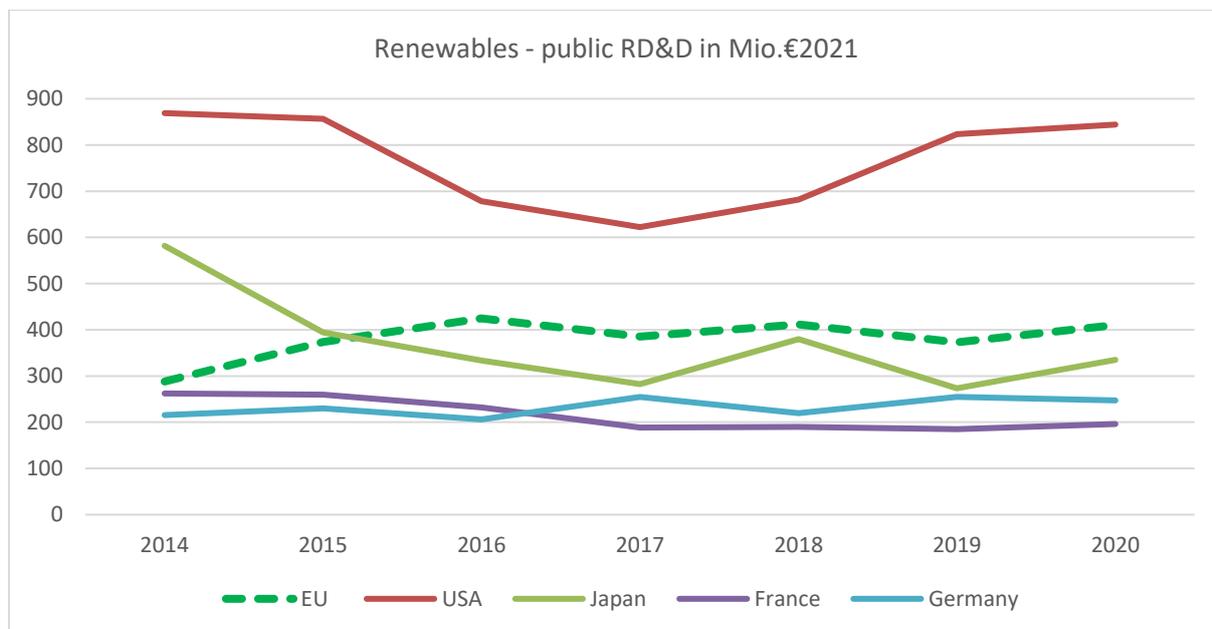


Quelle: Daten aus „IEA – ausgewählte Ergebnisse“; eigene Darstellung
 Abbildung 1: Gesamte öffentliche Ausgaben für RD&D im Energiebereich für die EU und ausgewählte Staaten



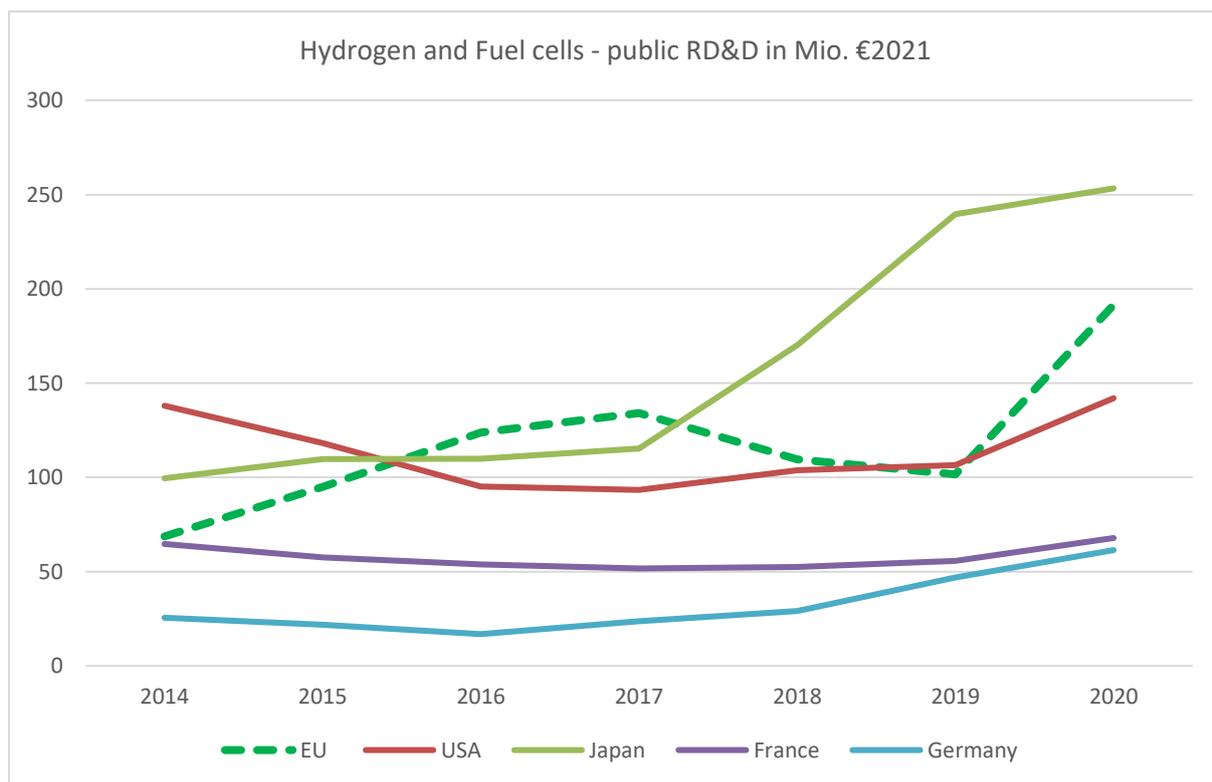
Quelle: Daten aus „IEA – ausgewählte Ergebnisse“; eigene Darstellung
 Abbildung 2: Öffentliche Ausgaben für RD&D in der IEA-Gruppe „Energieeffizienz“ für die EU und ausgewählte Staaten

²² Angesichts der möglichen Probleme bei der Interpretation von Zeitreihen aufgrund der budgetorientierten Erfassung (s.u.) wurden auch jeweils die Summen der Ausgaben für jedes Land und jede IEA-Gruppe von 2014-2020 betrachtet. Diese ergänzende Betrachtung stützt die eben getroffenen Aussagen.



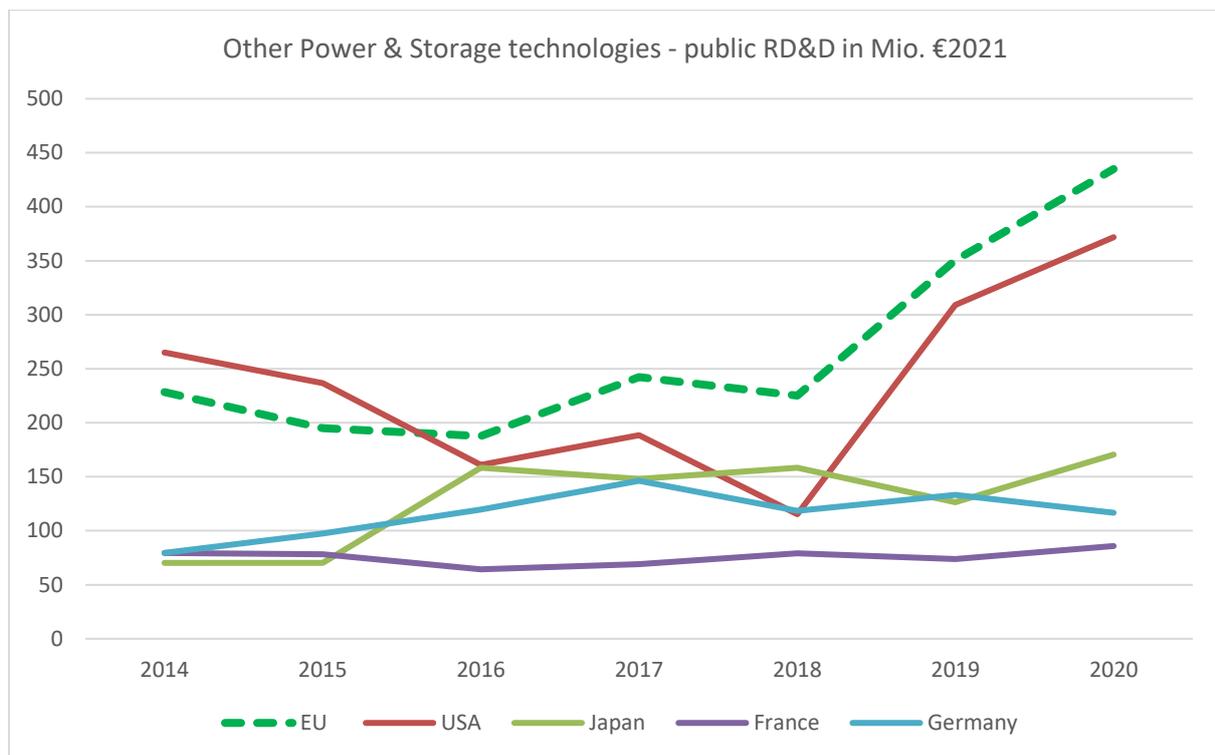
Quelle: Daten aus „IEA – ausgewählte Ergebnisse“; eigene Darstellung

Abbildung 3: Öffentliche Ausgaben für RD&D in der IEA-Gruppe „Erneuerbare Energien“ für die EU und ausgewählte Staaten



Quelle: Daten aus „IEA – ausgewählte Ergebnisse“; eigene Darstellung

Abbildung 4: Öffentliche Ausgaben für RD&D in der IEA-Gruppe „Wasserstoff und Brennstoffzellen“ für die EU und ausgewählte Staaten



Quelle: Daten aus „IEA – ausgewählte Ergebnisse“; eigene Darstellung

Abbildung 5: Öffentliche Ausgaben für RD&D in der IEA-Gruppe „andere Strom- und Speichertechnologien“ für die EU und ausgewählte Staaten

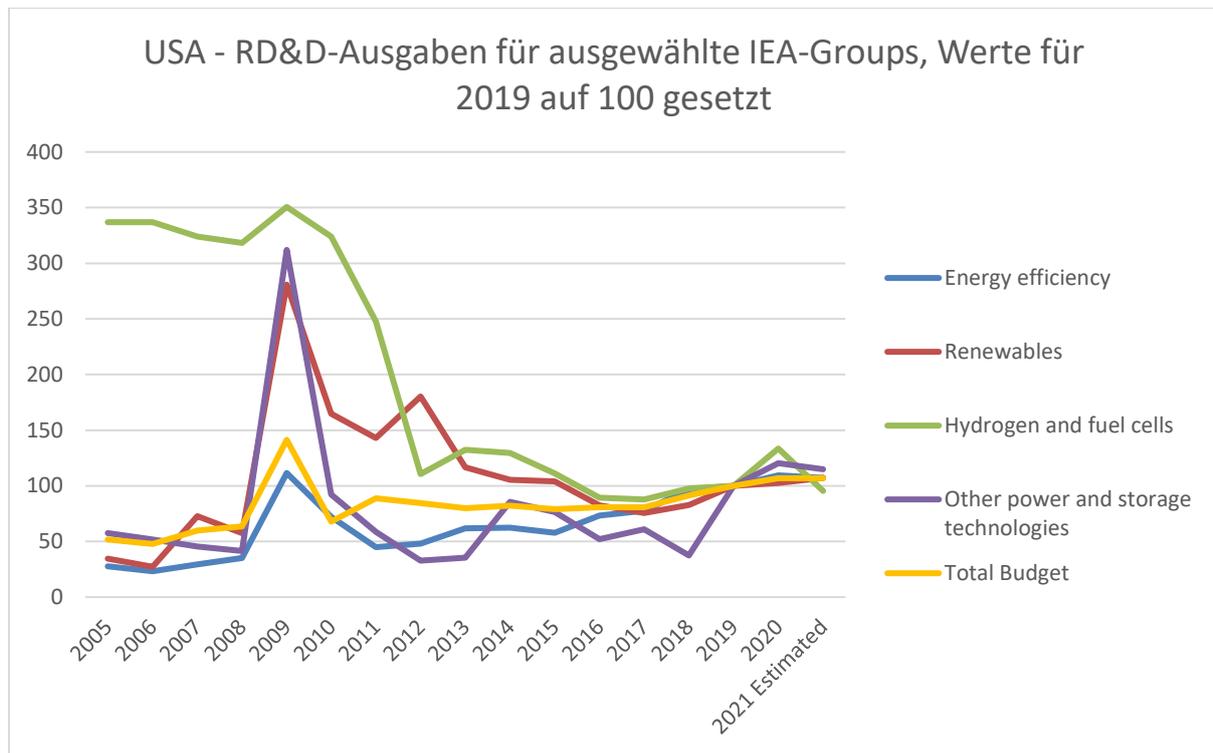
Die Daten zeigen insgesamt, dass die RD&D-Ausgaben der EU durchaus eine bedeutende Höhe erreichen können. Da deshalb nicht empfohlen werden kann, die EU-Daten zu vernachlässigen, kommt die nicht leicht zu beantwortende Frage auf, wie man mit diesen Daten umgeht. Ideal wäre es, wenn die Daten in der technologisch erforderlichen Tiefe auf Empfängerländer aufgegliedert zu finden wären. Derartige Aufteilungen dürften aber schwer zu bekommen sein. Alternativ könnte eine Zurechnung auf Basis von Anteilen der betrachteten Mitgliedsstaaten an der EU für verschiedene Indikatoren erwogen werden, z.B. BIP, Forschungsausgaben ... Eine solche Zurechnung ist allerdings nur schwer schlüssig zu begründen, ihr hängt also eine gewisse Willkür an. Ansonsten kompatibel mit dem Datenkonzept wäre eine Erfassung der Zahlungsanteile der einzelnen Mitgliedstaaten an den EU-RD&D-Ausgaben, aber auch hier dürften nicht ohne weiteres Daten zu finden sein. Eine Untersuchung der EU als eigenes Land in der Regimeanalyse kommt ebenfalls nicht in Betracht, da der Aufwand sehr erheblich wäre und die Interaktion zwischen betrachteten Mitgliedstaaten und der EU explizit berücksichtigt werden müssten, was schwierig ist. Im Weiteren werden deshalb Daten ohne die EU-Ausgaben betrachtet.

Die budgetorientierte Erfassung kann zu einem weiteren Problem führen: Unter Umständen werden über mehrere Jahre laufende Budgets im Entscheidungs- oder Startjahr komplett ausgewiesen. Dadurch wird die Interpretation von Zeitreihen problematisch da z.B. ein hoher Wert am Ende einer Zeitreihe auch einen Teil des Budgets für zukünftige Jahre enthalten kann oder

eine starke Schwankung innerhalb der Zeitreihen mitunter nicht als eine Änderung der jährlichen Ausgaben zu interpretieren ist, sondern ein Artefakt der Fristigkeit und Budgetusancen sein kann. Ein eindrückliches Beispiel ist das Jahr 2009 für die USA: In diesem Jahr wurde der „American Recovery and Reinvestment Act“ verabschiedet und voll dem Jahr 2009 zugerechnet, obwohl auch Auszahlungen in zukünftigen Jahren enthalten sind²³. Abbildung 6 zeigt den Verlauf der US-Amerikanischen RD&D-Ausgaben für einschlägige IEA-Groups. Sowohl für die gesamten RD&D-Ausgaben als auch für die meisten Gruppen sind in 2009 deutliche Ausschläge nach oben zu erkennen. Besonders kräftig sind sie für die IEA-Groups „other power and storage technologies“ und „renewables“. Für die erstgenannte Gruppe ergibt sich ein Wert für 2009, der dem 7,5-fachen des Wertes von 2008 entspricht. Er sinkt dann im Folgejahr (2010) auf ca. 30% und in 2011 auf ca. 19% des Wertes von 2009. Damit könnte z.B. eine 2010 startende Analyse die tatsächlichen Ausgaben gerade in diesem Jahr erheblich unterschätzen. Für andere Länder konnten keine derart massiven Ausschläge festgestellt werden, die wahrscheinlich auf die Art der Budgetierung bzw. die Erfassung auf einer bestimmten Stufe des Budgetprozesses zurückzuführen sind²⁴. Allerdings wurden die Zeitreihen nicht systematisch nach derartigen Vorkommnissen durchgesehen. Falls sie auftreten sollten, kann Fehlinterpretationen vorgebeugt werden, indem man Durchschnittswerte über mehrere Jahre bildet. Allerdings gehen mit einer Durchschnittsbildung möglicherweise interessante Entwicklungen – wie z.B. ein deutlicher Anstieg der Budgets - am aktuellen Rand verloren. Die nach Jahren aufgelösten Budgets werden deshalb weiterhin beachtet, aber nur in Verbindung mit maßgeblicheren Durchschnittsbildungen.

²³ S. „IEA-Dokumentation“, S. 37. In der aktuellen IEA-Dokumentation (https://wds.iea.org/wds/pdf/RDD_Documentation.pdf S.51, abgerufen am 03.06.2024) verweist hier explizit darauf, dass es sich um „a one year appropriation“ handle und „actual expenditure may go into future years“.

²⁴ Die Beschreibung zur EU in „IEA-Dokumentation“, S.37, offenbart aber, dass auch EU-Daten von dem Problem betroffen sind.



Quelle: Berechnet aus Daten aus „IEA – ausgewählte Ergebnisse“ (auf Basis der Daten in €2021); eigene Darstellung

Abbildung 6: Entwicklung der US-amerikanischen RD&D-Ausgaben von 2005-2021 für ausgewählte IEA-Groups. (Die Werte wurden auf die Werte von 2019 (entspricht 100) normiert)

Aus der IEA-Datenbank wurden Werte ab 2005 bis 2020 herangezogen²⁵. Daraus wurden Daten in heimischer Währung und laufenden Preisen extrahiert, da es sich hierbei sehr wahrscheinlich um die von den Staaten an die IEA gemeldeten Werte handelt, die noch nicht von der IEA prozessiert sind. Um sie vergleichen zu können, wurden sie in €2019 umgerechnet, wobei zuerst mittels der BIP-Deflatoren 2019-Werte in jeweiliger Währung bestimmt wurden und diese dann mit dem Jahresreferenzwechsellkurs von 2019 in Euro umgerechnet wurden (s. Kapitel 2)²⁶.

Verwendet wurden dabei die Zeitreihen der IEA-Datenbank mit den Bezeichnungen GOVTRD, STATERD und GOVTDEMO²⁷. Gewählt wurden diese Zeitreihen, da zwischen staatliche R&D-Förderung (GOVTRD) und Förderung von Demonstrationsanlagen (GOVTDEMO) unterschieden wird und dieser Unterschied für die Regimeanalyse bedeutend sein kann. Hierzu ist aber anzumerken, dass für Japan und Deutschland keine eigenen Werte zu GOVTDEMO zu finden

²⁵ Für 2021 gibt es in der verwendeten Version der Datenbank nur für Deutschland Einträge.

²⁶ Grundsätzlich ist als Weg z.B. auch möglich, erst die Landeswährungen in Euro umzurechnen und dann mit dem EURO-BIP-Deflator die Werte auf €2019 zu bringen. Dabei entstehen mitunter bedeutende Abweichungen zum gewählten Weg. Darüber hinaus sind dann auch kurzfristige größere Schwankungen zu beobachten, die aus den Schwankungen der Wechselkurse resultieren. Da fraglich ist, wie schnell Produktion und internationaler Handel auf schwankende Wechselkurse reagieren, wurde der beschriebene Weg gewählt.

²⁷ Zu STATEDEMO gab es keinen Eintrag für die relevanten Länder und Technologien.

sind. Laut Länderbeschreibung („IEA-Dokumentation“ S.25 und S.28) kann davon ausgegangen werden, dass für Deutschland RD&D-Zahlen angegeben sind, für Japan bleibt aus der dortigen Beschreibung unklar, ob R&D- oder RD&D-Daten an die IEA geliefert wurden. Jedenfalls ist die Vergleichbarkeit der Zahlen dieser beiden Länder mit anderen Ländern entweder für RD&D-Ausgaben oder für R&D-Ausgaben für alle Technologiegruppen beeinträchtigt²⁸. Für die Auswertung im Rahmen der quantifizierten MLP-Analyse für die Fokusländer und -technologien wurden letztlich vor allem die gesamten RD&D-Ausgaben herangezogen, da eine Trennung von Demonstrations- und anderen Forschungs- und Entwicklungsausgaben für drei der vier (bzw. eingeschränkt fünf)²⁹ ausgewählten Länder nicht möglich war.

Generell sollen laut IEA auch die RD&D-Ausgaben staatlicher Unternehmen („state-owned enterprises“) berücksichtigt werden³⁰. Für die explizite Ausweisung der R&D-Ausgaben staatlicher Unternehmen hat die IEA die Variable STATERD eingeführt. Ein expliziter Werteeintrag für diese Variable findet sich allerdings nur für Italien. Zu beachten ist aber, dass staatliche Unternehmen nach IEA u.U. auch direkt unter GOVT... berücksichtigt werden können. Inwieweit für die anderen betrachteten Länder staatliche Unternehmen relevant und enthalten sind, konnte nicht für alle Länder geklärt werden³¹. Deshalb wurde für Italien für R&D auch STATERD mitberücksichtigt. Allerdings sind für Österreich und Frankreich Ausgaben staatlicher Unternehmen nicht in den Werten enthalten³². Insofern ist mit Inkonsistenzen in den Daten zu rechnen. Jedenfalls zeigt sich auch hier, dass sich die Ländermeldungen mitunter nicht komplett an die Systematik der IEA laut „IEA-Manual“ halten³³.

Schließlich ist darauf zu verweisen, dass auch aufgrund von Änderungen der Erfassung Brüche in den Zeitreihen entstehen können. Z.B. sind für Japan ab 2018 auch Budgets des Ministry of Environment enthalten; für Deutschland ist zwischen 2003 und 2017 die institutionelle Förderung von Helmholtz-Zentren auf Technologien alloziert enthalten, ab 2018 wird diese Förderung – soweit sie nicht nuklear ist – der Kategorie - unallocated zugeordnet; ab 2019 hat

²⁸ Mitunter ergeben sich dabei auch Unterschiede zwischen einzelnen Jahren: So beinhalten die Daten für die USA im Jahr 2012 sowohl R&D als auch Demonstrationen (IEA-Dokumentation, S.37)

²⁹ Zu den Ländern s. Kapitel 2.

³⁰ S. „IEA-Manual“ S.19; dort auch die Begründung, warum RD&D-Ausgaben staatlicher Unternehmen unter öffentlichen Ausgaben subsumiert werden sollten, sowie der Hinweis, dass u.U. eine Subsumierung unter GOVTRD und GOVTDEMO angezeigt ist.

³¹ Z.B. fehlen in „IEA-ausgewählte Ergebnisse“, Blatt „Info on national data systems“ für viele Länder diesbezügliche Angaben.

³² S. „IEA-ausgewählte Ergebnisse“, Blatt „Info on national data systems“ sowie „IEA-Dokumentation“ S.18 und S.24.

³³ Ein weiteres Beispiel dürften die Zahlungen an internationale Organisationen für eine Energieforschung sein, die laut IEA enthalten sein sollten, aber z.B. von Deutschland und Österreich nicht berücksichtigt werden. (s. S. „IEA-ausgewählte Ergebnisse“, Blatt „Info on national data systems“)

Deutschland eine „new categorization of energy research funding“ eingefügt; für die USA beruhen allein die Daten zwischen 2012 und 2015 auf Meldungen US-amerikanischer Behörden, in den andern Jahren auf Schätzungen der IEA. Wie bedeutend derartige Änderungen auf Seiten der meldenden Staaten sind, konnte nicht bestimmt werden. Jedenfalls ist es angezeigt, bei deutlichen Brüchen in den Zeitreihen einen Blick in die Metadaten zum fraglichen Land zu werfen.

3.3.1.2 Zur Zuordnung von IEA-Technologien in der RD&D-Datenbank zu Technologiegruppen

Um die IEA-Daten projektorientiert auswerten zu können, muss die Technologiesystematik der IEA der Systematik der Technologiegruppen zugeordnet werden. Die IEA-Systematik enthält zur eindeutigen Zuordnung eine Nummerierung bis zu 4-Stellern³⁴, wobei die Meldung der 3-Steller und 4-Steller optional ist³⁵. Auf jeder Ebene gibt es dann die Kategorie „unallocated“, in die Werte einzutragen sind, sofern eine Aufteilung auf andere Positionen der gleichen Gliederungstiefe nicht möglich erscheint. Sie ist unmittelbar an der Endziffer „9“ zu erkennen. Tabelle 6 zeigt die Zuordnung der IEA-Systematik (in Nummern³⁶) zu den Technologiegruppen.

Technologiegruppe	IEA: Technologie in RD&D-Systematik (Nummern) (bestmöglich)	IEA: Technologien in RD&D-Systematik (Nummern)(für Datenauswertung verwendet)
Windkraft	321, 322, evtl. 323	32 (d.h. inklusive 323 und 329)
Solar	312, 313 (Teil von 319)	312, 313, 319
Batterien (stationär)	6311 (Teil von 639)	6311
CCUS und CO ₂ -Infrastruktur	23	23
Biomasse	34	34
E-Mobilität (inkl. Batterien für den mobilen Einsatz)	1311, 1312, 1314	1311, 1312, 1314
Wasserstoff	51	51
Wasserkraft	36, Teil von 6313 (Teil von 639)	36, 6313
Wärmespeicher	632, Teil von 639	632, 639
Brennstoffzellenfahrzeuge	522, Teil von 529	522, 529
Wärmepumpen	144	144
Effizienz in der Industrie	11, 141	11

³⁴ Mitunter werden 3-Steller nicht mehr weiter unterteilt.

³⁵ „IEA-Manual“, S.26. Dort auch: „... every effort should be made to avoid using the unallocated rows and to divide budgets/expenditures into “normal” categories whenever possible“.

³⁶ Zur Beschreibung der Technologien zu den IEA-Nummern s. „IEA-Manual“.

Technologiegruppe	IEA: Technologie in RD&D-Systematik (Nummern) (bestmöglich)	IEA: Technologien in RD&D-Systematik (Nummern)(für Datenauswertung verwendet)
Übertragung und Verteilung (Strom)	62	62
Gebäudetechnologien	12 ohne 123	12

Tabelle 6: Zuweisung der Technologien nach IEA-Systematik für RD&D zu Technologiegruppen (Technologiebeschreibungen zu den Nummern liefert das „IEA-Manual“)

Diese Zuordnung ist – wie zu erwarten – nicht immer passgenau. Hier sollen nun nicht alle Technologiegruppen und die ihnen zugeordneten IEA-Technologien durchgegangen werden. Anhand von Beispielen soll aber ein gewisser Eindruck weitergegeben werden. Dabei wird auch auf die tiefere Technologiegliederung der in diesem Projekt verwendeten Technologiegruppen geachtet.

Ein Problem stellen IEA-Technologien dar, die mehreren Technologiegruppen zuzuordnen sind. Vornehmlich ist die Abgrenzung zwischen E-Mobility und Brennstoffzellenfahrzeugen betroffen. Die dort aufgeführte 522 enthält die Brennstoffzelle selbst. Die 1311 bei E-Mobility umfasst neben Batterien im mobilen Einsatz auch Wasserstoffspeicher und in 1312 ist auch die Steuerung von Brennstoffzellen neben der von Batterien enthalten. Diese zwei Unterpunkte enthalten also Teile, die Brennstoffzellenfahrzeugen zuzuordnen sind, ebenso wie Teile, die zu batterieelektrischen Fahrzeugen gehören. Eine Aufteilung ist nicht möglich. Hier wurden sie unter E-Mobilität subsumiert, man könnte sie aber grundsätzlich auch den BZ-Fahrzeugen zuordnen. Eine Zuordnung auf beide wurde nicht durchgeführt, da in der Summe für ein Land dann unerwünschte Doppelzählungen in den RD&D-Ausgaben auftreten. Grundsätzlich könnte aber für einen Ländervergleich einer gegebenen Technologiegruppe entschieden werden, die fraglichen Positionen in beiden Technologiegruppen zu berücksichtigen. Für die folgende quantitative Auswertung für die Fokusbänder und -technologien war dies dann von untergeordneter Bedeutung da nur Elektro-PKW nicht aber Brennstoffzellenfahrzeuge berücksichtigt wurden.

Tendenziell sind die zugeordneten IEA-Technologien umfassender als die Technologiegruppen, was bezogen auf die Technologiegruppen zu überhöht ausgewiesenen RD&D-Ausgaben führt. Erläutert sei dies beispielhaft an der Technologiegruppe „Solar“, die sich zusammensetzt aus PV sowie solarthermischen Parabolrinnen- und Turmkraftwerke. Unter „bestmögliche“ Zuordnung (Spalte 2, Tabelle 6) sind die Nummern 312 und 313 genannt.

312 bezieht sich auf PV-Anlagen, was einigermaßen zur Technologiegruppe passt. Allerdings stellt sich bei einem genaueren Blick auf die der Technologiegruppe hinterlegten Technologien

heraus, dass die Technologiegruppe nicht alle PV-Technologien umfasst. Wesentlich für diesen Unterschied – was dann auch für andere Technologiegruppen zutrifft – dürfte sein, dass im Rahmen der Bestimmung der Technologiegruppen der TRL als Filter verwendet wurde und nur Technologien mit einem TRL größer als vier weiter betrachtet wurden. RD&D wird naturgemäß auch Technologien betreffen, deren TRL kleiner/gleich vier ist. Das impliziert, dass die IEA-Daten regelmäßig Technologien umfassen dürften, die nicht in der finalen Technologieliste dieses Projekts enthalten sind.

313 umfasst alle Hochtemperaturanwendungen. Neben den oben genannten Kraftwerkstypen sind demnach z.B. Fresnel-Kraftwerke und Stromerzeugung mittels Parabolspiegel enthalten. Ergänzend sind zudem außer der solarthermischen Stromerzeugung auch andere Hochtemperaturanwendung dort subsumiert, z.B. also die unmittelbare Nutzung der Hochtemperaturwärme als Prozesswärme sowie deren Nutzung für photochemische Prozesse³⁷. Insofern ist die IEA-Abgrenzung etwas zu weit gefasst. Wenn man nur den einschlägigen 2-Steller (31 „solar energy“) berücksichtigt, kommt ergänzend noch die Nutzung solarer Niedertemperatur³⁸ hinzu. In 319 sind zum einen dann noch andere, bisher nicht genannte Technologien enthalten oder Forschungen, die mehrere der genannten Technologien betreffen und deshalb nicht auf die explizit beschriebenen Technologien aufgeteilt werden können. Vor allem aber ist damit zu rechnen, dass sämtliche Forschungsausgaben zu 31 bei 319 landen, sofern der meldende Staat – mitunter auch nur für einige Jahre - keine Aufteilung auf die einzeln genannten Solartechnologien durchführt. Auch dies ist ein generelles über die Technologiegruppe „Solar“ hinausgehendes Problem. Verwendet wurden letztlich tendenziell die übergeordneten, zu weiten Abgrenzungen, da die Anzahl der abgedeckten Länder und Jahre mit detaillierteren Abgrenzungen sinkt. Für einen Ländervergleich ist der Fehler dann nicht, falls der Anteil der enthaltenen nichtzugehörigen Technologien gleich ist. Letzteres kann man natürlich nicht empirisch aus diesen Daten ableiten.

Zur Technologiegruppe „Wasserkraft“ passt erstmal die Nummer 36 gut. In der Technologiegruppe sind aber auch Pumpspeicher genannt. Diese finden sich in der Subgruppe 6313. Ihr sind alle mechanischen Stromspeicher zugeordnet, also z.B. auch Druckluftspeicher. Eine weitere Aufteilung der eingetragenen Werte ist nach IEA-Systematik nicht vorgesehen. Demnach ist die Abgrenzung zu weit. Gewichtiger ist, dass man für die Erfassung der Technologiegruppe auf einen 4-Steller angewiesen ist, für den mitunter keine Daten ausgewiesen werden. Für

³⁷ „Solar chemistry based on photochemical processes (e.g. for water detoxification)“ (IEA-Manual, S.52).

³⁸ „solar heating and cooling“ (311)

Länder, die dort keinen Wert ausweisen und vielmehr die gesamten Ausgaben für Stromspeicher (Nr. 631) unter „unallocated“ (6319) zusammenfassen, wird mithin ein zu niedriger Wert ausgewiesen. Eine ersatzweise Betrachtung einer übergeordneten Nummer, um mehr Daten zu erhalten, verbietet sich hier, da die übergeordnete Kategorie 631 (Stromspeicher) viel zu weit ist und vor allem auch Batterien für den stationären Einsatz (6311) beinhaltet, was eine eigenständige Technologiegruppe ist, für die dann ebenfalls eine Abgrenzung auf Basis von 3-Stellern problematisch ist. Das belegt nochmal, dass man für eine passende Abgrenzung mitunter auf 4-Steller angewiesen ist. Unter dem dazugehörigen 2-Steller (63 „Energy storage (non-transport applications)“) sind neben den elektrischen (631) auch die thermischen Speicher (632) enthalten, die eine eigene Technologiegruppe darstellen. Daneben ist noch „unallocated“ (639) zu finden, das auch als Sammelposition bei einer unterlassenen Zuordnung auf elektrische oder thermische Speicher dient, und damit mitunter RD&D-Ausgaben für alle betrachteten Speicherarten enthalten kann.

Dies mag genügen, um einen Eindruck zu vermitteln, welche Probleme im Zuge der Zuordnung der IEA-RD&D-Technologiesystematik auf Technologiegruppen bestehen. Bevor zu den Zahlen aus den Übersichtsrechnungen übergegangen werden kann, ist noch zu bestimmen, wie mit den problematischen Zuordnungen umgegangen wurde. Die gewählte Zuordnung für die vorläufige Auswertung der IEA-RD&D-Daten ist in Tabelle 6, Spalte 3, dargelegt. Grundsätzlich orientiert sich die Zuordnung an der bestmöglichen in Tabelle 6, Spalte 2. Für einige problematische Positionen wurde eine eher weite Abgrenzung gewählt, womit die folgende Untersuchung und Diskussion zur Datenverfügbarkeit eher optimistisch ausfällt.

3.3.1.3 Zu den ausgewiesenen Daten für die ausgewählten Länder und Technologiegruppen

Nachdem nun konzeptionelle und Zuordnungsfragen behandelt wurden, kann man sich unter den daraus sich ergebenden Caveats und Maßgaben den eigentlichen Daten zuwenden. Für die oben genannten Länder und den eben näher bestimmten IEA-Technologien werden nun die Ergebnisse der Auswertung der Daten der IEA für RD&D-Ausgaben im Zeitraum 2005-2020 dargelegt. Die zentrale Frage dabei ist, inwieweit die Daten geeignet sind, a) einzelne Ausgaben für bestimmte Technologiegruppen zwischen den Ländern (hierzu 3.3.1.3.1) und b) Ausgaben für verschiedene Technologiegruppen in einzelnen Ländern (hierzu 3.3.1.3.2) zu vergleichen. Beide Perspektiven beziehen sich dabei grundsätzlich auf die gleichen Datenprobleme, stellen sie aber in einen anderen Kontext. Verwendet werden RD&D-Daten. Für R&D-Daten, die auch betrachtet wurden, ergeben sich für die hier diskutierte Brauchbarkeit der Daten keine anderen Schlussfolgerungen. Dargelegt werden dabei nicht die detaillierten Ergebnisse für alle Technologiegruppen bzw. Länder im Einzelnen. Vielmehr werden beispiel-

hafte Ergebnisse gezeigt und dann kurze Notizen zu anderen Technologiegruppen bzw. Ländern, für die ähnliches zu beobachten ist, gegeben. Eine Beschreibung oder Interpretation der Ergebnisse ist nicht intendiert. Das Ziel ist allein eine Einschätzung der Brauchbarkeit der Daten, also eine einer Beschreibung oder Interpretation vorlaufende Überlegung.

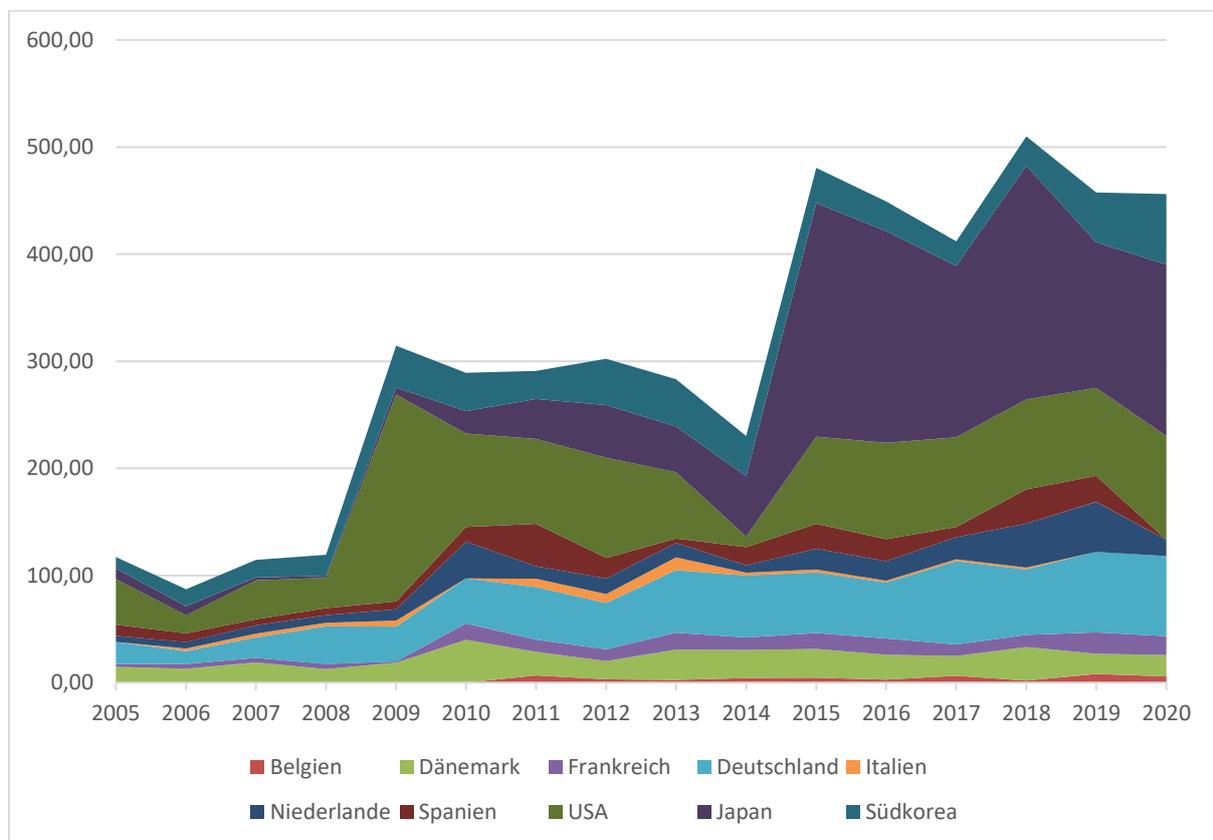
Zwei Vorbemerkungen seien noch erlaubt: Zum ersten ist darauf hinzuweisen, dass in den IEA-Daten nicht zwischen einem Eintrag von Null und einer fehlenden Meldung unterschieden wird. Vieles spricht dafür, dass es sich überwiegend um fehlende Meldungen in der vorgegebenen Tiefe handelt. Die Brauchbarkeit der Daten für den Regimevergleich ist damit maßgeblich von der Datenverfügbarkeit innerhalb des IEA-Datensatzes geprägt. In der Diskussion wird vereinfachend angenommen, dass es sich um fehlende Daten handelt, auch wenn für einzelne Positionen ein Wert von Null durchaus möglich erscheint. Zum zweiten zeigt sich in den Daten an vielen Stellen, dass zwar Daten für 2-Steller vorliegen, bei 3- oder 4-Stellern aber erhebliche Lücken auftauchen können³⁹. Das dürfte auch damit zusammenhängen, dass eine Meldung an die IEA von 3- und 4-Stellern optional ist und deshalb bevorzugt an diesen Stellen keine Meldung erfolgt. Tendenziell ist die Datenlage für Technologiegruppen, die auf 3- oder 4-Stellern beruhen, deshalb problematisch.

3.3.1.3.1 Diskussion nach Technologiegruppen

Zu Anfang sei das Beispiel einer Technologiegruppe betrachtet, für die letztlich gute Daten für einen internationalen Vergleich innerhalb der IEA-Daten vorliegen: Es handelt sich um Windkraft (s. Abbildung 7 und Abbildung 8). Letztlich sind die Daten geeignet, um sowohl die absolute als auch die relative Bedeutung der RD&D-Ausgaben zwischen den Ländern zu vergleichen. Eine Regimeanalyse könnte also an den Zahlen in den Grafiken ansetzen. Ab 2011 zeigen sich nur für Italien (für die Jahre 2019 und 2020) sowie für Spanien (2020) Datenlücken. Die können aber in der Tat bedeutsam sein, wenn man den Durchschnitt aktuell vergangener Jahre als Indikator heranziehen will. Eine praktikable Lösung scheint aber möglich, indem dann für diese Länder nur die Jahre eingehen, für die Daten vorliegen. Datentechnisch problematisch wird es allerdings, wenn man an einer tieferen Gliederung interessiert, wobei hier vor allem an Wind-onshore (321) und Wind-offshore (322) zu denken ist. Entsprechende Zahlen liegen für Deutschland erst ab 2019 vor, für Italien und Südkorea überhaupt nicht, für die Niederlande und Spanien gibt es insgesamt nur je einen Wert (für offshore, 2020 bzw. für offshore 2017) und für die USA ab 2011 keinen Wert. Damit dürfte eine vertiefende Diskussion zu Wind-Onshore- und -Offshore-RD&D in einem Ländervergleich kaum möglich sein.

³⁹ Datentechnisch schaut das dann so aus, dass der Eintrag z.B. eines 2-Stellers komplett dem untergeordneten 3-Steller mit 9 am Ende (also „unallocated“) zugeordnet wird. Der Eintrag auf der Ebene von 3-Stellern enthält damit keine zusätzlichen Informationen zum 2-Steller.

Sehr ähnliches – mit ähnlichen Schlussfolgerungen, auch zu einer tieferen Auflösung – zeigt sich für die Technologiegruppen „CCUS und CO₂-Infrastruktur“, „Biomasse“, „Wasserstoff“⁴⁰, „Übertragung und Verteilung“, „Gebäudetechnologien“, „Effizienz in der Industrie“⁴¹ und „Solar“. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um 2-Steller mit einer potentiellen Vertiefung auf 3-Steller. „Solar“ und „Heat storage“ ist auf Basis von 3-Stellern definiert, wobei durch die Inklusion von „unallocated“ (319 bzw. 639) eine Ähnlichkeit zu einer Definition auf Basis von 2-Stellern besteht, wodurch z.B. in die Technologiegruppe Wärmespeicher auch teilweise Forschungsausgaben für Stromspeicher einfließen dürften. Würde man 639 hier nicht berücksichtigen, wären Daten für Wärmespeicher nur eingeschränkt verfügbar (z.B. gar nicht für Südkorea, die USA und Italien).

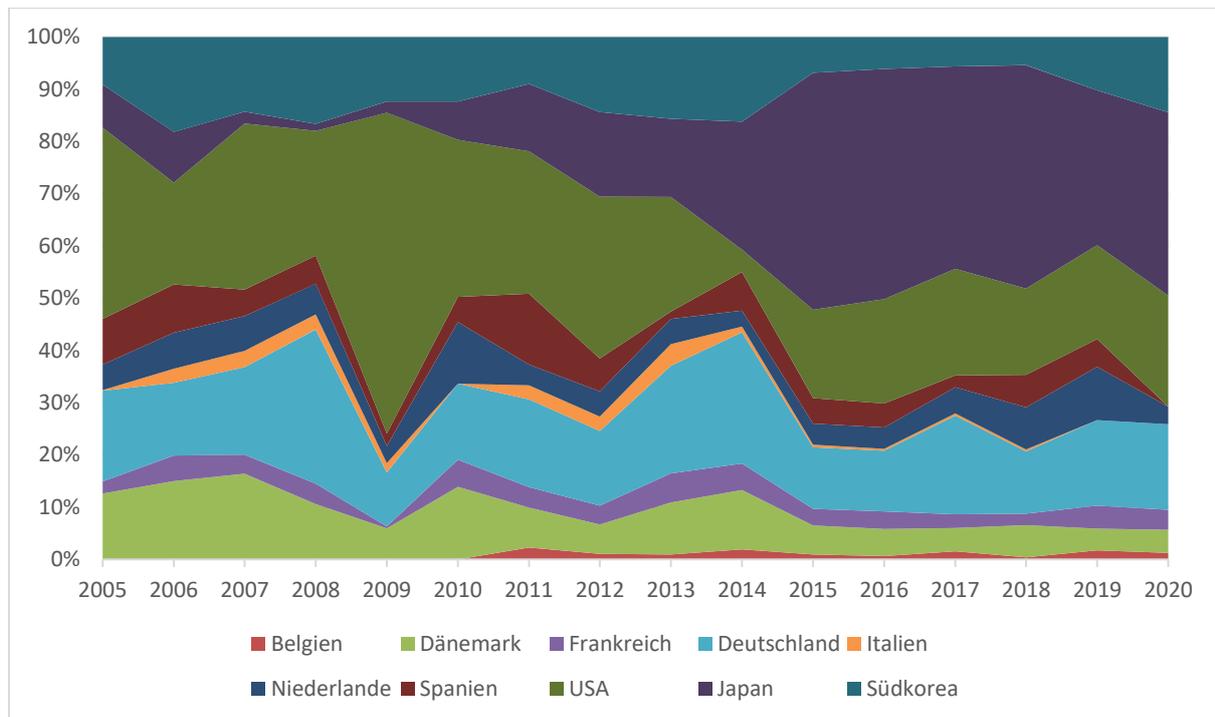


Quelle: Daten: IEA und eigene Berechnungen, eigene Darstellung

Abbildung 7: Entwicklung der RD&D-Ausgaben für Windkraft (32) in den zehn betrachteten Ländern 2005-2020 (in Mio. €2019)

⁴⁰ Allerdings mit etwas größeren Datenlücken, von denen ein Fehlen von Daten für die USA ab 2016 die mit Abstand gravierendste ist.

⁴¹ Für diese Technologiegruppe, für die hier nur ein 2-Steller betrachtet wurde, wurde nicht nachgesehen inwieweit Daten für 3-Steller zu finden sind. Für die Abwärmenutzung (141), die ergänzend hinzugezogen werden könnte, ergibt sich Ähnliches wie für die Betrachtung der 3-Steller im Windkraftbereich. D.h. ein halbwegs vollständiger Ländervergleich ist für die Abwärmenutzung kaum möglich. Damit würde auch ein Vergleich der Summe aus Position 11 und 141 problematisch, da dann faktisch für einige Länder die Abwärmenutzung berücksichtigt wird und für andere nicht. Gleiches gilt für Wasserkraft und die dortige Berücksichtigung von Pumpspeicher.



Quelle: Daten: IEA und eigene Berechnungen, eigene Darstellung

Abbildung 8: Anteile der zehn für Windkraft (32) betrachteten, in den IEA-Daten enthaltenen Länder an den gesamt RD&D-Ausgaben für Windkraft dieser Länder von 2005-2020

Für die anderen Technologiegruppen sind nur eingeschränkte Ländervergleiche möglich, wobei sich die Einschränkungen je nach Technologiegruppe stark unterscheiden können. Z.B. fehlen für Wärmepumpen (144) alle Angaben vor 2010; gewichtiger ist jedoch, dass keine Daten für Italien, die USA und Südkorea enthalten sind, und für Deutschland und Niederlande nur für jeweils ein Jahr mit unterschiedlichen Jahren (2019 bzw. 2020). Damit fehlen potentiell wichtige Staaten und ein Vergleich kann nicht auf einem einheitlichen Jahr und nicht ohne weiteres auf einer Durchschnittsbildung über mehrere Jahre der jüngeren Vergangenheit beruhen. Ähnliches gilt für die Technologiegruppe Batterien, wobei dort Daten für die USA zu finden sind, allerdings keine ab 2016, was in etwa auch der Datenlage für die Technologiegruppe E-Mobilität entspricht.

Für Wasserkraft sieht es ein wenig besser aus: Dort fehlen mitunter nur aktuelle Daten für einige Länder (Italien, Niederlande und Japan). Die Inklusion von „Pumpspeicher“ ist aber problematisch (s.o.). Grundsätzlich das Gleiche gilt für „Brennstoffzellenfahrzeuge“, wobei sich die verfügbaren Daten deutlich reduzieren würden, wenn nur 522 und nicht auch 529 beachtet würden (s. auch obige Diskussion zu „Heat storage“ und „Solar“).

Technologiegruppe	Datenverfügbarkeit für internationalen Vergleich	Anmerkung
Windkraft	Gut	In tieferer Gliederung problematisch
Solar	gut	falls Erweiterung um „unallocated“ akzeptiert; ansonsten eingeschränkte Verfügbarkeit
Batterien (stationär)	Stark eingeschränkt	Für mehrere Länder fehlende oder nur sporadische Daten
CCUS und CO ₂ -Infrastruktur	Gut	In tieferer Gliederung problematisch
Biomasse	Gut	In tieferer Gliederung problematisch
E-Mobilität (inkl. Batterien für den mobilen Einsatz)	Stark eingeschränkt	Für mehrere Länder fehlende oder nur sporadische Daten
Wasserstoff	Gut	In tieferer Gliederung problematisch
Wasserkraft	Eingeschränkt	Pumpspeicher problematisch
Wärmespeicher	gut	falls Erweiterung um „unallocated“ akzeptiert; ansonsten eingeschränkte Verfügbarkeit
Brennstoffzellenfahrzeuge	eingeschränkt	falls Erweiterung um „unallocated“ akzeptiert; ansonsten stark eingeschränkte Verfügbarkeit
Wärmepumpen	Stark eingeschränkt	Für mehrere Länder fehlende oder nur sporadische Daten
Effizienz in der Industrie	Gut	In tieferer Gliederung problematisch
Übertragung und Verteilung (Strom)	Gut	In tieferer Gliederung problematisch
Gebäudetechnologien	Gut	Bei genauerer Zuordnung (s. Tabelle 6; Spalte 2) problematisch, In tieferer Gliederung problematisch

Tabelle 7: Einschätzung der Datenverfügbarkeit von IEA-RD&D-Daten für einen Ländervergleich der Technologiegruppen

In Tabelle 7 sind die Einschätzungen der Datenverfügbarkeit für einen Ländervergleich der IEA-RD&D-Daten für jede Technologiegruppe im Überblick zusammengefasst gegeben.

3.3.1.3.2 Diskussion nach Ländern

Für einen Vergleich der relativen Bedeutung einer Technologiegruppe in einem Land kann die Datenverfügbarkeit noch aus einem zweiten Blickwinkel betrachtet werden. Die Frage ist dabei, inwieweit es die verfügbaren Daten erlauben, den Anteil jeder Technologiegruppe eines Landes an den einschlägigen gesamten RD&D-Ausgaben für alle betrachteten Technologiegruppen zu bestimmen⁴².

Frankreich ist das Land, für das die beste Verfügbarkeit der hier relevanten Daten gegeben ist. Grundsätzlich sind dort ab ca. 2010 für R&D-Ausgaben alle Positionen auch auf der Ebene von 3- bzw. 4-Stellern befüllt. Auch für Österreich liegt ein ähnlich guter Datensatz vor⁴³.

Ab meistens 2011, mitunter 2014, liegen für Belgien im Allgemeinen über die Jahre und IEA-Technologien brauchbare Daten vor. Im Einzelnen aufscheinende Lücken für einzelne Jahre, sollten die Vergleichbarkeit zwischen den Technologien für dieses Land nicht erheblich beeinträchtigen⁴⁴.

Nach ca. 2009 sind für die meisten Technologiegruppen für Deutschland erst wieder in den letzten Jahren Zahlen zu 3- oder 4-Stellern angegeben. Eine Ausnahme ist „Solar“ mit einer durchgehenden Zuordnung auf 3-Steller, weitere sind „Wasserstoff“ und „Wärmespeicher“ mit einer solchen Zuordnung ab 2014. Für Wärmepumpen resultiert daraus ein einziger Eintrag im Jahr 2019. Ansonsten sind detailliertere Werte i. Allg. für die Jahre 2019 bis 2021 abgebildet, so dass am aktuellen Rand eine gute Vergleichbarkeit gegeben sein dürfte, wobei zu bedenken ist, dass nur für Deutschland Werte für das Jahr 2021 enthalten sind und diese wahrscheinlich vorläufig sind.

Für Italien ist nichts zu „Batterien“, „E-Mobilität“ und „Wärmepumpen“ zu finden. Daneben fehlen regelmäßig Daten für aktuelle Jahre: Z.B. für „Wasserkraft“ ab 2013, für „Übertragung und Verteilung“ ab 2016, für Gebäudetechnologien ab 2019, ebenso für „Effizienz in der Industrie“, „Brennstoffzellenfahrzeuge“, „Wärmespeicher“, „Wasserstoff“, „Biomasse“, „CCUS...“, „Solar“ und „Windkraft“, was nicht nur die aktuelle Entwicklung verschleiert, sondern auch die Möglichkeit einschränkt, Durchschnitte aktueller Jahre zu berechnen, um mög-

⁴² Als Bezugszahl könnte man auch die gesamten RD&D-Ausgaben im Energiebereich oder die gesamten RD&D-Ausgaben eines Landes erwägen. Die folgende Diskussion gilt aber unabhängig von der Wahl des Nenners, da stets die einschlägigen den Technologiegruppen zugerechneten RD&D-Ausgaben im Zähler benötigt werden.

⁴³ Wobei Österreich, wie gesagt, nur für die Technologiegruppe Wasserkraft relevant ist.

⁴⁴ Ähnliches gilt für Dänemark, wobei für wenige Technologiegruppen aktuelle Werte fehlen oder spärlich angegeben sind (für „Brennstoffzellenfahrzeuge“, „E-Mobilität“, „CCUS“ und „Batterien“). Für Dänemark wird in der Regimeanalyse aber nur „Windkraft“ berücksichtigt. Für die Technologiegruppe sind gute Daten vorhanden.

liche Probleme aufgrund der budgetorientierten Erhebung zu mildern. Da ergänzend noch Lücken in den verbleibenden Zeitreihen vorhanden sind, wird es fraglich, ob ein passabler Technologiegruppenvergleich für dieses Kriterium in Italien möglich ist.

Die Daten der Niederlande fallen dadurch auf, dass häufiger v.a. für 3- oder 4-Steller nur äußerst sporadisch Eintragungen vorliegen. Z.B. gibt es für Batterien im stationären Einsatz nur einen Eintrag für 2020; für E-Mobilität nur einen Eintrag zu 1314 im Jahr 2020, zu Wasserkraft nur einen für 2017⁴⁵, für Wärmepumpen nur einen für 2020. Das dürfte auch einen Vergleich der Bedeutung der Technologiegruppen in den Niederlanden erheblich erschweren.

Spanien ist eigentlich nur für Windkraft relevant, für die Daten bis 2019 vorliegen, die allerdings nicht nach On- und Offshore aufgeteilt sind. Eine Einordnung der öffentlichen RD&D-Ausgaben für Windkraft in diejenigen für Energiewendetechnologien wäre wünschenswert. Hierzu erscheinen aber die Angaben für die anderen Technologiegruppen als sehr lückenhaft. Z.B. fehlen Angaben zu Batterien und Wärmepumpen, zu E-Mobilität gibt es nur für 2012 einen Eintrag für einen Teil der relevanten IEA-Technologien und für einige andere Technologien sind für mehrere Jahre keine Werte zu finden., was es erschweren dürfte einen passenden Referenzzeitraum für einen Vergleich zu finden.

Ab 2016 sind für die USA – abgesehen von der „unallocated“-Kategorie – keine Werte mehr für 3- oder 4-Steller eingetragen. Für „Batterien“, „Brennstoffzellenfahrzeuge“ und „E-Mobilität“ sind deshalb auch ab 2016 überhaupt keine Daten zu finden. Ergänzend fehlen für diesen Zeitraum auch Einträge zu „Wasserstoff“. Für „Wärmepumpen“ gibt es überhaupt keine Daten. Dadurch wird eine vergleichende Bewertung der Bedeutung der Technologiegruppen in den USA sehr schwierig und wohl nur für einen vor 2016 liegenden Zeitraum einigermaßen fundiert möglich⁴⁶.

Für Japan liegen im Allgemeinen passable Daten vor. Allerdings sind für einige Technologiegruppen nur lückenhafte Zeitreihen zu beobachten. Z.B. für E-Mobilität nur Daten für 2018-2020; für Wasserkraft für 2012-2015 und 2018 und für Wärmespeicher für 2018 und 2019, was die möglichen Bezugsjahre für eine konsistente Auswertung deutlich einschränkt.

⁴⁵ Allerdings ist für Wasserkraft plausibel, dass für viele der restlichen Jahre ein Wert von Null anzusetzen wäre, zumal der Eintrag von 2017 sich nur auf 25.000 Euro beläuft.

⁴⁶ Auch die aktuelle IEA-Dokumentation zu den RD&D-Ausgaben enthält für die USA „latest available data: 2015“ (s. [RDD_Documentation.pdf \(iea.org\)](#) S.51, abgerufen am 03.06.2024, dort auch: Vom US-Department of Energy wurden nur die Daten 2012-2015 geliefert); in der verwendeten Datenversion sind für 2016-2020 Schätzungen des IEA-Sekretariats enthalten, die in der aktuellen Version des Datensatzes entfernt wurden. Für die Fortführung us-amerikanischer Daten zu Wasserstoff wurde auf Gallagher/Anadon 2020 zurückgegriffen. Aufgrund anderer Abgrenzungen und ähnlichem sind die dortigen Daten nur eingeschränkt mit den IEA-Daten für die USA vergleichbar und zeigen auch für vergleichbare Jahre und Technologien davon abweichende Werte.

Relativ schlecht sind die Vergleichsmöglichkeiten innerhalb Südkoreas. Dort fehlen Werte für die Technologiegruppen Batterien und Wärmepumpen, für E-Mobilität sind ganz überwiegend nur für einen Ausschnitt der Technologiegruppe Werte von 2008 bis 2011 zu finden. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass ab spätestens ca. 2012 keinerlei Werte für 3- oder 4-Steller gemeldet wurden⁴⁷, wodurch etliche Technologiegruppen nur gröber zu erfassen sind (vgl. Tabelle 6).

3.3.1.4 Zusammenfassung

Hier wurde die Frage betrachtet, inwieweit die IEA-Daten zu öffentlichen RD&D-Ausgaben im Energiebereich zu einer Regimeanalyse beitragen können und welche Probleme in den Daten auftreten. Eine Interpretation der Daten ist nicht Gegenstand der Diskussion. Die Daten sollen letztlich für zwei Vergleiche verwendet werden: Zum einen um den Umfang der öffentlichen RD&D-Ausgaben für eine Technologiegruppe zwischen den Ländern zu vergleichen, zum anderen um die Bedeutung der RD&D-Ausgaben einer Technologiegruppe im Fördersystem eines jeden Landes abzuschätzen.

Als erstes ist darauf hinzuweisen, dass einige der für eine vertiefte Betrachtung ausgewählten Länder nicht erfasst sind bzw. dass keine brauchbaren Daten vorliegen. Dabei handelt es sich um China, Hong Kong und Malaysia bzw. Brasilien. Für diese Länder wurde versucht technologiespezifische RD&D-Daten anderweitig gesucht (s.u.).

Zuerst wurde die Systematik der IEA-Daten zu RD&D-Ausgaben betrachtet. Als erstes hat hierzu eine Durchsicht gezeigt, dass sich nicht alle Länder bei ihren Meldungen an die IEA an deren Systematik halten und nicht als gesichert erscheint, dass Abweichungen stets in der IEA-Dokumentation zu finden sind. Wie häufig solche Abweichungen auftreten, worin sie genau bestehen, und ob sie quantitativ bedeutend sind, kann nicht abgeschätzt werden. Zum zweiten ist zu beachten, dass sich aufgrund von Änderungen der Erfassung in einzelnen Ländern konzeptionelle Brüche in den Zeitreihen ergeben können. Wie diese quantitativ einzuordnen sind, wurde nicht untersucht.

Wichtig ist, dass die IEA-Daten auf der Budgetseite ansetzen und nicht auf der Seite der Empfänger, also den Organisationen, die die Forschung tatsächlich durchführen. Daraus ergeben sich zwei Probleme:

- Das EU RD&D-Budget wird nur für die EU ausgewiesen und ist konzeptionell nicht bei den EU-Mitgliedstaaten zu finden, und wenn es dort zu finden wäre, würde es den Geber- und nicht den Empfängerländern zugeordnet. Ein Vergleich von EU-Zahlen mit

⁴⁷ Außer natürlich für die nichtssagende jeweilige Subgruppe „unallocated“ (Nummern mit 9 am Ende), in der dann der komplette, unter der übergeordneten Kategorie ausgewiesene Wert erscheint.

denen von Deutschland, Frankreich, Japan und den USA auf aggregierterer Technologieebene zeigt, dass die EU-Ausgaben relativ erheblich sind und mitunter die Ausgaben Japans und teils sogar der USA überschreiten können. Eine Zuordnung ihrer Ausgaben nach Technologien auf Empfängerländer scheitert an der Datenverfügbarkeit. In der Datenanalyse wurden EU-Werte nicht berücksichtigt.

- Je nach dem auf welchen Teil des Budgetprozesses für die Meldung an die IEA Bezug genommen wird, kann ein über mehrere Jahre laufendes Förderprogramm komplett dem Jahr seiner Verabschiedung zugerechnet werden. Das kann für das Jahr zu einer sehr hohen Ausweisung führen, die dann in den Folgejahren mit einer geringeren Ausweisung einhergehen. In den Zeitreihen der IEA-RD&D-Ausgaben wird dies für die US-amerikanischen Werte im Jahr 2009 offensichtlich; für dieses Jahr wird für einige Technologien eine (vorübergehende) Vervielfachung des Werts von 2008 ausgewiesen. Um durch derartige Effekte potentiell entstehenden Verzerrungen zu dämpfen, werden in der Auswertung verschiedenen Durchschnitte über mehrere Jahre verwendet.

Als nächstes wurde geprüft, wo sich die in diesem Projekt entwickelten Technologiegruppen in den Technologien nach IEA-RD&D-Daten wiederfinden. Diese Zuordnung ist – wie zu erwarten – nicht immer passgenau.

Zum ersten sind im Einzelfall IEA-Technologien gleichzeitig verschiedenen Technologiegruppen zuzuordnen. Das betrifft die Abgrenzung zwischen den Technologiegruppen E-Mobilität und Brennstoffzellenfahrzeuge; z.B. finden sich in einer nicht weiter aufzugliedernden IEA-Technologie u.a. neben Batterien für den mobilen Einsatz auch Wasserstoffspeicher für Straßenfahrzeuge. In diesen Fällen wurden in der weiteren Datenanalyse die entsprechenden Positionen komplett E-Mobility und nicht Brennstoffzellenfahrzeugen zugeordnet. In der vertieften quantitativen Analyse wurden nur batterieelektrische PKW nicht aber Brennstoffzellenfahrzeuge bearbeitet wurden. Für die batterieelektrischen PKW ergibt sich daraus eine gewisse Überschätzung der RD&D-Ausgaben.

Zum zweiten wurden mit der Zuordnung zu IEA-Technologien (mit genauen Identifikationsnummern, die bis zu maximal 4-Stellern gehen) die hiesigen Technologiegruppen eher zu weit abgegrenzt. Dies folgt teils unmittelbar aus dem Vorgehen bei der Technologiewahl: Dort wurden u.a. Technologien ausgeschlossen, deren Technology Readiness Level kleiner als 5 ist. Deren Weiterentwicklung kann aber durchaus per RD&D-Ausgaben gefördert werden. Andererseits wurden IEA-Technologien, die Technologien einer Technologiegruppe enthalten, auch dann dieser zugeordnet, wenn dort noch zusätzliche Technologien subsumiert sind. Ein gewisses Problem stellen die Restkategorien („unallocated“) in der IEA-Liste dar. Sie wurden gegenwärtig mitunter berücksichtigt, insbesondere dann, wenn die sonstige Definition hauptsächlich auf

3- oder 4-Stellern beruhte und die Anzahl der sonstigen alternativen Technologien auf dieser Ebene gering war. Das führt in der Analyse der IEA-Daten tendenziell zu einer zu hohen Einschätzung.

Schließlich wurde für die resultierende Zuordnung untersucht, inwieweit im IEA-Datensatz auch Werte zu finden sind. Dabei wurde sowohl die Perspektive eines Vergleichs einer Technologiegruppe zwischen Ländern als auch eines Vergleichs verschiedener Technologiegruppen in einem Land eingenommen. Zur entsprechenden Datenanalyse ist zu beachten, dass in der Quelle nicht zwischen einem Wert von Null und einem fehlenden Wert unterschieden wird. Es erscheint plausibel, dass häufig Werte fehlen, da z.B. für mehrere Technologien für bestimmte Länder-Jahres-Kombinationen keine Werte eingetragen sind. Insbesondere ist dabei zu konstatieren, dass besonders für 3- und 4-Steller für etliche Länder nur sehr unvollständige oder keine Werteeinträge vorliegen.

Für einen Vergleich einer Technologiegruppe über mehrere Länder kommt man zu dem Schluss, dass allenfalls für ca. elf der vierzehn Technologiegruppen passable Vergleiche möglich sein könnten⁴⁸.

Auch für die Frage, inwieweit sich für ein Land die Ausgaben für verschiedene Technologiegruppen vergleichen lassen, resultiert eine differenzierte Antwort. Für einige Länder ist dies überhaupt kein Problem (z.B. Frankreich). Für andere Länder dürfte ein solcher Vergleich nur sehr eingeschränkt möglich sein (z.B. Italien, Südkorea, die USA). Deutschland liegt hier im Mittelfeld, mit der Besonderheit, dass für die letzten Jahre (v.a. 2019, 2020 und 2021) recht differenzierte Daten vorliegen, für weiter in der Vergangenheit liegenden Jahre aber für eine größere Anzahl an Technologiegruppen Daten fehlen.

3.3.2 Datensammlung zu den nicht in der IEA-Datenbank vertretenen Ländern

Für Brasilien, China, Hongkong und Malaysia mussten anderweitig Daten gesammelt werden. Während der Suche fand sich für **Brasilien** ein einschlägiges Datenportal, in dem öffentliche RD&D-Ausgaben entsprechend der IEA-Systematik angezeigt wurden⁴⁹. Allerdings enthielten die Daten nur Zweisteller nach IEA-Systematik, was eine Zuordnung auf einzelne Technologiegruppen erschwert oder unmöglich macht (s.o. unter 3.3.1.2). Zum Beispiel sind RD&D-Ausgaben nur für „Road Vehicles“ verfügbar, was z.B. viel zu weit für Elektrische Straßenfahrzeuge

⁴⁸ Vgl. *Tabelle 7*.

⁴⁹ Siehe <https://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com/inova-e-eng/dashboard.html> (abgerufen 10.2022). Inzwischen ist ein Abruf über diese Seite nicht mehr möglich. Die Zahlen dürften inzwischen in die allgemeine IEA-Datenbank zu öffentlichen RD&D-Ausgaben aufgenommen worden sein. Nähere Informationen zu dem Projekt, in dem diese Zahlen erhoben wurden, finden sich auf <https://www.cepal.org/en/news/eclac-cgee-epe-and-ia-present-overview-investments-clean-energy-innovation-brazil> (letztmalig abgerufen am 03.06.2024).

in der Technologiegruppe E-Mobilität oder Brennstoffzellenfahrzeuge ist. Als Besonderheit Brasiliens ist zu erwähnen, dass bestimmte Energieunternehmen verpflichtet sind, eine gesetzlich vorgegebene Summe in R&D zu investieren. Die entsprechenden Werte werden „public-oriented“-Ausgaben genannt und sind in den ausgewiesenen Zahlen enthalten. Diese Werte wurden durchgehend für die weitere Analyse verwendet. Aus der zusätzlichen Suche ergaben sich ansonsten keine nennenswerten brauchbaren ergänzenden Zahlen.

Für diese zusätzliche Suche für Brasilien sowie die Suche für die anderen drei genannten Länder (**China, Hong Kong und Malaysia**) wurde grundsätzlich „google scholar“ mit den Eingaben LAND, TECHNOLOGIE, RD&D“ verwendet, wobei in diesem Rahmen auch verschiedene Variationen (z.B. R&D oder RD&D expenditure ...; verschiedene Bezeichnung für Technologien) verwendet wurden⁵⁰. Falls an einschlägiger Stelle ein Literaturverweis zu finden war, was nicht stets der Fall war, wurde dieser soweit möglich weiterverfolgt. Insgesamt erwies sich dieses Vorgehen als sehr aufwendig und wenig ergiebig. Das Hauptproblem bestand darin, dass RD&D (auch bei allen verwendeten Variationen) zwar häufig in Artikeln genannt wird, aber in den Artikeln selbst nur sehr selten Zahlen zur Höhe von (öffentlichen) Ausgaben zu finden waren. Deshalb war es erforderlich, sehr viele Abstracts zu lesen und viele Artikel zu überfliegen, wobei die Ausbeute an Zahlen gering war. Falls Werte zu finden waren, waren sie teils wenig verlässlich, teils war die Abgrenzung anders – v.a. stark aggregiert - oder nicht genau angegeben und teils waren sie aufgrund des Time-lags zwischen Schreiben und Veröffentlichung eines Artikels relativ alt. Ergänzende Recherchen in offiziellen Statistiken lieferten keine technologiespezifischen Daten⁵¹.

Für **Hong Kong** fanden sich keine einschlägigen Daten, was an der vermutlich eher geringen internationalen Aufmerksamkeit liegen könnte, die in diesem Kontext auf Hong Kong gerichtet ist. Ein gewisses besonderes Problem bereitete die Suche mit dem Schlagwort „Hong Kong“, da in nennenswertem Umfang Artikel vorgeschlagen wurden, die sich mit chinesischen Provinzen beschäftigen, in denen routinemäßig stand, dass sie Hong Kong nicht betrachten.

Für **Malaysia** wurden nur Daten zu dem Kontext Wasserstoff und evtl. Brennstoffzellenfahrzeuge gefunden. Sie beziehen sich mit je einem Wert auf längere und länger vergangene Zeitperioden. Die Werte wurden dann als arithmetisches Mittel auf jedes Jahr dieser Zeitperiode aufgeteilt. Für Wasserstoff sind nur die Ausgaben eines Ministeriums (MOSTI) – ergänzende Ausgaben anderer staatlicher Organisationen können nicht ausgeschlossen werden – von

⁵⁰ Betrachtet wurden i. Allg. die ersten hundert Quellen nach Google Scholar. Sofern sich unter den letzten Verweisen noch potentiell hilfreiche Artikel fanden, wurden solange mehr Verweise betrachtet, bis sich unter den folgenden 20 Verweisen keine potentiell relevanten Quellen mehr fand.

⁵¹ Z.B. u.a. China (2021) und Hong Kong (2021).

2002 bis 2007 angegeben, wobei die sachliche Abgrenzung für „hydrogen production and storage technologies“ eindeutig ist⁵². Daneben sind noch Werte für Ausgaben für Brennstoffzellenforschung für die gleiche Organisation zu finden, allerdings ohne Angaben zur Aufteilung auf Brennstoffzellen für den mobilen und den stationären Einsatz. Sie wurden vorläufig Brennstoffzellenfahrzeugen zugeordnet. Da allerdings alle angegebenen Werte sehr gering sind - sie erreichen bei jährlicher Umrechnung stets weniger als 1 Mio. EURO2019 pro Jahr – ist die genaue Zuordnung nicht sonderlich relevant. Anzumerken ist, dass verschiedene Studien mit verschiedenen Veröffentlichungsjahren letztlich mitunter die gleichen Zahlen nennen und - sofern nachvollziehbar - auf den gleichen Ursprungswerten basieren. Da darunter auch ein 2021 veröffentlichter Aufsatz zu finden ist und unter den Autoren typischerweise auch an malaysischen Forschungseinrichtungen arbeitende Forscher waren, ist es wahrscheinlich, dass bis dahin keine anderweitigen fundierten Zahlen zu öffentlichen RD&D-Ausgaben im Bereich Wasserstoff oder Brennstoffzellen im mobilen Einsatz veröffentlicht wurden⁵³.

Dass die geringe Ausbeute nicht vornehmlich ein Problem der Suchmethode – z.B. aufgrund von Sprach- und Schriftproblemen – ist, konnte für **China** insofern erhärtet werden, als Quellen die Nichtverfügbarkeit von Daten explizit benennen. Entsprechende Stellen sind u.a. zu finden für CCUS, Biokraftstoffe, Solarenergie und auch allgemeiner für stärker zusammengefasste Teile des Energiesystems zu finden⁵⁴. Letztlich konnten für einige der Technologiegruppen keine oder keine verwertbaren Daten gefunden werden (Tabelle 8). Für die anderen Technologiegruppen wurden Daten erfasst, wobei generell anzumerken ist, dass sie in vielerlei Hinsicht von den gewünschten Daten abweichen und auch dort, wo verschiedene Quellen verglichen werden konnten, keine konsistenten Werte ersichtlich wurden. Die Schwierigkeit liegt dabei z.B. an den Technologieabgrenzungen, den erfassten öffentlichen Stellen, der Frage, inwieweit auch private Ausgaben erfasst sind, der Frage, ob Budgets, Budgetplanungen oder Ausgaben betrachtet wurden, ob über längere und mitunter verschiedene Zeiträume (die dann

⁵² Siehe z.B. Foo (2015, S.1486).

⁵³ S. neben Foo (2015) z. B. Ambroce et al. (2016), Petinrin/Shaabab (2015), Rahman/Wahid (2021). Nicht verwendet wurde die Zahl für Ausgaben in der fernerer Vergangenheit für EV-Demonstrationsprojekten in Malaysia aus Saad/Ling (2022), da sie letztlich aus einem New-York-Times Artikel aus dem Jahr 2009 stammen.

⁵⁴ S. z.B. Wang et al. (2021): “China ranks third in CCUS projects but related R&D investment is not available”; Anadi et al. (2017): “No information is available in the public domain regarding the Chinese R&D expenditure on biofuels”; Ball, J. et al. (2017, S.96): “... people in China who are deeply involved in solar R&D said that, because the solar R&D effort is so fragmented in China, the Chinese central government itself may not know the total amount of public money being spent on solar R&D”; Crijns-Graus et al. (2022): “data on investment in R&D were very limited for China”; Zhang, F. et al. (2021): “... granular data for China's public R&D spending in the energy sector are not available ...”. Dabei ist Zhang, F. et al. (2021) ein Übersichtsartikel über staatliche R&D-Ausgaben, vor allem für „clean energy“-Technologien, in dem verschiedene Probleme mit den vorhandenen Daten - inklusive deren internationaler Vergleichbarkeit - angesprochen werden. Die dort präsentierten Daten sind i. Allg. zu wenig nach Technologien aufgelöst, um in diesem Projekt verwendet werden zu können. Insgesamt kommen sie zu folgender Einschätzung: „An important caveat is that data collection and reporting on energy RD&D remains maddeningly partial, opaque, and haphazard.“

nominal gleichmäßig auf die einzelnen Jahre verteilt wurden) aggregiert wurde oder daran, dass zu diesen Themen keine eindeutigen Aussagen enthalten waren. Die entsprechenden Daten für China sind deshalb nur sehr eingeschränkt mit Daten aus anderen Ländern vergleichbar. Aufgrund der Bedeutung Chinas wird eine Übersicht zu RD&D-Daten für China in Tabelle 8 gegeben. Eine genaue Diskussion der schließlich verwendeten Daten ist hier nicht intendiert, aber es besteht durch die Quellenangaben die Möglichkeit sich ein eigenes Bild zu verschaffen.

Technologiegruppe	Daten verfügbar?*	Wesentliche Quellen**
Windkraft	Ja	Hu et al. (2018)
Solar	Ja	Verwendet: Ding et al. (2020); Ergänzend: Ball et al. (2017); Zhang, J. et al. (2018), Urban et al. (2016), Wen et al. (2020); aber vgl. Fußnote 54
Batterien (stationär)	Nein	--
CCUS und CO ₂ -Infrastruktur	Ja	Verwendet: Fan (2021) und Baird et al. (2015) ⁵⁵ , aber vgl. Wang et al. (2021) in Fußnote 54
Biomasse	Nein	--
E-Mobilität (inkl. Batterien für den mobilen Einsatz)	Ja	Verwendet: Xingping et al. (2017). Ergänzend: Huang/Chen(2017), Li (2020), Styczinski/Hughes (2019); aber vgl. auch Fußnote 54
Wasserstoff	Ja (aber nicht von „Brennstoffzellenfahrzeuge“ zu trennen)	Verwendet: Zhang, J. et al. (2018), s. auch Zhang, F. et al. (2021). Jeweils für „Hydrogen and Fuel Cells“.
Wasserkraft	Nein	--
Wärmespeicher	Nein	--
Brennstoffzellenfahrzeuge	Ja (aber nicht von „Wasserstoff“ zu trennen)	s. „Wasserstoff“
Wärmepumpen	Nein	aus Jiang, J. et al. (2022) konnten keine brauchbaren Zahlen extrahiert werden
Effizienz in der Industrie	Nein	--
Übertragung und Verteilung (Strom)	Nein	--

⁵⁵ Vgl. auch Jiang et al. (2018)

Technologiegruppe	Daten verfügbar?*	Wesentliche Quellen**
Gebäudetechnologien	Nein	--

* Auch bei verfügbaren Daten ist deren Umfang und Systematik problematisch und ein internationaler Vergleich i. Allg. nur eingeschränkt möglich. Dazu: s. Text.

** Die Meldungen Chinas im Rahmen der internationalen Kooperation „Mission Innovation“ wurden dabei über deren Diskussion in Teilen der angegebenen Literatur berücksichtigt. Zu den entsprechenden Zahlen s. <https://mission-innovation.net/our-members/china/> (letztmalig abgerufen 21.06.2024)

Tabelle 8: Übersicht zu RD&D Datenquellen für China nach Technologiegruppen

3.3.3 Zusammenfassung

Trotz der Verfügbarkeit einer einschlägigen internationalen Datenbank der IEA, die von ihrer Systematik her gut für die gesuchten Daten geeignet ist, sind die tatsächlich zu extrahierenden Werte für öffentliche RD&D-Ausgaben limitiert. Dies rührt insbesondere daher, dass die IEA-Mitgliedstaaten häufig keine Daten in der hier erforderlichen hohen Auflösung nach Technologien liefern. Daneben schränken gewisse Besonderheiten und unter Umständen Abweichungen der Ländermeldungen von IEA-Vorgaben eine internationale Vergleichbarkeit ein. Für in dieser Datenbank nicht enthaltene Länder sind Umfang und Qualität der in einer Literatursuche gefundenen Daten erheblich geringer. Brasilien hat inzwischen eine Datenbasis aufgebaut, die sich an den IEA-Standards orientieren. Die Technologien sind dort aber nicht tief gegliedert. Deshalb sind die Daten nur eingeschränkt für die Zwecke hier verwendbar. Für Hong Kong und Malaysia wurden keine bzw. fast keine einschlägigen Daten gefunden. Für China konnten immerhin für einige Technologiegruppen einschlägige Daten gefunden werden, die allerdings hinsichtlich Umfang und Abgrenzung i. Allg. problematisch sind, z.B. weil nur einzelne oder wenige ausgewählte öffentliche Geldgeber oder Programme berücksichtigt werden oder verschiedene mögliche Abgrenzungen unklar bleiben. Da in der Literatur des Öfteren – sei es zu einzelnen Technologien oder insgesamt - explizit darauf hingewiesen wird, dass Daten zu öffentlichen RD&D-Ausgaben für China nicht öffentlich verfügbar sind, ist es unwahrscheinlich, dass die geringe Ausbeute maßgeblich durch Schrift- oder Sprachprobleme verursacht wurde. Die zu Kriterium 2 (RD&D-Ausgaben) gesammelten Daten sind insgesamt nur für ausgewählte Länder und Technologie relativ unproblematisch auszuwerten. Bei weiteren Auswertungen wurde die jeweilige Datenqualität und -verfügbarkeit berücksichtigt.

Eine zukünftige grundsätzliche Vereinfachung eines Suchverfahrens für RD&D-Ausgabendaten für viele Energietechnologien und Länder ist aus den gesammelten Verfahren nicht abzuleiten. Für die dort erfassten Länder dürfte die IEA-Datenbank weiterhin ein zentraler Ausgangspunkt sein. Für die USA könnte es weiterhin sinnvoll sein Gallagher/Anadon (2020) hinzuziehen. Allenfalls ist für die Suche von weiteren Daten zu erwägen, sich nicht auf referierte

Fachartikel zu konzentrieren, da diese Suche sich als wenig effektiv erwies. Ob allerdings anderweitig Daten zu finden sind, muss offenbleiben. Die mitunter gefundene Evidenz, dass es derartige Daten nicht gibt, nährt eine gewisse Skepsis. Inwieweit sich der Suchaufwand durch den Einsatz sich rapide entwickelnder neuer informationstechnischer Verfahren reduzieren lässt, wäre zu überlegen. In Bezug auf Innovation könnte erwogen werden, auf anderweitige Indikatoren – z.B. Patentdaten als Ergebnisdaten – überzugehen, wofür dann möglicherweise entstehende Datenprobleme offenbleiben müssen. Im Kontext der datenbasierten MLP-Analyse würde ein solcher Indikator allerdings nicht mehr helfen, die Regimedimension „Politik/Regulierung“ mitabzubilden.

3.3.4 Literatur zu Kriterium 2

Ambroce, A. F. et al. (2016): Prospects for introducing hydrogen fuel cell vehicles in Malaysia, *International Journal of Hydrogen Energy*, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.122.

Anadi, P.; R. Malina; S. R. H. Barrett, M. Kraft (2017): The evolution of biofuel science, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76, S. 1479-1484. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.181>

Baird, J. et al. (2015): People's Republic of China: Roadmap for carbon capture and storage demonstration and deployment. Component A-Work Package 4 Report: CCS Regulatory Framework for China. Asian Development Bank. <https://www.adb.org/sites/default/files/project-document/174976/46052-001-tacr-04.pdf> (abgerufen im Oktober 2022).

Ball, J., D. Reicher, X. Sun, C. Pollock (2017): The new solar system: China's evolving solar industry and its implications for competitive solar power in the United States and the World; Stanford Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance.

China (2021): China Statistical Yearbook on Science and Technology, China Statistics Press.

Crijns-Graus, W. et al. (2022): International comparison of research and investments in new renewable electricity technologies: A focus on European Union and China; in: *Energies* 15, <https://doi.org/10.3390/en15176383>

Ding, H.; D. Q. Zhou; G. Q. Liu; P. Zhou (2020): Cost reduction or electricity penetration: Government R&D-induced PV development and future policy schemes, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 124, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109752>

Fan, J.-L. (2021): CCUS Progress and Policy in China, Vortrag bei: Asia Clean Energy Forum 2021 (Deep Dive Workshop: Re-inventing carbon capture utilization and Storage in Asia). <https://www.asiacleanenergyforum.org/wp-content/uploads/2021/07/Jingli-Fan.pdf> (abgerufen im Oktober 2022).

Foo, K. Y. (2015): A vision on the opportunities, policies and coping strategies for the energy security and green energy development in Malaysia, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews 51, S.1477-1498

Gallagher, K. S.: L. D. Anadon (2020): DOE Budget Authority for Energy Research, Development, and Demonstration Database. Fletcher School of Law and Diplomacy Tufts University; Department of Land Economy, Center for Environment, Energy and Natural Resource Governance (C-EENRG), University of Cambridge; and Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School. (abgerufen: September 2022).

Hong Kong (2021): Innovation Activities Statistics 2020. Census and Statistics Department, Hong Kong Special Administrative Region. https://www.censtatd.gov.hk/en/data/stat_report/product/B1110010/att/B11100102020AN20B0100.pdf (abgerufen: September 2022)

Hu, R.; J. Skea; M. Hannon (2018): Measuring the energy innovation process: An indicator framework and a case study of wind energy in China, in: Technological Forecasting and Social Change 127, S.227-244. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.09.025>

Huang, Y.; Y. Chen (2017): The review of technology industry policy about new energy vehicle in China since the new century, in: Advances in Engineering Research 114 (International Conference in Materials, Machinery, Electrical Engineering (AMMEE 2017)

IEA (2011): IEA Guide to Reporting Energy RD&D Budget/Expenditure Statistics. June 2011 Edition, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/751c1fce-72ca-4e01-9528-ab48e561c7c4/RDDManual.pdf> , abgerufen im Mai 2022 (im Text genannt: „IEA-Manual“)

IEA (2022): Energy Technology RD&D Budgets, October 2021 Edition, Database documentation, [RDD Documentation v4.pdf \(windows.net\)](https://iea.blob.core.windows.net/assets/53533e19-2f21-4dca-ab9a-c251bc0f9e33/RDD_Documentation.pdf), abgerufen im Mai 2022 (im Text genannt: „IEA-Dokumentation“). Ergänzend wurde die May 2024 Edition hinzugezogen (https://iea.blob.core.windows.net/assets/53533e19-2f21-4dca-ab9a-c251bc0f9e33/RDD_Documentation.pdf (letztmalig abgerufen am 03.06.2024)

IEA (2022a): IEA Energy Technology RD&D Budgets – Rahman/Wahid May 2022 – selected data. Kann abgerufen werden unter [Energy Technology RD&D Budgets - Data product - IEA](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-technology-rd-and-d-budget-database-2) (im Text genannt: „IEA-ausgewählte Daten“) <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-technology-rd-and-d-budget-database-2> dort: Energy Technologies, (abgerufen: Juni 2022.

Jiang, J. et al. (2022): A review and perspective on industry high-temperature heat pumps, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews 161, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106>

Jiang, M.; X. Liang, Q. Liu, C. Liu, X. Chen (2018): Manage multiple policy instruments in financing CCUS: Case study of Guangdong. 14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne 21.-26. October 2018.

Li, J. (2020): Charging Chinese future: The roadmap of China's policy for new energy automotive industry, in: International Journal of Hydrogen Energy 45, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.075>

Pentinrin, J. O.; M. Shaaban (2015): Renewable energy for continuous energy sustainability in Malaysia, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews 50, S. 967-981. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.146>

Rahman, M. N.; Wahid, M. A. (2021): Renewable-based zero-carbon fuels for the use of power generation: A case study in Malaysia supported by updated developments worldwide; in: Energy Reports 7, S. 1986-2020. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.005>

Saad, A.Y.; Y. Y. Ling (2022): Electricity demand in relation to rise of electric vehicles in Malaysia, in: Journal of Built Environment, Technology and Engineering 9. ISSN 0128-1003.

Styczyński, A. B.; L. Hughes (2019): Public policy strategies for next-generation vehicle technologies: An overview of leading markets, in: Environmental and Societal Transitions 11, <https://doi.org/10.1016/j.eist.2018.09.002>

Urban, F.; S. Geall, Y. Wang (2016): Solar PV and solar water heaters in China: Different pathways to low carbon energy, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews 64, S.531-542, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.023>

Wang, N.; K. Akimoto ; G. F. Nemet (2021): What went wrong? Learning from three decades of carbon capture, utilization and sequestration (CCUS) pilot and demonstration projects; in: Energy Policy 158, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112546>

Wen, D.; W. Gao; J. Ren (2020): Development of solar photovoltaic industry and market in China, Germany, Japan and the United States of America using incentive policies, in: Energy Exploration & Exploitation 39, Issue 5, <https://doi.org/10.1177/0144598720979256>

Xingping, Z.; Y. Liang; E. Yu; R. Rao; J. Xie (2017): Review of electric vehicle policies in China: Content summary and effect analysis; in: Renewable and Sustainable Energy Reviews 70, S.689-714, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.250>

Zhang, F. et al. (2021): From fossil to low carbon: The evolution of global public energy innovation, in: WIREs Climate Change, <https://doi.org/10.1002/wcc.734>

Zhang, J.; F. Lv; H. Xu (2018): Analysis of clean energy development in China on Mission Innovation to face global climate change, in: IOP Conf. Ser.: Material Science and Engineering. 394 (ACMME 2018), doi:10.1088/1757-899X/394/4/042064

3.4 Kriterium 3: Öffentliche Förderung

3.4.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren

Das Kriterium 3 (öffentliche Förderung) trägt zur Erfassung der MLP-Regimedimension „Politik/Regulierung (Policy)“ bei. Ziel ist dabei, die Aktivitäten zur Beschleunigung einer Marktdurchdringung, insbesondere über eine Erhöhung der Nachfrage, zu erfassen. Dafür sollen als Indikatoren monetäre Fördermaßnahmen erfasst werden. Vornehmlich sind dabei spezifische Förderungen (z.B. Fördersätze bezogen auf Output, auf Käufe oder auf Investitionskosten) relevant, daneben sind auch allgemeine staatliche Budgets für eine Förderung von Interesse. Beides zeigt zum einen die Bereitschaft des Staates eine Technologie zu fördern, zum anderen – gerade im Vergleich mit anderen Kriterien, wie Kriterium 5 (Kosteneffizienz) – gibt es Hinweise auf eine zu erwartende zukünftige Entwicklung des Zubaus. Grundsätzlich sind dabei auch Förderungen für die Produktion von Technologien (z.B. für die Herstellung von Batterien) zu berücksichtigen⁵⁶. Nicht erfasst wurden Förderungen für zu den Technologiegruppen konkurrierenden Güter oder Förderungen, die eine große Anzahl von Gütern betraf, also nicht technologiegruppenspezifisch war⁵⁷.

Gesucht werden Daten für alle ausgewählten Länder und Technologiegruppen zu öffentlichen Mitteln, die in die Markteinführung fließen. Eine Beschränkung auf wesentliche Fördermaßnahmen wäre ausreichend. In der Umsetzung erwies es sich aber als schwierig, wichtige von weniger wichtige Maßnahmen zu unterscheiden, ohne sich näher mit der jeweiligen Fördermaßnahme zu befassen. Auch dann kann die faktische Bedeutung einer bestimmten Maßnahme unter Umständen mitunter nicht ohne weiteres eingeschätzt werden. Deshalb wurde die relative Bedeutung von Maßnahmen in einem Land auch im Zuge der Auswertung der Datenbank eingeschätzt, wenn eine Übersicht über die Maßnahmen vorlag. Eher als nebensächlich einzuschätzende Maßnahmen wurden dann gefiltert und in der folgenden Bewertung nicht mehr betrachtet.

⁵⁶ Zur Einordnung in eine MLP-Analyse s. Banning et al. (2023, S.8ff.).

⁵⁷ Wie z.B. Nachforschungen zu <https://www.iea.org/policies/15019-bnde-financing-for-a-wind-farm-in-bahia> (letztmalig abgerufen am 25.06.2024) ergaben.

Um Doppelzählungen zu vermeiden, waren Mittel für RD&D auszuschließen, da diese unter Kriterium 2 (RD&D-Ausgaben) erfasst sind. Die Abgrenzung ist nicht immer einfach. Nicht aufgenommen wurden nicht-monetäre Maßnahmen wie z.B. Standards für den Primärenergieverbrauch von Wohnungsneubauten, die auch durch PV-Anlagen und Wärmepumpen erreicht werden können. Quantitative Ziele – z.B. Beimischungsquoten für Biokraftstoffe, Ausschreibungsmengen – werden unter Kriterium 1 (Politische Ziele) erfasst, im Zuge von Ausschreibungen vergebene Förderung sind hier erfasst.

Aufgenommen wurden auch net-metering, net-billing und ähnliches, da sie typischerweise einen geldwerten Vorteil für Anlagenbetreiber implizieren. Für derartige Maßnahmen wurde nur technologiespezifisch festgehalten, dass es sie gibt, es wurde jedoch nicht versucht den monetären Vorteil zu quantifizieren, da er von vielfältigen Parametern und der genauen Ausgestaltung der Regelung abhängt⁵⁸. Für Fördersätze und Budgets ist darauf hinzuweisen, dass es Maßnahmen geben kann, für die nur das ein oder andere verfügbar ist. Für die Erhebung der Förderung für die Produktion einschlägiger Technologien ist mit einer größeren Unvollständigkeit zu rechnen, da derartige Maßnahmen in industriepolitischen Förderungen enthalten sein können (z.B. Förderung KMU oder Start-ups), die nicht ergänzend zu den energiepolitischen Maßnahmen systematisch untersucht werden konnten.

Aufgrund des damit verbundenen Aufwands wurde darauf verzichtet, Zeitreihen für die Förderungen zu erheben. Da Fördermaßnahmen häufig technologiegruppenübergreifend angelegt sind, wurde die Datenerhebung Land-für-Land abgearbeitet. Berücksichtigt wurden dabei aufgrund des ansonsten erforderlichen Aufwands nur Maßnahmen der Zentralregierung. Die einzige Ausnahme ist Belgien, da den Regionen dort die alleinige Kompetenz für weite Bereiche der Energiepolitik zukommt⁵⁹. Sofern ein Budget mehrere Technologiegruppen betraf und eine Aufteilung auf die einzelnen Gruppen nicht möglich war, wurden diese Budgets unter jeder der betroffenen Technologiegruppen eingetragen, wobei vermerkt wurde, dass die genannte Summe auch eine Förderung anderer Technologiegruppen umfasst.

Dem Kriterium 3 (Öffentliche Förderung) ist wie dem Kriterium 1 (Politische Ziele) zu eigen, dass nicht zu unterscheiden ist, ob fehlende Indikatoren für eine Land-Technologiegruppen-Kombination darauf zurückzuführen sind, dass es keine relevanten Sachverhalte gibt oder relevante einschlägige Sachverhalte nur bisher nicht gefunden wurden. Das Analoge gilt für die Frage, ob ein Sammlungsstand für ein Land-Technologiegruppen-Kombination tatsächlich alle

⁵⁸ Ähnliches gilt für „soft loans“, für die nur quantitative Werte aufgenommen wurden, falls sie explizit in den Quellen genannt wurden.

⁵⁹ Z.B. für die Förderung aller erneuerbarer Energien außer Offshore-Windkraft. Zur genaueren Aufteilung der Kompetenzen in der Energiepolitik in Belgien s. IEA (2022, S.18).

wesentlichen Sachverhalte abdeckt. Damit kann aus gefundenen oder eben nicht gefundenen Daten kein an dem Ziel der Vollständigkeit orientiertes einfaches Abbruchkriterium für eine Suche gegeben werden. Da Fördermaßnahmen einerseits relativ schnell eingestellt, geändert oder neu aufgelegt werden können, andererseits aber auch über einen längeren Zeitraum unverändert laufen können, ist es auch nicht stets möglich, einzuschätzen, ob ein bestimmter Befund aktuell ist.

Ein Überblick über die letztlich verwendeten Quellen kann hier nicht gegeben werden, da sie äußerst vielfältig sind: Für jede Kombination aus Fördermechanismus, und Land ist für dieses Kriterium tendenziell mit einer eigenen Quelle zu rechnen. Für die jeweils angesprochenen Schwierigkeiten im Zuge der Datenerhebung werden aber Beispiele gegeben. Diese werden nicht in das allgemeine Literaturverzeichnis übernommen, sondern nur im Text und vor allem in Fußnoten benannt, da ansonsten die missliche Situation entstehen würde, dass im Literaturverzeichnis in großem Umfang Quellen genannt würden, die gerade nicht weiterhelfen und letztlich auch nicht – oder zumindest nicht allein - verwendet wurden. Die Recherche fand von Januar bis Juli 2023 statt⁶⁰. Die Datensammlung entspricht grundsätzlich dem Stand in dieser Zeit. Der genaue Stand innerhalb dieses Zeitraums für einzelne Länder hängt dabei von der Reihenfolge der Abarbeitung der Länder ab. Aufgrund von time-lags zwischen der Einführung oder Änderung einer Maßnahme und der Veröffentlichung in verwendeten Quellen kann im Einzelfall ein älterer Stand nicht ausgeschlossen werden.

3.4.2 Allgemeines Vorgehen

Um möglichst aktuelle und vollständige Daten zu erfassen, wurde wie folgt vorgegangen:

- Ausgangspunkt waren grundsätzlich Eintragungen für ein Land in der IEA-Policy-Database⁶¹.
- Ergänzt wurde diese durch die beiden Policy-Datenbanken <https://www.climatepolicy-database.org/> und <https://www.energypolicytracker.org/> (abgerufen: Erstes Halbjahr 2023; die erstgenannte Datenbank schätzt auch für verschiedene Politikbereiche für jedes Land die Vollständigkeit der Erfassung ab; mitunter verweist sie in den links allerdings auf Seiten der IEA-Datenbank oder auf die gleichen Quellen wie die IEA-Datenbank. Die zweite Datenbank erfasst gemäß ihrem Ziel nur in den Jahren 2020 und 2021 eingeführte oder geänderte „Policies“ für den gesamten Energiebereich).

⁶⁰ Alle angegebenen Links wurden in diesem Zeitraum abgerufen.

⁶¹ S. <https://www.iea.org/policies> (abgerufen: Erstes Halbjahr 2023). Daneben wurde auch der REN21 (2022) nebst dem zugehörigen Data Pack ausgewertet. Die dort zu findenden Eintragungen und Links erwiesen sich aber nur in Ausnahmefällen als hinreichend und konnten nur in Einzelfällen verwendet werden. Stichprobenartig wurde auch in WTO-Subventionsberichte hineingeschaut. Da dort nichts Verwertbares gefunden wurde, wurden diese möglichen Quellen nicht weiter berücksichtigt.

- Da sich im Zuge der Arbeit herausstellte, dass keine Datenbank (und auch nicht der Verbund) vollständig und aktuell ist, wurden zusätzlich noch Überblicke über die Energiepolitik herangezogen (z.B. IEA Energy Policy Reviews für einzelne Länder⁶², anderweitige Überblicke⁶³). Dadurch sollte vermieden werden, dass als wichtig angesehene Förderungen übersehen werden.
- Im Allgemeinen reichten weder die Überblicke noch die Angaben in den Datenbanken aus, um die gewünschten Daten in benötigter Auflösung zu erhalten (v.a. was wird in welchem Land wie und wie hoch gefördert?). Deshalb war eine vertiefte Recherche erforderlich. Da auch die Links in den Datenbanken aus verschiedenen Gründen (s.u.) mitunter wenig weiterhalfen, wurde ergänzend nach aus anderen Quellen erschlossenen genauen Namen bestimmter Fördermechanismen gesucht. Unter den gefundenen Webseiten wurden dann diejenigen von Regierungsorganisationen bevorzugt betrachtet, nachgelagert dann evtl. wissenschaftliche Quellen.
- Sofern eine Regierungsorganisation für mehrere relevante Förderungen – auch technologieübergreifend – verantwortlich war, wurden deren Web-Seiten gleich für alle Technologiegruppen ausgewertet⁶⁴. Diese Seiten waren typischerweise für die Zielgruppe potentieller Antragsteller gestaltet, so dass die hier relevanten Informationen mitunter ein wenig versteckt und verstreut zu finden waren. Auch sofern Fördermechanismen oder Budgetpläne mehrere Technologiegruppen umfassten, wurden diese stets gleich komplett ausgewertet⁶⁵.
- Für die Länder China, Japan und Südkorea wurden ergänzend Presseberichte herangezogen, da v.a. die den Bearbeitern unbekanntem Schriften die Suche entsprechendes

⁶² S. z.B. IEA (2020, 2020a, 2021, 2021a, 2022, 2023)

⁶³ Z.B. für Südkorea: <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=04756d82-6d33-4fc7-add1-642bbb33f5be> ; für Japan <https://www.lexology.com/indepth/the-renewable-energy-law-review/japan> ; für Brasilien: [https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/8-545-7207?contextData=\(sc.Default\)&transitionType=Default&firstPage=true](https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/8-545-7207?contextData=(sc.Default)&transitionType=Default&firstPage=true) (abgerufen April/Mai 2023).

⁶⁴ In den Niederlanden läuft z.B. ein Großteil der Fördermechanismen über RVO (s. <https://www.rvo.nl/>). Eine solch starke organisatorische Konzentration erwies sich aber als Einzelfall. Eine Fragmentierung der Förderlandschaft kann durchaus Schwierigkeiten bei der Suche bereiten (s.u.).

⁶⁵ Beispiel zu technologiegruppen übergreifenden Fördermechanismen: das EEG in Deutschland; für technologiegruppenübergreifenden Budgetplänen z.B. „National Plan for Recovery and Resilience“ (NRRP, mit je nach Staat angepasstem Namen) der einzelnen EU-Mitgliedstaaten wie für Belgien (<https://dermine.belgium.be/sites/default/files/articles/FR%20-%20Plan%20national%20pour%20la%20reprise%20et%20la%20re%CC%81silience.pdf>) oder für Italien (https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR_0.pdf).

obigen Vorgehens erschwerte⁶⁶. Ansonsten wurde der Bezug auf Presseartikel weitestmöglich vermieden.

- Zu den kaum in den Datenbanken vertretenen Ländern – Hong Kong und Malaysia – wurde die Suche frühzeitig auf Seiten der Regierung und von Regierungsorganisationen begonnen, was insbesondere für Hong Kong aufgrund der relativ wenig ausdifferenzierten Organisationsstruktur tendenziell als angemessen eingeschätzt wird.
- Für die USA war bekannt, dass kurz vor der Datenerhebung der Inflation Reduction Act (IRA) verabschiedet wurde, der erhebliche Fördermittel verteilt. Aufgrund der Aktualität waren diese Mittel noch nicht in den Datenbanken aufgenommen, weshalb hier über Regierungsorganisationen vorgegangen wurde – auch für andere bundesstaatliche Förderprogramme – und notwendige ergänzende Informationen aus den einschlägigen Artikeln des IRA extrahiert wurden. Dabei wurde der Stand Januar 2023 erfasst, danach etwa beschlossene Präzisierungen, Ausführungsvorschriften oder Änderungen konnten nicht aufgenommen werden.

Die Förderungen setzen häufig voraus, dass genauere Anforderungen⁶⁷ erfüllt werden und können in ihrer Höhe je nach Erfüllung weiterer Tatbestände erheblich variieren⁶⁸. Derartige Sachverhalte wurden in einem speziellen Feld für „Anmerkungen“ stichwortartig erfasst, wobei dort auch jeweils gegebenenfalls erforderliche ergänzende Quellen festgehalten wurden.

3.4.3 Schwierigkeiten der Datenerhebung

3.4.3.1 Zur IEA-Datenbank zur Energiepolitik

In der IEA-Datenbank (<https://www.iea.org/policies>) zur Energiepolitik wurden alle Eintragungen für die jeweiligen Länder durchgegangen, außer jenen mit dem Status „ended“. Aufgrund der dortigen Kurzüberschriften der policies konnten viele nicht relevante Einträge bereits als nicht relevant ausgeschlossen werden. Allgemein findet sich dann eine Kurzbeschreibung der „Policy“ mit einem link „learn more“ zur Vertiefung sowie einem Eintrag „last update: ...“. Ins-

⁶⁶ Für einen ersten Einblick wurde generell der Übersetzer des Browsers verwendet. Sofern sich dann Hinweise auf Gesuchtes fanden, wurden die einschlägigen Texte per DeepL übersetzt. Sofern Abbildungen involviert waren, mussten die sprachlichen Bestandteile typischerweise einzeln übersetzt werden. Für die „Korea Energy Agency“ ist eine englischsprachige Webseite zu finden, die etliche relevante Informationen enthält (z.B. https://dco.energy.or.kr/renew_eng/new/standards.aspx). Der Inhalt einiger dort zu findender Webseiten – wie in dem angegebenen Link – ist ein starkes Indiz, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass diese Seiten aktuell sind, was teils – z.B. für die Gewichtungen in der Quote auf der angegebenen Seite - auch durch Angaben in anderweitigen Quellen bestätigt wurde.

⁶⁷ Z.B. für Kaufzuschüsse für batterieelektrische PKW an private Haushalte in den USA: Maximales Haushaltseinkommen, maximales Fahrzeuggewicht, maximaler Fahrzeugpreis... (s. <https://www.irs.gov/credits-deductions/credits-for-new-clean-vehicles-purchased-in-2023-or-after> (abgerufen 27.06.2024; in der Erhebung verarbeitet: Version von Februar 2023).

⁶⁸ Das ist typischerweise für die IRA-Maßnahmen für Unternehmen in den USA der Fall (z.B. für PV s. https://www.energy.gov/eere/solar/federal-solar-tax-credits-businesses#_edn5 (abgerufen Februar 2023).

besondere aufgrund „last update: ...“ wurde zu Beginn vermutet, dass die Datenbank gut geeignet ist, Aktualität zu sichern oder zumindest einschätzen zu können. Im Zuge der Nutzung musste aber festgestellt werden, dass das „last update“ nicht unbedingt die Beschreibung der Policy und den „learn more“-link umfasste, was mitunter auch Zweifel an der Bedeutung der Stauseinordnung „in force“ aufwarf⁶⁹. Auch die dortigen Verlinkungen halfen häufig nicht weiter, da sie zu keinen spezifischeren Daten⁷⁰ oder zu stark veralteten Quellen⁷¹ führten oder die Zielseite nicht mehr existierte⁷². Selbst wenn ein link inhaltlich hilfreich war, war häufig eine weitere Recherche erforderlich (z.B. bei Verweisen auf lange Dokumente⁷³ oder sehr lange Gesetzestexte⁷⁴ oder Gesetzestexte, die nur aktuelle Änderungen älterer Versionen enthielten⁷⁵).

Aufgrund der genannten Schwierigkeiten, die frühzeitig erkannt wurden, wurde auf das oben beschriebene, komplexere Vorgehen gewechselt. Gegenwärtig ist keine „policies“-Datenbank bekannt, die einigermaßen geeignet erscheint, für eine Vielzahl an Ländern und Energiewendetechnologien relativ aktuelle und komplette Informationen zu Fördermaßnahmen zu bieten.

⁶⁹ Z.B. wird für Südkorea ein Programm - <https://www.iea.org/policies/5098-residential-deployment-subsidy-program> (abgerufen: April 2023) - aus dem Jahr 1996 („last update: 26 July 2012“) als „in force“ eingeordnet oder aus dem Jahr 2012 („last update: 5 November 2017“), „in force“: <https://www.iea.org/policies/3280-tax-reduction-per-vehicle?country=Korea&qs=korea> . (abgerufen: April 2023)

⁷⁰ Z.B. in Japan für <https://www.iea.org/policies/13130-national-budget-2021-support-for-livestock-biomass-energy> (abgerufen April 2023) und dortiger link (abgerufen Mai 2023; inzwischen ist der link nicht mehr aktiv (26.06.2024)) oder zur Förderung von Elektrofahrzeugen in China nach <https://www.iea.org/policies/14305-report-on-the-implementation-of-chinas-fiscal-policy-in-the-first-half-of-2021> (abgerufen Februar 2023) mit dem link http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caizhengxinwen/202108/t20210827_3748539.htm (abgerufen Februar 2023).

⁷¹ Z.B. für China <https://www.iea.org/policies/5982-notice-on-further-promotion-of-the-distributes-solar-pv-systems> der link https://zfxqg.nea.gov.cn/auto87/201409/t20140904_1837.htm (abgerufen Februar 2023). Möglicherweise veraltete Webseiten waren darüber hinaus ein generelleres Problem (s. Fußnote 66).

⁷² Z.B. für Südkorea: <https://www.iea.org/policies/4837-renewable-portfolio-standard-rps> , <https://www.iea.org/policies/6688-local-incentives-for-electric-vehicles> . <https://www.iea.org/policies/1356-esco-program> und <https://www.iea.org/policies/4836-act-on-the-promotion-of-the-development-use-and-diffusion-of-new-and-renewable-energy> (alle abgerufen: April 2023).

⁷³ Z. B. für China <https://www.iea.org/policies/6272-china-energy-technology-innovation-action-plan-2016-2030> mit dem „learn more“-link: <https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/01/5078628/files/d30fbc1ca23e45f3a8de7e6c563c9ec6.pdf> (alle abgerufen Februar 2023).

⁷⁴ S. z.B. für Brasilien <https://www.iea.org/policies/14589-legal-framework-for-distributed-microgeneration-and-mini-generation-the-electricity-compensation-system-scee-and-the-social-renewable-energy-programme-pers> mit dem „learn more“-Link <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821> (alle abgerufen April 2023).

⁷⁵ S, z.B. für Brasilien [Decree no. 10.387 to provide incentives for financing infrastructure projects with environmental and social benefits – Policies - IEA](https://www.iea.org/policies/16693-targeted-fuel-and-public-transport-support) , wo der link zu [DEKRET NR. 10.387 VOM 5. JUNI 2020 - DEKRET NR. 10.387 VOM 5. JUNI 2020 - DOU - Nationale Presse \(in.gov.br\)](https://www.iea.org/policies/16693-targeted-fuel-and-public-transport-support) führt oder <https://www.iea.org/policies/16693-targeted-fuel-and-public-transport-support> mit dem Link https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/Emendas/Emc/emc123.htm (alle abgerufen: April 2022).

3.4.3.2 Allgemeine Schwierigkeiten bei der Erhebung

Neben konkreten Schwierigkeiten im Einzelnen – z.B., weil unklar war, ob ein Budget für ein spezielleres Programm bereits im Budget eines übergeordneten Programms enthalten ist⁷⁶, oder sich Förderung auf Positivlisten bezogen, die einzusehen waren, um zu entscheiden, ob eine bestimmte Technologie gefördert wird⁷⁷ – konnten systematische Probleme ausgemacht werden, die den Aufbau einer Datensammlung für dieses Projekt erschwerten. Sie bestehen darin, dass

- i) eine Förderung einzelner Technologien teils sehr komplex oder differenziert ist,
- ii) es für eine Technologiegruppe viele verschiedene Fördermaßnahmen (d.h. Förderrahmen) geben kann und
- iii) eine Förderung für eine Technologie unter anderen, sehr allgemeinen Förderrahmen subsumiert sein kann.
- iv) die Förderungen können auf verschiedene öffentliche Organisationen nach grundsätzlicher Kompetenz (z.B. verschiedene Ministerien), Organisation der Förderung und operative Abwicklung der Förderung verteilt sein. In Verbindung mit ii) kann dies durchaus auch innerhalb einer Technologiegruppe relevant sein.

Zu i): Hier seien drei verschiedene, aber typische Beispiele genannt:

Als erstes Beispiel für eine differenzierte und im Ergebnis nicht einfach abzuschätzende Förderung sei die Kaufprämie für batterieelektrische PKW in China genannt. Sie hängt unter anderem von technischen Eigenschaften des konkreten Autos ab, wobei sich der Zusammenhang von Jahr zu Jahr ändert. Hier – und in ähnlichen Fällen – wurde dann danach gesucht, ob sich typische Fälle, Bandbreiten oder Grenzfälle (v.a. maximale Förderung) finden lassen und diese dann in die Datendatei aufgenommen. Zum Beispiel wurden zur Verkaufsförderung von batterieelektrischen PKW in China standardisierte Rechnungen für „typische Fahrzeuge“ zu Grunde gelegt⁷⁸.

Ein zweiter Fall, in dem die Recherche aufwändiger werden konnte, ist wenn die Förderung als Reduktion einer Steuerbemessungsgrundlage (und nicht der Steuerschuld) gegeben wird, da

⁷⁶ Z.B. für Wasserstoff in Frankreich wird nicht immer deutlich, wie die Beziehungen zwischen dem „France 2030“-Programm, dem NRRP, dem Budget für die Förderung von Investitionen in ein Wasserstoff-„Ecosystem“ („EcosysH2“) und Wasserstoff-IPCEI-Budgets ist.

⁷⁷ Z.B. für Malaysia zu Wärmepumpen in der Industrie in den Listen unter <https://dir.myhijau.my/directory#/data?history=Business> für eine Förderung via einer Steuerreduzierung für Unternehmen nach <https://www.mgtc.gov.my/wp-content/uploads/2022/07/REC-GTGT-007-GUIDELINES-FOR-GREEN-TECHNOLOGY-TAX-INCENTIVE-GITAGITE.pdf> (alle abgerufen März 2023).

⁷⁸ Für eine genauere Beschreibung der Förderung sowie Förderungen für „typische Fahrzeuge“ s. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/China%20NEV-policyupdate-jul2020.pdf> (letztmalig abgerufen am 26.06.2024).

dann ein Steuersatz erforderlich ist, um die Förderhöhe zu bestimmen. Sofern kein typisches Beispiel für die dadurch reduzierte Steuerschuld angegeben wurde, mussten Steuersätze recherchiert werden und dann – ein oder mehrere – typische Steuersätze angesetzt werden, um den geldwerten Vorteil zu bestimmen⁷⁹.

Zum dritten kann auch das Fördersystem sehr komplex sein. Dann erfordert es einige Zeit, um passable Einschätzungen der Förderhöhe – sofern dies dann überhaupt möglich ist - und des Zugangs zu einer Förderung geben zu können. Als Beispiel mag hier das „SDE++“-Fördersystem in den Niederlanden gelten, das nicht nur kompliziert ist, sondern darüber hinaus auch technologieübergreifend⁸⁰. Auch aus den Ergebnissen sind allenfalls maximale Förderbeträge zu berechnen, was aber i.Allg. als zu aufwändig erschien⁸¹.

Zu ii): Als typisches Beispiel für eine Förderung mit vielen Instrumenten können die einschlägigen Regelungen für PV in vielen Ländern dienen: Je nach Größe kann es unterschiedliche Förderinstrumente bzw. -rahmen geben; die Förderinstrumente können sich je nach Förderempfänger (z.B. Industrie vs. private Haushalte) unterscheiden und eine Förderung kann z.B. im Rahmen von Maßnahmen zur Gebäudesanierungen vergeben werden.

Als Beispiel mag hier Italien dienen: Für kleine Anlagen wird eine Einspeisevergütung gezahlt, für größere eine Art von Marktprämie, die ab einer bestimmten Größe über eine Auktion festgelegt wird. Daneben können Haushalte und NGOs in Verbindung mit anderen Maßnahmen – im Bereich der thermischen Energie - eine Steuervergünstigung für PV-Investitionen beantragen. Für Kleinanlagen – nahezu unabhängig von der Akteursgruppe - ist auch ein net-billing

⁷⁹ Z.B. für die Förderung Kaufförderung von batterieelektrischen Fahrzeugen in Hong Kong für private Haushalte, die über eine Reduktion der „first registration tax“ (FRT) läuft, deren Tarif variiert (zur Beschreibung der Förderung s. https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/promotion_ev/promotion_ev.html), zu Beispielrechnungen zur Förderung und zur FRT s. https://www.td.gov.hk/en/public_services/licences_and_permits/vehicle_first_registration/new_frt_concessions_for_electric_vehicles_2018/index.html bzw. https://www.td.gov.hk/en/public_services/licences_and_permits/vehicle_first_registration/new_frt_concessions_for_electric_vehicles_2018/index.html; verwendet wurde in der Datenbank ein Höchstwert)(alle letztmalig abgerufen April 2023).

⁸⁰ Verwendet wurde die 2022er-Runde; eine englischsprachige knappe Beschreibung liefert Netherlands Enterprise Agency (2022): SDE++ 2022. Stimulating of sustainable energy production and climate transition. Diese englischsprachige Version ist augenscheinlich nicht mehr online verfügbar. Darum sei auf die 2023er Version verwiesen, die zwar einige Änderungen im Vergleich zu der 2022er-Regelung enthält, aber den gleichbleibenden Grundsatz des Mechanismus ebenfalls beschreibt: https://www.rvo.nl/sites/default/files/2023-09/Brochure_SDEplusplus_2023.pdf (abgerufen am 27.06.2024). Auf Niederländisch bietet <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sde/orienteren> einen guten Ausgangspunkt für Informationen zu SDE++ (abgerufen Juni 2023).

⁸¹ Zur Ergebnisliste der 2022er-Runde s. <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.rvo.nl%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2023-05%2FEindstand%2520SDE%252B%252B2022.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK> (letztmalig abgerufen am 27.06.2024).

möglich. Für weitere spezielle Technologien – „Agro-PV“ – oder Akteure (z.B. Energiegenossenschaften) und für Eigenverbrauch sind weitere Fördermittel eingeplant⁸². Ähnlich vielfältige Fördermechanismen gibt es für PV in einigen der betrachteten Länder (insbesondere in Südkorea). Dabei können verschiedene Förderungen kumulativ⁸³ oder alternativ⁸⁴ beantragt werden.

Zu iii): Die eben für Italien genannte Förderung von PV-Anlagen im Kontext einer energetischen Sanierung ist auch ein Beispiel für den letzten Punkt, wonach Förderungen für eine Technologie unter einem Instrument mit einer anderen Zielrichtung mitgehalten sein könnten. Innerhalb der Gebäudesanierung werden auch häufig Wärmepumpen und gelegentlich auch Ladepunkte für batterieelektrische Fahrzeuge sowie stationäre Batterien gefördert. Förderungen für Wärmepumpen sind zudem häufiger z.B. unter Effizienzmaßnahmen in der Industrie subsumiert⁸⁵. Deshalb ist generell erforderlich, auch effizienzorientierte Förderinstrumente – vornehmlich im Gebäudebereich und Effizienz in der Industrie – zu betrachten.

Zu iv): Generell zielführend erwies sich das Vorgehen gleich alle möglichen Förderungen (z.B. verschiedenen Förderprogramme), die von einer Organisation verwaltet werden durchzugehen, sobald sie das erste Mal als relevant erkannt wurde. Dies half insbesondere, falls eine Organisation viele verschiedene Programme verwaltete (z.B. in den Niederlanden, s. Fußnote 64). Von der anderen Seite betrachtet, ist das auch so zu interpretieren, dass eine fragmentierte Organisation die Suche erschwert und eine vollständige Erfassung unwahrscheinlicher werden lässt.

Als Beispiel für eine recht breite Streuung mag die deutsche Förderlandschaft für die Technologiegruppe „E-Mobilität“ gelten, die neben PKW auch Nutzfahrzeuge sowie Lademöglichkeiten umfasst. Eingesehen wurden für die Datenerhebung neben einschlägigen Seiten der IEA-

⁸² Siehe zum Einstieg: Einspeisevergütung und Marktprämie: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Servizi%20per%20te/FER%20ELETRICHE/NORMATIVE/DM%204%20luglio%202019%20-%20Incentivazione%20dell'E2%80%99energia%20elettrica%20prodotta%20dagli%20impianti.pdf; "Agro-PV" and "Energy communities": https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR_0.pdf S.130 (Details S.132f.); Steuervergünstigung für PV (superbonus) <https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/web/quest/superbonus-110%25> Steuervergünstigung für PV (bonus casa): <https://www.ufficienzaenergetica.enea.it/detrazioni-fiscali/bonus-casa.html>; "net billing": https://iea.blob.core.windows.net/assets/71b328b3-3e5b-4c04-8a22-3ead575b3a9a/Italy_2023_EnergyPolicyReview.pdf S.89 and <https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/scambio-sul-posto/chi-pu%C3%B2-accedere> (alle abgerufen im Juli 2023).

⁸³ Z.B. für Deutschland für Wärmepumpen u.U. sowohl Zuschuss und als auch vergünstigtes Darlehen (s. <https://www.energie-wechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/Foerderprogramme/beg-em-privat.html#anker-wie>) (abgerufen Juli 2023).

⁸⁴ Z.B. für Unternehmen in den USA auch für PV die Wahl zwischen einem Investitionszuschuss („ITC“) oder einem Zuschuss auf die erzeugte Strommenge („PTC“) s. https://www.energy.gov/eere/solar/federal-solar-tax-credits-businesses#_edn5 (abgerufen 02.2023)

⁸⁵ Z.B. für Malaysia (s. Fußnote 77)

Datenbank Webseiten zuständiger Bundesministerien (für Wirtschaft und Klimaschutz, für Digitales und Verkehr sowie der Finanzen). Mit der Umsetzung der Förderung ist mitunter Projektträger Jülich (PtJ) betraut, wobei die faktische Durchführung einer Förderrichtlinie wiederum z.B. bei der Programmgesellschaft NOW GmbH liegt. Daneben waren Webseiten des Bundesamts für Logistik und Mobilität (BALM), der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und der Bundesanstalt für Verwaltungsdienstleistungen (BAV) zu einschlägigen Förderprogrammen zu konsultieren. Nach der ersten Zeit wurde allerdings deutlicher, an welchen Stellen hilfreiche Angaben zu finden und wie Zuständigkeiten wahrscheinlich geregelt waren, was die weitere Suche erleichterte. Die Webseiten waren mitunter weder horizontal noch vertikal verlinkt⁸⁶. Von den ausführenden Organisationen ist nur die KfW für verschiedene Förderprogramme zu anderen Technologiegruppen zuständig, weshalb deren „E-Mobilität“ zuzuordnender Beitrag höchstwahrscheinlich auf jeden Fall gefunden worden wäre.

Es ist fraglich, ob bei einer ähnlichen organisatorischen Struktur in Ländern mit unbekannter Sprache, vor allem aber mit unbekannter Schrift, alle wesentlichen Programme gefunden worden wären, zumal für das Beispiel „E-Mobilität, Deutschland“ nicht alle über die genutzten Datenbanken zu finden waren.

3.4.4 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick

Da für die Indikatoren zu diesem Kriterium Vollständigkeit und Aktualität nur eingeschränkt zu erkennen sind (s. Kapitel 3.4.1), muss die Datenlage auch auf Basis von Plausibilitäten eingeschätzt werden. Die Einschätzung bezieht sich dabei nur auf Förderungen im Energiebereich, da rein industriepolitische Maßnahmen nicht erhoben werden konnten.

Das grundsätzliche Problem bei diesem Kriterium ist, dass keine Datenbank gefunden wurde, die einen relativ aktuellen und vollständigen Überblick über Fördermaßnahmen liefert. Aufgrund dortiger Eintragungen kann man tendenziell davon ausgehen, dass OECD-Länder besser erfasst sind als Nicht-OECD-Länder und größere Länder besser als kleinere. Durch das

⁸⁶ Eine Auswahl letztlich verwendeter Webseiten mag zur Verdeutlichung dienen: https://www.bav.bund.de/DE/4_Foerderprogramme/6_Ladeinfrastruktur_fuer_Elektrofahrzeuge/Foerderung_Ladeinfrastruktur_node.html;jsessionid=9C2BFBD75C15572F2858686B274C7E01.live11292 und https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Foerderprogramme/KsNI/2_Foerderauefruf/2_Foerderauefruf_KsNI_Fahrzeuge_Infrastruktur_Teil1.pdf?__blob=publicationFile&v=5 und https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/7950/live/lw_bekdoc/3.-aufruf-busse-und-infrastruktur.pdf und https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bundesanzeiger-foerderrichtlinie-umweltbonus-elektroautos.pdf?__blob=publicationFile&v=1 und <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/01/BAanz-AT-24.12.2020-B3.pdf> und <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/Wohngeb%C3%A4ude/Bestand/Ladestation/> (alle abgerufen: Juli/August 2023).

darauf angepasste, erweiterte Vorgehen konnte dem teils entgegengewirkt werden. Eine Gesamteinschätzung zuerst nach Technologiegruppen, dann nach Ländern wird im Folgenden gegeben.

Für die Technologiegruppen „Wärmespeicher“ und „Übertragung und Verteilung von Strom“ waren besonders wenige Daten zu finden. Bei „Wärmespeicher“ dürfte es damit zusammenhängen, dass sie selten explizit einzeln gefördert werden, sondern vermutlich häufiger – auch ohne explizit genannt zu werden – als Teil anderer Anlagen und gewissermaßen bei Bedarf mit diesen mitgefördert werden. Im Zusammenhang mit Stromnetzen ist zu bedenken, dass politische Fördermaßnahmen hier häufig nicht über Zuschüsse und ähnlichem erfolgen dürften, sondern über Anpassungen in der Regulierung (z.B. wie dort bestimmte Kosten berücksichtigt werden können) und derartige Technologien dann letztlich über Netzentgelte bezahlt werden. Ähnliches könnte für große „stationäre Batterien“ zutreffen. Jedenfalls wurden hier insbesondere Förderungen für kleine Batterien im Zusammenhang mit lokalen Energiesystemen, insbesondere PV, zu finden. Auch für CCUS resultierten wenige Daten zur Förderung: Dies dürfte damit zusammenhängen, dass aufgrund des Entwicklungsstands von CCUS nur wenige Förderungen für kommerzielle Projekte zu erwarten sind und der Fokus der Länder noch mehr auf Pilotanlagen und Demonstrationen liegt. Insofern war zu erwarten, dass nur in wenigen Ländern Markteinführungsinstrumente etabliert sind. Ergänzend ist für die Technologiegruppe „Wasserstoff“ zu vermuten, dass am aktuellen Rand Förderungen der Markteinführung schnell geändert oder ergänzt worden sein dürften, da in einigen Ländern ambitionierte Wasserstoffziele vorliegen und dafür erforderliche Technologien schnell kommerziell attraktiv werden müssen. Als ein weiteres eventuell problematisches Feld ist „Biomasse“ zu nennen, da sie in vielen energetischen Bereichen – z.B. zur Strom- und Wärmeerzeugung als auch als Kraftstoff – eingesetzt werden kann, sich aus höchst unterschiedlichen Ursprungsstoffen – z.B. Holz, Reststoffe verschiedener Prozesse, Anbau für energetische Zwecke – zusammensetzt und nach evtl. weiteren Prozessen in fester, flüssiger oder gasförmiger Form eingesetzt werden können. Dementsprechend kann eine Vielzahl von Maßnahmen mit verschiedenen Voraussetzungen relevant werden. Vermutet wird, dass trotzdem ein zwar nicht vollständiger aber passabler Überblick über hauptsächliche Förderinstrumente erreicht wurde, da typischerweise Maßnahmen im Bereich der Strom- und Wärmeerzeugung (sowohl für Gebäude- als auch für Industrierwärme) systematisch durchgegangen wurden und Beimischungsquoten für Kraftstoffe unter Kriterium 1 (Politische Ziele) erfasst wurden.

In Bezug auf die Länder muss damit gerechnet werden, dass vor allem die Daten für die ostasiatischen Länder – China, Japan, Südkorea – aufgrund v.a. der nicht vertrauten Schrift tendenziell schlechter erfasst sind, da sie vermutlich eine systematische Auswertung einschlägiger Webseiten erschwerte. Zudem erschwerte sie eine Identifikation jeweils für Förderungen

zuständiger Regierungsorganisationen. Um dem entgegenzuwirken, wurden für diese Länder auch Presseberichte herangezogen, und für die im weiteren Projektverlauf vertieft untersuchten Länder – hieraus: Japan und China – bei unvollständig oder veraltet erscheinenden Einträgen in der resultierenden Datenbank ergänzend recherchiert. So konnte z.B. für Japan die neue, 2023 veröffentlichte Wasserstoffstrategie mit geplanten Förderungen berücksichtigt werden. China wird aufgrund seiner Bedeutung häufig in anderweitigen Studien behandelt, was die Datenlage tendenziell verbessert. Ergänzend ist zu erwähnen, dass für Japan und Südkorea relativ aktuelle IEA-Studien zur Energiepolitik vorliegen (IEA 2020, 2021a), die einen gewissen Ausgangspunkt für die weitere Recherche bieten.

Ein quantitativer Vergleich der gefundenen Förderungen zwischen Ländern ist aber nur eingeschränkt möglich. Dies gilt schon für Angaben zu (geplanten) Budgets, da sich die Zwecke bestimmter Budgets je nach Land unterscheiden. Immerhin können aber gewisse Größenordnung der Budgetplanungen, z.B. zu Wasserstoff, mit gewisser Vorsicht teils verglichen werden. Für spezifische Fördersätze ist ein Vergleich teils äußerst schwierig. Im Bereich der Stromerzeugung können u.a. Investitionszuschüsse gezahlt werden, eine Quotenregelung oder Einspeisevergütungen (FiT) oder Marktprämien (FiP) existieren, wobei für Letztere entweder eine Prämie oder ein Referenzstrompreis angegeben sein kann. Zusätzlich können sich bei FiT oder FiP weitere wichtige Regelungen - z.B. die Laufzeiten – unterscheiden. Für einen unmittelbaren quantitativen Vergleich, inwieweit die Förderungen auskömmlich sind, wären mithin einzelne komplette Investitionsrechnungen erforderlich, was in diesem Projekt nicht zu leisten war. Für einzelne Länder kann die Förderung jedoch v.a. im Zusammenspiel mit „Kriterium 5: Kosteneffizienz“ aber auch Kriterium 1 (Politische Ziele) – da dort Ausschreibungsmengen betrachtet werden – gut ausgewertet werden.

Eine zukünftige grundsätzliche Vereinfachung eines Suchverfahrens für Maßnahmen zur Förderung der Markteinführung für viele Energietechnologien und Länder ist aus den gesammelten Verfahren nicht abzuleiten. Jedenfalls ist gegenwärtig weiterhin davon auszugehen, dass keine öffentlich zugängliche, vollständige und aktuelle internationale Datenbank zu Fördermaßnahmen von einzelnen Energiewendetechnologien nach Ländern existiert, vor allem wenn auch nicht-OECD-Länder berücksichtigt werden sollen und nochmals verstärkt, wenn diese Länder energiewirtschaftlich relativ klein sind. Zumal auch die Erfahrung zeigt, dass – zusätzlich zu den bereits oben explizit genannten Datenbanken – im Zuge der Projektplanung als prinzipiell gut geeignet identifizierte Datenwebseiten nicht mehr aktualisiert wurden oder zu

wenig detailliert waren⁸⁷. Für einzelne, ausgewählte Technologien und Länder mag es Zusammenfassungen bestimmter Förderungen geben, aber typischerweise reichen die dort zu findenden Informationen auch für die betrachteten Länder nicht aus, die Informationen enthalten vielfältige Annahmen und die Vielfalt der Förderinstrumente wird nicht abgebildet⁸⁸. Ähnlich verhält es sich mit den herangezogenen Übersichten zur Energiepolitik für einzelne Länder (z.B. IEA 2020, 2020a, 2021, 2021a, 2022, 2023). Auch hier ist zu erwägen, inwieweit sich der Such- und Auswertungsaufwand durch den Einsatz neuer informationstechnischer Verfahren reduzieren lässt.

3.4.5 Literatur zu Kriterium 3:

Vorbemerkung: Im Text und vor allem den Fußnoten finden sich weitere betrachtete Links, die beispielhaft bestimmte Sachverhalte illustrieren und belegen. Diese sind nicht in der Literaturliste aufgenommen, da sie – der Intention des Textes folgenden – häufig aufzeigen, was nicht funktioniert hat. Das Literaturverzeichnis bestünde demnach zu einem großen Teil aus nicht weiterhelfenden Links. Alle tatsächlich verwendeten Links aufzuführen, würde das Literaturverzeichnis ganz erheblich aufblähen. Sie wären ohne weitere Notizen zum Kontext, in dem die jeweilige Quelle relevant ist, mitunter auch wenig hilfreich.

Banning, M. et al. (2023): Zentrale Technologien und Länder der globalen grünen Transformation. Methoden und Analysen vor dem Hintergrund des „Low Carbon Leakage“-Risikos. GWS Research Report 2023/07.

IEA (2020): Korea 2020. Energy Policy Review.

IEA (2020a): The Netherlands 2020. Energy Policy Review.

IEA (2021): France 2021. Energy Policy Review.

IEA (2021a): Japan 2021. Energy Policy Review.

IEA (2022): Belgium 2022. Energy Policy Review.

IEA (2023): Italy 2023. Energy Policy Review.

⁸⁷ Z.B. <http://www.res-legal.eu/home/> mit einem finalen Update im Jahr 2019. Die Daten auf <https://www.eurobserv-er.org/eurob-server-policy-files-for-all-eu-28-member-states/> erwiesen sich zwar teilweise als hilfreich, aber teils als zu alt (das betrifft v.a. auch Daten zu den meisten anderen Kriterien) oder als zu wenig detailliert, um als maßgebliche Quelle verwendet werden zu können; hauptsächlich fehlten i. Allg. Daten zu Förderhöhen und die verfügbaren technologische Gliederung war überwiegend unzureichend. Beide Webseiten erfassen zur Förderung zudem nur EU-Länder (res-legal noch einige anderen europäischen Länder)(letztmalig abgerufen September 2022).

⁸⁸ S. z.B. aktuell zu Wasserstoff: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2024/06/2024-State-of-the-European-Hydrogen-Market-Report.pdf>, zu Zahlen zur Förderung S.21f. (abgerufen Juli 2024).

REN21 (2022): Renewables 2022. Global Status Report (inklusive des dazugehörigen Data Packs).

Für die Recherche als Ausgangspunkt verwendete Datenbanken (Abrufe März 2023 bis Juli 2023):

<https://www.iea.org/policies>

<https://www.climatepolicydatabase.org/>

<https://www.energypolicytracker.org/>

Anmerkungen: Kriterium 4 (Marktpotentiale) wurde in einem anderen Projektkontext anderweitig behandelt und ist deshalb nicht Gegenstand dieses Papiers (s. Abschnitt 2.1).

3.5 Kriterium 5: Kosteneffizienz

3.5.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren

Über das Kriterium 5 (Kosteneffizienz) soll erfasst werden, inwieweit die betrachteten Energiewendetechnologien auch unabhängig von einer Förderung alte Technologien aus ökonomischer Sicht aus dem Markt drängen und welche neuen Technologien am ehesten eingesetzt werden. Dabei sollen sowohl Länderunterschiede erfasst als auch ein Ausblick gewagt werden, wie sich die Kosten aufgrund von vor allem Lern- oder Skaleneffekten zukünftig in einzelnen Ländern entwickeln. In Kombination mit dem Kriterium 3 (öffentliche Förderung) kann dann auch eingeschätzt werden, inwieweit die ökonomischen Bedingungen in einem Land ausreichend sein dürften, um eine Anwendung voranzubringen.

Als Indikatoren für Land/Technologiekombinationen ergeben sich daraus

- Spezifische Gesamtkosten, die bei Einsatz einer Technologie in einem Land entstehen (z.B. Stromgestehungskosten (LCOE) für PV, Windkraftanlagen u.a. oder Gesamtkosten pro gefahrenen Kilometer (TCOO) für PKW);
- Spezifische Investitions- oder Installationskosten (z.B. Fahrzeugpreise, Kosten pro installierter MW Leistung für PV, Windkraftanlagen...)
- Länderspezifische Lernraten (also: Um wieviel Prozent sinken die spezifischen Kosten, wenn sich die kumulierte Menge verdoppelt?).

Neben Werten zum aktuellen Stand sind dabei auch Werte für die Vergangenheit und besonders für die Zukunft relevant. Zum Vergleich sollten auch – sofern sinnvoll – vergleichbare Daten für konventionelle, typischerweise auf fossiler Basis arbeitenden Technologien erhoben werden.

Spezifische Gesamtkosten wurden dabei als wichtiger als spezifische Investitionskosten eingeschätzt, da sie die tatsächlichen Kosten der Produkterzeugung abbilden und mithin für einen Vergleich zwischen Technologien und Ländern sowie mit Daten zu „öffentlicher Förderung“ besser geeignet sind⁸⁹. Investitionskosten sind als nur ergänzend anzusehen, haben aber den Vorteil näher an der monetären Nachfrage nach den einschlägigen Investitionsgütern zu sein als spezifische Gesamtkosten.

Für eine Projektion in die Zukunft können zum einen Fortschreibungen der beiden eben genannten Größen aus der Literatur verwendet werden. Daneben sind länderspezifische Lernraten interessant, da diese erlauben würden, die zukünftige Kostenentwicklung für eine Technologie in jedem Land in Abhängigkeit von der Entwicklung der Nachfrage nach dieser Technologie in diesem Land zu bestimmen. Damit könnten Kostenvorteile abgeschätzt werden, die ein Land aufgrund eines früheren oder schnelleren Ausbaus einer Technologie erlangen könnte. Zu dem Indikator ist anzumerken, dass eine länderspezifische Lernrate eine andere Diffusion von technologischem Wissen impliziert als eine weltweite Lernrate: Mit einer länderspezifischen Lernrate wird angenommen, dass neu erlangtes Wissen durch Anwendung der Technologie sich ausschließlich an Produzenten innerhalb des Landes, in dem die Anwendung erfolgt, verbreitet. Hingegen wird bei einer weltweiten Lernrate angenommen, dass das in einem Land generierte Wissen Produzenten in allen Ländern der Welt zur Verfügung steht. Das zeigt sich auch mathematisch: Da es sich um Potenzfunktionen handelt, kann eine für die Welt ermittelte Lernrate nicht einfach auf einzelne Länder angewendet werden; denn im Ergebnis führt eine bestimmte gleiche Lernrate für einzelne Länder i. Allg. nicht zu ebendieser Lernrate in einer darauf aufbauenden, aggregierenden weltweiten Betrachtung. Also eine Lernrate von $x\%$ für alle Länder führt i. Allg. nicht zu einer Lernrate von $x\%$ für die Welt und umgekehrt⁹⁰. Ergänzend ist auch darauf hinzuweisen, dass Lernraten, je nachdem wie sie geschätzt werden, höchst Unterschiedliches beinhalten können. Wenn die Lernraten auf Basis einer generellen Kostenentwicklung über die Zeit geschätzt werden, beinhalten sie drei wesentliche Effekte: 1.

⁸⁹ Nicht berücksichtigt wurden komplette Systemkosten, die z.B. im Falle von Elektrizitätserzeugungstechnologien etwa durch notwendige Netzausbau, flexible anderweitige Erzeugung oder Nachfrage entstehen. Derartige Systemkosten sind in einem ökonomischen Szenarienvergleich von Bedeutung, wurden hier jedoch aufgrund der vielfältigen zusätzlichen Annahmen als untergeordnet betrachtet. Zudem sind diese Kosten i. Allg. nicht einer Technologie zuzuordnen, sondern hängen von dem in Ausbauszenarien angesetzten Technologiemiß ab. Über Kriterium 9 („Abhängigkeit von Infrastrukturen“) flossen etwaig drohende Netzengpässe und ähnliches jedoch in der Gesamtauswertung ein.

⁹⁰ Grundsätzlich sind entsprechende Umrechnungen möglich: Man kann Welt- und einheitliche Länderlernraten für einen bestimmten Ausbaupfad je Land so justieren, dass sie miteinander kompatibel sind; also z.B. für eine vorgegebene Weltlernrate für einen bestimmten Ausbaupfad je Land einheitliche länderspezifische Lernraten bestimmen, die dann aggregiert zu der festgelegten Weltlernrate führen. Ergänzend dazu: Inhaltlich ist es grundsätzlich möglich länderspezifische und weltweite Lernraten so zu gestalten, dass eine Diffusion des Wissens innerhalb eines Landes schneller abläuft als eine Diffusion in andere Länder. Eine derartige Modellierung ist nicht trivial.

Skalenerträge (eine Produktion kann pro erzeugter Einheit (z.B. pro MW) – bei gleichem Wissen – kostengünstiger werden, wenn die – z.B. jährliche - Erzeugungsmenge pro Betrieb über die Zeit steigt); 2. Verringerte Kosten pro erzeugter Einheit, wenn die Größe der erzeugten Anlagen mit der Zeit steigt (z.B. kann eine Windkraftanlage pro MW kostengünstiger werden, wenn statt 2-MW-Anlagen 5-MW-Anlagen produziert werden); 3. Lerneffekte im eigentlichen Sinn: Durch Erfahrungen mit dem Produktionsprozess kann dieser über die Zeit verbessert werden, was zu verringerten spezifischen Kosten führt. Alternativ kann versucht werden, diesen letzten Effekt unter 3. (ggf. inklusive 2.) aus Kostenentwicklungen herauszulösen. Da es für dieses Vorgehen aber keine breite Literatur über viele Länder und Technologien gibt, beziehen sich Angaben i. Allg. auf eine über alle Effekte aggregierte Lernrate. Als Ersatz für derartige Lernraten nach Technologien und Ländern werden, sofern vorhanden, auch Angaben zu Kostenreduktionen über einen längeren Zeitraum nach Technologien und Ländern aufgenommen.

Die genannten Indikatoren wurden teils auch in aggregierterer räumlicher Abgrenzung (v.a. „Welt“, „EU“) aufgenommen, sofern für eine Technologie keine länderspezifischen Daten oder keine Daten für alle betrachteten EU-Länder zu finden waren.

3.5.2 Grundsätzliches Vorgehen

Bevorzugt wurden für die Sammlung Quellen herangezogen, die für eine Technologie möglichst viele Länder und für den Bereich der Stromerzeugung möglichst mehrere Technologien vergleichen, da verschiedene Technologien zur Stromerzeugung auch miteinander in Konkurrenz stehen können⁹¹. Damit soll erreicht werden, dass Parametrisierung und Verfahren für die Bestimmung der Kosten zwischen Ländern und teilweise Technologien vergleichbar sind. Eine Vergleichbarkeit ist offensichtlich für Auswertungen wichtig. Bedeutend ist die Parametrisierung z.B. für PKW, da die „total cost of ownership“ (TCO) u.a. von dem zugrunde gelegten Fahrzeugmodell und der angenommenen jährlich zurückgelegten Fahrstrecke abhängen⁹². Daneben impliziert das, dass techno-ökonomische Studien überwiegend nicht herangezogen werden konnten, da sie häufig bestimmte eingeschränkte Anwendungssituationen enger spezifizierte Technologien untersuchen und eher selten breiter angelegt sind und viele hier relevante Länder und Technologien umfassen. Generell wurde deshalb für alle Technologiegrop-

⁹¹ Gegebenenfalls können sie aber in einer Gesamtbetrachtung des Stromsystems aufgrund unterschiedlicher zeitlicher Erzeugungscharakteristika auch in einem Komplementaritätsverhältnis stehen.

⁹² Deshalb wurden zum Beispiel TCO für verschiedene PKW in Malaysia aus Li/Kimura (2021) oder CCS-Kosten für China aus Guizhen Li et al. (2022) nicht aufgenommen.

pen vornehmlich auf Quellen von IRENA, der IEA und die Clean Energy Technology Observation(CETO)-Berichte, die von der Europäischen Union herausgegeben werden, zurückgegriffen und die jeweiligen Quellen gegebenenfalls ergänzt.

Technologiegruppe	Zentrale Quellen
Windenergie	Enerdata et al. (2020), Enerdata (2022), IEA, NEA (2020), IRENA (2021, 2022), Telsnig et al. (2022),
Solarenergie (PV, CSP)	Chatzipanagi et al. (2022), IEA, NEA (2020), IRENA (2021, 2022), Taylor et al. (2022)
Wasserkraft	IEA, NEA (2020), IRENA (2021, 2022), Quaranta et al. (2022)
Biomasse	Hurtig et al. (2022), IEA, NEA (2020), IRENA (2021, 2022), Motola et al. (2022)
Batteriespeicher (stationär)	Bielewski et al. (2022), IEA, NEA (2020), IRENA (2017), Prettico et al. (2022)
Wasserstoff	Dolci et al. (2022), ESMAP, World Bank (2020), IEA, NEA (2020), IRENA (2020, 2022a)
Brennstoffzellen-Fahrzeuge	IEA (2015, 2019), NOW (2018), Samsun et al. (2022)
E-Mobilität	Bielewski et al. (2022), IEA (2019)
Wärmepumpen	ECF (2022), IEA (2022), IRENA (2022b)
Wärmespeicher	IRENA (2020a)
CCU/CCS	IEA (2020), Kapetaki et al. (2022)

Tabelle 9: Zentrale Quellen nach Technologiegruppen für das Kriterium „Kosteneffizienz“

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die zentrale letztlich verwendete Literatur, die nur einen Teil der gesichteten Literatur darstellt.

3.5.3 Schwierigkeiten der Datenerhebung

Auch für dieses Kriterium liegt die Schwierigkeit darin, gleichzeitig sowohl eine Länder- als auch eine Technologiespezifität bei erwünschter internationaler Vergleichbarkeit zu sichern.

In Bezug auf Länder ist die resultierende Datenlage tendenziell in absteigender Reihenfolge für EU-Länder, in der weltweiten Energiewirtschaft sehr bedeutende Länder (insbesondere China und die USA) und OECD-Länder besser und für Malaysia, Hong Kong und Brasilien schlecht. Dies erklärt sich aus der hohen Bedeutung von länderübergreifenden Studien durch die EU sowie der IEA und teils IRENA. Gerade in letzteren werden weniger bedeutsame Länder nicht behandelt oder Kostenwerte nicht explizit für diese Länder veröffentlicht.

In Bezug auf Technologien sind die Daten für Technologien zur Stromerzeugung tendenziell besser als für andere. Für relative neue und zum Zeitraum der Datensammlung noch nicht breit eingesetzt Technologien (CCU/CCS, Wasserstoff, Brennstoffzellenfahrzeuge, stationäre Batte-

riespeicher und E-Mobilität) sind Kostendaten – insbesondere länderspezifische – erwartungsgemäß tendenziell schwierig zu beschaffen. Daneben erwies sich die Datenlage für Wärmespeicher als sehr schlecht, was damit zusammenhängen könnte, dass diese Technologie nicht im Fokus energiewirtschaftlicher Untersuchungen steht und sie häufig integriert in Wärmesystemen eingesetzt wird. Zudem sind Wärmespeicher ein relativ heterogene Technologiegruppe, da je nach Einsatzbedingungen (z.B. Temperaturniveau, Speichermenge, Raumrestriktionen, Dauer der Speicherung) andere Technologie und Konfigurationen in Frage kommen. Das erschwert eine Datensammlung erheblich. Ähnliches gilt im Übrigen auch für den Carbon-Capture-Teil von CCU/CCS, da je nach Zusammensetzung und Temperatur des Gases oder Rauchs andere Technologien in Frage kommen. Ähnliches gilt zudem für Biomasse, wo überwiegend nur Daten zur Stromerzeugung gefunden wurden und wenige zum Einsatz im Wärme- und Verkehrsbereich.

Zudem sollten Werte für die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ermittelt werden. Je nach Aktualität der Technologien (s. vorhergehender Abschnitt) sind vergangene Werte nicht vorhanden oder kaum belastbar und auch gegenwärtige Werte nur eingeschränkt aus empirischen Auswertungen abgeleitet. Davon abgesehen konnten für die Länder und Technologien, für die Daten gefunden wurden, typischerweise auch für einzelne Jahre Werte für die Vergangenheit und für mögliche Entwicklungen in zukünftigen Jahren ermittelt werden. Durchgehende Zeitreihen in jährlicher Auflösung resultierten aber i. Allg. nicht.

Inhaltlich wurden vornehmlich spezifische Gestehungskosten und verwandtes erfasst. Für spezifische Investitionskosten nach Technologie – die von Haus als weniger relevant eingeschätzt wurden – ergab sich das Problem, dass zum einen häufiger spezifische Installationskosten – also Kosten inklusive z.B. Planungs-, Bau-, Montagekosten – angegeben wurden, aus denen die Kosten für den Kauf von Anlagen nicht ohne weiteres zu ermitteln sind. Zum anderen wurden häufig nur CAPEX bzw. deren Anteil an den Gestehungskosten angegeben, woraus auch Installationskosten nicht ohne weiteres zu ermitteln sind. Angesichts der eher geringen Bedeutung dieses Indikators wurde allerdings kein größerer Aufwand betrieben, um diesen Indikator zu beschaffen.

Länderspezifische Lernraten wurden i. Allg. nicht gefunden. Dies mag auch daran liegen, dass für Lernraten die „Welt“ im Fokus steht. Zusätzlich ist zu erinnern, dass weltweite und länderspezifische Lernraten letztlich unterschiedliches zu Prozessen der Wissensdiffusion annehmen und kostensenkende Faktoren (z.B. Skaleneffekte versus Lerneffekte im eigentlichen Sinn) miteinander nicht sauber getrennt sind (s. 3.5.1). Insofern wäre dieser Indikator auch mit besonderer Um- und Vorsicht zu interpretieren. Ohne diesen Indikator ist allerdings ein Zusammenhang

zwischen Entwicklung von Nachfragemengen und Kosten in einem Land schwieriger herzustellen. Für weltweite Lernraten erwies sich eine Nutzung innerhalb des Projekts im Zuge der Auswertung als schwierig und wenig zielführend, da letztlich Produktionen in allen Ländern gleichermaßen von einer Nachfrageerhöhung in einem Land profitieren.

3.5.4 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick

Generell hat sich als schwierig erwiesen Daten zu finden, die gleichzeitig technologie- und länderspezifisch sind. Das gilt auch für dieses Kriterium. Erschwerend kommt bei diesem Kriterium hinzu, dass eine gewisse Vergleichbarkeit zwischen Ländern gewährleistet werden soll, was insbesondere für Gestehungskosten und verwandtem schwierig ist, da in deren Berechnung eine große Anzahl von Parametern einfließen. Zu „Vergleichbarkeit“ ist zu bedenken, dass einige dieser Parameter zwischen den Ländern variieren müssen, um länderspezifische Unterschiede – um die es hier geht – abzubilden. Das heißt, es ist primär ein einheitlicher Ansatz erforderlich, in den dann bestimmte länderspezifische Unterschiede in systematisch gleicher Weise erhoben werden und in die Rechnung einfließen. Deshalb ist angezeigt, über möglichst viele Länder aber auch verschiedene Technologiegruppen hinweg, sofern sie gleiche Leistungen (z.B. Strom erzeugen, Verkehrsdienstleistungen) bieten, gleichzeitig untersuchende Quellen zu verwenden. Deshalb wurde bevorzugt auf IEA-, IRENA-Berichte/Daten sowie von der EU veröffentlichte CETO-Berichte (Clean Energy Technology Observatory) zurückgegriffen. Grundsätzlich wird damit auch Unsicherheit abgebildet, sofern für eine bestimmte Land/Technologiekombination Daten für gleiche Jahre aus verschiedenen Quellen zu finden waren. Das war allerdings überwiegend nicht der Fall, die Quellen selbst gaben mitunter aber Hinweise zu Unsicherheiten, die dann auch beachtet wurden. Die Alternative oder Ergänzung in der Breite Veröffentlichungen zu Kosten auszuwerten, wurde aufgrund des damit verbundenen Aufwands verworfen. Letztlich wären dann für jede Technologiegruppe – oder gar für verschiedene Einzeltechnologien in jeder Gruppe - Metastudien erforderlich gewesen. Zudem haben Stichproben gezeigt, dass einschlägige Artikel zu Kosten aufgrund mitunter sehr unterschiedlicher Annahmen tatsächlich schwer zu vergleichen sind. Demnach zeigte sich, dass der grundsätzliche Ansatz, sich auf länderübergreifende Studien zu fokussieren, für eine Betrachtung mehrere Technologien und Länder der mit vertretbarem Aufwand einzig praktikable ist. Falls nur eine Technologie in einem Land zu betrachten wäre, ist wahrscheinlich ein anderer Ansatz angezeigt.

Mit dieser Methode war es aber i. Allg. nicht möglich, längere Zeitreihen für die vergangene Entwicklung zu eruieren. Im Kontext der Indikatoren-basierten MLP-Analyse wurde erkannt, dass derartige Zeitreihen eine Verbindung zu quantitativen Modellanalysen liefern könnten, zumal in dem hier verwendeten Modell (s. Banning et al., 2023) statistische Schätzungen die

Grundlage für implementierte Gleichungen sind. Auch wenn ein anderes Vorgehen als das Gewählte in diesem Projekt als unpraktikabel einzuschätzen ist, weist dies doch darauf hin, dass man insbesondere im Zusammenhang einer breiten Datenerhebung, die auch einer quantitativen Modellierung dienen soll, erwägen sollte, ob mit vertretbarem Aufwand und ohne Abstriche bei anderweitigen Datenverwendungen eine Suchstrategie sinnvoll sein könnte, die an den Datenbedarf des Modells angepasst ist. Das ist natürlich selbstverständlich, falls es allein um die Parametrisierung oder Kalibrierung eines Modells geht. Eine solche, vorab festgelegte Verengung der Suche ist allerdings regelmäßig nicht sinnvoll, wenn eine eigenständige qualitative Analyse mit einer quantitativen Modellierung verbunden werden soll.

Ergänzend zeigt sich bei diesem Kriterium – ähnlich wie z.B. bei dem Kriterium 6 (Wertschöpfung) –, dass gerade für relative neue Technologien, deren Markteinführung gerade beginnt oder erst ansteht (z.B. H₂-Elektrolyseure, viele Carbon-Capture-Technologien), detailliertere, relativ verlässliche Daten nicht zu finden sind, weil naturgemäß noch keine Erfahrungen vorliegen können. Im Zuge einer Auswertung kann das berücksichtigt werden, indem diesem Kriterium eine geringere Gewichtung beigemessen wird und fehlende länderspezifische Daten als wenig gravierend eingeordnet werden. Im Zuge einer Projektplanung kann gegebenenfalls erwogen werden für derartige Technologien gleich auf eine Detaillierung von Kostendaten zu verzichten. Allerdings hat sich gezeigt, dass gerade für derartige am Beginn oder gar noch vor der Markteinführung stehenden Technologien am ehesten unterschiedliche Rahmenbedingungen in verschiedenen Ländern zu einer Produktionsausweitung oder -verlagerung führen können. Mithin sind gerade für diese Technologien Abschätzungen potentieller Kosten in einzelnen Ländern und Möglichkeiten einer Kostenreduktion besonders wichtig. Man steht also vor dem Dilemma, dass Abschätzungen von potentiellen zukünftigen Kosten nach Ländern gerade für die Technologien sehr wichtig sind, für die es naturgemäß keine gut fundierten derartigen Schätzungen geben kann. Dieser Kontext von Kostenabschätzungen und Rahmenbedingungen ist demnach für eine Weiterentwicklung der Indikatoren-basierten MLP-Analyse sehr wichtig, zumal sich die geplante Umsetzung über länderspezifische Lernraten – und damit einer Verbindung von Nachfrage- und Kostenentwicklung in einem Land – als theoretisch nicht unproblematisch und aufgrund der Datenlagen vor allem als praktisch nicht durchführbar erwies. Eine zukünftige Reduktion des Arbeitsaufwands bei der Datenrecherche zu diesem Kriterium im Vergleich zum gewählten Verfahren ist eher nicht zu sehen, zumal teils auch schon Synergien mit der Recherche zu anderen Kriterien genutzt wurden. Auch für dieses Kriterium ist, wie stets, darauf hinzuweisen, dass Entwicklungen der Informations- und Kommunikationsanwendungen potentiell zukünftige Recherchen erheblich beschleunigen könnten.

3.5.5 Zentrale Literatur zu Kriterium 5

Banning, M. et al. (2023): Zentrale Technologien und Länder der globalen grünen Transformation. Methoden und Analysen vor dem Hintergrund des „Low Carbon Leakage“-Risikos. GWS Research Report 2023/07.

Bielewski, M., Pfrang, A., Bobba, S., Kronberga, A., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny, G., Eulaerts, O., Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Batteries for energy storage in the European Union - 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/808352, JRC130724.

Chatzipanagi, A., Jaeger-Waldau, A., Cleret de Langavant, C., Letout, S., Latunussa, C., Mountraki, A., Georgakaki, A., Ince, E., Kuokkanen, A. and Shtjefni, D. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Photovoltaics in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/812610, JRC130720.

Dolci, F., Gryc, K., Eynard, U., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny, G., Eulaerts, O., Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Water Electrolysis and Hydrogen in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/7606, JRC130683.

ECF (2022): Building Europe’s net-zero future, European Climate Foundation.

Enerdata, Trinomics, LBST (2020): Final report on the cost of energy (LCOE) - Study on energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments in the energy sector, Final Report, im Auftrag der Europäischen Kommission.

Enerdata (2022): The dynamics of offshore wind power, Analyst Brief, herunterladbar unter: <https://d1owejb4br3l12.cloudfront.net/publications/executive-briefing/wind-offshore-power-dynamics.pdf> (abgerufen am 12.12.2022).

ESMAP, World Bank (2020): Green hydrogen in developing countries, Washington.

Guizhen Liu, Bofeng Cai, Qi Li, Xian Zhang & Tao Ouyang (2022): China’s pathways of CO2 capture, utilization and storage under carbon neutrality vision 2060, in: Carbon Management, 13:1, 435-449, DOI: 10.1080/17583004.2022.2117648

Hurtig O., Buffi M., Scarlat N., Motola V., Georgakaki A., Letout S., Mountraki A., Joanny G (2022): Clean Energy Technology Observatory: Advanced biofuels in the European Union –

2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/938743, JRC130727.

IEA (2015): Technology roadmap. Hydrogen and fuel cells. Paris.

IEA (2019): The future of hydrogen – seizing today's opportunities, Report prepared by the IEA for the G20, Japan. Paris.

IEA (2020): Energy technology perspectives 2020 – special report on carbon capture utilisation and storage, Paris.

IEA (2022): The future of heat pumps, Paris.

IEA, NEA (2020): Projected costs of generating electricity, 2020 Edition. Paris. (inklusive Datafile)

IRENA (2017): Electricity storage and renewables: Costs and Markets to 2030, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2020): Green hydrogen cost reduction, International Renewable Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2020a): Innovation outlook – thermal energy storage, International Renewable Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2021): Renewable power generation costs in 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. (inklusive datafile)

IRENA (2022): Renewable power generation costs in 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. (inklusive datafile)

IRENA (2022a): Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part III – Green hydrogen cost and potential, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2022b): Renewable solutions in end-uses: Heat pump costs and markets, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Kapetaki, Z., Eulaerts O., Georgakaki, A., Gonzalez Sanchez, R., Grabowska, M., Ince, E., Janny, G., Kuokkanen, A., Letout, S., Mountraki, A., Shtjefni, D. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Carbon Capture Utilisation and Storage in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/268143, JRC130663.

Li, Yanfei; Kimura, Shigeru (2021): Economic competitiveness and environmental implications of hydrogen energy and fuel cell electric vehicles in ASEAN countries: The current and future scenarios, in: Energy Policy 148 Part B, 111980, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111980>

Motola V., Scarlet N., Hurtig O., Buffi M., Georgakaki A., Letout S., Mountraki A., Joanny G. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Bioenergy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/577104, JRC130730.

NOW (2018): Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Prettico, G., De Paola, A., Thomas, D., Andreadou, N., Papaioannou, I., Kotsakis, E. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Smart Grids in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/276606, JRC130710.

Quaranta, E., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny Ordonez, G., Eulaerts, O. and Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Hydropower and Pumped Hydropower Storage in the European Union - 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/256255, JRC130587

Samsun, R. C.; M. Rex; L. Antoni; D. Stolten (2022): Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Station Infrastructure: A Global Overview and Perspectives. In: *Energies* 15, 4975, 5. <https://doi.org/10.3390/en15144975>

Taylor, N., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, K., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny, G., Eulaerts, O. and Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Concentrated Solar Power and Heat in the European Union - 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/080204, JRC130811

Telsnig, T., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny Ordonez, G., Eulaerts, O. and Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Wind Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/855840, JRC130582.

3.6 Kriterium 6: inländische Wertschöpfung

3.6.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren

Ziel des Kriteriums „inländische Wertschöpfung“ ist die Messung der wirtschaftlichen Bedeutung der einzelnen Technologien der jeweiligen Länder. Dieses soll anhand des Indikators Bruttowertschöpfung (BWS; englisch: Gross Value Added, GVA) der amtlichen Statistik zur volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) implementiert werden. Dabei besteht die BWS aus der Differenz von Produktionswert (produzierte Waren und Dienstleistungen) und Vorleistungen. Die Summe der BWS aller Wirtschaftsbereiche ergibt – nach Verrechnung von Produktsteuern, -subventionen und Importzöllen – das Bruttoinlandsprodukt (BIP) in der Entstehungsrechnung (Produktionsansatz) und stellt zentrale Elemente der VGR^{93,94} dar. Somit können – im Gegensatz zur Betrachtung von Daten zur Technologienachfrage – Rückschlüsse gezogen werden, inwiefern der „Produktionsapparat“, d.h. Tätigkeiten, woraus die Bevölkerung ihr Einkommen bezieht, auf die Transformation eingestellt ist.

Da die VGR nach relativ aggregierten Branchen (z.B. „Maschinenbau“) strukturiert ist – was auch für die mögliche zweite Statistische Quelle zur BWS (der Produktionsstatistik) gilt –, ist es nicht möglich, den Tabellen BWS-Daten zu Produkten (z.B. „PV“) zu entnehmen. Da in der VGR Unternehmen nach ihren Schwerpunkten komplett einer Branche zugeordnet werden entspricht diese Einteilung nicht einer bestimmten Technologie⁹⁵. Zudem sind sie nicht auf das Niveau einzelner Technologien heruntergebrochen, und Wertschöpfungsketten sind aus diesen Daten nicht zu erschließen. So wurde auf international vergleichende Studien zurückgegriffen, die in Einzelanalysen Daten entweder zur Wertschöpfung selbst oder zu Ersatzindikatoren, wie z.B. Produktionskapazität (nicht installierte Kapazität) oder -mengen, Umsatz oder Anzahl der Arbeitnehmer ausweisen.

⁹³ Destatis 2022: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Wichtige Zusammenhänge im Überblick. S. 8

⁹⁴ Destatis 2010: Input-Output-Rechnung im Überblick. S. 15-22.

⁹⁵ Die Zurechnung nach Schwerpunkten entspricht dem Vorgehen in der VGR und es resultieren „Wirtschaftsbereiche“. Eine Zuordnung nach den produzierten Gütern – wobei einzelne Unternehmen datentechnisch aufgespaltet werden müssen – ist in Deutschland nur in den Input-Output-Tabellen üblich; es resultieren „Produktionsbereiche“ (zu einer verständlichen Kurzerläuterung mit Beispielen s. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/ueberblick/Glossar/wirtschafts-produktionsbereich.html> (letztmalig abgerufen am 14.01.2025), sowie Literatur in Fußnote 94). Die „Produktionsbereiche“ dort sind aber zu aggregiert, um über die hier interessierenden Technologiegruppen Auskünfte geben zu können. Für andere Länder wurden Angaben in „Produktionsbereichen“ nicht gesucht, da aus den Resultaten der Datenrecherche schon geschlossen werden konnte, dass es entsprechend detaillierte Daten nicht gibt. Das mag darin begründet liegen, als das Umrechnen von Daten zu Wirtschaftsbereichen – die nahe an den Primärdaten liegen – auf Produktionsbereiche einer erheblichen zusätzliche Prozessierung bedarf. Input-Output-Tabellen enthalten grundsätzlich Hinweise auf Vorleistungslieferungen und mathematisch kann grundsätzlich die gesamte Wertschöpfungskette inkl. Vorleistungen aus ihnen bestimmt werden. Aufgrund des hohen Aggregationsniveaus der Tabellen ist dies für die vorliegende Aufgabenstellung aber nicht von Nutzen.

3.6.2 Grundsätzliches Vorgehen

Um international vergleichbare Daten zu erhalten, wurde für die jeweiligen Technologien zunächst die „großen“ internationalen Wissenschafts-Institutionen, wie der IEA und IRENA sowie das Joint Research Centre der EU nach Studien und Datenbanken durchsucht. Weiter wurden – je nach weiterführenden Verweisen und Datenlücken – „große“ nationale Institutionen (z.B. DOE, NREL, Fraunhofer ISI, RWTH u.a.) und z.T. auch Interessenverbände auf globaler (z.B. IHA, GWEC, WBA) europäischer (ACEA, BioEU, EUROBAT, Eurelectric, WindEurope,) und nationaler (BWE, BWP, DWV, NOW) Ebene geprüft.

Wenn die gewünschten BWS-Daten nicht zu finden waren, wurde auch auf Näherungsgrößen („Ersatzdaten“), wie Produktion bzw. Produktionskapazität (nicht installierte Kapazität), Umsatz oder Beschäftigung o.ä. zurückgegriffen. Waren entsprechende Daten nur für Teile der Wertschöpfungskette / bestimmte Schritte zu finden, wurden diese gesammelt. Schließlich wurden in einigen Quellen statt einzelner Länderdaten oder ergänzend regionale Daten, wie z.B. „Europe“, „The Americas“, „APAC“ (Asia-Pacific Region excluding India) sowie – je nach Fokus der Länderanalysen unterschiedliche – „ROW“ (Rest of World) ausgewiesen, die ebenfalls gesammelt wurden.

Mit Blick auf *tatsächliche Daten zu Wertschöpfung bzw. BWS / GVA* hat sich als beste Quelle – zumindest für die EU-Länder – das EurObser’ER⁹⁶ Barometer erwiesen, dessen 2022er Edition zum Zeitpunkt der Recherche zur Verfügung stand. Hier werden BWS (GVA), Umsatz (Turnover) und Beschäftigung (Employment) für solare PV, Solarthermie, Wind (on- & offshore zusammen), Wasserkraft, Geothermie, Wärmepumpen, Biogas, Biotreibstoffe (Biodiesel, Bioethanol, Biogas für Transport), den biologischen Anteil des Abfalls sowie feste Biomasse für alle EU-Länder, d.h. auch für die hier interessierenden Länder Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Italien, Niederlande, Österreich und Spanien veröffentlicht. Die hier v.a. interessierenden BWS-Daten werden seit der 2021er Edition (Datenstand 2019) veröffentlicht (Umsatz und Beschäftigung bereits früher), sodass Daten für 2019-2021 zur Verfügung standen.

Als zweitbeste und ergänzende Quelle – wiederum für die EU-Länder aber über erneuerbare Energien hinausgehend – erwies sich die bereits in Kriterium 5 („Kosteneffizienz“, s.o.) erwähnte Serie von Statusberichten zu sauberen Energien in der EU durch das Clean Energy Technology Observatory / Joint Research Centre (CETO-Berichte)⁹⁷. Von den kontinuierlich aktualisierten Berichten stand zum Zeitpunkt der Recherche die 2022er Edition zur Verfügung. Neben den erneuerbaren Energien werden auch Batterien, CCUS (hier auch einige nicht-EU-

⁹⁶ <https://www.eurobserv-er.org/> (letzter Abruf: 20.1.25)

⁹⁷ https://setis.ec.europa.eu/publications-and-documents/clean-energy-technology-observatory_en (letzter Abruf: 20.1.25)

Länder), Fernwärme, Smart Grids (inkl. Ladeinfrastruktur für E-Mobilität) und Wasserstoff betrachtet. Mit Blick auf Wertschöpfung wird in diesen Berichten vereinzelt der Produktionswert („Total Production Value“) der größeren Produzentenländer („top producer countries“) in Graphiken ausgewiesen. Teils stehen die zugehörigen Werte in den Graphiken, teils mussten sie händisch bzw. mit Hilfe entsprechender Programme⁹⁸ ausgelesen werden. Im Einzelnen sind folgende Daten des „Total Production Value“ ausgewiesen:

- Solare PV: 2011-2021 für Dänemark, Deutschland, Frankreich, Italien, Spanien und die EU-27.
- Windenergie (on- & offshore): 2011- 2020 für Dänemark, Deutschland und die EU-27.
- Elektromobilität: 2011-2019 (2010 im Smart-Grid-Bericht) für Deutschland, Italien und die EU-27.
- Batterien: nur nach Technologien (nicht nach Ländern) differenziert (Ausnahme: Ungarn und Polen für Litionen-Batterien).
- Biotreibstoffe: nur nach Treibstoffen (nicht nach Ländern) differenziert
- Wasserkraft: 2011-2021 für Österreich, Deutschland und die EU-27
- Wärmepumpen: 2011-2021 für die EU-27.

Für CCUS sind statt des „Total Production Value“ der „value added as % of GDP“ für 2021 für Deutschland, Frankreich, Italien, Die Niederlande und Spanien sowie für die Nicht-EU-Länder China, Brasilien und Südkorea ausgewiesen. Weiter wurde ein „overall revenue“ für 2021 für China, Brasilien, Malaysia, USA und Europa ausgewiesen.

Weitere Daten zur Wertschöpfung – d.h. vor allem zu Nicht EU-Ländern und den weiteren Technologien – konnten punktuell aus Einzelstudien erhoben werden:

- Windenergie: Zusätzlich zu den obigen Werten weist der entsprechende CETO-Bericht in einer Graphik GVA-Werte für die gesamte EU (aus anderen Studien) aus, wobei zwischen direkter und indirekter Wertschöpfung (zur Problematik direkter und indirekter Wertschöpfung s. Folgeabschnitt) unterschieden wird. Dabei handelt es sich einerseits um die o.g. EurObser'ER-Daten (direct GVA wind sector EU 2019-2020) und andererseits um eine Datenreihe des EU-Generaldirektorats Energie (direct GVA wind sector EU 2014-2020) sowie zwei Datenreihen (direct and indirect GVA wind sector EU 2011-2019) einer Studie des Branchenverbands WindEurope (2020). Aus der Graphik geht hervor, dass die EurObser'ER-Daten der direkten Wertschöpfung mit denen der indi-

⁹⁸ <https://plotdigitizer.com/> (letzter Abruf: 20.1.25)

rekten Wertschöpfung aus WindEurope (2020) übereinstimmen, was auf Inkonsistenzen hinweist. Da es sich hier ohnehin um nicht länderspezifische Daten handelt, wurde dies nicht weiterverfolgt.

- Elektromobilität: Für die Niederlande konnten einige (ältere) GVA-Daten (2013-2014) für Fahrzeuge (sowie Komponenten, zugehörige Services und Ladeinfrastruktur) gefunden werden (IEA-HEV-TCP 2016).
- Batterien: Für Blei-Akkus werden Angaben zur direkten, indirekten und induzierten Wertschöpfung für 2019 für alle EU-Länder und die gesamte EU als Tabelle durch den Verband der Europäischen Auto- und industriellen Batterieproduzenten (EUROBAT) veröffentlicht (EUROBAT/EPB 2022), wobei die Werte der direkten Wertschöpfung verwendet wurden (zur Problematik indirekter und induzierter Wertschöpfung s. Folgeabschnitt). Für Li-On-Akkus macht Fraunhofer ISI (2022) Angaben zur projektierten Wertschöpfung für die EU und die Welt in 2030.

Darüber hinaus – d.h. für Nicht-EU-Länder und für die weiteren Technologiegruppen –, sind praktisch keine Daten zur Wertschöpfung zu finden. Mit Blick auf *Näherungsgrößen* („Ersatzdaten“), wie Produktion bzw. Produktionskapazität (nicht installierte Kapazität), die in GW (PV, Wind), GWh (Batterien) oder Stückzahlen (Autos) ausgedrückt werden sowie Umsatz oder Beschäftigung, konnten folgende Daten gefunden werden:

- Solare PV: Ein Sonderbericht der IEA (2022c) veröffentlicht Graphiken zur Produktion von Modulen in den Jahren 2010 sowie 2015-2022. Diese beziehen sich nicht nur auf das EU-Land Deutschland, sondern auch auf die hier interessierenden Länder China, Japan, Malaysia und Südkorea (plus wenige weitere asiatische Länder) und die USA. Zur Zellproduktion werden Angaben (auch 2010 sowie 2015-2022) zu China, Japan, Malaysia, Südkorea gemacht (plus wenige weitere asiatische Länder). Für die Produktion von Wafern für die gleichen Jahre wird lediglich China ausgewiesen. Zudem enthalten alle Graphiken unterschiedliche korrespondierende ROWs. Alle Angaben mussten wieder aus den Graphiken ausgelesen werden. Angaben zur Produktionskapazität zu Zellen und Modulen außerhalb Chinas wurden auch in DOE (2022b) gemacht aber mit Blick auf die bereits vorhandenen Daten aus IEA (2022c) nicht ausgelesen. In DOE (2022b) sind auch Beschäftigungsangaben zu PV enthalten, d.h. es werden „labor input“ für bestimmte PV-Technologien und Teilabschnitte („c-Si „ingot & wafer production“, „CdTe module assembly“) angegeben. Allerdings sind diese als Effizienzangaben, d.h. pro 1 GW Produktionskapazität (als Spannbreite mit oberer und unterer Grenze) angegeben. Schließlich enthält Fraunhofer ISI (2022) Angaben zur europäischen Produktionskapazität von Modulen, Zellen sowie ingots & wafern in der EU und in Deutschland.

- Wind: WindEurope (2020) sowie eine Vorläufer-Studie (WindEurope 2017) enthalten Daten zu Beschäftigung und Investitionen, aber wiederum nur für die gesamte EU. Zwei Studien haben exklusiv offshore Wind zum Gegenstand und bieten Daten zu aktueller Produktionskapazität (2021) von China, Japan, „Europe“, Südkorea und Taiwan (GWEC 2022) bzw. – mit Fokus auf Deutschland – Daten zu Umsatz und Beschäftigung auf Bundesländer-Ebene (wind:research 2022).
- Elektromobilität: Der periodisch erscheinende „IEA Global EV Outlook“ (IEA 2023) stellt eine Graphik mit globalen Zahlen zu Verkäufen und Importanteilen nach Einheiten (2018-2022) bereit. Ansonsten sind entweder projizierte Verkäufe (d.h. Ziele / Szenariowerte) zu einem Teil der interessierenden Länder (Roland Berger 2021) oder regionale Verkäufe (EY and Eurelectric oJ; Datenstand 2022) dargestellt. Für die Niederlande wurden aus der oben erwähnten Quelle neben GVA- auch Produktions-, Umsatz- und Beschäftigungsdaten (2013-2014) für Fahrzeuge sowie Komponenten, zugehörige Services und Ladeinfrastruktur verfügbar gemacht und für Frankreich konnte der Umsatz (2010-2015) indirekt anhand von Angaben zu heimischer Produktion und durchschnittlichem Verkaufspreis ermittelt werden (IEA-HEV-TCP 2016). Schließlich konnten für Deutschland Produktionszahlen für batterieelektrische PKW und Plugin hybride PKW (2021-2022) mittels email-Anfrage beim Verband der Automobilindustrie (VDA) ermittelt werden. Zur damit eng verbundenen Frage der Autobatterien stellt IEA (2023) eine einzelne Zahl zur globalen Produktionskapazität für das Jahr 2022 zur Verfügung. An anderer Stelle des Berichts wird erwähnt, dass sich 75% dieser Produktionskapazität in China befinden. Eine eigene Analyse zu den Wertschöpfungsketten von Batterien für batterieelektrische PKW und Plugin hybride PKW stellt Kapazitätsdaten für China, EU, Japan, Südkorea, USA und Südostasien für 2021 zur Verfügung (IEA 2022b).
- Batterien: Für Blei-Akkus werden – sowohl empirische als auch zukunftsbezogene – Angaben (2015-2025) zur europäischen und weltweiten Produktion (in MWh) gemacht (avicenne/EUROBAT 2020). Der oben erwähnte Fraunhofer-Bericht macht auch empirische und zukunftsbezogene Angaben zur EU-Produktionskapazität in der Batteriezellenproduktion für Lithiumbatterien (2021, 2030) (Fraunhofer 2022). Schließlich bietet eine EU-Kommunikation zur Wettbewerbsfähigkeit für 2021 eine alternative (deutlich abweichende) Zahl (EU-KOM 2022).

3.6.3 Schwierigkeiten der Datenerhebung

Insgesamt ist festzuhalten, dass schon für einige der „klassischen“ erneuerbaren Energien, namentlich Biomasse (in seinen verschiedenen Formen) und Wasserkraft, keine Wertschöpfungsdaten jenseits der EU zu finden sind. Für die weiteren Energiewende-relevanten Technologien, die entweder noch neuer oder komplexer sind oder bisher noch nicht so sehr im Fokus

standen, namentlich Brennstoffzellen, CCUS, Netzinfrastrukturen, Wärmepumpen, Wärmespeicher sowie die Fokustechnologie Wasserstoff des zugrundeliegenden Forschungsprojekts, konnten weder für die EU noch für Nicht-EU-Länder tatsächliche Daten zu Wertschöpfung oder Ersatzdaten gefunden werden. Dafür kann eine Reihe von Gründen genannt werden. Im Folgenden werden exemplarische Beispiele für die zahlreichen – letztlich erfolglos – gescannten Studien dargestellt:

Eine Schwierigkeit besteht darin, dass zahlreiche Studien den Begriff „Wertschöpfung“ (bzw. „value added“ in internationalen Studien) eher allgemein anstatt im streng ökonomischen / statistischen Sinne nutzen. Mit Blick auf entsprechende Daten ist zu beachten, dass Wertschöpfung ein produktionsseitiges Konzept darstellt. So sind Näherungsgrößen zur „Marktgröße“ o.ä., die auf die Technologienachfrage abstellen, wie die Nachfrage in Szenarien oder die installierte Kapazität (im Gegensatz zur Näherungsgröße der Produktionskapazität), nicht zielführend, da aufgrund von Handelsaktivitäten (Import/Export) die Nachfrage eines Landes nicht mit der Produktion dieses Guts gleichgesetzt werden kann⁹⁹. Z. B. findet sich bei der Technologie Wärmepumpen in der deutschen 2023er Branchenstudie die „Marktsituation“ mit dem Absatz nach Stückzahlen übersetzt (BWP 2023). Analog eine Studie zu den regionalen (Europa u.a.) und zum globalen Wärmepumpenmarkt (Eunomia 2020). Auch bei der Technologie Brennstoffzelle trägt z.B. die Studie „Wertschöpfungskette Brennstoffzelle“ (NOW 2022) den gesuchten Begriff im Namen, ist aber keine Wertschöpfungsstudie im o.g. Sinne, sondern beschreibt Technologie und Kostenstruktur. Das analysierte „Marktvolumen“ basiert auf Absatzzahlen (=Nachfrage), woraus der Anteil dt. Produktion nicht eindeutig hervorgeht. Auch bei der Technologie Elektromobilität basiert der bereits oben erwähnte „IEA Global EV Outlook“ (IEA 2023) neben den o.g. Daten ganz überwiegend auf nachfragebasierten Indikatoren (demand, sales). Schließlich werden Begriffe, wie „Markt“, „Marktrolle“, „Sektor“ etc. in vielerlei Zusammenhängen genutzt. Z.B. liegt der Fokus des IEA „Hydropower Special Market Report“ (2021) auf der Rolle der Wasserkraft im Strommarkt (steuerbare Energie, Flexibilität) anstatt auf dem industriellen Sektor. Auch der 2022er Statusreport des internationalen Wasserkraftverbands (Untertitel: „Sector Trends and insights“) fokussiert ausschließlich auf Status und Trends zur installierten Kapazität, Stromproduktion u.ä. (IHA 2022). Auch eine Berichtsreihe des US-Amerikanischen Energieministeriums (DOE; „supply chain deep dive assessment“), aus der einzelne Berichte bereits erwähnt wurden, betrachtet verschiedene (erneuerbare und nicht-erneuerbare) Energietechnologien zur Emissionsreduktion mit dem Ziel, die industrielle

⁹⁹ Einzig bei globalen Zahlen stimmt (in Abwesenheit eines intraplanetaren Handels) der innerplanetarische Absatz mit der innerplanetarischen Produktion überein. Dies wäre gleichzeitig das planetarische Marktpotential (s. Kriterium 4)

Basis und deren Wertschöpfungsketten in den USA zu sichern¹⁰⁰. Sie umfassen Berichte zu erneuerbaren Energien, Nuklearenergie, kritische Rohstoffe und Digitalisierung etc. Zwar konnten hier, wie oben gezeigt, einzelne Daten zur Wertschöpfung oder Ersatzgrößen gefunden werden, aber insgesamt ließen sich überraschend wenig Daten für die hiesige Fragestellung gewinnen.

Damit verwandt stellt sich das Problem, dass viele Studien versuchen, die sozioökonomischen Effekte Energiewende-relevanter Technologien durch ein breiteres Verständnis von Wertschöpfungsketten umfassend zu analysieren. So werden neben der Produktion der Technologie auch der Betrieb inkl. Planung, Installation, Wartung etc. sowie später Abbruch und Entsorgung mit betrachtet (stellvertretend Wind: IRENA (2017)). Diese Analyse mit einem häufigen Fokus auf Kosten & Arbeitsplatzeffekten ist zwar für eine Reihe von Fragestellungen relevant, aber die für die hiesige Fragestellung relevanten Daten zur Wertschöpfung werden nicht ausgewiesen. So führten auch in den durchaus zahlreichen IEA- und IRENA-Berichten zu den anderen Technologien entsprechende Stichwortsuchen („value added“, „value chain“, „supply chain“) zwar zu entsprechend häufigen Treffern, die zahlreiche Aspekte beleuchten (vulnerabilities, bottlenecks, barriers of supply chains etc.) aber keine für den hiesigen Kontext notwendigen Daten liefern (stellvertretend für Wärmepumpen: (IEA 2022d)). Vor diesem Hintergrund – sowie den bereits im Kriterium 2 („RD&D-Ausgaben“, s.o.) gemachten Erfahrungen – wurde auf eine Suche in wiss. (d.h. peer reviewed) Einzel-Studien anhand von „google scholar“ verzichtet. Auch dort hatte sich gezeigt, dass entsprechende Stichwörter zwar zu zahlreichen Treffern führt und somit das Lesen entsprechend vieler abstracts / Überfliegen von Texten erfordert, die Darstellung der Daten in der notwendigen Tiefe (technologie- und länderspezifisch) meist nicht stattfindet.

Schließlich fanden sich zu einigen Technologien – mutmaßlich, weil sie schwer abgrenzbar sind und/oder sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden – nicht einmal die oben genannten Treffer (stellvertretend für Grids: DOE (2022a), IEA-TCP-ISGAN (2021), für CCUS: Global CCS Institute (2022), IEA (2020), Lyons et al. (2021), für heat storage: IEA-ES-TCP (2022)).

Auch die Technologiegruppe Wasserstoff, zu der aufgrund des hohen politischen Interesses in den letzten Jahren eine Reihe aktueller Berichte erschienen sind und die im hiesigen Kontext eine Fokustechnologie darstellt, gehört zu dieser letzten Gruppe, zu der sich praktisch keine wertschöpfungs-relevanten Informationen finden ließen. Im entsprechenden CETO-Bericht (Dolci et al. 2022) wird zu den Kategorien „Turnover“ und „GVA“ angemerkt: “Due to the lack

¹⁰⁰ <https://www.energy.gov/policy/securing-americas-clean-energy-supply-chain> (letzter Abruf: 20.1.25)

of fully developed markets for electrolyzers and the often commercially sensitive nature of the information, it is difficult to have a clear vision on European and global market turnover. ... For the same reasons outlined for the category 'Turnover', retrieving information of gross added value it is extremely challenging (Dolci et al. 2022, S. 33). Analog zur Kategorie „Production Value“: “On PRODCOM is no data available for renewable hydrogen, or hydrogen produced by water electrolysis” (Dolci et al. 2022, S. 36). Zur Abwesenheit von entsprechenden Daten auch mittels Stichwortsuche exemplarisch: DOE (2022c), IEA (2022a), IRENA (2022).

Schließlich sind eine Reihe von Spezialproblemen zu konstatieren: Mit Blick auf Solarenergie war diese im Rahmen der Erhebung mit PV gleichzusetzen, d.h. es gibt praktisch keine Angaben zu Solarthermie oder konzentrierender Solarthermie (CSP). Einzige Ausnahme sind die EurObser'ER-Daten. Das CETO widmet der Technologie einen eigenen Bericht, stellt mit Blick auf BWS aber die Abwesenheit von Daten fest. Bei Windenergie findet bis auf wenige Ausnahmen keine Unterscheidung zwischen on- und offshore statt.

Zu Guter Letzt tauchte bei zwei Studien das methodische Problem der notwendigen Unterscheidung zwischen direkter, indirekter und induzierter Wertschöpfung auf. Während die direkte Wertschöpfung (und Arbeitsplatzeffekte) derjenigen des betrachteten Sektors entspricht, entstehen indirekte Effekte durch die nachgefragten Vorleistungen des betrachteten Sektors in anderen Sektoren sowie deren Vorleistungen usw. Schließlich wird wirtschaftstheoretisch unterstellt, dass diese Einkommen aus direkten und indirekten Effekten komplett eine Einkommenssteigerung seien, diese zu einer Erhöhung der Konsumnachfrage führten, was eine Erhöhung einer entsprechenden Produktion verursache, womit dann weitere Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzeffekte verbunden seien („einkommenstheoretisches Modell“). Die letzteren werden als „induzierte“ Effekte bezeichnet. Direkte Effekte erfordern mithin allein eine Erfassung, indirekten Effekte eine berechnete erweiterte Erfassung unter bestimmten Annahmen und Parametrisierungen, induzierte Effekte setzen hingegen bestimmte Kausalitäten in Wirtschaftssystemen voraus, die nicht ohne weiteres als allgemein richtig angenommen werden können. Aufgrund unterschiedlicher Vorleistungsstrukturen in den Ländern sollten zur besseren Vergleichbarkeit nur die direkten Effekte verwendet werden, sofern diese extra ausgewiesen sind. Pauschales „herausrechnen“ indirekter und induzierter Effekte würde gerade die hier interessierenden Unterschiede zwischen den Ländern nivellieren oder ein nicht ohne weiteres mögliches oder aufwändiges „reverse engineering“ der jeweiligen Berechnungen erfordern. In Abwesenheit expliziter Hinweise wurde davon ausgegangen werden, dass es sich bei den (wenigen) gefunden Werten um direkte Wertschöpfung handelt, zumal dies die grundlegende Bilanzierung ist und gerade bei Berechnung von induzierten Effekten ein expliziter Hinweis zu erwarten ist.

3.6.4 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick

Insgesamt muss die Datenlage mit Blick auf technologie- *und* länderspezifische Daten zur Wertschöpfung Energiewende-relevanter Technologien als ernüchternd bezeichnet werden.

Am ehesten waren Daten für die erneuerbaren Energien in den EU-Mitgliedsländern auffindbar, was im Wesentlichen auf einer Quelle (EurObser'ER) beruht, die seit dem Datenstand 2019 jährliche GVA-Daten veröffentlicht (für die Ersatzdaten Umsatz und Beschäftigung schon früher). Ergänzt wird dies – teilweise und mit einzelnen Datenpunkten – durch die CETO-Berichtsreihe, die zwar weitere Technologien betrachtet aber bei weniger etablierten Technologien auch z.T. entweder Ersatz- (CCUS) oder gar keine Daten (Wasserstoff) liefert.

Jenseits der EU sind schon für einige der „klassischen“ erneuerbaren Energien (Biomasse, Wasserkraft) keine Wertschöpfungsdaten zu finden. Für die weiteren Energiewende-relevanten Technologien (Brennstoffzellen, CCUS, Netzinfrastrukturen, Wärmepumpen, Wärmespeicher, Wasserstoff) konnten weder für EU- noch für Nicht-EU-Länder tatsächliche Daten zu Wertschöpfung oder Ersatzdaten gefunden werden. D. h. es wurden z.T. cursorische, einzelne Datenpunkte oder regionale (Europa, Asien) oder globale Daten gefunden und „mitgesammelt“, auch wenn sie für die vorliegende Fragestellung letztlich von geringem Nutzen sind. Auch wurden z.T. Institutionen / Verbände per email angefragt, was nur in Ausnahmefällen zum Erfolg führte. So blieb häufig die Antwort aus, wurde negative beschieden oder auf bereits bekannte Datensätze verwiesen.

3.6.5 Zentrale Literatur zu Kriterium 6

3.6.5.1 EurObser'ER-Berichte (Auswahl)

EurObserv'ER (2022): The State of Renewable Energies in Europe. Edition 2022. 21st Observ'ER-report. Observ'ER, renac, TNO, Fraunhofer ISI, vito, Statistics Netherlands. Funded by the European Commission

EurObserv'ER (2021): The State of Renewable Energies in Europe. Edition 2021. 20st Observ'ER-report. Observ'ER, renac, TNO, Fraunhofer ISI, vito, Statistics Netherlands. Funded by the European Commission

3.6.5.2 CETO-Berichte

Bielewski, M., Pfrang, A., Bobba, S., Kronberga, A., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny, G., Eulaerts, O., Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Batteries for energy storage in the European Union - 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/808352, JRC130724.

Chatzipanagi, A., Jaeger-Waldau, A., Cleret de Langavant, C., Letout, S., Latunussa, C., Mountraki, A., Georgakaki, A., Ince, E., Kuokkanen, A. and Shtjefni, D. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Photovoltaics in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/812610, JRC130720.

Dolci, F., Gryc, K., Eynard, U., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny, G., Eulaerts, O., Grabowska, M., Clean Energy Technology Observatory: Water Electrolysis and Hydrogen in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/7606, JRC130683.

Hurtig O., Buffi M., Scarlat N., Motola V., Georgakaki A., Letout S., Mountraki A., Joanny G (2022): Clean Energy Technology Observatory: Advanced biofuels in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/938743, JRC130727.

Kapetaki, Z., Eulaerts O., Georgakaki, A., Gonzalez Sanchez, R., Grabowska, M., Ince, E., Joanny, G., Kuokkanen, A., Letout, S., Mountraki, A., Shtjefni, D. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Carbon Capture Utilisation and Storage in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/268143, JRC130663.

Motola V., Scarlat N., Hurtig O., Buffi M., Georgakaki A., Letout S., Mountraki A., Joanny G. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Bioenergy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/577104, JRC130730.

Prettico, G., De Paola, A., Thomas, D., Andreadou, N., Papaioannou, I., Kotsakis, E. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Smart Grids in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/276606, JRC130710.

Quaranta, E., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny Ordonez, G., Eulaerts, O. and Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Hydropower and Pumped Hydropower Storage in the European Union - 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/256255, JRC130587

Taylor, N., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, K., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny, G., Eulaerts, O. and Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Concentrated Solar Power and Heat in the European Union - 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/080204, JRC130811

Telsnig, T., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny Ordonez, G., Eulaerts, O. and Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Wind Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/855840, JRC130582.

3.6.5.3 DOE-Berichte (Auswahl)

DOE (2022a): Electric Grid Supply Chain Review: Large Power Transformers and High Voltage Direct Current Systems. Supply Chain Deep Dive Assessment. U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, “Americas Supply Chains”, February 24, 2022

DOE (2022b): Solar Photovoltaics. Supply Chain Deep Dive Assessment. U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, “Americas Supply Chains”, February 24, 2022

DOE (2022c): Water Electrolysers and Fuel Cells Supply Chain. Supply Chain Deep Dive Assessment. U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, “Americas Supply Chains”, February 24, 2022

3.6.5.4 Weitere Literatur

avicenne/EUROBAT (2020): EU battery demand and supply (2019-2030) in a global context. December 2002

BWP (2023): Branchenstudie 2023: Marktentwicklung – Prognose – Handlungsempfehlungen. Berlin. Stand: 30.1.2023

EU-KOM (2022): Fortschritte bei der Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Technologien für saubere Energie. Bericht der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat. Brüssel, den 15.11.2022, COM(2022) 643 final

Eunomia (2020): Heat Pump Manufacturing Supply Chain Research Project. Final Report. Research carried out by Eunomia Research & Consulting Ltd. On behalf of the Department for Business, Energy and Industrial Strategy. November 2020

EUROBAT/EPB (2022): Economic Contribution of the European Lead Battery Industry. February 2022

EY and Eurelectric (oJ): six essentials for mainstream EV adaptation.

Fraunhofer ISI (2022): Photovoltaics Report, Prepared by Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems with support of PSE projects GmbH. Freiburg, 22. September 2022

Fraunhofer (2022): Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022. Fraunhofer IPT, Fraunhofer FFB, Fraunhofer ISI, RWTH PEM. Karlsruhe. Dezember 2022

Global CCS Institute (2022): Global Status of CCS 2022.

GWEC (2022): Global Offshore Wind Report 2022. Global Wind Energy Council. 29 June 2022. Brussels

IEA (2020): Energy Technology Perspectives 2020. Special Report on Carbon Capture Utilization and Storage. Paris

IEA (2021): Hydropower Special Market Report. Analysis and Forecast to 2030. Paris

IEA (2022a): Global Hydrogen Review 2022. Paris. September 2022

IEA (2022b): Global Supply Chains for EV Batteries. Paris

IEA (2022c): Special Report on Solar PV Global Supply Chains. Paris.

IEA (2022d): The Future of Heat Pumps. World Energy Outlook Special Report. Paris. Revised Version, December 2022

IEA (2023): Global EV Outlook 2023. Catching up with climate ambitions. Paris

IEA-ES-TCP (2022): ES TCP Annual Report 2021. Technology Collaboration Program on Energy Storage (ES TCP). August 2021

IEA-HEV-TCP (2016): Economic Impact Assessment of E-Mobility. Technology Collaboration Program (TCP) on Hybrid and Electric Vehicles (HEV TCP), Task 24. Final Report. Version 3.4, December 2016.

IEA-TCP-ISGAN (2021): ISGAN Annual Report for the Period from 1 March 2020 to 28 February 2021. Technology Collaboration Program (TCP), International Smart Grid Action Network (ISGAN). August 2021

IHA (2022): Hydro Status Report 2022. Sector Insights and Trends. London

IRENA (2017): Renewable Energy Benefits. Leveraging Local Capacity for Onshore Wind. Abu Dhabi

IRENA (2022): Global Hydrogen Trade to meet the 1.5°C Climate Goal. Part II – Technology Review of Hydrogen Carriers. Abu Dhabi

Lyons, M., Durrant, P. and Kochhar, K. (2021): Reaching Zero with Renewables. Capturing Carbon. IRENA. Abu Dhabi

NOW (2022): Wertschöpfungskette Brennstoffzelle. Metastudie. Berlin. Stand: Februar 2022

Roland Berger (2021): E-Mobility Index 2021. München

WindEurope (2017): Local impact, global leadership. The impact of wind energy on Jobs and the EU Economy. Deloitte Advisory, S.L.; WindEurope. November 2017

WindEurope (2020): Wind energy and economic recovery in Europe. Wood Mackenzie Limited; WindEurope. October 2020

wind:research (2022): Wertschöpfung der Offshore-Windenergie in Deutschland. Regionale Verteilung und Entwicklung der Marktteilnehmer und der Arbeitsplätze. wind:research, Bremen

3.7 Kriterium 7: Akzeptanz

3.7.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren

Das Kriterium gesellschaftliche Akzeptanz soll abbilden, inwieweit für die betrachtete Technologie im politisch-sozialen System und auf lokaler Ebene eher Unterstützung oder Widerstand zu erwarten ist. Gesellschaftliche Unterstützung oder ein Widerstand der Öffentlichkeit wird als ein wesentlicher Faktor gesehen, der eine schnelle Verbreitung der Anwendung unterstützt oder eher hemmt. Dieser gesellschaftsbezogene Aspekt ist für die Einschätzungen der Rahmenbedingungen in einem Land sehr wichtig. Gerade im Vergleich zwischen verschiedenen Ländern ergibt sich durch die Betrachtung darüber hinaus ein Hinweis, ob relativ günstige Rahmenbedingungen für eine Technologie vorliegen. Schließlich kann damit auch eingeschätzt werden, inwieweit einzelne von teils alternativen Technologien (z.B. verschiedene Möglichkeiten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien) einen Vorteil im Vergleich zu anderen Technologien in einem Land haben.

Das Kriterium Akzeptanz weist mit den Kriterien 1 (politische Ziele) und 3 (öffentliche Förderung) insoweit eine Querverbindung auf, als ein anspruchsvolles Ziel und dessen Erreichungswahrscheinlichkeit sowie eine höhere öffentliche Förderung politisch tendenziell umso eher durchsetzbar und opportun für demokratisch legitimierte Politiker sind, je stärker eine Technologie akzeptiert wird. Der Zusammenhang zwischen Akzeptanz und diesen Kriterien ist aber insofern komplex, als die Akzeptanz selbst wiederum auch von Art der politischen Maßnahmen, von Erfahrungen der Auswirkungen dieser Maßnahmen sowie von Erfahrungen mit dem Einsatz der Technologien und der öffentlichen Diskussion über diese Themen abhängen bzw. Ziele und Förderung gewissermaßen auch als Akzeptanzindikatoren angesehen werden können. Mithin steht Akzeptanz in einem dynamischen und rückgekoppelten Verhältnis mit dem Inhalt anderer Kriterien und kann folglich z.B. je nach gewählten Maßnahmen gestärkt oder

geschwächt werden. Die Akzeptanzeinschätzung ist dann auch erstmal als eine Momentaufnahme zu verstehen – was grundsätzlich auch auf andere Kriterien, wie z.B. „politische Ziele“ zutrifft. Deren konkrete Erhebung soll aber tendenziell so erfolgen, dass sich Hinweise auf anhaltende oder sich verändernde Akzeptanz ergeben. Ein wesentlicher Beitrag der Akzeptanzforschung über die Wirkungsrichtungen und Einflussfaktoren – nämlich wie bestimmte Maßnahmen oder Prozesse die Akzeptanz beeinflussen – ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Akzeptanz wird in der Literatur mitunter aufgeschlüsselt in marktliche, sozio-politische und lokale Akzeptanz. Die marktliche Akzeptanz ist in diesem Kontext nicht von Bedeutung, da sie über andere Kriterien – v.a. 3 (öffentliche Förderung) und 5 (Kosteneffizienz) – grundsätzlich abgedeckt wird¹⁰¹.

3.7.1 Grundsätzliches Vorgehen

Es wurde eine Literaturrecherche nach einschlägigen Veröffentlichungen durchgeführt. Sie beschränkt sich dabei auf die Fokustländer und -technologien (s. Quelle: eigene Berechnungen basierend auf COMTRADE-Daten. Zur Zuordnung der Waren nach Außenhandelsstatistik zu den Technologien s. Banning et al (2023)

Tabelle 4)¹⁰². Es ist das einzige Kriterium, für das vorab eine derartige Einschränkung gewählt wurde. Damit konnte der Arbeitsaufwand reduziert und auch die Erfolgsaussichten erhöht werden, zumal einzelne Technologiegruppen auch eine größere Anzahl von Technologien umfassen, für die jeweils eigene Datenbeschaffungen hätten erfolgen müssen. Eine eigenständige empirische Forschung zur Akzeptanz auch dieser reduzierten Anzahl an Technologien und Ländern konnte allein schon aufgrund des dafür erforderlichen ganz erheblichen Arbeitsaufwands von vorneherein ausgeschlossen werden.

Die Akzeptanz – insbesondere die sozio-politische und lokale - wurde ordinal mit einem Wert von 1 bis 5 eingeschätzt, wobei 5 den höchsten Akzeptanzgrad ausdrückt. Hierfür wurden aus der Literatur – sofern verfügbar – Anteile einer „Zustimmung“ zur jeweiligen Technologie in den jeweils in die Erhebung einbezogene Gruppen herangezogen. Die Ordinalwerte wurden dann aus Zustimmungsteilen bestimmt: 0% bis einschließlich 20%: „1“, über 20% bis einschließlich 40%: „2“, über 40% bis einschließlich 60%: „3“, über 60% bis einschließlich 80%: „4“ sowie über 80% bis einschließlich 100%: „5“. Sofern diese Einteilung aufgrund des Verfahrens oder der genauen Untersuchungsziele der Studie nicht ohne weiteres verfügbar

¹⁰¹ Als ein Überblick zu Akzeptanz als Kriterium in der Technikforschung sei auf (Viebahn et al., 2018, S.58ff.) verwiesen.

¹⁰² Es handelt sich um die Länder China, Deutschland, Japan und die USA für alle Fokustechnologien sowie um Dänemark für Windkraft. Die Fokustechnologien sind: Windkraft, PV, H₂-Elektrolyseure und batterieelektrische PKW

wurde, erfolgte die Einschätzung ausschließlich aus einer – ohnehin erfolgenden – vorausgehenden qualitativen Auswertung des Inhalts.

Je Land und Technologie und über die Akzeptanz wurden dann ein zusammengefasster Ordinalwert ermittelt, der dann für die weiteren Arbeiten an der indikatorenbasierten MLP-Analyse verwendet wurde.

Bei der Einschätzung einzelner Studie oder bei der Ermittlung eines Gesamtwertes für eine Land-Technologiekombination wurde auch berücksichtigt, inwieweit eine zugrundeliegende Quelle zwar Akzeptanz lokaler Projekte oder in Regionen, aber keine Akzeptanz auf nationaler Ebene untersuchte sowie die Aktualität und die verwendeten Methoden der Studie. Ältere oder lokale Studien wurden geringer gewichtet oder letztlich in der resultierenden Gesamteinschätzung nicht berücksichtigt. Insgesamt konnte dies unter Umständen dazu führen, dass gefundene Literatur für eine Länder-Technologiekombination als nicht ausreichend angesehen wurde, um die Akzeptanzlagen fundiert einschätzen zu können.

Technologie	Land	Verwendete Quellen
Windkraftanlagen	China	Yuan et al. (2015), Guan/Zepp (2020), Guo et al. (2015), Ali et al. (2023)
	Deutschland	Radtke et al. (2021), Fischer/Kube (2020), Agentur für Erneuerbare Energien (2020, 2022), FA Wind (2022), Funke (2017), IKND (2023),
	Japan	Iwata et al. (2023), Keeley et al. (2021), Motosu/Maruyama (2016), Nakano et al. (2018), Maruyama et al. (2007), Iwata et al. (2022)
	USA	Rand/Hoen (2017), Sharpton et al. (2020), Firestone et al. (2018), Hoen et al. (2019), Groth/Vogt (2014)
	Dänemark	Ladenburg (2008), Ladenburg et al. (2020), Borch (2018), Ladenburg/Möller (2011), Johansen/Emborg (2018), Jørgensen et al. (2020)
PV-Anlagen	China	Irfan et al. (2021), Yuan et al. (2011), Ngar-yin Mah et al. (2018), Wu et al. (2023), Yang et al. (2019)
	Deutschland	Agentur für Erneuerbare Energien (2023), Ariadne (2023), Henke (2023), LichtBlick (2020), Forsa (2023)
	Japan	Akita et al. (2020), Mukai et al. (2011), Doedt/Maruyama (2023)
	USA	Carlisle et al. (2015), Bao et al. (2020), Raj/Beck (2015), Pascaris et al. (2021), Carlisle et al. (2016)
H ₂ -Elektrolyseure	China	Liu et al. (2023), Yan/Zao (2022), Ren et al. (2020), Wang et al. (2023)
	Deutschland	Konrad et al. (2021), Isidor-Losada (2022), BDEW (2020), Witte et al. (2023), Zeller et al. (2019), FhG IAO (2020), DNR (2023)

Technologie	Land	Verwendete Quellen
	Japan	Itaoka et al. (2017), Yap/McLellan (2024), Hienuki et al. (2021), Ono/Tsunemi (2017), Hienuki et al. (2019)
	USA	Martin et al. (2009), Besley/Baxter-Clemmons (2010), ORNL (2006), Ramea (2019), Bade et al. (2024)
Batterieelektrisch PKW	China	Zhao et al. (2022), Wang et al. (2018), Huang/Ge (2019), Lin/Wu (2018), She et al. (2017)
	Deutschland	Öko-Institut (2020), FhG ISI (2011), Schlüter/Weyer (2019), Ludin et al. (2023), Burghard et al. (2020), Aca-tech (2024)
	Japan	Tanaka et al. (2014), Lim et al. (2022)
	USA	Krause et al. (2013), NREL (2017), Egbue/Long (2012), Tanaka et al. (2014), Sintov et al. (2020)

Tabelle 10: Für die Einschätzung von Akzeptanz berücksichtigte Veröffentlichung nach Fokusland und -technologie

Zu den gefundenen und ausgewerteten einschlägigen Studien für jede Land-Technologiekombination gibt Tabelle 10 einen Überblick.

3.7.2 Herausforderung der Datenerhebung

In Bezug auf Technologien sind besondere Schwierigkeiten zu H₂-Elektrolyseuren aufgetreten hinsichtlich der Konkretisierung des Akzeptanzobjektes: Die Studien, die ausgewertet wurden, beschäftigen sich mit dem Wasserstoffsystem als Ganzem, vornehmlich aber mit bestimmten Teilen, z.B. der Verwendung von Wasserstoff im Verkehrsbereich im Rahmen von Tankstellen oder ÖPNV (u.a. Bus) oder individueller Fahrzeugnutzung, die an dieser Stelle – nach Konzentration auf H₂-Elektrolyseure statt des ganzen H₂-Systems – nicht von unmittelbarer Relevanz sind. Abgesehen davon, dass die ermöglichte Übersicht dann auch in weiteren Untersuchungen zum Thema „Wasserstoff“ sehr hilfreich ist, ist anzumerken, dass der in H₂-Elektrolyseuren erzeugte Wasserstoff auch genutzt und gegebenenfalls transportiert werden muss. Insofern sind derartige Aspekte indirekt auch für H₂-Elektrolyseure von Interesse, obgleich nicht alle Verwendungsmöglichkeiten (z.B. H₂-Erzeugung zur nichtenergetischen Nutzung in der Industrie in unmittelbarer räumlicher Nähe des Verbrauchs) gleichermaßen in den Studien abgedeckt sind. Daneben dürften allgemeine Vorbehalte gegenüber Wasserstoff (z.B. aufgrund einer empfundenen oder wahrgenommenen Brand- und Explosionsgefahr) relativ unabhängig von der jeweils genau betrachteten Wasserstofftechnologie zum Ausdruck kommen. Demnach wurde in der Auswertung und damit auch im Ergebnis weniger auf die Akzeptanz für H₂-Elektrolyseure als vielmehr auf diejenige für Wasserstofftechnologien im Allgemeinen abgehoben.

Aus Tabelle 10 ist ersichtlich, dass mitunter relative wenige und wenig aktuelle Studien gefunden wurden (z.B. zu Japan - batterieelektrische PKW). Dies kann an einem geringen Interesse

am Thema Akzeptanz in einem Land liegen, aber auch an der Aufmerksamkeit, die eine Technologie in einem Land erhält. Für den neuen Energieträger „Wasserstoff“ zeigen einige Studien für Deutschland explizit, dass bei den Befragten nur geringe Kenntnisse bestehen oder Wasserstofftechnologien noch wenig bekannt waren. Dies mag auch damit zusammenhängen, dass eine unmittelbare alltägliche Erfahrung oder Bedeutung von Wasserstofftechnologien noch nicht vorhanden sind. Dies könnte sich z.B. ändern, wenn Elektrolyse-Kapazitäten, Wasserstoffpipelines oder -tankstellen in der Nähe des Wohnorts vermehrt geplant werden, wodurch ein unmittelbarer Anlass entsteht, sich mit dieser Technologie auseinanderzusetzen. Allerdings kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass gerade in Japan oder China Untersuchungen existieren, die nicht übersetzt vorliegen und auch nicht den Weg in die Forschungs-Community finden. So ist z.B. für Deutschland anzumerken, dass einige Akzeptanzuntersuchungen von Verbänden durchgeführt oder für deren eigene Zwecke beauftragt wurden und mitunter nur auf der Webseite des Auftraggebers zu finden sind. Es kann nicht als gesichert gelten, dass derartige, grundsätzlich öffentlich zugängliche Untersuchungen oder Ergebnisse, z.B. in Japan, vollständig erfasst werden konnten.

Inhaltlich zeigte sich, dass sich sozio-politische und lokale Akzeptanz nicht durchgehend scharf von marktlicher Akzeptanz trennen lässt. Z.B. weisen die in Acatech (2024) hinterlegten Gründe für eine geringe Akzeptanz auch auf eine Bedeutung von Kosten und Preisen für eine Akzeptanz hin. Deren Effekte können nicht isoliert werden. Das impliziert auch, dass eine öffentliche Förderung die Akzeptanz erhöhen kann, oder sie verringert, falls diese als ungerecht oder ungerechtfertigt angesehen wird. Das verdeutlicht die bereits erwähnte wechselseitige Beziehung verschiedener Kriterien.

Die teilweise geringe Anzahl an Studien, deren Alter und inhaltliche Fokus führten letztlich dazu, dass eine Bewertung der Akzeptanzlagen in diesen Fällen nicht oder nur mit Einschränkung möglich war. Derartige Einschränkungen der Datenverfügbarkeit wurden in der Weiterverarbeitung der Akzeptanzergebnisse in der Indikatoren-basierten MLP-Analyse berücksichtigt.

3.7.3 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick

Die Analyse zeigt, dass gerade für besonders neue Technologien wie H₂-Elektrolyseure noch wenig Akzeptanzanalysen vorliegen. Das beeinträchtigt naturgemäß die Verwertbarkeit. Eine genauere Vorabdefinition von Akzeptanz – auch die hier verwendete nach lokaler, sozio-politischer und marktlicher - für eine zielgerichtete Datensammlung erscheint nur bedingt hilfreich, da sich in der gefundenen Literatur zeigte, dass diese Dimensionen nicht gut zu trennen

sind bzw. nicht alle Studien dieser Einteilung folgen. Zudem ist eine Auswertung, die die Eigenheiten – z.B. Ziel, Methodik, räumliche Abgrenzung - der einzelnen Studien berücksichtigt, durchaus möglich.

Gleichzeitig sind Akzeptanzfragen für eine Einschätzung einer möglichen faktischen Entwicklung zentral. Grundsätzlich wäre ein dynamisches Zusammenspiel sich gegenseitig beeinflussender, hier getrennt betrachteter Faktoren wünschenswert. Allerdings muss hierzu gesagt werden, dass eine indikatorbasierte MLP-Analyse gerade auch dazu dienen soll, diese methodisch schwer abzubildenden Interdependenzen einem handhabbaren Analyserahmen zugänglich zu machen.

Ein anderer Ansatz, als der gewählte, um zu Akzeptanzaussagen für eine größere Anzahl an Technologien und Länder zu kommen, ist nicht ersichtlich. Der Suchmechanismus für Studien ist grundsätzlich auch nur wenig zu verbessern, wenngleich auch für dieses Kriterium nicht ausgeschlossen werden kann, dass zukünftige IKT-Entwicklungen Recherchemöglichkeiten verbessern.

3.7.4 Zentrale Literatur zu Kriterium 7

Acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften) (2024): Mobilitätsmonitor 2024, dort „E-Mobilität als Alternative“ <https://www.acatech.de/mobilitaetsmonitor/>, (abgerufen am 01.05.2024).

Agentur für Erneuerbare Energien (2020): Akzeptanz in der Fläche, Protest im Lokalen? Studie zur Windenergie an Land. *Renews Special 90*.

Agentur für Erneuerbare Energien (2022): Umfrage: Wunsch nach Versorgungssicherheit beflügelt Akzeptanz von Erneuerbaren Energien. <https://www.unendlich-viel-energie.de/presse/pressemitteilungen/umfrage-wunsch-nach-versorgungssicherheit-befluegelt-akzeptanz-von-erneuerbaren-energien> (abgerufen am 20.06.2024).

Agentur für Erneuerbare Energien (2023): Erneuerbare Energien in Deutschland: Zwischen Akzeptanz und Unsicherheit. <https://www.unendlich-viel-energie.de/die-agentur/presse/pressemitteilungen/erneuerbare-energien-in-deutschland-zwischen-akzeptanz-und-unsicherheit> (abgerufen am 20.06.2024).

Akita, N., Ohe, Y., Araki, S., Yokohari, M., Terada, T., Bolthouse, J. (2020): Managing Conflicts with Local Communities over the Introduction of Renewable Energy: The Solar-Rush Experience in Japan. *Land* 2020, 9(9), 290; <https://doi.org/10.3390/land9090290>

Ali, M., Irfan, M., Ozturk, I., Rauf, A. (2023): Modeling public acceptance of renewable energy deployment: a pathway towards green revolution. Economic Research-Ekonomska Istraživanja. DOI: 10.1080/1331677X.2022.2159849

Ariadne (2023): Kurzdossier: Umsetzbarkeit der Stromwende: Regionale Potenziale Erneuerbarer Energien und gesellschaftliche Akzeptanz. https://publications.pik-potsdam.de/rest/items/item_28994_1/component/file_28995/content, (abgerufen am 20.06.2024).

Bade, S. O., Tomomewo, O. S., Meenakshisundaram, A., Ferron, P., Oni, B. A. (2024): Economic, social and regulatory challenges of green hydrogen production and utilization in the US: A review. International Journal of Hydrogen Energy 49(1). DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.08.157

Bao, Q., Sinitskaya, E., Gomez, K. J., MacDonald, E. F., Yang, M. C. (2020): A human-centered design approach to evaluating factors in residential solar PV adoption: A survey of homeowners in California. Renewable Energy, 151, Pages 503-513, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.047>

BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) (2020): Umfrage zu Wasserstoff des Meinungsforschungsinstituts prolytics. <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/umfrage-zu-wasserstoff-mehr-als-die-haelfte-der-deutschen/>, (abgerufen am 23.06.2024).

Besley, J. C., Baxter-Clemmons, S. (2010): Analysis of South Carolina hydrogen and fuel cell workers views and opinion leadership behavior: A waiting opportunity? International Journal of Hydrogen Energy 35(16): 8407-8416, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.06.002

Borch, K. (2018): Mapping value perspectives on wind power projects: The case of the danish test centre for large wind turbines. Energy Policy, 123, Pages 251-258, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.056>.

Burghard, U., Scherrer, A., Dütschke, E., Globisch, J. (2020): Social acceptance of electric mobility in Germany. Working Paper Sustainability and Innovation, No. S 12/2020

Carlisle, J. E., Kane, S. L., Solan, D., Bowman, M., Joe, J. C. (2015): Public attitudes regarding large-scale solar energy development in the U.S. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48, Pages 835-847, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.047>.

Carlisle, J. E., Solan, D., Kane, S. L., Joe, J. (2016): Utility-scale solar and public attitudes toward siting: A critical examination of proximity. Land Use Policy, 58, Pages 491-501, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.006>.

DNR (Deutscher Naturschutzring) (2023): Forsa-Umfrage: Mehr als drei Viertel der Befragten wollen Investitionen in "grüne" Zukunftstechnologien. <https://www.dnr.de/aktuelles-termine/aktuelles/forsa-umfrage-mehr-als-drei-viertel-der-befragten-wollen-investitionen> (abgerufen am: 14.07.2024).

Doedt, C., Maruyama, Y. (2023): The mega solar Twitter discourse in Japan: Engaged opponents and silent proponents. *Energy Policy*, 175, 113495, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113495>.

Egbue, O., Long, S. (2012): Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy Policy*, 48, Pages 717-729, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.009>.

FA Wind (Fachagentur Windenergie an Land) (2022): Umfrage zur Akzeptanz der Windenergie an Land - Herbst 2022. https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Akzeptanz/FA_Wind_Umfrageergebnisse_Herbst_2022.pdf, (abgerufen am: 15.07.2024).

FhG (Fraunhofer Gesellschaft) IAO (2020). Umfrage des HYPOS-Projekts H2-Chancendialog. In: Zukunftsweisende Forschung für eine Grüne Wasserstoffwirtschaft, Meilensteinpublikation geförderter Projekte des HYPOS e.V. im Rahmen von Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation https://www.hypos-germany.de/wp-content/uploads/2023/06/hypos_zwanzig20_abschlusspublikation_web.pdf (abgerufen am 24.07.23).

Fischer, A., Kube, R. (2020): Breite Mehrheit für Windkraft, IWKurzbericht, No. 6/2020, Institut der deutschen Wirtschaft (IW), Köln.

Forsa (2023): Akzeptanz von Wind- und Solarenergie in Rheinland-Pfalz. Ergebnisse einer Repräsentativbefragung in den fünf Planungsregionen von Rheinland-Pfalz. https://mkuem.rlp.de/fileadmin/14/Startseite/Pressemeldung-PDF/Akzeptanz_von_Wind-_und_Solarenergie_in_Rheinland-Pfalz.pdf, abgerufen am: 15.07.2024.

Funke, J. (2017): Wettringer Windbürger - Erfolgsfaktoren bei der Planung und Umsetzung des Bürgerwindparks Ströfeld unter besonderer Berücksichtigung von Kommunikation und finanzieller Beteiligung.

Guan, J., & Zepp, H. (2020): Factors Affecting the Community Acceptance of Onshore Wind Farms: A Case Study of the Zhongying Wind Farm in Eastern China, *Sustainability* 2020, 12, 6894; doi:10.3390/su12176894

Guo, Y., Ru, P., Su, J., Anadon, L. (2015): Not in My Backyard, but Not Far away from Me: Local Acceptance of Wind Power in China, *Energy*, 82, Pages 722-733, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.082>.

Henke, C. (2023): Lokale Akzeptanz von Windenergie und Photovoltaik-Freiflächenanlagen: Weiche Faktoren, die die Implementierung beeinflussen. Abschlussarbeit (BSC) an der Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Architektur und Landschaft, Institut für Umweltplanung.

Hienuki, S., Hirayama, Y., Shibutani, T., Sakamoto, J., Nakayama, J., Miyake, A. (2019). How Knowledge about or Experience with Hydrogen Fueling Stations Improves Their Public Acceptance, *Sustainability* 2019, 11, 6339; doi:10.3390/su11226339

Hienuki, S., Hirayama, M., Hirayama, Y., Kamada, H., Kasai, N., Shibutani, T., Otaki, T. e (2021): Public acceptance for the implementation of hydrogen self-refueling stations, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 35739-35749, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.115>.

Huang, X., Ge, J. (2019): Electric vehicle development in Beijing: An analysis of consumer purchase intention, *Journal of Cleaner Production*, 216, Pages 361-372, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.231>.

IKND (Initiative Klimaneutrales Deutschland) (2023): Akzeptanz für Windenergie in Bayern. <https://initiative-klimaneutral.de/presse/akzeptanz-fuer-windenergie-in-bayern> (abgerufen am: 14.05.2024).

Irfan, M., Elavarasan, R. M., Hao, Y., Feng, M., Sailan, D. (2021): An assessment of consumers' willingness to utilize solar energy in China: End-users' perspective, *Journal of Cleaner Production*, Volume 292, 126008, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126008>.

Isidoro-Losada, A.M. (2022): Wahrnehmung von Wasserstofftechnologien - Untersuchungsergebnisse von Umfragen im bundesdeutschen Kontext, Lehrstuhl für Umwelt- und Klimapolitik, Hochschule für Politik, Technische Universität München

Itaoka, K., Saito, A., Sasaki, K. (2017): Public perception on hydrogen infrastructure in Japan: Influence of rollout of commercial fuel cell vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (11), 7290-7296, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.123>.

Iwata, K., Kyoji, S., Cao, Y., Ushifusa, Y. (2022): Social acceptance of wind turbines in Japan: An empirical study using choice experiments, *The Society for Economic Studies*, The University of Kitakyushu, Working Paper Series, No.2022-1

Iwata, K., Kyoji, S., Ushifusa, Y. (2023): Public attitudes of offshore wind energy in Japan: An empirical study using choice experiments, *Cleaner Energy Systems* 4 (2023) 100052, <https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100052>.

Johansen, K., & Emborg, J. (2018): Wind farm acceptance for sale? Evidence from the Danish wind farm co-ownership scheme, *Energy Policy*, 117, 413-422, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.038>.

Jørgensen, M. L., Anker, H. T., Lassen, J. (2020): Distributive fairness and local acceptance of wind turbines: The role of compensation schemes, *Energy Policy*, 138,111294, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111294>.

Keeley, A. R., Komatsubara, K., & Managi, S. (2021): The value of invisibility: factors affecting social acceptance of renewable energy, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 17(1), Article 1983891. <https://doi.org/10.1080/15567249.2021.1983891>

Konrad, W., Kuhn, R., Wist, S.-K., Witzel, B. (2021): Einstellungen in Deutschland zu Wasserstofftechnologien: Ergebnisse von Repräsentativbefragungen in der Übersicht. Stuttgart: DIA-LOGIK gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH

Krause, R. M., Carley, S. R., Lane, B. W., Graham, J. D. (2013): Perception and reality: Public knowledge of plug-in electric vehicles in 21 U.S. cities, *Energy Policy*, 63, 433-440, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.018>.

Ladenburg, J. (2008): Attitudes towards on-land and offshore wind power development in Denmark; choice of development strategy, *Renewable Energy*, 33 (1), 111-118, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.01.011>.

Ladenburg, J., Hevia-Koch, P., Petrovic, S., Knapp, L. (2020): The offshore-onshore conundrum: Preferences for wind energy considering spatial data in Denmark, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121,109711, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109711>.

Ladenburg, J., & Möller, B. (2011): Attitude and acceptance of offshore wind farms- The influence of travel time and wind farm attributes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (9), 4223-4235, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.130>.

LichtBlick (2020): Repräsentative Umfrage zu erneuerbaren Energien: Mehrheit der Deutschen für Solaranlagen auf Dächern. <https://www.lichtblick.de/presse/mehrheit-der-deutschen-fuer-solaranlagen-auf-daechern/> (abgerufen am: 20.10.2024)

Lim, S., Dolsak, N., Prakash, A., Tanaka, S. (2022): Distributional concerns and public opinion: EV subsidies in the U.S. and Japan, *Energy Policy*, 164, 112883, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112883>.

Lin, B., Wu, W. (2018): Why people want to buy electric vehicle: An empirical study in first-tier cities of China, *Energy Policy*, 112, 233-241, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.026>.

Liu, J., Chen, T., Hu, B. (2023): Consumer acceptance under hydrogen energy promotion policy: Evidence from yangtze River Delta, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (30), 11104-11112, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.081>.

Ludin, D., Schreier, N., Mueller, E., Wellbrock, W., Melber, P., Sollner, J (2023): Acceptance of E-Motorcycle: A Longitudinal Survey at Loewensteiner Platte, South Germany, *World Electr. Veh. J.*, 14, 326. <https://doi.org/10.3390/wevj14120326>.

Martin, E., Shaheen, S. A., Lipman, T. E., Lidicker, J. R. (2009): Behavioral response to hydrogen fuel cell vehicles and refueling: Results of California drive clinics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 8670-8680, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.098>.

Maruyama, Y., Nishikido, M., Iida, T. (2007): The rise of community wind power in Japan: Enhanced acceptance through social innovation, *Energy Policy*, 35 (5), 2761-2769, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.010>.

Motosu, M., & Maruyama, Y. (2016): Local acceptance by people with unvoiced opinions living close to a wind farm: A case study from Japan, *Energy Policy*, 91, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.018>.

Mukai, T., Kawamoto, S., Ueda, Y., Saijo, M., Abe, N. (2011): Residential PV system users' perception of profitability, reliability, and failure risk: An empirical survey in a local Japanese municipality, *Energy Policy*, 39(9), 5440-5448, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.019>.

Nakano, R., Miwa, T., & Morikawa, T. (2018): Comparative Analysis on Citizen's Subjective Responses Related to Their Willingness to Pay for Renewable Energy in Japan Using Latent Variables, *Sustainability*, 10, 2423; <https://doi.org/10.3390/su10072423>.

Ngar-yin Mah, D., Wang, G., Lo, K., Leung, M., Hills, P., Lo, A. Y. (2018): Barriers and policy enablers for solar photovoltaics (PV) in cities: Perspectives of potential adopters in Hong Kong, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 921-936, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.041>.

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2017): The Barriers to Acceptance of Plug-in Electric Vehicles: 2017 Update, Technical Report NREL/TP-5400-70371, November 2017, Contract No. DE-AC36-08GO28308.

Öko-Institut e.V. (2020): Akzeptanz und Perspektiven von Elektromobilität in Südhessen - Ergebnisse aus der Begleitforschung in Kooperation mit der Entega AG. Projektendbericht. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Begleitforschung-E-Mobilitaet_Suedhessen.pdf abgerufen am 19.10.2024)

Ono & Tsunemi (2017). Identification of public acceptance factors with risk perception scales on hydrogen fueling stations in Japan, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (16), 10697-10707, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.021>.

ORNL (Oak Ridge National Laboratory) (2006): The results of the 2004 knowledge and opinions surveys for the baseline knowledge assessment of the U.S. department of energy hydrogen program. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub1840.pdf> (abgerufen am 10.10.2024)

Pascaris, A.S., Schelly, C., Burnham, L., Pearce, J. M. (2021): Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community and socio-political dimensions of agrivoltaics, *Energy Research & Social Science*, 75,102023, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102023>.

Peters, A., Agosti, R., Popp, M., Ryf, B. (2011): Elektroautos in der Wahrnehmung der Konsumenten: Zusammenfassung der Ergebnisse einer Befragung in Deutschland. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.

Radtke, J., Saßmannshausen, S., Bohn, N. (2021): Windkraft in Nordrhein-Westfalen: Einstellungen zu Akzeptanz, Beteiligung und Konfliktlösung. Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage. Universität Siegen. <https://doi.org/10.25819/ubsi/10009>.

Rai, V., Beck, A. L. (2015): Public perceptions and information gaps in solar energy in Texas. *Environ. Res. Lett.* 10 074011, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/074011>.

Ramea, K. (2019). An integrated quantitative-qualitative study to monitor the utilization and assess the perception of hydrogen fueling stations, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (33), 18225-18239, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.053>.

Rand, J., Hoen, B. (2017): Thirty years of North American wind energy acceptance research: What have we learned? *Energy Research & Social Science*, 29, 135-148, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.019>.

Ren, X., Dong, L., Xu, D., Hu, B. (2020): Challenges towards hydrogen economy in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (59), 34326-34345, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.163>.

Schlüter, J., Weyer, J. (2019): Car sharing as a means to raise acceptance of electric vehicles: An empirical study on regime change in automobility, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 60, 185-201, <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.09.005>.

She, Z., Sun, Q., Ma, J., Xie, B. (2017): What are the barriers to widespread adoption of battery electric vehicles? A survey of public perception in Tianjin, China, *Transport Policy*, 56, 29-40, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.03.001>.

Sintov, N., Abou-Ghalioum, V., White, L. V. (2020): The partisan politics of low-carbon transport: Why democrats are more likely to adopt electric vehicles than Republicans in the United States,

Energy Research & Social Science, 68, 101576.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101576>.

Tanaka, M., Ida, T., Murakami, K., Friedman, L. (2014): Consumers' willingness to pay for alternative fuel vehicles: A comparative discrete choice analysis between the US and Japan, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 70, 194-209, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.10.019>.

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Zelt, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2018): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken. (abrufbar im Internet unter: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7081/file/WR12.pdf>)

Wang, S., Tan, Y., Fukuda, H., Gao, W. (2023): Willingness of Chinese households to pay extra for hydrogen-fuelled buses: A survey based on willingness to pay, *Front. Environ. Sci.* 11:1109234. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1109234>.

Wang, N., Tang, L., Pan, H. (2018): Analysis of public acceptance of electric vehicles: An empirical study in Shanghai, *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, vol. 126(C), pages 284-291, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.09.011>.

Witte, K., Weber, N., Reichmann, A., Große-Keul, F., Altstadt, L. (2023): Die Akzeptanz von grünem Wasserstoff in Nordrhein-Westfalen: Status quo und Handlungsempfehlungen, In Brief: Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit /Sustainability Impulses from Wuppertal, 12. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. <https://doi.org/10.48506/opus-8497>.

Wu, J., Wang, S., Meng, Z., Zhang, R. (2023): Public acceptance of residential photovoltaic installation: A case study in China, *Heliyon* 9, e20891, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20891>.

Yan, J., Zhao, J. (2022): Willingness to pay for heavy-duty hydrogen fuel cell trucks and factors affecting the purchase choices in China, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (58), 24619-24634, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.252>.

Yang, W., Li, C., Ozansoy, C. (2019): Public Response to Installation of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) System to Residential Buildings in Wuhan, China, *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019*. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.41.07>.

Yap, J., McLellan, B. (2024): Evaluating the attitudes of Japanese society towards the hydrogen economy: A comparative study of recent and past community surveys, *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 66-83, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.174>.

Yuan, X., Zuo, J., Huisingh, D. (2015): Social acceptance of wind power: a case study of Shandong Province, China, *Journal of Cleaner Production*, 92, 168-178, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.097>

Yuan, X., Zuo, J., Ma, C. (2011): Social acceptance of solar energy technologies in China - End users' perspective, *Energy Policy*, 39 (3), 1031-1036, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.003>.

Zeller, M., Luise, R., Sikka, M., Hartmann, N., Kim, H., Soylu, T. (2019). Wasserstoffmobilität im ÖPNV der Stadt Offenburg und Umgebung - Konzeptentwicklung, technoökonomische Analyse und gesellschaftliche Akzeptanz "H2-Bus", Forschungsbericht BWPLUS.

Zhao, X., Ma, Y., Shao, S., Ma, T. (2022): What determines consumers' acceptance of electric vehicles: A survey in Shanghai, China, *Energy Economics*, 108, 105805, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105805>.

Anmerkung: Zu Kriterium 8 (Pfadabhängigkeit) wurde keine eigenständige Datenrecherche durchgeführt. Deshalb wird dieses Kriterium hier nicht besprochen (s. Abschnitt 2.1).

3.8 Kriterium 9: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Da sich die Datenrecherche für Stromnetze und Wärme-/Kältenetze sehr unterschiedlich darstellte werden diese im Folgenden getrennt behandelt. Für Stromnetze existieren in großen Teilen Netzentwicklungspläne¹⁰³, wogegen das im Bereich von Wärme-/Kältenetzen nicht der Fall ist. Zudem ist das Thema Wärme-/Kältenetze nicht in allen betrachteten Ländern in staatlichen Stellen präsent.¹⁰⁴

3.8.1 Stromnetze

3.8.1.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren

Ziel war es Informationen über den Zustand und Ausbau des Stromnetzes zu recherchieren und weitere Indikatoren zur Einordnung heranzuziehen, die einen Bezug zu den einzelnen Technologien zulassen. Dabei sollten auch topologische Bedingungen als besondere Hindernisse berücksichtigt werden. Zunächst sollten für den Bereich Stromnetze deshalb die Netzentwicklungspläne recherchiert werden, auf Basis derer die (Netz-)Ausbauziele bestimmt werden sollten. Um diese einzuordnen, sollte mit Hilfe von mehreren Indikatoren und Karten sowie

¹⁰³ Z.B. für Dänemark: Energinet (2022): Long-term development needs in the power grid. Energinet's long-term development plan 2022 - Needs analysis

¹⁰⁴ Z.B. in Brasilien, für das lediglich eine wissenschaftliche Veröffentlichung zu KWK-Kraftwerken mit Fernwärmenetzen gefunden werden konnte: Maria Aparecida Bottiglieri Savoia (2012): ESTUDO DE CENTRAIS DE COGERAÇÃO EM CICLO COMBINADO COM AQUECIMENTO URBANO ATRAVÉS DE REDES (TE-LEAQUECIMENTO) NA EUROPA, ESTADOS UNIDOS E BRASIL – IMPLICAÇÕES SÓCIO-AMBIENTAIS E ECONÔMICAS – ANÁLISE DO CASO BRASILEIRO

Ausbauzielen für betrachtete Technologiegruppen eine Einordnung stattfinden, die einerseits bestimmte topologische Schwierigkeiten wie Berge oder Inseln berücksichtigt und auf der anderen Seite bestimmen soll, in wie weit das Netz für die untersuchten Technologien bereits besteht oder noch in erheblichem Maße ausgebaut werden muss. Auch sollten die Potenzialgebiete für Solar und Wind sowie die Lastzentren geographisch eingeordnet werden, um die Herausforderungen bei der Verbindung von Erzeugung und Verbrauch im jeweiligen Land abzubilden. Ebenfalls zur Einordnung sollte der Netzausbau ins Verhältnis zu mehreren Indikatoren gesetzt werden. Diese sollten die Wirtschaftskraft, die Bevölkerung, die Fläche sowie Erzeugungskapazitäten allgemein und speziell auf Erneuerbare und Stromverbräuche abbilden, um die Netzlänge zwischen den Ländern vergleichbar zu machen und insbesondere auch den Bezug zu den variablen Erneuerbaren Energien Solar und Wind zu beleuchten. Neben den quantitativen Daten sollte dabei auch qualitative Daten berücksichtigt werden. Daraus sollten jeweils Überblicksdokumente erstellt werden. Zur Veranschaulichung der topologischen Bedingungen sowie der Potenziale für variable erneuerbare Stromerzeuger sollte zur einfachen Veranschaulichung Kartenmaterial verwendet werden. Zudem sollten bestimmte Indikatoren berücksichtigt werden, die ein Abbild auf den Netzzustand geben können. Dafür geeignete Daten – nicht: Landkarten – wurden in die Datenbank integriert.

3.8.1.2 Grundsätzliches Vorgehen

Zunächst wurden die übergreifenden Netzentwicklungspläne recherchiert. Diese lagen zu meist als Veröffentlichung des Übertragungsnetzbetreibers vor¹⁰⁵. In Fällen, in denen es mehrere Übertragungsnetzbetreiber gab, bestanden diese entweder wie für Deutschland als Veröffentlichung der Netzaufsichtsbehörde¹⁰⁶ oder als gemeinschaftliche Veröffentlichung mit Federführung des größten Übertragungsnetzbetreibers, wie für Österreich¹⁰⁷. Eine dritte Art der Veröffentlichung, die die Recherche verkomplizierte, war die getrennte Veröffentlichungen jedes einzelnen Übertragungsnetzbetreibers wie es für die USA der Fall war¹⁰⁸. Hier wurden deshalb weitere übergreifenden Quellen recherchiert, die sich in einem Entwurfsdokument des Energieministeriums zu übergreifenden Netzausbaubedarfen fand. Für andere Länder waren keine separaten Dokumente zur Netzplanung vorhanden, sondern Informationen zu Netzplanungen befanden sich in Energie oder Gesamtwirtschaftsplänen¹⁰⁹. Weitere Informationen

¹⁰⁵ Z.B. für Belgien: elia (2023): Plan de développement fédéral du réseau de transport 2024-2034

¹⁰⁶ NEP 2035

¹⁰⁷ Austrian Power Grid AG; Vorarlberger Übertragungsnetz GmbH (2021): Netzentwicklungsplan 2021

¹⁰⁸ Z.B. California ISO (2022): 20-Year transmission outlook und New York ISO (2022): 2012-2040 System & Ressource Outlook (The Outlook). A Report from the New York Independent System Operator.

¹⁰⁹ Z.B. Brasilien: Ministerium für Bergbau und Energie Brasilien: 2031 ten-year energy expansion plan - Chapter 4 power transmission

konnten für China auch aus Sekundärliteratur gewonnen werden.¹¹⁰ Aus den recherchierten Dokumenten wurden die Netzausbaupläne sowie für die qualitativen Analysen die angegebenen Gründe für den Netzausbau im jeweiligen Land extrahiert. Ebenfalls konnten die Ausbauplanungen für die Technologien, Photovoltaik, Wind Onshore, Wind Offshore, Biomasse, Wasserkraft, E-Mobilität, Wärmepumpen, Batteriespeichern und Elektrolyse/PtX aus den Netzentwicklungsplänen entnommen werden. Lag kein getrennter Netzentwicklungsplan vor, so wurden diese aus den Energie- oder Gesamtwirtschaftsplänen entnommen. Der aktuelle Zustand des Netzes konnte zumeist nicht aus den Netzplanungsdokumenten entnommen werden, sondern musste einzeln recherchiert werden. Daten hierzu fanden sich in einem sehr diversen Spektrum von Quellen. Dazu zählten Websites und Dokumente von Netzbetreibern¹¹¹ (z.B. Brasilien) oder Sprechern bzw. Verbänden dieser oder der Energiewirtschaft¹¹² (z.B. Deutschland), eine Website einer Technologieplattform für elektrische Netze für Daten aus Spanien¹¹³, eine Website eines Energieversorgungsunternehmens für Daten aus Südkorea¹¹⁴, ein Dokument eines Deutsch-Französischen Netzwerks zur Energiewende für Daten aus Frankreich¹¹⁵, ein Dokument eines Informationszentrums zur Energie für Daten aus Japan¹¹⁶, ein Handbuch der Regulierungsbehörde für den Energiesektor (Malaysia)¹¹⁷ oder Strom- und Gaskunden (Österreich)¹¹⁸, ein Dokument des nationalen Energieministerium für Daten aus den USA¹¹⁹, eine Website von einem Unternehmen, welches sich auf das Sammeln von Daten spezifiziert hat für

¹¹⁰ Dena (2019): Transmission Grid Planning in systems with high shares of Renewable Energy. Planning the future energy system in China

¹¹¹ Z.B. für Brasilien: ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico (2023): ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico - O Sistema em Números. Online verfügbar unter <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

¹¹² BdeW (2023): Entwicklung der Stromnetze in Deutschland - Stromkreislängen nach Spannungsebenen - Stand 03/2023. Online verfügbar unter https://www.bdeW.de/media/documents/Stromkreislaengen_D_Entw_10J_o_dw_online_jaerlich_Ki_31032023.pdf

¹¹³ FutuRed. Plataforma española de redes eléctricas (2017): Las redes eléctricas en España - FutuRed. Plataforma española de redes eléctricas. Online verfügbar unter <https://www.futured.es/las-redes-electricas-espana/>, zuletzt aktualisiert am 07.07.2017, zuletzt geprüft am 02.08.2023

¹¹⁴ Kepco (2023): - Overview | KEPCO -. Online verfügbar unter <https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/B/htmlView/EN-BDHP001.do?menuCd=EN020401>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023

¹¹⁵ Ofate DFBew: Versorgungszuverlässigkeit, Spannungsqualität und Kosten Betrachtung der Stromnetze in Deutschland und Frankreich April 2019

¹¹⁶ Jepic: The Electric Power Industry in JAPAN 2022.

¹¹⁷ Suruhanjaya Tenaga Energy Commission (2022): Malaysia energy statistics - Handbook 2021.

¹¹⁸ E-Control (2023): Netz und Netzbetreiber in Österreich - E-Control. Online verfügbar unter <https://www.e-control.at/konsumenten/netz-und-netzbetreiber-in-oesterreich>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023

¹¹⁹ U.S. Department of Energy: Developing Innovative Technologies to Enhance Reliability, Ensure Resilience, and Increase Flexibility.

Daten aus China¹²⁰. Die sehr divergierenden Angaben, die sich in einer Quelle nur auf einzelne Netzebenen¹²¹ bezogen und in der anderen Quelle auf das gesamte Übertragungsnetz sowie das Verteilnetze¹²² beziehen konnten, mussten rechnerisch abgeglichen werden und wurden nach Übertragungsnetz, Verteilnetz oder das Gesamtnetz dargestellt. Zum aktuellen Zustand des jeweiligen Netzes konnte zudem ein Ausschnitt aus der OpenInfrastructureMap¹²³ zur Abbildung der räumlichen Verteilung verwendet werden, woraus auch unterschiedliche Netzebenen erkennbar sind. Über die Dichte der Stromnetze je nach Bereich konnten zudem räumlich die Lastzentren im Land markiert werden. Für die Einordnung der Netzlänge zu verschiedenen Indikatoren konnten weitgehend internationale Quellen genutzt werden. Die Wirtschaftskraft wurde mit Hilfe des Bruttoinlandsprodukts (BIP) dargestellt; auch die Bevölkerungszahl und Fläche wurden recherchiert. Die Daten konnten von Weltbank, OECD und UN bezogen werden¹²⁴. Einzig bei der Fläche für Hong Kong musste eine Regierungswebsite aus Hong Kong genutzt werden¹²⁵. Die weiteren Indikatoren zur installierten Leistung und dem Stromverbrauch, zu denen die Netzlänge ebenfalls ins Verhältnis gesetzt werden sollte, konnten von der IEA und der IRENA bezogen werden. Genutzt wurde die installierte Leistung der Erneuerbaren, die gesamte installierte Leistung und der Stromverbrauch. Gleiches galt für eine Abbildung des Strommixes¹²⁶.

¹²⁰ China Length of Electricity Transmission Circuit (2023). In: CEICdata.com, 01.08.2023. Online verfügbar unter <https://www.ceicdata.com/en/china/length-of-electricity-transmission-circuit>, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

¹²¹ Z.B. für die Niederlande: Gasunie, Tennet, coteq, enduris, enexis, alliander, rendo, stedn, westland infra (2021): Het Energiesysteem van de Toekomst - Integrale Infrastructuurverkenning 2030 -2050 April 2021. oder für Malaysia: Suruhanjaya Tenaga Energy Commission (2022): Malaysia energy statistics - Handbook 2021

¹²² Z.B. für die USA: U.S. Department of Energy: Developing Innovative Technologies to Enhance Reliability, Ensure Resilience, and Increase Flexibility.

¹²³ Open Infrastructure Map (2023). Online verfügbar unter <https://openinframap.org/#2/26/12>, zuletzt aktualisiert am 30.04.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

¹²⁴ BIP: World Bank Open Data (2023a): World Bank Open Data - GDP (constant 2015 US\$). Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023, Bevölkerungszahl: World Bank Open Data (2023b): World Bank Open Data - Population, total. Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023, Fläche: United Nations Statistics Division - Environment Statistics - Land Use (2016). Online verfügbar unter <https://unsstats.un.org/unsd/environment/totalarea.htm>, zuletzt aktualisiert am 07.06.2016, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

¹²⁵ GovHK (2024): GovHK: Hong Kong – the Facts. Online verfügbar unter <https://www.gov.hk/en/about/abouthk/facts.htm>, zuletzt geprüft am 08.11.2024.

¹²⁶ Installierte Leistung: https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/IRENASTAT__Power%20Capacity%20and%20Generation/ELECCAP_2023_cycle2.px/, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023, Stromverbrauch und installierte Leistung mussten trotz internationaler Quelle einzeln von verschiedenen Websites der IEA entnommen werden z.B. für Belgien: IEA (2023): Belgium - Countries & Regions - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/countries/belgium>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

Die Topologie konnte über einen Ausschnitt der OpenTopoMap¹²⁷ bestimmt werden. Diese hob Berge deutlich hervor und stellte Inseln dar und erfüllte damit die notwendigen Bedingungen der Darstellung. Für die Darstellung der Potenziale für Solar und Wind konnten Ausschnitte aus dem Solar- und dem Windatlas entnommen werden¹²⁸. Zum Netzzustand sowie den Planungen zum EE-Ausbau konnten zudem weitere Indikatoren hinzugezogen werden. Der Netzzustand konnte über den SAIDI-Index aus den Doing Business Indikatoren abgebildet werden¹²⁹. Für die Netzverbindungen, der Netznutzung und dem EE-Ausbau konnten Indikatoren aus dem RISE-Indikatorenset verwendet werden¹³⁰. Dieses deckte fast alle Länder ab.

3.8.1.3 Schwierigkeiten der Datenerhebung

Bei der Erfassung der Daten zu Stromnetzen traten vor allem Probleme in Bezug auf die Netzentwicklungspläne und die Recherche des aktuellen Netzausbauzustands auf. Dazu gehörte die nicht einheitliche Veröffentlichung. Diese konnte als separates Dokument der Netzbetreiber¹³¹, wie es z.B. in Europa üblich ist, sowie als Kapitel von Energie- und Gesamtwirtschaftsplänen wie z.B. für Brasilien oder Malaysia veröffentlicht sein¹³². Dazu kann es zum Teil wie für Malaysia noch weitere spezifischere Planungen für Technologien geben, aus denen auch Informationen zum Ausbau der Netze extrahiert werden können¹³³. Besonders für China war es eine Herausforderung an Informationen zu gelangen. Letztlich mussten für China mit hohem Aufwand aus einem Energieplanungsdokument der Regierung ohne separate Kapitel Daten zu Gründen für den Netzausbau entnommen werden¹³⁴. Diese Pläne konnten erst im Laufe der Recherche aufgefunden werden, weshalb zunächst Sekundärliteratur genutzt werden

¹²⁷ OpenTopoMap - Topographische Karten aus OpenStreetMap (2020). Online verfügbar unter <https://opentopomap.org/#map=4/39.67/-105.21>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2020, zuletzt geprüft am 01.08.2023

¹²⁸ World Bank Group, Esmap, Solargis (2023): Global Solar Atlas. Online verfügbar unter <https://globalsolaratlas.info/map>, zuletzt aktualisiert am 28.02.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023., World Bank Group, Esmap, Vortex, DTU (2023): Global Wind Atlas. Online verfügbar unter <https://globalwindatlas.info/en>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

¹²⁹ Doing Business | DataBank (2023). Online verfügbar unter <https://databank.worldbank.org/SAIDI-Index-WB/id/dd1d6036>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

¹³⁰ Indicators | RISE (2023). Online verfügbar unter <https://rise.esmap.org/indicators>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

¹³¹ Z.B. für Belgien: elia (2023): Plan de développement fédéral du réseau de transport 2024-2034

¹³² Brasilien: Ministerium für Bergbau und Energie Brasilien: 2031 ten-year energy expansion plan - Chapter 4 power transmission, Malaysia: Twelfth Malaysia Plan 2021-2025 (2021).

¹³³ SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT AUTHORITY (SEDA) MALAYSIA (2021): Malaysia Renewable Energy Roadmap. Pathways towards low carbon energy system. Online verfügbar unter https://www.seda.gov.my/reportal/wp-content/uploads/2022/03/MyRER_webVer3.pdf, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

¹³⁴ 14th Five-Year Plan on Modern Energy System Planning. Online verfügbar unter https://climate-laws.org/documents/14th-five-year-plan-on-modern-energy-system-planning_20bd

musste¹³⁵. Zudem bestand gerade für die USA ein weiteres Hindernis, da Netzentwicklungspläne nur für einzelne Netzbetreiber veröffentlicht wurden und nicht zusammengeführt wurden¹³⁶. Zusätzlich konnte auf den Netzentwicklungsplan des texanische Netzbetreibers nicht zugegriffen werden oder der Netzbetreiber war multinational aktiv wie es z.B. für MISO¹³⁷ der Fall ist. Die Recherche nach einem übergreifenden Dokument zu den USA ergab als einziges nutzbares Dokument ein Entwurfsdokument des Energieministeriums zu Risiken und Bedarfe für die übergreifende Netzplanung und deren Gründen¹³⁸. Auch für Japan ist eine übergreifende Netzplanung vor allem auf die Verbindungen der Teilgebiete fokussiert gewesen¹³⁹. Deutschland dagegen bietet an dieser Stelle trotz der vier Netzgebiete ein einheitliches Netzplanungsdokument mit entsprechend verwendeten Ausbauzielen für die Technologien¹⁴⁰. An den beschriebenen Aspekten wird außerdem deutlich, dass es verschiedene Veröffentlichungsinstitutionen gab, was die Recherche erschwerte. Zudem wurden die Dokumente nicht immer in englischer Sprache verfasst, sodass sowohl beim Lesen der Dokumente als auch der Suche ein Übersetzungsprogramm notwendig war¹⁴¹. Eine weitere Erschwernis insbesondere für den Vergleich sind die unterschiedlichen Veröffentlichungszeiträume, die von einem bis zu mehreren Jahren zwischen den Veröffentlichungen reichen können. Des Weiteren sind die Zeiträume, in denen das Netz vorausgeplant wird sehr unterschiedlich, was die Vergleichbarkeit vermindert. Teilweise ist in den Netzausbauplanungen kein konkreter Wert für den Netzausbau angegeben.¹⁴² Für China fanden sich keine Dokumente, aus denen konkretere Ausbauplanungen entnommen werden konnten. Lediglich Gründe für den Ausbau konnten mit viel Aufwand extrahiert werden¹⁴³. Netzgrößen oder Ausbauzustände waren sowohl in Bezug als

¹³⁵ Dena (2019): Transmission Grid Planning in systems with high shares of Renewable Energy. Planning the future energy system in China.

¹³⁶ California ISO (2022): 20-Year transmission outlook New York ISO (2022): 2012-2040 System & Ressource Outlook (The Outlook). A Report from the New York Independent System Operator

¹³⁷ Miso: MTEP 2022 Report (DRAFT)

¹³⁸ U.S. Department of Energy (2023): National Transmission Needs Study - Draft for Public Comment

¹³⁹ Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators (2022a): Aggregation of Electricity Supply Plans Fiscal Year 2022. und Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators (2022b): Status of the national transmission grid to integrate variable renewable electricity generation.

¹⁴⁰ Bundesnetzagentur: NetzentwicklungsplanStrom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023 - Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber.

¹⁴¹ Z.B. für Südkorea: 9th Basic Plan for Power Supply and Demand. In diesem Fall ist der Plan unter dem englischen Titel über eine Suchabfrage auffindbar.

¹⁴² Für Deutschland wurden Netzentwicklungspläne zuletzt im 2-Jahres-Rhythmus veröffentlicht (vgl. NEP 2017 (für die Jahre 2017-2030, NEP 2019 für 2019-2030 und NEP 2021 für 2021-2035), wogegen für Belgien in einem 4-Jahres-Rhythmus veröffentlicht wurde (vgl. Federal Development Plan für Jahre 2020-2030 und 2024-2034). Zudem werden an diesem Beispiel auch die Planungszeiträume deutlich, auch wenn sie sich für andere Länder noch deutlicher unterscheiden.

¹⁴³ 14th Five-Year Plan on Modern Energy System Planning. Online verfügbar unter https://climate-laws.org/documents/14th-five-year-plan-on-modern-energy-system-planning_20bd.

auch besonders für die Ausbauziele, sofern verfügbar, in unterschiedlichen Einheiten angegeben. Der Bezug konnte, wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, auf unterschiedliche Netzebenen oder Aggregationen von Netzebenen gesetzt sein. Die Ausbauziele konnten in km Netzlänge¹⁴⁴, die sich auf die Leitungen oder die Trassen beziehen konnte, als monetäre Investition in das Netz¹⁴⁵, oder als Anteil des aktuellen Ausbaus angegeben sein¹⁴⁶. Zudem ergab sich durch die bereits im vorherigen Abschnitt erwähnte große Diversifikation in den Veröffentlichungsorganen zum Netzzustand eine zusätzliche Schwierigkeit beim Auffinden von Quellen. Für die Recherche der weiteren Indikatoren und Karten ergaben sich nur vergleichsweise wenig Probleme. Die Karten wurden mit Ausnahme des Solaratlases nicht als Ausschnitt angeboten. Aus den bereits genannten Kartenquellen konnten mit Hilfsmitteln dennoch Ausschnitte erstellt werden. Zudem bestand für Hong Kong keine Flächenangabe in der verwendeten UN-Statistik, welche deshalb aus einer Regierungsquelle aus Hong Kong bezogen werden musste.

3.8.1.4 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick

Bei der Recherche zu Stromnetzen ergaben sich Schwierigkeiten, da es keine übergreifende Statistik zum Netzzustand gibt. Auch sind die länderspezifischen Dokumente zur Netzausbauplanung sowohl hinsichtlich des inhaltlichen Detailgrades, dem Zeitpunkt beziehungsweise dem Rhythmus in dem sie veröffentlicht werden und dem Zeitraum, den die Planungen umfassen, sehr unterschiedlich. Alle diese Aspekte erschweren einen Ländervergleich bzw. verunmöglichen diesen. Hinzu kommt die Sprachbarriere, die für einzelne Länder zunächst überwunden werden musste.

3.8.1.5 Zentrale Literatur zum Kriterium 9 Stromnetze

Kartenmaterial:

Open Infrastructure Map (2023). Online verfügbar unter <https://openinframap.org/#2/26/12>, zuletzt aktualisiert am 30.04.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

OpenTopoMap - Topographische Karten aus OpenStreetMap (2020). Online verfügbar unter <https://opentopomap.org/#map=4/39.67/-105.21>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2020, zuletzt geprüft am 01.08.2023

World Bank Group, Esmap, Solargis (2023): Global Solar Atlas. Online verfügbar unter <https://globalsolaratlas.info/map>, zuletzt aktualisiert am 28.02.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

¹⁴⁴ Z.B. für die Niederlande: Gasunie, Tennet, coteq, enduris, enexis, alliander, rendo, stedind, westland infra (2021): Het Energiesysteem van de Toekomst - Integrale Infrastructuurverkenning 2030 -2050 April 2021

¹⁴⁵ Z.B. für Belgien: elia (2019): Plan der développement fédéral du réseau de transport 2020-2030

¹⁴⁶ Z.B. für die USA: U.S. Department of Energy (2023): National Transmission Needs Study - Draft for Public Comment

World Bank Group, Esmap, Vortex, DTU (2023): Global Wind Atlas. Online verfügbar unter <https://globalwindatlas.info/en>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

Indikatoren:

Doing Business | DataBank (2023). Online verfügbar unter <https://databank.worldbank.org/SAIDI-Index-WB/id/dd1d6036>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

Indicators | RISE (2023). Online verfügbar unter <https://rise.esmap.org/indicators>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

United Nations Statistics Division - Environment Statistics - Land Use (2016). Online verfügbar unter <https://unstats.un.org/unsd/environment/totalarea.htm>, zuletzt aktualisiert am 07.06.2016, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

World Bank Open Data (2023a): World Bank Open Data - GDP (constant 2015 US\$). Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

World Bank Open Data (2023b): World Bank Open Data - Population, total. Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

United Nations Statistics Division - Environment Statistics - Land Use (2016). Online verfügbar unter <https://unstats.un.org/unsd/environment/totalarea.htm>, zuletzt aktualisiert am 07.06.2016, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

Strommix, Stromverbrauch und installierte Leistung:

IEA (2023): Belgium - Countries & Regions - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/countries/belgium>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023. (Weitere Länderberichte der IEA mit verändertem Ländernamen und ansonsten gleichem Titel für: Brasilien, China, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Hong Kong, Japan, Malaysia, Niederlande, Österreich, Spanien, Südkorea und USA.

https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/IRENASTAT__Power%20Capacity%20and%20Generation/ELECCAP_2023_cycle2.px/, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

Netzzustand und Ausbau der Technologiegruppen (nach Netzplanung) und des Netzes sowie Gründe für den Ausbau:

Belgien

elia (2019): Plan der développement fédéral du réseau de transport 2020-2030

elia (2023): Plan de développement fédéral du réseau de transport 2024-2034.

Synergrid (2023): Technische gegevens voor de transmissie- en distributienetten elektriciteit in België Données techniques relatives aux réseaux de transport et de distribution d'électricité en Belgique. Online verfügbar unter https://www.synergrid.be/images/downloads/Statistiques%20techniques/2021-2023%20Elektrische%20netten%20technische%20gegevens%20voor%20de%20website_Zonder%20AIESH.pdf Stand 31.12.2023, zuletzt geprüft am 21.01.2025.

Brasilien

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico (2023): ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico - O Sistema em Números. Online verfügbar unter <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

Ministério de minas e energia (2022): 2031 Plano decentral de expansão de energia, online verfügbar unter https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2025

Ministério de minas e energia : 2031 ten-year energy expansion plan - Chapter 4 power transmission. https://www.epe.gov.br/sites-en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/Relatorio_PDE2031_Cap04_EUS.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2025

Ministério de minas e energia (2020): PNE2050 - Plano nacional de energia. Online verfügbar unter <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050/relatorio-final/relatorio-final/relatorio-final-do-pne-2050.pdf/@@download/file>, abgerufen am 11.07.2023.

China

China Length of Electricity Transmission Circuit (2023). In: CEICdata.com, 01.08.2023. Online verfügbar unter <https://www.ceicdata.com/en/china/length-of-electricity-transmission-circuit>, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

14th Five-Year Plan on Modern Energy System Planning. Online verfügbar unter https://climate-laws.org/documents/14th-five-year-plan-on-modern-energy-system-planning_20bd.

Dena (2019): Transmission Grid Planning in systems with high shares of Renewable Energy. Planning the future energy system in China.

Dänemark

Energinet (2023): Adgang til Netdata. Online verfügbar unter <https://energinet.dk/el/data-om-energisystemet/netdata/>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

Energistyrelsen (2021): Analyse af fremtidssikret eldistributionsnet.

Energistyrelsen: Analyseforudsætninger til Energinet 2022 (AF 22) Dataak.

Dansk energi, State of Green (2017): Elnetselskaber sætter strøm på Europas grønne omstilling.

Energinet (2022): Long-term development needs in the power grid. Energinet's long-term development plan 2022 - Needs analysis.

Energinet (2009): Kabelhandlingsplan. 132-150 kV - Marts 2009.

Deutschland

BDEW (2023): Entwicklung der Stromnetze in Deutschland - Stromkreislängen nach Spannungsebenen - Stand 03/2023

Bundesnetzagentur (2023): Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023 - Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, Stand 12.06.2023, online verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-06/NEP_2037_2045_V2023_2_Entwurf_Teil1_1.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2025

NEP 2035 - Zahlen, Daten, Fakten. 2. Entwurf, Stand 26.04.2021, online verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2022-11/NEP_2035_V2021_2_Entwurf_Zahlen-Daten-Fakten_0.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2025

Frankreich

Ofate DFBEW: Versorgungszuverlässigkeit, Spannungsqualität und Kosten - Betrachtung der Stromnetze in Deutschland und Frankreich April 2019

Rte (2017): Bilan prévisionnel.

Rte (2019): French transmission network development plan - 2019 edition.

Rte (2021): Energy Pathways to 2050. Key results.

Hong Kong

Clp group (2023): Transmission & Distribution Network. Online verfügbar unter <https://www.clpgroup.com/en/about/our-business/assets-and-services/hong-kong/transmission---distribution-network.html>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

CLP Power Hong Kong Limited (2018): Executive Council approves CLP Power's Five-Year Development Plan New Tariff and Monthly Fuel Cost Adjustment Come into Effect on 1 October
HK Electric: CORPORATE INFORMATION 2020/21. Online verfügbar unter https://www.hkelectric.com/documents/en/CorporateInformation/Documents/2020_21_CIB_E_Full.pdf. zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023.

HK Electric (2018): 2019-2023 Development Plan - Entering a New Era of Gas Generation for a Low-Carbon Future.

Italien

e-distribuzione (2023): I nostri numeri | e-distribuzione. Online verfügbar unter <https://www.e-distribuzione.it/Azienda/I-nostri-numeri.html>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2023, zuletzt geprüft am 01.08.2023

Terna (2021): Piano di sviluppo.

Japan

Jepic: The Electric Power Industry in JAPAN 2022.

Organization for Cross-regional COordination of Transmission Operators (2022a): Aggregation of Electricity Supply Plans Fiscal Year 2022.

Organization for Cross-regional COordination of Transmission Operators (2022b): Status of the national transmission grid to integrate variable renewable electricity generation.

Malaysia

Suruhanjaya Tenaga Energy Commission (2022): Malaysia energy statistics - Handbook 2021.

SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT AUTHORITY (SEDA) MALAYSIA (2021): Malaysia Renewable Energy Roadmap. Pathways towards low carbon energy system. Online verfügbar unter https://www.seda.gov.my/reportal/wp-content/uploads/2022/03/MyRER_webVer3.pdf, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Twelfth Malaysia Plan 2021-2025 (2021).

Niederlande

Gasunie; Tennet (2022): Infrastructure Outlook 2050. A joint study by Gasunie and TenneT on integrated energy infrastructure in the Netherlands and Germany. online verfügbar unter [https://www.gasunie.nl/en/expertise/energy-system/infrastructure-outlook-2050/\\$4134](https://www.gasunie.nl/en/expertise/energy-system/infrastructure-outlook-2050/$4134) oder https://tennet-drupal.s3.eu-central-1.amazonaws.com/default/2022-07/Infrastructure_Outlook_2050_appendices_190214.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2025.

Gasunie, Tennet, coteq, enduris, enexis, alliander, rendo, stedion, westland infra (2021): Het Energiesysteem van de Toekomst - Integrale Infrastructuurverkenning 2030 -2050 April 2021.

Tennet (2022): Investeringsplan Net op land 2022-2031.

TYNDP 2022 Project Collection - TR 103 (2023). Online verfügbar unter <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/103>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

TYNDP 2022 Project Collection - TR 260 (2023). Online verfügbar unter <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/260>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

TYNDP 2022 Project Collection - TR 335 (2023). Online verfügbar unter <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/335>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

TYNDP 2022 Project Collection - TR 346 (2023). Online verfügbar unter <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/346>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

Österreich

Austrian Power Grid AG; Vorarlberger Übertragungsnetz GmbH (2021): Netzentwicklungsplan 2021. Einreichversion - Planungsstand August 2021.

E-Control (2023): Netz und Netzbetreiber in Österreich - E-Control. Online verfügbar unter <https://www.e-control.at/konsumenten/netz-und-netzbetreiber-in-oesterreich>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

Spanien

FutuRed. Plataforma española de redes eléctricas (2017): Las redes eléctricas en España - FutuRed. Plataforma española de redes eléctricas. Online verfügbar unter <https://www.futured.es/las-redes-electricas-espana/>, zuletzt aktualisiert am 07.07.2017, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

RED Eléctrica de espana (2022): Electricity Transmission Network Development Plan - Period 2021-2026 - Executive Summary, online verfügbar unter https://www.planificacioneolica.es/sites/default/files/2022-05/Plan_Desarrollo_Sumario_Ejecutivo_ENG.pdf, zuletzt geprüft 21.01.2025.

RED Eléctrica de espana (2022): Transmission network development plan 2021-2026 period, online verfügbar unter https://www.planificacioneolica.es/sites/default/files/2024-01/REE_PLAN_DESARROLLO_EN.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2025.

Südkorea

9차 전력기본계획, 신재생·LNG 발전 확대, 산업부, 제9차 전력수급기본계획 공청회 개최 (2020), (Übersetzung des Titels nach DeepL: “9. Energieplan zum Ausbau der Stromerzeugung aus von erneuerbaren Energien und LNG“) online verfügbar unter <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/9th%20Basic%20Plan%20for%20Power%20Supply%20and%20Demand%20.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2025.

Kepeco (2023): - Overview | KEPCO -. Online verfügbar unter <https://home.kepeco.co.kr/kepeco/EN/B/htmlView/ENBDHP001.do?menuCd=EN020401>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2017): The 8th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand (2017 - 2031).

USA

Miso: MTEP 2022 Report (DRAFT).

New York ISO (2022): 2012-2040 System & Resource Outlook (The Outlook). A Report from the New York Independent System Operator.

U.S. Department of Energy (2017): Developing Innovative Technologies to Enhance Reliability, Ensure Resilience, and Increase Flexibility, online verfügbar unter <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/04/f34/OE%20R%26D%20Fact%20Sheet%202017.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2025.

U.S. Department of Energy (2023): National Transmission Needs Study - Draft for Public Comment

3.8.2 Wärme-/Kältenetze

3.8.2.1 Beschreibung der gesuchten Indikatoren

Ziel war es den Zustand und den Ausbau von Wärme-/Kältenetzen mit dem Fokus auf die zu untersuchenden Technologien und Länder darzustellen und deren Sinnhaftigkeit über thermischen Randbedingungen einzuordnen. Letztere sollten als erstes Thema der Recherche über Wärme- und Kältesumme charakterisiert werden. Als zweites Thema sollte der aktuelle Zustand der Wärme-/Kältenetze recherchiert werden, d.h. der aktuelle Ausbau, die Länge und Leistung, das Alter sowie die Einsatzbereitschaft der Netze für die Nutzung erneuerbarer Wärme-/Kältequellen, welches sich insbesondere auf das Temperaturniveau in den Netzen bzw. ob Dampf oder Wasser als Wärmeübertragungsmedium bezog. Zudem sollten die aktuellen Verbraucher und Einspeiser bestimmt werden. Drittens sollten Informationen zu den zukünftigen Wärme-/Kältenetzen und Treibern für deren Ausbau ausfindig gemacht werden. Als Treiber sollten einzelnen Wärme- bzw. Kälteerzeugungstechnologien, die mit Wärme-/Kältenetzen in Verbindungen stehen können, wie Wärmepumpen und Biomasse, Infrastrukturbestandteile wie Wärmespeicher und weiteren Faktoren, wie PtX untersucht werden. Zudem sollten als letzter Punkt die Potenziale des Landes für Wärme-/Kältenetze aufgeführt werden.

3.8.2.2 Grundsätzliches Vorgehen

Für Wärme-/Kältenetze wurden analog zu Stromnetzen zunächst Netzentwicklungspläne als Basis genommen. Diese lagen nicht als separates Dokument vor. Deshalb mussten Informationen aus sogenannten Energie- und Klimaplänen entnommen werden, die neben Wärme-/Kältenetzen auch andere Wärme bzw. Kälteerzeugungstechnologien behandelten und z.B. in den Niederlanden nur für die regionale Ebene nicht aber die nationale Ebene existierten. Zudem fanden sich bei der Recherche auch keine Länder übergreifenden Dokumente zu Wärmenetzen. Daher wurde mit wenigen Ausnahmen auf verschiedene länderspezifische Quellen zurückgegriffen. Dabei wurden Dokumenten, die von offizieller Seite publiziert wurden, prioritär behandelt. Für die Einordnung wurde auf Statistiken zu Wärme und Kältesummen zurückgegriffen. Die Quellen hierzu unterschieden sich, da keine übergreifende Quelle für alle Länder gefunden werden konnte, einzig für die europäischen Länder konnten diese von Eurostat bezogen werden¹⁴⁷. Für Japan und Korea waren Daten durch die IEA veröffentlicht¹⁴⁸. Für die

¹⁴⁷ Europäische Kommission, Eurostat, Cooling and heating degree days by country - monthly data, Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, 2023, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/nrg_chdd_m

¹⁴⁸ Für Japan: IEA (2023a): Cooling degree days in Japan, 2000-2020 – Charts – Data & Statistics - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/cooling-degree-days-in-japan-2000-2020>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023. und für Südkorea: IEA (2023b): Heating degree days in Japan, 2000-2020 – Charts – Data & Statistics - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/heating-degree-days-in-japan-2000-2020>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

USA bestand eine nationale Quelle¹⁴⁹. Malaysia und Brasilien konnten nur qualitativ anhand von Daten aus dem World Bank Climate Knowledge Portal beschrieben werden¹⁵⁰. Daten für Hong Kong und China mussten aus mehreren wissenschaftlichen Publikationen bezogen werden¹⁵¹. Zudem wurden für Japan zusätzlich weitere Publikationen hinzugezogen, die das spezielle Verhalten der Bewohner in Bezug auf die dort üblichen kalt gehaltenen Wohnungen und Häuser und häufigen heißen Bäder beschrieben¹⁵².

Daten zum Zustand der Wärme-/Kältenetze und der Nutzung von Fernwärme oder -kälte wurden hauptsächlich aus statistischen Quellen bezogen¹⁵³. Neben diesen wurden weitere wissenschaftliche und politische Veröffentlichungen genutzt. Diese umfassten Berichte der IEA zur Situation in China¹⁵⁴ und für die USA auch eine Veröffentlichung des Energieministeriums¹⁵⁵.

Für die Treiber eines zukünftigen Wärme-/Kältenetzausbaus wurden hauptsächlich Planungsdokumente zu Energie- und Klima¹⁵⁶; oder Studien für den Wärme-/Kältenetzausbau¹⁵⁷ in die Analyse einbezogen. In vielen Ländern bestanden keine solchen Informationen und auch keine Sekundärliteratur zum Thema. Dies betraf Hong Kong, Malaysia und Südkorea. In Brasilien sind Wärmenetze an KWK-Kraftwerken lediglich in einer wissenschaftlichen Publikation behandelt worden¹⁵⁸. Und in den USA bestand lediglich eine Studie zur Geothermie, die als weitere

¹⁴⁹ NCEI.Monitoring.Info@noaa.gov (2023b): Statewide Mapping | Climate at a Glance | National Centers for Environmental Information (NCEI). Online verfügbar unter <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/statewide/mapping>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

¹⁵⁰ Für Brasilien: World Bank Climate Change Knowledge Portal - Brazil (2023). Online verfügbar unter <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/brazil>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2023, zuletzt geprüft am 18.04.2023. und für Malaysia: World Bank Climate Change Knowledge Portal - Malaysia (2023). Online verfügbar unter <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/malaysia>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

¹⁵¹ Shi, Ying; Zhang, Dong-Feng; Xu, Ying; Zhou, Bo-Tao (2018): Changes of heating and cooling degree days over China in response to global warming of 1.5 °C, 2 °C, 3 °C and 4 °C. In: *Advances in Climate Change Research* 9 (3), S. 192–200. DOI: 10.1016/j.accre.2018.06.003 und Wang, Si; Huang, Qiaojie; Liu, Qiang; Sun, Demei (2022): Can Clean Heating in Winter in Northern China Reduce Air Pollution?—Empirical Analysis Based on the PSM-DID Method. In: *Energies* 15 (5), S. 1839. DOI: 10.3390/en15051839.

¹⁵² Tochihara, Yutaka (2022): A review of Japanese-style bathing: its demerits and merits. In: *Journal of Physiological Anthropology* 41 (1), S. 5. DOI: 10.1186/s40101-022-00278-

¹⁵³ Z.B. für Deutschland: AG Energiebilanzen e.V. (2022): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2021. und AGFW (2021): Hauptbericht.

¹⁵⁴ IEA (2017): District energy systems in China. Options for optimisation and diversification.

¹⁵⁵ Department of Energy USA: District Energy Systems Overview.

¹⁵⁶ Z.B. für Italien: Ministero dello Sviluppo Economico (2019): Piano nazionale integrato per l'energia e il clima

¹⁵⁷ Z.B. für Deutschland: FfE; Hamburg Institut (2021): Grüne Fernwärme für Deutschland - Potenziale, Kosten, Umsetzung.

¹⁵⁸ Maria Aparecida Bottiglieri Savoia (2012): ESTUDO DE CENTRAIS DE COGERAÇÃO EM CICLO COMBINADO COM AQUECIMENTO URBANO ATRAVÉS DE REDES (TE-LEAQUECIMENTO) NA EUROPA, ESTADOS UNIDOS E BRASIL – IMPLICAÇÕES SÓCIO-AMBIENTAIS E ECONÔMICAS – ANÁLISE DO CASO BRASILEIRO

Quelle für Wärme-/Kältenetze identifiziert wurde¹⁵⁹. Für die Niederlande musste auf regionale Energiestrategien zurückgegriffen werden¹⁶⁰. Für die Niederlande handelte es sich dabei um eine Serie von Plänen für die einzelnen Regionen¹⁶¹.

Zur Bestimmung der Potenziale wurden ebenfalls zumeist Planungsdokumente genutzt. Für Malaysia konnte Sekundärliteratur gefunden werden¹⁶² und für die USA wurden statistische Daten genutzt¹⁶³. Die Datenlage in den anderen Ländern stellte sich ähnlich dar wie für die zukünftigen Wärme-/Kältenetze. Insgesamt ist aus den Recherchen zu entnehmen, dass Wärmenetze für Regionen mit hohen Wärmesummen verbreiteter sind, als Kältenetze für Regionen mit hohen Kältesummen.

3.8.2.3 Schwierigkeiten der Datenerhebung

Die Hauptschwierigkeit ergab sich bei der Recherche zu Wärme-/Kältenetzen durch die unterschiedliche Quellenlage. Wärme-/Kältenetze sind im Gegensatz zu Stromnetzen nicht so zentral und werden zumeist zusammen mit weiteren Wärmequellen genannt. Informationen finden sich deshalb in Energie bzw. speziell Wärmebereitstellungsstatistiken¹⁶⁴ oder für Planungen häufig in Energie- und Klimaplänen¹⁶⁵, die neben Wärme z.B. auch die Stromseite betrachten. Die Suche nach entsprechenden Dokumenten gestaltete sich deshalb insgesamt aufwendiger als für Stromnetze. Hinzukommt, dass z.B. für die Niederlande Informationen zu Planungen bzw. Strategien für Wärmenetze nur in Form von regionalen Energiestrategien für 30 Regionen vorlagen¹⁶⁶. Diese unterschieden sich im Detail und der Form. Häufig waren beim Lesen der Dokumente zunächst Sprachbarrieren zu überwinden¹⁶⁷. Zum Teil lagen Planungen zu Wärmenetzen bereits in der Vergangenheit und wurden nicht neu aufgelegt¹⁶⁸. Wie bereits aus den

¹⁵⁹ Robins et. al.: 2021 U.S. Geothermal Power Production and District Heating Market Report.

¹⁶⁰ Z.B. Regionale Energie Strategie 1.0 Midden-Holland.

¹⁶¹ <https://www.regionale-energiestrategie.nl/default.aspx>

¹⁶² District Cooling in Malaysia. 16th APEC Workshop on Energy Statistics (2018).

¹⁶³ eia (2018): U.S. District Energy Services Market Characterization.

¹⁶⁴ Z.B. für Deutschland: AG Energiebilanzen e.V. (2022): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2021. und AGFW (2021): Hauptbericht.

¹⁶⁵ Z.B. für Frankreich: Stratégie française pour l'énergie et le climat - Programmation pluriannuelle de l'énergie - 2019-2023 - 2024-2028.

¹⁶⁶ Z.B. Regionale Energie Strategie 1.0 Midden-Holland.

¹⁶⁷ Z.B. für Italien für den Energie- und Klimaplan: Ministero dello Sviluppo Economico (2019): Piano nazionale integrato per l'energia e il clima

¹⁶⁸ Z.B. IEA (2023): Clean Winter Heating Plan in Northern China (2017 - 2021) – Policies - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/policies/7906-clean-winter-heating-plan-in-northern-china-2017-2021>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2023, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

Erläuterungen im vorherigen Abschnitt deutlich wurde, gab es größere Datenlücken vor allem im Bereich der Planungen mit Verknüpfung zu spezifischen Wärmeerzeugern.

3.8.2.4 Zusammenfassende Einschätzung und Ausblick

Das Thema Wärme-/Kältenetze ist schwerer zu fassen als Stromnetze, da Wärme-/Kältenetze sehr lokal verlaufen und nicht für häufig verwendete Einzelheizungsanlagen benötigt werden. Somit finden sich Informationen häufig als Unterpunkt in Energiestatistiken für den Wärmebereich oder in Energie- und Klimaplänen. Kältenetze sind nicht so verbreitet wie Wärmenetze. Insgesamt sind die Quellen im Bereich Wärme-/Kältenetze sehr divers und sie sind häufig in Landesprachen verfasst, welches die Recherche aufwendig macht. Nicht zu vergessen sind die regionalen Energiestrategien für die Niederlande, die die Recherche für dieses Land besonders aufwendig gestalteten.

3.8.2.5 Zentrale Literatur zum Kriterium 9 Wärmenetze

Thermische Bedingungen

Europäische Kommission, Eurostat (2023): Cooling and heating degree days by country - monthly data, Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/nrg_chdd_m

World Bank Climate Change Knowledge Portal - Brazil (2023). Online verfügbar unter <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/brazil>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2023, zuletzt geprüft am 18.04.2023.

World Bank Climate Change Knowledge Portal - Malaysia (2023). Online verfügbar unter <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/malaysia>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

World Bank Climate Change Knowledge Portal - Germany (2023). Online verfügbar unter <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/germany>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

Shi, Ying; Zhang, Dong-Feng; Xu, Ying; Zhou, Bo-Tao (2018): Changes of heating and cooling degree days over China in response to global warming of 1.5 °C, 2 °C, 3 °C and 4 °C. In: *Advances in Climate Change Research* 9 (3), S. 192–200. DOI: 10.1016/j.accre.2018.06.003

Wang, Si; Huang, Qiaojie; Liu, Qiang; Sun, Demei (2022): Can Clean Heating in Winter in Northern China Reduce Air Pollution?—Empirical Analysis Based on the PSM-DID Method. In: *Energies* 15 (5), S. 1839. DOI: 10.3390/en15051839.

IEA (2023a): Cooling degree days in Japan, 2000-2020 – Charts – Data & Statistics - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/cooling-degree-days-in-japan-2000-2020>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

IEA (2023b): Heating degree days in Japan, 2000-2020 – Charts – Data & Statistics - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/heating-degree-days-in-japan-2000-2020>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

IEA (2021): Japan 2021 - Energy Policy Review.

Tochihara, Yutaka (2022): A review of Japanese-style bathing: its demerits and merits. In: Journal of Physiological Anthropology 41 (1), S. 5. DOI: 10.1186/s40101-022-00278-0.

NCEI.Monitoring.Info@noaa.gov (2023b): Statewide Mapping | Climate at a Glance | National Centers for Environmental Information (NCEI). Online verfügbar unter <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/statewide/mapping>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

Zustand der Wärmenetze, zukünftige Planungen bezogen auf Treiber und Elemente und Potenziale

Belgien

Belgisch geïntegreerd Nationaal Energie- en Klimaatplan 2021-2030.

Euroheat & Power (2023): DHC Market Outlook Insights & Trends.

ICEDD; bruxelles environment leefmilieu brussel (2021): Potential for heating and cooling efficiency in the Brussels-Capital Region.

Ministerium der Deutschsprachigen Gemeinschaft (Hrsg.) (2018): Integrierter Energie- und Klimaplan für die Deutschsprachige Gemeinschaft Belgiens. Eupen

Vlaamse Regering (2023), Ontwerp Vlaams Energie- en Klimaatplan 2021-2030. Online verfügbar unter <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/56259>, zuletzt geprüft am 21.01.2025

Simus; Orsini (2022): Bilan énergétique de la Wallonie 2020.

Technopolis Group; VITO (2022): Economische potentieelstudie vergroening van de warmtevraag van de niet-ETS industrie in Vlaanderen - Eindrapportage – April 2022.

Vlaams Energie- & Klimaagentschap, www.energiesparen.be (2020): Warmte in Vlaanderen, rapport 2020. Online verfügbar unter <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/40481>.

Vlaams energie- & Klimaagentschap (2021): Heating in Flanders.

Vlaamse Regering (2021): Bis-Visienota aan de vlaamse regering.

VREG (2022): Warmtenetrapport.

Wallonie energie SPW (2021): Directive 2021/27/EU (Energy Efficiency Directive) - Article 14 Potential For Efficiency in heating and cooling.

Warmtekaart | Vlaanderen.be (2023). Online verfügbar unter <https://www.vlaanderen.be/bouwen-wonen-en-energie/groene-energie/warmtekaart>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Warmtenet | Vlaanderen.be (2023). Online verfügbar unter <https://www.vlaanderen.be/bouwen-wonen-en-energie/groene-energie/warmtenet>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Brasilien

Maria Aparecida Bottiglieri Savoia (2012): ESTUDO DE CENTRAIS DE COGERAÇÃO EM CICLO COMBINADO COM AQUECIMENTO URBANO ATRAVÉS DE REDES (TELEAQUECIMENTO) NA EUROPA, ESTADOS UNIDOS E BRASIL – IMPLICAÇÕES SÓCIO-AMBIENTAIS E ECONÔMICAS – ANÁLISE DO CASO BRASILEIRO.

China

National Development and Reform Commission (NDRC) and the National Energy Administration (NEA) (2022): 14th Five-Year Plan on Modern Energy System Planning. Online verfügbar unter https://climate-laws.org/documents/14th-five-year-plan-on-modern-energy-system-planning_20bd.

Alekseev, Aleksandr; Novitsky, Nikolay; Tokarev, Vyacheslav; Wang, Richard (2023): The current state of district heating processes in China and directions for the development of the methodological and instrumental base to support them. In: E3S Web Conf. 397, S. 4002. DOI: 10.1051/e3sconf/202339704002.

Asian Development Bank (2017): In the People's Republic of China. Status and development potential.

Zhang, Lipeng; Gudmundsson, Oddgeir; Li, Hongwei; Svendsen, Svend (2015): Comparison of District Heating Systems Used in China and Denmark. In: International Journal of Sustainable and Green Energy 4 (3), S. 102. DOI: 10.11648/j.ijrse.20150403.15

IEA (2017): District energy systems in China. Options for optimisation and diversification.

IEA (2019): The Future of Cooling in China. Delivering on action plans for sustainable air conditioning.

IEA (2023): Clean Winter Heating Plan in Northern China (2017 - 2021) – Policies - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/policies/7906-clean-winter-heating-plan-in-northern-china-2017-2021>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2023, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

Xia, Jianjun (2021): Overview of district heating and cooling – representative from China. Tsinghua University, online verfügbar unter https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Presentations/Regional-focus/2021/Mar/District-Energy-Systems-ZH_Session-I_Xia-Jianjun-Overview-of-district-heating-and-cooling-in-China.pdf, zuletzt geprüft 21.01.2025

Xiong, Weiming (2014): Heat Roadmap China. New heat strategy to reduce energy consumption towards 2030. In: Energy, DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.039

Zhang, Lipeng; Gudmundsson, Oddgeir; Thorsen, Jan Eric; Li, Hongwei; Li, Xiaopeng; Svendsen, Svend (2016): Method for reducing excess heat supply experienced in typical Chinese district heating systems by achieving hydraulic balance and improving indoor air temperature control at the building level. In: Energy 107, S. 431–442. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.138.

Deutschland

AG Energiebilanzen e.V. (2022): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2021.

AGFW (2021): Hauptbericht.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan. Online verfügbar unter https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-06/de_final_necp_main_de_0.pdf, zuletzt geprüft 21.01.2025

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, BMWK - (2023): Im Fokus: Grüne Wärme. BMWI. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2022/02/04-im-fokus-gruene-waerme.html>, zuletzt aktualisiert am 21.08.2023, zuletzt geprüft am 21.08.2023.

Engelmann, P.; B. Köhler; R. Meyer; Jörg Dengler; Sebastian Herkel (2021): Systemische Herausforderung der Wärmewende - Abschlussbericht. Climate Change 18/2021, Herausgeber Umweltbundesamt.

Euroheat & Power (2023): DHC Market Outlook Insights & Trends.

FfE; Hamburg Institut (2021): Grüne Fernwärme für Deutschland - Potenziale, Kosten, Umsetzung.

Frankreich

Cerema (2022): District Heating and Cooling in France. Online verfügbar unter <https://reseaux-chaaleur.cerema.fr/espace-documentaire/district-heating-and-cooling-france>, zuletzt aktualisiert am 11.08.2022, zuletzt geprüft am 22.08.2023.

Euroheat & Power (2023): DHC Market Outlook Insights & Trends.

Évolution du bouquet énergétique (2023). Online verfügbar unter <https://www.observatoire-des-reseaux.fr/evolution-du-bouquet-energetique/>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Les réseaux de froid (2023). Online verfügbar unter <https://www.observatoire-des-reseaux.fr/les-reseaux-de-froid/>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Französische Regierung (2020). Plan national integre energie-climat de la france, online verfügbar unter : https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-04/fr_final_necp_main_fr_0.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2025

SNCU: Les Réseaux de chaleur en france. Stand 2012

SNCU; Fedene (2020): Les Réseaux de chaleur et de froid - Édition 2020, Daten von 2019, online verfügbar unter https://cibe.fr/wp-content/uploads/2021/01/SNCU_synth%C3%A8se-enquete-2020-final.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2025

Ministère de la transition écologique et solidaire (2020): Stratégie française pour l'énergie et le climat - Programmation pluriannuelle de l'énergie - 2019-2023 - 2024-2028. Online verfügbar unter <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2020/04/20200422-Programmation-pluriannuelle-de-l%C3%A9nergie.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2025

Hong Kong

Arup (2023): Constructing the Kai Tak District Cooling System. Online verfügbar unter <https://www.arup.com/projects/kai-tak-district-cooling-system>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2023, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

EMSD (2020): District Cooling System at Kai Tak Development - Introduction Online verfügbar unter https://www.emsd.gov.hk/en/energy_efficiency/district_cooling_system/introduction/index.html, zuletzt aktualisiert am 17.04.2023, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

Veolia China (2023): Hong Kong Kai Tak District Cooling. Online verfügbar unter <https://www.veolia.cn/en/hong-kong-kai-tak-district-cooling>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2023, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

Italien

Gestore Servizi Energetici (2020): Teleriscaldamento e teleraffrescamento.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2023): Piano nazionale integrato per l'energia e il clima.

Ministero dello Sviluppo Economico (2019): Piano nazionale integrato per l'energia e il clima

Japan

Japan Heat Supply Business Association (2023). District Heating and Cooling in Japan - Consumption of Fuel, online verfügbar unter <https://www.jdhc.or.jp/english/number-of-service-districts/fuel/>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2023, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

Japan Heat Supply Business Association (2023). District Heating and Cooling in Japan - Consumption of Thermal Energy, online verfügbar unter <https://www.jdhc.or.jp/english/number-of-service-districts/thermal-energy/>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2023, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

IEA (2023b): Heating degree days in Japan, 2000-2020 – Charts – Data & Statistics - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/heating-degree-days-in-japan-2000-2020>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2023, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

IIDA Tesunari (2022): The 4th Generation District Heating and Japan's Thermal Policy, 12.01.2022.

Gillaux, Sylvain (2012): Inside view into the Japanese heat pump market. In: REHVA Journal, Oktober 2012. Online verfügbar unter <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/inside-view-into-the-japanese-heat-pump-market>, zuletzt geprüft 21.01.2025

ISEP (2022): The 4th Generation District Heating and Japan's Thermal Policy. In: Institute for Sustainable Energy Policies, 30.11.2022. Online verfügbar unter <https://www.isep.or.jp/en/1377/>, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

Malaysia

Suruhanjaya Tenaga (2018): District Cooling in Malaysia. 16th APEC Workshop on Energy Statistics. online verfügbar unter <https://www.egeda.ewg.apec.org/egeda/meeting/16WSpresentations/1-4.%20Malaysia.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2012

Niederlande

Provincie Groningen (2020): Klimaagenda Provincie Groningen 2030. De Groningse bijdrage aan het nationale Klimaatakkoord. online verfügbar unter https://www.provinciegroningen.nl/fileadmin/user_upload/Documenten/Beleid_en_documenten/Documentenzoeker/Klimaat_en_energie/Klimaat/Klimaagenda_provincie_Groningen_2030_1.pdf, zuletzt geprüft 21.01.2025

Es wurden die dem Nationalen Programm Regionalen Energie Strategien der Niederlande zugehörigen Strategiedokumente der 30 Regionen in der Version 1.0 als Quellen verwendet. Links zu den Strategien bzw. Webseiten auf denen diese für die einzelnen Regionen zu finden

sind, finden sich online unter <https://www.regionale-energiestrategie.nl/resregios/default.aspx>, zuletzt geprüft am 21.01.2025. Diese wurden bis Juli 2021 veröffentlicht.

TNO (2020): Warmtemonitor 2019.

Twence - Warmtenet Twente (2023). Online verfügbar unter <https://www.twence.nl/projecten/warmtenet-twente>, zuletzt aktualisiert am 26.06.2023, zuletzt geprüft am 26.06.2023.

Warmte | Regionale Energie Strategie monitor Drenthe (2023). Online verfügbar unter <https://res.drentheincijfers.nl/warmte/warmte.php>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Wetterwaarmte | Fryslan (2023). Online verfügbar unter <https://www.fryslan.frl/wetterwaarmte>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

USA

Department of Energy USA: District Energy Systems Overview.

eia (2018): U.S. District Energy Services Market Characterization.

Robins, Jody C.; Kolker, Amanda; Flores, Francisco; Pettitt, Will; Beckers, Koenraad; Pauling, Hannah; Anderson (2021): U.S. Geothermal Power Production and District Heating Market Report. Herausgeber NREL Transforming Energy, online verfügbar unter <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78291.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2025

4 Ergebnis und Ausblick

4.1 Ergebnisse nach Kriterien

Es folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse zur Datenrecherche nach Kriterien.

Beim *Kriterium 1* (politische Ziele) stellt die Sicherung von Vollständigkeit und Aktualität die wesentliche Herausforderung dar. Es wurden keine entsprechenden öffentlich zugänglichen Sammlungen gefunden – auch nicht für einzelne Länder oder einzelne Technologiegruppen. Für bedeutende Länder kommen einzelne Veröffentlichung nahe heran, wobei aber die Zeitverzögerungen zwischen jeweiligen inhaltlichen Redaktionsschlüssen für Daten, Veröffentlichung und Nutzung zu beachten sind. Oft waren ergänzende, zielgerichtete Recherchen notwendig. Schließlich besteht in der Verbindlichkeit eines Ziels eine Art Kontinuum zwischen unverbindlichen politischen Äußerungen bis hin zu gesetzlich festgelegten, d.h. verbindlichen, Zielen. Für eine konsistente Datenerhebung wurde versucht, Quellenangaben durch erläuternde Ergänzungen einzuordnen. Gegenwärtig ist vom Vorgehen her kein besserer/einfacherer Weg für weitere Datenerhebungen absehbar. Ggfs. kann der Arbeitsaufwand künftig durch den Einsatz KI-basierter Verfahren reduziert werden.

Die zu *Kriterium 2* (RD&D-Ausgaben) gesammelten Daten sind insgesamt nur für IEA-Mitgliedsstaaten und ausgewählte Technologie relativ unproblematisch auszuwerten. Aber selbst aus der an sich gut geeigneten Datenbank der IEA sind die tatsächlich gefundenen Werte limitiert, da die Mitgliedsstaaten häufig keine Daten in der erforderlichen hohen Auflösung nach Technologien liefern. Daneben sind Besonderheiten der IEA-Systematik sowie die Tatsache, dass sich Länder bei ihren Meldungen nicht unbedingt an diese Systematik halten, zu beachten. Für die anderen Länder sind Umfang und Qualität der gefundenen Daten erheblich geringer. Exemplarisch sei China genannt, wo in der Literatur des Öfteren explizit verwiesen wird, dass Daten zu öffentlichen RD&D-Ausgaben nicht öffentlich verfügbar seien. So ist es bei diesem Kriterium unwahrscheinlich, dass die geringe Ausbeute maßgeblich durch Schrift- oder Sprachprobleme verursacht wurde. Auch hier ist eine zukünftige grundsätzliche Vereinfachung eines Suchverfahrens nicht abzuleiten. Allenfalls ist für die Suche von weiteren Daten zu erwägen, sich nicht auf referierte Fachartikel zu konzentrieren, da diese Suche sich als wenig effektiv erwies. Ob allerdings anderweitig Daten zu finden sind, muss offenbleiben. Auch hier könnte evtl. der Suchaufwand künftig durch den Einsatz KI-basierter Verfahren reduziert werden.

Bei *Kriterium 3* (öffentliche Förderung) bestand – ähnlich wie bei Kriterium 1 – das grundsätzliche Problem darin, dass keine Datenbank gefunden wurde, die einen relativ aktuellen und

vollständigen Überblick über Fördermaßnahmen liefert. Und auch hier bietet eine IEA-Datenbank, ergänzt durch zwei weitere Datenbanken (die sich aber z.T. auf erstere beziehen) den Ausgangspunkt. So ist davon auszugehen, dass OECD-Länder besser erfasst sind als Nicht-OECD-Länder und größere Länder besser als kleinere. D. h. bei diesem Kriterium muss damit gerechnet werden, dass vor allem die Daten für die ostasiatischen Länder – China, Japan, Südkorea – aufgrund v.a. der nicht vertrauten Schrift tendenziell schlechter erfasst sind, was mit Recherchen zu Presseberichten auszugleichen versucht wurde. Zumal dort deshalb auch die ergänzende Suche auf offiziellen Webseiten problematisch war. Generell kam für eine Reihe an Technologiegruppen und Ländern bestehende starke Aufspaltung von Förderkompetenzen auf verschiedene Organisation erschwerend hinzu. Ein quantitativer Vergleich der gefundenen Förderungen zwischen Ländern ist nur eingeschränkt möglich. Dies gilt schon für Angaben zu (geplanten) Budgets, bei denen in Einzelfällen aber immerhin eine gewisse Größenordnung teils verglichen werden kann. Für spezifische Fördersätze wären aufgrund der höchst unterschiedlichen Bemessungsgrundlagen und gesetzlich vorgegebenen Rahmenbedingungen einzelne komplette Investitionsrechnungen für einen unmittelbaren Vergleich erforderlich gewesen, was in diesem Projekt nicht zu leisten war. Für einzelne Länder kann die Förderung jedoch v.a. im Zusammenspiel mit Kriterium 5 (Kosteneffizienz) aber auch Kriterium 1 (Politische Ziele) – da dort Ausschreibungsmengen betrachtet werden – gut ausgewertet werden. Insgesamt ist gegenwärtig auch weiterhin davon auszugehen, dass keine öffentlich zugängliche, vollständige und aktuelle internationale Datenbank zu Fördermaßnahmen von einzelnen Energiewendetechnologien nach Ländern existiert, vor allem wenn auch nicht-OECD-Länder berücksichtigt werden sollen und umso mehr, wenn diese Länder energiewirtschaftlich relativ klein sind. Bei einzelnen Zusammenfassungen bestimmter Förderungen und Technologien, Länderübersichten zur Energiepolitik etc. reichen die Informationen typischerweise nicht aus. Schließlich hat sich gezeigt, dass andere, im Zuge der Projektplanung identifizierte, Datenwebseiten nicht mehr aktualisiert wurden oder zu wenig detailliert waren. So ist auch hier eine zukünftige grundsätzliche Vereinfachung eines Suchverfahrens für Maßnahmen zur Förderung der Markteinführung für viele Energietechnologien und Länder aus den gesammelten Erfahrungen nicht abzuleiten. Auch hier ist zu erwägen, inwieweit sich der Such- und Auswertungsaufwand durch den Einsatz durch den Einsatz KI-basierter Verfahren reduzieren lässt.

Kriterium 4 (Marktpotential) wird in diesem Bericht nicht näher dargestellt. Nach einer gewissen Vorstudie (s. Banning et al., 2023) erfolgte dessen Bearbeitung konkret im Rahmen der Implementierung der qualitativen Ergebnisse in die quantitativen Modelle. Eine knappe Beschreibung des Vorgehens findet sich in Abschnitt 2.1. Für nähere Ausführung zum Vorgehen, Methodik und verwendete Quellen sei auf Hembach-Stunden et al. 2024 verwiesen.

Bei *Kriterium 5* (Kosteneffizienz) hat es sich generell als schwierig erwiesen Daten zu finden, die gleichzeitig technologie- und länderspezifisch sind. Weiterhin ist gerade bei diesem Kriterium eine Vergleichbarkeit zwischen Ländern bei gleichzeitiger Abbildung länderspezifische Unterschiede notwendig. So ist primär eine einheitliche Methodik (z.B. für Gestehungskosten) erforderlich, in der länderspezifische Unterschiede transparent abgebildet werden. Damit wurde der grundsätzliche Ansatz, sich für eine Betrachtung mehrere Technologien und Länder auf länderübergreifende Studien zu fokussieren als der einzig praktikable betrachtet und es wurde auf entsprechende Meta-Studien (IEA, IRENA, CETO-Berichte) zurückgegriffen. Mit dieser Methode war es aber i. Allg. nicht möglich, längere Zeitreihen für die vergangene Entwicklung zu eruieren. Im Kontext der Indikatoren-basierten MLP-Analyse wurde erkannt, dass derartige Zeitreihen eine Verbindung zu quantitativen Modellanalysen liefern könnten, zumal in dem im Projekt verwendeten Modell (s. Banning et al., 2023) statistische Schätzungen die Grundlage für implementierte Gleichungen sind. Auch wenn ein anderes Vorgehen als das Gewählte in diesem Projekt als unpraktikabel einzuschätzen ist, weist dies doch darauf hin, dass man insbesondere im Zusammenhang einer breiten Datenerhebung, die auch einer quantitativen Modellierung dienen soll, erwägen sollte, ob mit vertretbarem Aufwand und ohne Abstriche bei anderweitigen Datenverwendungen eine Suchstrategie sinnvoll sein könnte, die an den Datenbedarf des Modells angepasst ist. Das ist natürlich selbstverständlich, falls es allein um die Parametrisierung oder Kalibrierung eines Modells geht. Eine solche, vorab festgelegte Verengung der Suche ist allerdings regelmäßig nicht sinnvoll, wenn eine eigenständige qualitative Analyse mit einer quantitativen Modellierung verbunden werden soll. Auch bei diesem Kriterium ist eine zukünftige Reduktion des Arbeitsaufwands bei der Datenrecherche im Vergleich zum gewählten Verfahren eher unwahrscheinlich, zumal teils auch schon Synergien mit der Recherche zu anderen Kriterien genutzt wurden. Schließlich kann auch hier die Suche durch den Einsatz KI-basierter Verfahren künftig evtl. erheblich beschleunigt werden.

Auch bei *Kriterium 6* (Wertschöpfung) lag, um international vergleichbare Daten zu erhalten, der Fokus der Recherche zunächst auf Meta-Studien der „großen“ internationalen Wissenschafts-Institutionen (IEA, IRENA, Joint Research Centre). Später wurden – je nach weiterführenden Verweisen und Datenlücken – „große“ nationale Institutionen und z.T. auch Interessenverbände auf globaler europäischer und nationaler Ebene geprüft. Diese wurden z.T. auch per email angefragt, was nur in Ausnahmefällen zum Erfolg führte. Bei diesem Kriterium musste zwischen „echten“ Wertschöpfungsdaten (GVA) und „Ersatzdaten“ (Umsatz, Beschäftigung, Produktionskapazität) unterschieden werden. „Echte“ Wertschöpfungsdaten – technologie- und länderspezifisch – konnten lediglich für die erneuerbaren Energien in den EU-Mitgliedsländern gefunden werden, die im Wesentlichen auf einer Quelle (EurObser’ER; ab Datenstand 2019, für Umsatz und Beschäftigung schon früher) beruhen. Ergänzt wird dies – teilweise und

mit einzelnen Datenpunkten – durch die CETO-Berichtsreihe, die zwar weitere Technologien betrachtet aber bei weniger etablierten Technologien auch z.T. entweder Ersatz- (CCUS) oder gar keine Daten (Wasserstoff) liefert. Jenseits der EU konnten schon für einige der „klassischen“ erneuerbaren Energien keine Wertschöpfungsdaten gefunden werden. Für die weiteren Technologien konnten – abgesehen von kursorischen Einzelwerten – weder für EU- noch für Nicht-EU-Länder tatsächliche Daten zu Wertschöpfung oder Ersatzdaten gefunden werden.

Hinsichtlich des *Kriteriums 7* (Akzeptanz) zeigten die durchgeführten Literaturanalysen, dass zum spezifischen Akzeptanzobjekt Elektrolyseure bislang noch wenig Literatur vorliegt, verglichen mit den inzwischen gut dokumentierten Akzeptanzlagen bzgl. Windenergie. Wasserstoff wurde aus Akzeptanzforschungsperspektive im Wesentlichen im Verkehrsbereich betrachtet, wobei vor allem das Nutzungsverhalten im Vordergrund stand (Wasserstoffauto, Brennstoffzelle). Erzeugungsinfrastrukturen sind noch kaum vertreten, in Deutschland existieren in diesem Kontext auch erst wenige Projekte, dementsprechend sind die Akzeptanzbefragungen eher auf der Ebene von Erwägungen und Beliefs als tatsächlicher Erfahrungen einzuordnen. Auch wenn die begutachteten Studien das Konzept des Akzeptanzdreiecks (Wüstenhagen et al, 2007) mit lokaler, sozio-politischer und Marktakzeptanz nicht stringent genutzt haben und ein Vergleich auf diese Ebene aus diesem Grund nur schwer möglich ist, zeigt es sich dennoch als ein sinnvoller Strukturierungsansatz, um die Verteilung und den jeweiligen Fokus der erfolgten Akzeptanzuntersuchungen zuordnen zu können.

Kriterium 8 (Pfadabhängigkeiten) wurde nicht in einer eigens aufgesetzten vertieften Datenrecherche behandelt, da es nach Vorrecherchen als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt wurde, einschlägige Daten aufgelöst nach Ländern und Technologien zu finden. Im Rahmen der quantitativen Modellanalysen wurden jedoch entsprechende Sachverhalte (z.B. zu Altersstrukturen, Bauzeiten) teils explizit, teils implizit beachtet (s. Abschnitt 2.1.)

Beim *Kriterium 9* (Infrastrukturen) ergab die Recherche zu *Stromnetzen*, dass es keine übergreifende Statistik zum Netzzustand gibt. Auch sind die länderspezifischen Dokumente zur Netzausbauplanung sowohl hinsichtlich des inhaltlichen Detailgrades, dem Zeitpunkt beziehungsweise dem Rhythmus, in dem sie veröffentlicht werden, und dem Zeitraum den die Planungen umfassen sehr unterschiedlich. Alle diese Aspekte erschweren einen Ländervergleich bzw. verunmöglichen diesen. Hinzu kommt die Sprachbarriere, die für einzelne Länder zunächst überwunden werden musste. Daten zu *Wärme-/Kältenetzen* sind noch schwerer zu fassen als zu Stromnetzen, da Erstere sehr lokal verlaufen und nicht für häufig verwendete Einzelheizungsanlagen benötigt werden. Somit finden sich Informationen häufig als Unterpunkt in Energiestatistiken für den Wärmebereich oder in Energie- und Klimaplänen. Kältenetze sind nicht so verbreitet wie Wärmenetze. Insgesamt sind die Quellen im Bereich Wärme-/Kältenetze

sehr divers und sie sind häufig in Landesprachen verfasst, welches die Recherche aufwendig macht.

4.2 Ausblick: Datenrecherche und datenbasierter MLP-Ansatz

Das vorliegende Papier beleuchtet die Datenrecherche zur quantitativen Operationalisierung des an sich verbal orientierten MLP-Ansatzes. Sie stellt somit das Bindeglied zwischen MLP und quantitativer Modellierung dar. Neben den inhaltlichen Ergebnissen soll das vorliegende Papier als strategisch-prozessuale Unterstützung für ähnliche Vorhaben dienen.

Die Recherche nach Indikatoren, die länder- *und* technologiespezifisch sind, hat sich als herausfordernder herausgestellt, als ursprünglich gedacht und die Ergebnisse müssen teils als ernüchternd bezeichnet werden. So können zunächst die Aussagen der einschlägigen MLP-Literatur, die um eine Quantifizierung des MLP-Ansatzes bemüht ist, bestätigt werden, die „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. Insgesamt verweist die Literatur auf die großen methodischen Unterschiede zwischen Modellierung und Fallstudien und bisherige Ansätze zeigen, dass bereits bei entsprechenden Vorhaben für einzelne Länder/Sektoren ein hoher Aufwand entsteht. (vgl. Banning et al 2023, S. 6ff. m.w.V.). Mit dem vorliegenden Ansatz wurde dennoch versucht eine quantitative Operationalisierung für mehrere Länder und Technologien über einheitliche Indikatoren (-sets) zu erreichen, die zumindest als tlw. erfolgreich betrachtet werden kann, auch wenn letztlich nicht alle ursprünglich geplanten Länder und Technologien erfasst werden konnten. So konnten doch eine Reihe inhaltlicher Ergebnisse und prozessualer Einsichten gewonnen werden.

Inhaltlich zeigt sich, dass energiebezogene Daten – auch wegen der Vergleichbarkeit – noch am ehesten über multilaterale Organisationen wie der IEA/OECD und IRENA, d.h. deren Datenbanken und Meta-Studien, zu erlangen sind. Recherchen in wissenschaftlichen Einzelpublikationen waren weniger zielführend. Weiter sind die erstgenannten „kanonischen“ Quellen umso wichtiger für Recherche-Teams, die z.B. nicht mit asiatischen Sprachen und Schriftzeichen vertraut sind. Daraus ergibt sich umgekehrt, dass die entsprechenden Länder tendenziell weniger in Recherchen abgedeckt werden (können), wenn sie nicht Teil dieser Organisationen sind. Weiter hat sich (naturgemäß) das Dilemma aufgezeigt, dass gerade für relativ neue Technologien detailliertere Daten kaum zu finden sind. Diese sind aber aus Sicht der MLP-Analyse besonders interessant, da hier Produktionsausweitungen oder -verlagerungen eher wahrscheinlich sind.

Prozessual betrachtet hat die Recherche mehr Zeit in Anspruch genommen als ursprünglich veranschlagt und das Verfahren musste mehrfach geändert werden. So wurde mehrfach zwischen länder- und indikatoren-basierter Recherche gewechselt (letztlich war die Vorteilhaftigkeit von Indikator zu Indikator unterschiedlich). Auch aufgrund der unerwartet hohen Komplexität (Bewertung gefundener Daten etc.) musste der ursprüngliche Ansatz, die Recherche von studentischen Mitarbeitenden durchführen und durch wissenschaftliche Mitarbeitende „steuern“ zu lassen z.T. aufgegeben werden. Den oben genannten Sprachproblemen wurde z.T. durch den Einsatz muttersprachlichen Personals (soweit akquirierbar) begegnet. Daneben wurden Übersetzungsprogramme verwendet, was sich teils ebenfalls als zeitaufwändig erwies, da im Zuge der Recherche eine große Anzahl an Webseiten und Dokumenten übersetzt werden musste, in denen letztlich nichts inhaltlich Verwertbares gefunden wurde und sich auch Grenzen der Übersetzungsprogramme zeigten (z.B. lagen potentiell relevante Tabellen mitunter in Bildformaten vor, deren Textgehalt von Übersetzungsprogrammen nicht als Text erkannt wurde; oder: Übersetzungen von Stichpunkten (z.B. Bulletpoints aus Foliensätze) erwiesen sich als erheblich problematischer als Übersetzungen von Fließtexten). Im Zuge dessen und der Erfahrungswerte, welche Daten letztlich gefunden wurden, mussten die Eingabemasken (Excel) mehrfach angepasst werden (inhaltlich und sprachlich). All dies hat zu entsprechenden Verzögerungen geführt und stellte auch einen Lernprozess des Recherche-Teams dar. Allerdings wird – wie im vorigen Abschnitt bereits mehrfach erwähnt – kein grundsätzlich anderer Gang der Recherche für praktikabel gehalten. Vielmehr stellt sich die Frage, wie sich diese durch den Einsatz KI-basierter Verfahren beschleunigen¹⁶⁹, d.h. der Aufwand für das Recherche-Team reduzieren lässt.

Auch aufgrund des ungeplant hohen Zeitbedarfs für die Datenrecherche und dann immer noch zu verzeichnenden Datenlücken wurden der Übergang zur quantitativen Analyse und die quantitative Analyse mittels Modellsimulationen selbst nur für eine Teilmenge der in der Datenrecherche betrachteten Länder und Technologien durchgeführt. Als derartige „Fokustechnologien“ wurden PV, Wind, batterieelektrische PKW und H₂-Elektrolyseure gewählt. Damit sind quantitative besonders wichtige Technologien enthalten und sowohl Technologien, die relativ weit fortgeschritten in der Markteinführung sind (Wind, PV), als auch Technologien, die noch am Anfang der Markteinführung stehen (batterieelektrische Fahrzeuge und vor allem H₂-Elektrolyseure). Diese Auswahl ermöglicht es deshalb methodische und inhaltliche Unterschiede für verschieden weit diffundierter Technologien zu erfassen. Als „Fokusländer“ wurden

¹⁶⁹ Anfang 2023 wurden einige Versuche mit der damaligen Version von ChatGPT durchgeführt. Aufgrund der damaligen Ergebnisse gelangte das Rechercheteam zu der Einschätzung, dass diese KI die Recherche nicht vereinfache oder verbessere.

Deutschland und die größten Volkswirtschaften China, Japan und USA – die auch für die Fortkusttechnologien und potentiellen Leitmärkte - grundsätzlich sehr bedeutend sind – gewählt. Dänemark wurde für Windkraftanlagen hinzugenommen, da das Land ein sehr bedeutender Exporteur von Windkraftanlagen ist (s. Tabelle 4). Zum Ablauf der quantitativen Analyse, den Ergebnissen und deren Diskussion sei auf Hembach-Stunden et al. 2024 verwiesen.

4.3 Literatur zu „Ergebnis und Ausblick“

Köhler, J. (2020): Modelling the multi-level perspective: The MATISSE agent-based model. In: Moallemi, E.A., De Haan, F., Hrsg.: Modelling Transitions: Virtues, Vices, Visions of the Future, Routledge: London, UK; New York, NY, USA.

Köhler, J.; Geels, F.W.; Kern, F.; Markard, J.; Onsongo, E.; Wieczorek, A.; Alkemade, F.; Avelino, F.; Bergek, A.; Boons, F.; et al. (2019): An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*: 31, 1–32.

Die beiden weiteren zentralen Veröffentlichungen aus dem Gesamtprojekt heraus sind:

Banning, M., Becker, L., Hembach-Stunden, K., Horst, J., Klann, U., Lutz, C., Matschoss, P. (2023): Zentrale Technologien und Länder der globalen grünen Transformation. Methoden und Analysen vor dem Hintergrund des „Low Carbon Leakage“-Risikos. *GWS Research Report* 2023/07.

Hembach-Stunden, K. Banning, M., Becker, L., Lutz, C., Matschoss, P., Klann, U., Horst, J. (2024): Future Installation, Production and Global Trade of Clean Energy Technologies. *Sustainability* 2024, 16(23), 10482. <https://doi.org/10.3390/su162310482>