

Schlussbericht

gemäß Anlage 2 zu Nr. 8.2 NKBF 98

Förderkennzeichen: 03EI1024A

**Low Carbon Leakage: Wertschöpfungsketten und Markt- und
Diffusionsbarrieren in einem erweiterten Handelsmodellrahmen:
Akteursverhalten in Leitmärkten, Handelsstrukturen und struktureller Wandel
im Kontext unterschiedlicher Transformationsgeschwindigkeiten.**

Teilvorhaben A: Soziotechnische Analysen.

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2020 – 31.08.2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger

IZES gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
Altenkesseler Str. 17
66115 Saarbrücken
Tel.: +49 (0)681 844 972 0
Fax: +49 (0)681 961 799 9

Projektleitung (Büro Berlin)
Dr. Patrick Matschoss
Albrechtstr. 22
10117 Berlin
Tel.: +49 (0)30 568 3729 4
Email: matschoss@izes.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

1 Kurze Darstellung zu Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf, wissenschaftlich-technischem Stand sowie Zusammenarbeit

1.1 Aufgabenstellung

Technologien, die für die Transformation hin zu einer CO₂-neutralen Wirtschaft benötigt werden, sind bereits heute für den Klimaschutz von zentraler Bedeutung. Gleichzeitig gewinnen diese Energiewende-Technologien (EWT) auch in ökonomischer Hinsicht immer stärker an Gewicht. Deutschland hat in der Umwelt- bzw. Klimapolitik lange Zeit eine Vorreiterposition (engl.: first mover) eingenommen. Dies hat den Aufbau inländischer Märkte – sog. Leitmärkte – und inländischer Wertschöpfungsketten (WSK) für EWT unterstützt und die Position der entsprechenden Hersteller auf dem Weltmarkt gestärkt. Sie können eine entscheidende Rolle bei der Überwindung von Markt- und Diffusionsbarrieren spielen, mit denen EWT konfrontiert sind. Gleichzeitig wurde stets – unter dem Begriff *carbon leakage* – vor einer zu schnellen Energiewende und der damit einhergehenden möglichen Gefahr der Verlagerung von Produktionsstätten in Bezug auf CO₂-intensive Technologien gewarnt. Dies hat zu häufigen Ausnahmen für Unternehmen, bei z. B. Umlagen und Abgaben bei Energiekosten, Ausnahmen von der Versteigerung von CO₂-Zertifikaten sowie zu Grenzausgleichsregelungen im europäischen Emissionshandel geführt. Mit Blick auf das inzwischen international festgeschriebene 1,5°-Ziel und entsprechende Bemühungen anderer Länder, ihre Energiesysteme THG-neutral auszugestalten, ergeben sich ähnliche Fragestellungen im Hinblick auf CO₂-arme Technologien. D. h., in Umkehrung des obigen Arguments stellt sich die Frage, ob Deutschland Gefahr läuft, durch eine zu langsame Energiewende Leitmärkte bei EWT – *low carbon leakage* – zu verlieren (oder bereits verloren hat).

Gegenstand des Low-Carbon-Leakage (LCL)-Vorhabens war daher die Frage, unter welchen Bedingungen sich WSK im Inland, d.h. Leitmärkte für EWT, 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. Aufgabe des vorliegenden Vorhabens war daher die Abbildung von Akteursverhalten bei der Einführung neuer Technologien in Gegenwart von Markt- und Diffusionsbarrieren und unter Berücksichtigung von internationalem Wettbewerb und Handelsbeziehungen sowie die Analyse der gesellschaftlichen Voraussetzungen hierfür. Diese erfolgte sowohl anhand einer Modellierung internationaler WSK von EWT in einem globalen Handelsmodell (Teilvorhaben B des Projektpartners, s. Abschnitt 1.5) als auch mittels komplementärer soziotechnischer Analysen, die die gesellschaftliche Dimension dieses Wandels beschreiben (Teilvorhaben A, vorliegender Bericht).

Aufgabe des vorliegenden Teilprojekts A war daher, gesellschaftliche und politische Dynamiken abzubilden, die mit einer so fundamentalen Transformation einhergehen und in verschiedenen Ländern (= deutschen Handelspartnern) auch verschiedene

Formen annehmen (Fokus auf und Geschwindigkeit der Durchdringung neuer Technologien). Diese Dynamiken waren v.a. in numerischer Form abzubilden, damit sie als alternative Annahmen in die Modellierung des Projektpartners eingespeist werden konnten. So sollten anstatt der – in der Modellierung üblichen – „optimalen“ Übergangspfade eher „politisch realistischere“ Übergangspfade abgebildet werden.

Aus dem beschriebenen Vorhaben sind bisher drei Veröffentlichungen entstanden bzw. im Entstehen:

- 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>
- Klann, U., Matschoss, P., Mantke, H., Hildebrand, J. (2025): Bericht zur Datenerhebung für eine quantitativ orientierte MLP-Analyse. IZES-Schriftenreihe. Im Erscheinen

Für den vorliegenden Schlussbericht wurden, soweit möglich und sinnvoll, Texte aus diesen Veröffentlichungen sowie aus dem Vorhabenantrag verwendet und z.T. mit KI-Unterstützung übersetzt und umformuliert bzw. gekürzt. Auch die hier im Text zitierte Literatur findet sich entweder in diesen Veröffentlichungen oder im Antrag.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

1.2.1 Stand der Forschung aus Antrag

Zur Erfassung und Beschreibung regulativ-politisch bedingter Übergangsdynamiken etc. und damit einhergehende Abweichungen von Modelltypischen „idealen“ Referenzpfaden wird üblicherweise der Multi-Level-Perspective- (MLP-) Ansatz (Geels 2002, 2005, 2018, Geels und Schot (2007)) genutzt. In einem verbal-analytischen, häufig auf Fallstudien basierendem Rahmen, der verschiedene Disziplinen (evolutionäre Ökonomik, Techniksoziologie, Geschichte der Technik- und Innovationsstudien) verknüpft, wird im MLP-Ansatz untersucht, unter welchen Voraussetzungen Innovationen ihre Nische verlassen und zur neuen dominanten Technologie werden können. Dabei werden drei Ebenen und vier zeitliche Phasen der gesellschaftlichen Durchdringung neuer Technologien unterschieden.

In der unteren Nischen-Ebene beginnen radikale Innovationen, die im etablierten Regime zunächst nicht wettbewerbsfähig sind. Die mittlere, soziotechnische Regime-Ebene basiert auf dem technologischen Regime nach Nelson und Winter (vgl. Matschoss 2004, Abschnitt 4.3) und berücksichtigt auch politische und soziale Aspekte, d.h. es umfasst die Rahmenbedingungen mittels mehrerer Regime-Dimensionen (vgl. Tabelle 4), die die aktuellen (also „alten“) Technologien stützen. Die

obere Landscape-Ebene repräsentiert übergreifende Rahmenbedingungen, die in der Regel nicht von den anderen Ebenen beeinflusst werden (Merten et al. 2018). Weiter durchlaufen Innovationen auf dem Weg von der Nische zur Ablösung der dominanten Technologie vier zeitliche Phasen. In Phase eins (pre-development) entstehen Innovationen in unsicheren Nischen-Netzwerken. In Phase zwei (early market niche) entwickeln sich dominante Designs in kleinen Marktnischen. In Phase drei (breakthrough) diffundiert die Innovation und konkurriert mit dem Regime. Phase vier (stabilization of new regime) umfasst schließlich weitreichende Anpassungen von Infrastrukturen, Regulierungen und Gewohnheiten an die neue Technologie. (Geels 2018, Geels et al. 2017).

Bisher wird der MLP-Ansatz in der Hauptsache zur Ex-Post-Analyse, d.h. zur Erklärung „ungewollter“ Transformationen angewandt (Übergang von der Segel- auf die Dampfschiffahrt, vom Pferdefuhrwerk zum Auto etc.) (Papachristos et al. 2013, mit weiteren Verweisen). Dort werden neue Technologien überwiegend durch Unternehmer vorangetrieben, die Vorteile im bestehenden Markt sehen. Mit der Energiewende wird der MLP-Ansatz inzwischen auch auf zielgerichtete, d.h. politisch gewollte Transformationen angewendet. Deren Technologien setzen sich nicht allein durch einzelwirtschaftliches Engagement im Markt durch, d.h. die politische Dimension der Transformation gewinnt an Bedeutung (Geels et al. 2017, Geels & Schot 2007). Aber auch hier beschränkt sich die Analyse meist auf die Ex-post-Analyse von sektoral und/oder geographisch begrenzten Fallbeispielen (Geels 2014; Geels et al. 2016; Köhler et al. 2018; Köhler et al. 2020, Kapitel 2.7, S. 38-41).

1.2.2 Projektansatz

Um die Erkenntnisse aus makroökonomischen Modellierungen und MLP-Ansätzen zu kombinieren, müssen die relevanten Aspekte der MLP mit modellfähigen Daten beschrieben werden. Köhler et al. (2018) verglichen bestehende Modelle mit den Anforderungen der MLP-Modellierung. Köhler & Holtz (2020) wiesen auf methodische Probleme bei der Modellierung von Transformationen hin, die durch ihre radikalen Eigenschaften gekennzeichnet sind, die in herkömmlichen mikroökonomischen Modellen, die auf marginale Veränderungen fokussieren, nicht angemessen berücksichtigt werden. Daher wird die Entwicklung von Indikatoren-Sets zur Identifizierung von Transformationen als eigenes Forschungsfeld betrachtet (Köhler & Holtz 2020). Insgesamt werden die großen methodischen Unterschiede zwischen Modellierung und Fallstudien deutlich und bisherige Ansätze zeigen, dass bereits bei entsprechenden Vorhaben für einzelne Länder/Sektoren ein hoher Aufwand entsteht (Trutnevyte et al. 2014; Köhler et al. 2018). So wurde „das Finden passender Indikatoren zum Strukturieren der Komplexität“ als Forschungsgrenze der Transformationsforschung bezeichnet (Köhler et al. 2019). Auch Köhler (2020) wies noch einmal darauf hin, dass keine Literatur dazu existiert, wie bspw. kultureller Wandel in numerischen Modellen abzubilden sei (vgl. ausführlich: Banning et al 2024).

Somit bestand der Ansatz des vorliegenden (Teil-)Vorhabens zum einen darin, aus den Regime-Dimensionen des verbal orientierten MLP-Ansatzes quantitative Kriterien

und Indikatoren abzuleiten und für die entsprechenden Länder-Technologie-Kombinationen empirisch zu erheben (Klann et al. 2025). Zum anderen wurden anhand der Daten länderspezifische Dynamiken abgebildet, um diesen quantitativ erweiterten MLP-Ansatz als Eingangsgrößen in der Modellierung des Projektpartners nutzen zu können (Hembach-Stunden et al. 2024, section 2.2.3).

Die Regime-Dimensionen (Geels 2018, S. 3 bzw. Banning et al. 2023, Abbildung 1) weisen eine große Übereinstimmung mit der multi-kriteriellen Bewertung von Technologien für die Energiewende auf (Viebahn et al. 2018a, Kap. 3). Daher wurden diese mit leichten Anpassungen zur Umsetzung des MLP-Konzepts übernommen und durch Recherche-Indikatoren konkretisiert (Banning et al. 2023, Tabelle 1 bzw. Hembach-Stunden et al. 2024, Table 1).

Die Recherche-Indikatoren wurden für die entsprechenden Länder-Technologie-Kombinationen, d.h. für Deutschland und die aktuellen Haupthandelspartner in Bezug auf diese Technologien (vgl. Tabelle 2) länderspezifisch erhoben. Im Anschluss wurden für einige dieser Länder und Technologien (vgl. Tabelle 3) noch weitergehende MLP-Analysen vorgenommen (deep dive). Trotz hohem Rechercheaufwand konnten für einzelne Indikatoren nur eingeschränkt die hier erforderlichen Informationen gefunden werden. Die Herausforderungen unterschieden sich je nach Kriterium und auch nach Technologie, sind im Allgemeinen aber darauf zurückzuführen, dass gleichzeitig sowohl länderspezifische als auch technologiespezifische Daten benötigt wurden (vgl. ausführlich: Klann et al 2025).

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Aus den Arbeitspaketen 1-5 wurden im vorliegenden Teilvorhaben A (IZES) folgende Punkte schwerpunktmäßig bearbeitet:

1.3.1 AP 1: Projektmanagement und Ergebniskommunikation

In AP 1 wurde die Gesamtkoordination (1.1: regelmäßiger interner Austausch, Austausch mit Projektträger) sowie die Ergebniskommunikation (1.2: Koordination von Veröffentlichungen sowie der Abschlussveranstaltung) durchgeführt.

1.3.2 AP 2: Leitmärkte, Definition der Leitmarkttechnologien, strukturelle Verflechtungen und Indikatoren

In AP 2 lag der Schwerpunkt auf den Teil-AP 2.2 (empirische Auswertungen: Suche und Auswertung von Daten) und Teil-AP 2.3 (Indikatoren & Schnittstellen: gemeinsame Definition, Kompatibilität). Hierfür wurde zunächst einer Reihe vorbereitenden Arbeiten, wie die Auswahl der zu betrachtenden Technologien und Länder, durchgeführt. Beides wird in Banning et al. (2023) sowie in Klann et al (2025) erläutert. Hier wird ein kurzer Überblick gegeben. Darauf folgte – in Kombination mit AP 3 – die (aufwändige) Recherche der Indikatoren für die jeweiligen Länder-Technologie-Kombinationen. Später wurden die Analysen weiter auf bestimmte Länder und Technologien fokussiert (vgl. Tabelle 3).

Für die Technologieauswahl wurde basierend auf einer IEA-Liste, die um einige Technologien aus den anderen Listen ergänzt wurde, eine „very long list“ mit rund 450 Einzeltechnologien erstellt. Aus dieser wurden anhand eines Kriterienkatalogs 87 Technologien synthetisiert und in elf Technologiegruppen aggregiert. Es wurden verschiedenste Kriterien diskutiert, von denen einige (z.B. Bedeutung für den Klimaschutz, Entwicklungsstand der Technologie) als Filter angewendet werden konnten, andere wiederum nicht (Komplexität der Produktion, Forschungsintensität). Letztlich verblieben die elf in Tabelle 1 dargestellten Technologiegruppen (Banning et al. 2023, Kapitel 3).

Tabelle 1: Übersicht über die für die Datenerhebung vorausgewählten Technologiegruppen

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

Quelle: Banning et al. (2023)

Für die Länderauswahl wurde die Bedeutung der Länder im internationalen Handel für diesen Technologiegruppen zuzuordnenden Gütern herangezogen. Dabei wurden Länder ausgewählt, die für mehrere der Technologiegruppen bedeutend sind, sowie im Einzelfall ergänzend für einzelne Technologiegruppen sehr wichtige Länder. Dafür wurden die Exporte mittels UN Comtrade-Daten quantifiziert und es wurde ein Überblick über die Mindestanzahl an Ländern gegeben, die betrachtet werden müssen, um 70 % bzw. 90 % der weltweiten Exporte der jeweiligen Technologie in allen betrachteten Jahren zu erfassen. Im Durchschnitt mussten 8 bzw. 15 Länder pro Technologie betrachtet werden, wobei die Anzahl je nach Technologie erheblich variiert. Nach Bereinigung von Mehrfachnennungen ergaben sich 28 bzw. 40 verschiedene Länder. Es wurde als sinnvoll erachtet, besonders diejenigen Länder näher zu betrachten, die für mehrere Technologiegruppen relevant sind. Dies führte dazu, dass die Länderzahl bei einer geforderten Abdeckung von 70 % und 90 % auf 12 bzw. 25 reduziert wurde. Diese Kriterien, die 70 % der weltweiten kumulierten Exporte für mindestens zwei Güterpositionen erfassen, scheinen die großen Player gut zu erfassen und waren für die Recherche handhabbar. Das Ergebnis zeigt Tabelle 2 (Banning et al., 2023, Kapitel 4).

Tabelle 2: Übersicht über die für die Datenerhebung vorausgewählten Länder

Länder	Für folgende Technologiegruppen
Belgien	Alle
Brasilien	Alle
China	Alle
Deutschland	Alle
Frankreich	Alle

Länder	Für folgende Technologiegruppen
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)*

Diese ursprüngliche Auswahl an Ländern und Technologien wurden dann für die vertiefte Untersuchung und quantitative Erfassung entsprechend Tabelle 3 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. Zur Datenproblematik sei angemerkt, dass es nicht nur eine Vielzahl organisatorischer Probleme zu bewältigen gab, die trotz mehrfacher Verfahrensänderungen zu Verzögerungen geführt haben. Dazu gehören mehrfache notwendige Wechsel zwischen Kriterien-basiertem und länderbasiertem Vorgehen, mehrfache Wechsel zwischen wissenschaftlichem und nicht-wissenschaftlichem Personal und Ähnliches. Letztlich konnten aber – auch mit Nachfragen bei Branchenverbänden, dem Einsatz von teils muttersprachlichem Personal, KI-unterstützter Übersetzungen bei der Suche etc. – für bestimmte Indikatoren keine entsprechenden Daten gefunden werden, sodass mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen ist, dass diese tatsächlich nicht öffentlich verfügbar sind. Die Frage, ob solche Daten später, z.B. mit weiterentwickelter KI als zum Zeitraum der Recherche (Ende 2022 – Anfang 2023), doch noch gefunden werden können, muss späteren Projekten vorbehalten bleiben. Schließlich wurden auch während der Phase des Projekt-Antrags identifizierte Datenbanken nicht aktuell gehalten, sodass sie zur Zeit der Erhebung nicht mehr genutzt werden konnten (vgl. ausführlich: Klann et al. 2025). Am Ende wurde die Anzahl der auszuwählenden Technologien und Länder 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;
- Darstellbarkeit eines Leitmarkts in Deutschland;
- Die ausgewählten Technologien sollen sowohl welche enthalten, die eher am Beginn der Markteinführung stehen, als auch solcher, 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 3 ausgewählt. Mit dieser Auswahl sind einerseits relative neue (Elektrolyseure, batterieelektrische Fahrzeuge) und relativ etablierte (PV, Windkraftanlagen) Technologien enthalten.

Tabelle 3: Für vertiefte und quantitative Analyse ausgewählte Foküsländer und -technologien basierend auf technologiespezifischen globalen Exportanteilen (min-max) im Zeitraum 2015-2020

	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: Klann et al. (2025); Banning et al (2023)

Weiter fand währenddessen eine Koordination dazu statt, wie die Indikatoren mit der Modellierung zu verknüpfen seien (Teil-AP 2.3).

1.3.3 AP 3: Regime- und Landscape-Analysen

Im AP 3 wurden die Regime- (AP 3.1) und Landscape-Analysen (AP 3.2) durchgeführt, wobei auf eigene Landscape-Analysen verzichtet wurde, da diese mit den Kriterien 1, 3, und 7 teils mit abgedeckt sind und ein eigenständiger Teilbereich mit weiteren vertieften Analysen aus Zeitgründen entfallen musste, zumal kein großer ergänzender Erkenntnisgewinn für das Projektziel zu erwarten war. Mit AP 3 wurde bereits im Anschluss an die Definition der Technologie- und Länderlisten begonnen und es wurden quantitativen Kriterien und Indikatoren abgeleitet (Tabelle 4). Darauf folgte die (aufwändige) Recherche der Indikatoren für die jeweiligen Länder-Technologie-

Kombinationen. Generell wurden die Daten für die ersten längeren Technologie- und Länderlisten gesucht. Die Ausnahmen sind: Zum einen das Kriterium 7 (Akzeptanz). Hier wurden nur Fokusbänder 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 zu Kriterium 4 (Marktpotential) sind Hembach-Stunden et al. (2024; supplementary materials) zu entnehmen.

Tabelle 4: Von Regimedimensionen zu Indikatoren

Regimedimensionen (nach Geels 2018)	Kriterien (Nummer)	Indikatoren*
„Politik/Regulierung“	1: Politische Ziele	Quantitative Ziele (z.B. Ausbauziele)
„Politik/Regulierung“ und „Wissenschaft“	2: R,D&D-Ausgaben	öffentliche R,D&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

Regimedimensionen (nach Geels 2018)	Kriterien (Nummer)	Indikatoren*
„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)

Bei der Datensuche wurde je nach Kriterium verschieden vorgegangen (vgl. Klann et al 2025). Aber einige generelle Punkte der Vorgehensweise können hier skizziert werden:

- Inhaltlich wurde grundsätzlich versucht über internationale Datenbanken oder Studien zu starten. Dies hatte 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 veränderte sich das Verhältnis zwischen diesen beiden Vorgehen. Später erfolgte die oben beschriebene weitere Eingrenzung auf die sog. Fokustechnologien und -länder.

Um die Übergangsdynamiken und Barrieren der Transformation abzubilden, wurden im Anschluss an die Recherche die gesammelten Daten zu Übersichtsmatrizen für jede (Schwerpunkt-)Länder-Technologie-Kombination (Fokusländer und -technologien) verdichtet. Im Vergleich zu Pfaden mit sehr günstigen Rahmenbedingungen (sog. „Baseline-Pfade“) können die identifizierten Barrieren als Faktoren interpretiert werden, die die günstigen Ausbaupfade verlangsamen. Abhängig von den für jedes Land und jede Technologiekombination ermittelten Hemmnissen wird eine Verlangsamung der Marktdurchdringung von zwischen null und fünf Jahren im Vergleich zum Basispfad geschätzt. Auf dieser Grundlage der geschätzten Verlangsamung im Vergleich zum Basispfad wurden „MLP-Pfade“ als extrapolative Pfade konstruiert, die eine plausible Entwicklung unter Berücksichtigung der ermittelten Hindernisse darstellen. Zusätzlich wurden neben dem „eigentlichen“ MLP-Pfad noch alternative Pfade mit verschiedenen Verzögerungen als Sensitivitäten zur Abbildung von Unsicherheit dargestellt (s.u.). Letztlich wurden quantitative Zeitreihen von 2023 bis 2040 für den Brutto-Kapazitätszuwachs für jedes Land und jede Technologiekombination erstellt (Ausnahme: Fahrzeuge), die mit S-förmige Diffusionskurven als funktionale Form abgebildet wurden. Um ein standardisiertes

Verfahren für den erweiterten MLP-Ansatz zu etablieren, wurde die gleiche Diffusionsfunktion für alle Länder-Technologien-Kombinationen verwendet. (Hembach-Stunden et al. 2024, S. 10-11). Die alternativen Zeitreihen (baseline- und MLP-Pfade sowie Sensitivitätspfade) für die Fokustechnologien und -länder wurden vom Vorhabenpartner als input der Modellanalyse genutzt.

1.3.4 AP 5: Simulation verschiedener möglicher Zukünfte, Auswertung der Ergebnisse

In AP 5 wurden in AP 5.1 (Simulation) die Modellläufe abgesprochen und vom Vorhabenpartner durchgeführt. In AP 5.2 (Bewertung Modell-Ergebnisse) wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Vorhabenpartner erste Modell-Ergebnisse evaluiert und (weitere) Rücksprachen zur Kombination von MLP mit dem Modell, möglichen Sensitivitäten etc. gehalten. Vor allem mit den Sensitivitäten sollten alternative Entwicklungen aufgezeigt werden. So konnten auch ausgewählte Aussagen zu alternativen soziotechnischen Entwicklungen gemacht werden, da eine explizite Wiedereinspeisung unter AP 5.3 (Rückspeisung, soziotechnische Auswertung) in das Modell („loop“) aus Zeitgründen entfallen musste, diese aber durch eine vertiefere Diskussion der Modellimplementierung teils kompensiert wurde.

1.3.5 AP 6: Zusammenführung, Synthese der Ergebnisse

In AP 6 wurden die Ergebnisse gemeinsam ausgewertet (AP 6.1) und synthetisiert (AP 6.2). Hierunter fallen vor allem die inhaltliche Vorbereitung der Abschlussveranstaltung sowie des Ergebnis-papiers (Hembach-Stunden et al. 2024).

1.4 wissenschaftlich-technischer Stand, an den Angeknüpft wurde

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Dieser Punkt ist im Rahmen des vorliegenden Vorhabens nicht relevant.

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Wie unter 1.1 erwähnt, ist die verwendete Literatur in den dort genannten Veröffentlichungen sowie im Antrag aufgelistet.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektdurchführung fand in enger Zusammenarbeit mit dem beteiligten Vorhabenpartner GWS (Teilvorhaben B) statt.

Zu methodischen Fragen der Umsetzung des quantitativ erweiterten MLP-Ansatzes fand ein Austausch mit Dr. Jonathan Köhler (Fraunhofer ISI) per email und Telefon statt.

Im Rahmen der Datenrecherche wurden nationale (z.B. VDA: Alexander Fritz), europäische (Bioenergy Europe: Jérémie Geelen) sowie internationale (IHA: Nat

Snowden) Interessenverbände z.T. nach Daten angefragt. Auch wurde diesbezüglich der Kontakt zum Autor:innen-Team von Observ'ER (Energies Renouvelables: Diane Lescot) gesucht.

Weiterhin bestand z.T. Kontakt zu Unterorganisationen der IEA (IEA HEV TCP: Els Rutten) und es wurde der Kontakt zu verschiedenen Abteilungen der IEA selbst (info, webstore, pressoffice) gesucht.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,

Die Ergebnisse der Länder- und Technologie-Auswahl wurden bereits im Rahmen des Vorgehens oben dargestellt. An dieser Stelle werden kurz die Ergebnisse der Datenrecherche (basierend auf Klann et al 2025) sowie der resultierenden Diffusionskurven (basierend auf Hembach-Stunden et al. 2024) dargestellt. Mehr Details sind in den genannten Quellen genannt.

Mit Blick auf die Datenrecherche hat sich gezeigt, dass Recherchen nach Indikatoren, die länder- *und* technologiespezifisch sind, eine Herausforderung darstellt und die Ergebnisse müssen teils als ernüchternd bezeichnet werden. So können die oben zitierten Aussagen der einschlägigen, um eine Quantifizierung des MLP-Ansatzes bemühte Literatur, bestätigt werden, die dies als Forschungsgrenze der Transformationsforschung bezeichnet. Dennoch konnte mit dem vorliegenden Ansatz eine quantitative Operationalisierung des MLP-Ansatzes für mehrere Länder und Technologien über einheitliche Indikatoren (-sets) erreicht werden, auch wenn letztlich nicht alle ursprünglich geplanten Länder und Technologien erfasst werden konnten.

Mit Blick auf die resultierenden Diffusionskurven konnten für alle vier Fokustechnologien (PV, Wind, Elektrofahrzeuge und H₂-Elektrolyseure) und Fokusländer (China, Deutschland, USA, Japan und – nur für Wind – Dänemark) Basispfade und MLP-Pfade abgeleitet werden. Abbildung 1 zeigt beispielhaft Verzögerungen von 1-5 Jahren als Sensitivitäten für den jährlichen Elektrolyseur-Zuwachs (a) und die resultierende Kapazitätserhöhung (b) in Deutschland. Eine Verzögerung von zwei Jahren entspricht dem abgeleiteten MLP-Pfad.

Die folgenden Abbildungen 2-5 zeigen die Ergebnisse für alle Fokustechnologien und -länder, jeweils für die Baseline-Pfade (a) und MLP-Pfade (b). Wie aus den Abbildungen zu entnehmen ist, sind China und die USA in Bezug auf den Brutto-Kapazitätserweiterungen im Vergleich zu den anderen zwei oder drei Ländern sehr groß. Darüber hinaus ist außerdem für Elektrofahrzeuge (BEV-cars) und insbesondere für H₂-Elektrolyseure ein viel stärkerer Anstieg der Verkäufe bzw. des Brutto-Kapazitätserbaus absehbar als für Wind und PV, was den relativen Entwicklungsstand der Technologieeinführung widerspiegelt.

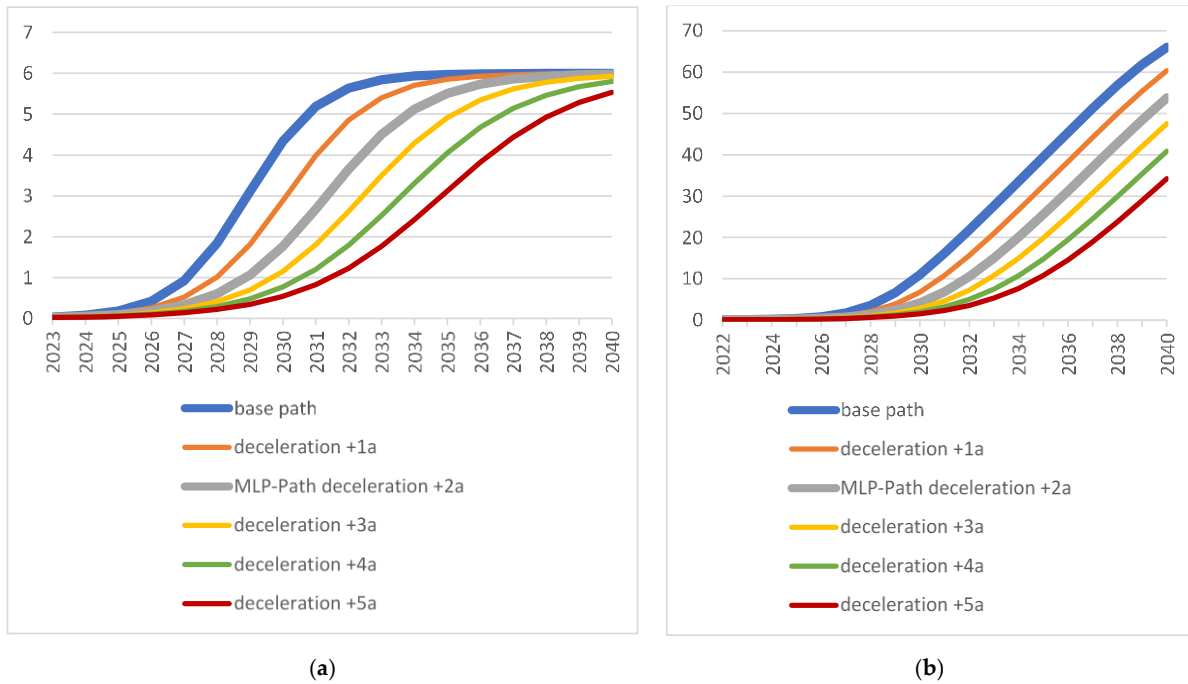


Abbildung 1: Baseline- und MLP-Pfade für H₂-Elektrolyseure in Deutschland in GW H₂/a (a) und GW H₂ (b)

Quelle: Hembach-Stunden et al (2024), Figure 3

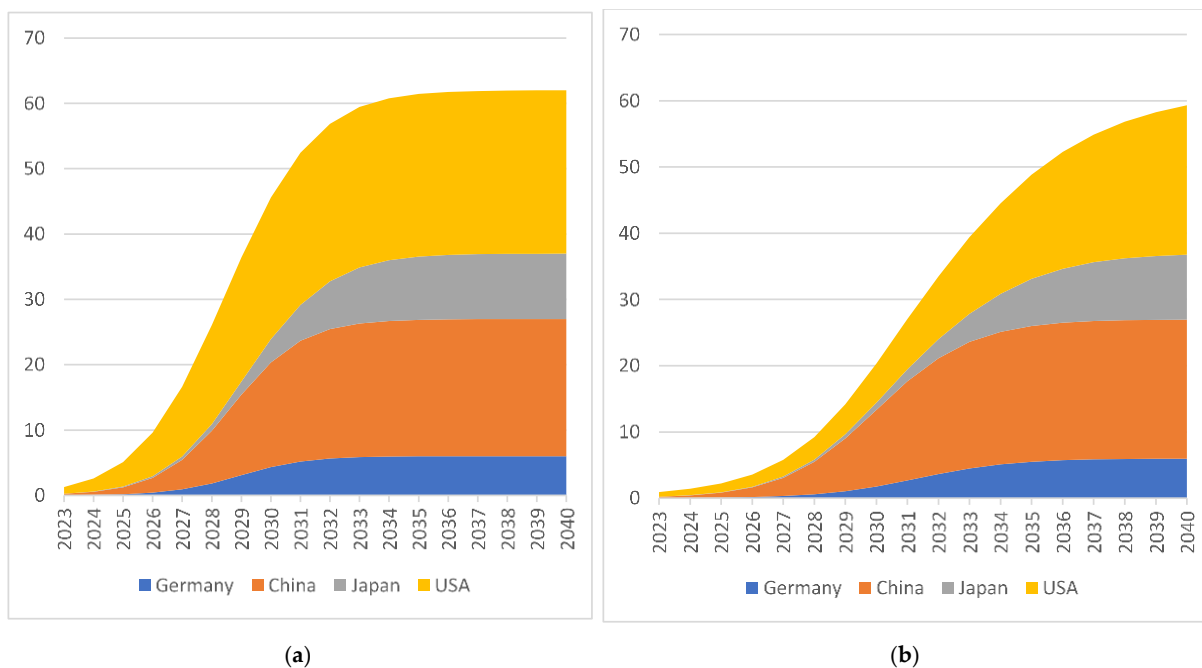


Abbildung 2: Szenarios für Baseline- und MLP-Pfade für H₂-Elektrolyseure in GW H₂/a

Quelle: Hembach-Stunden et al (2024), supplementary material, Figure S2

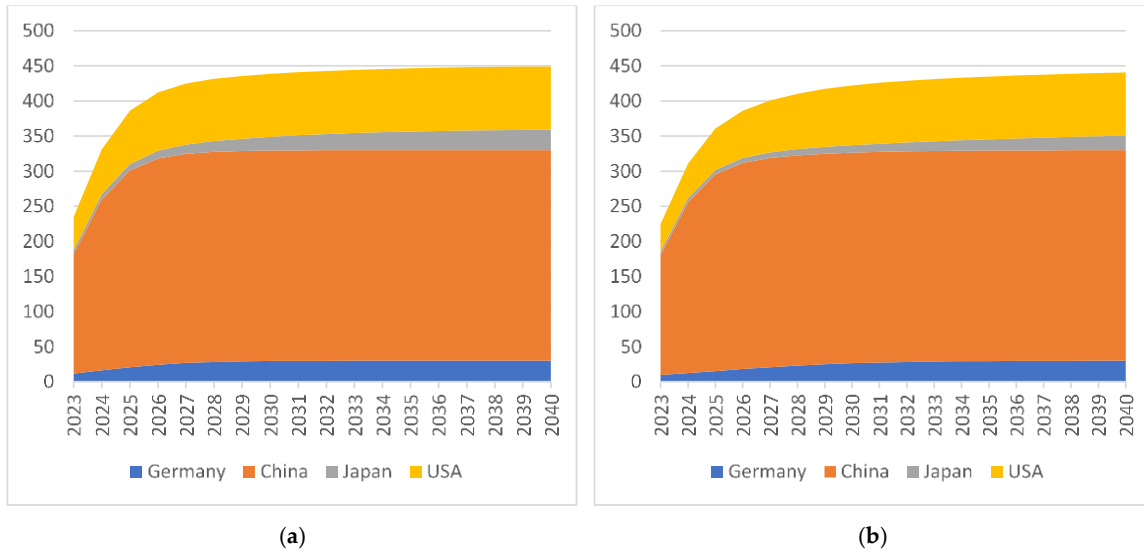


Abbildung 3: Szenarios für Baseline- und MLP-Pfade für PV in GW/a
 Quelle: Hembach-Stunden et al (2024), supplementary material, Figure S3

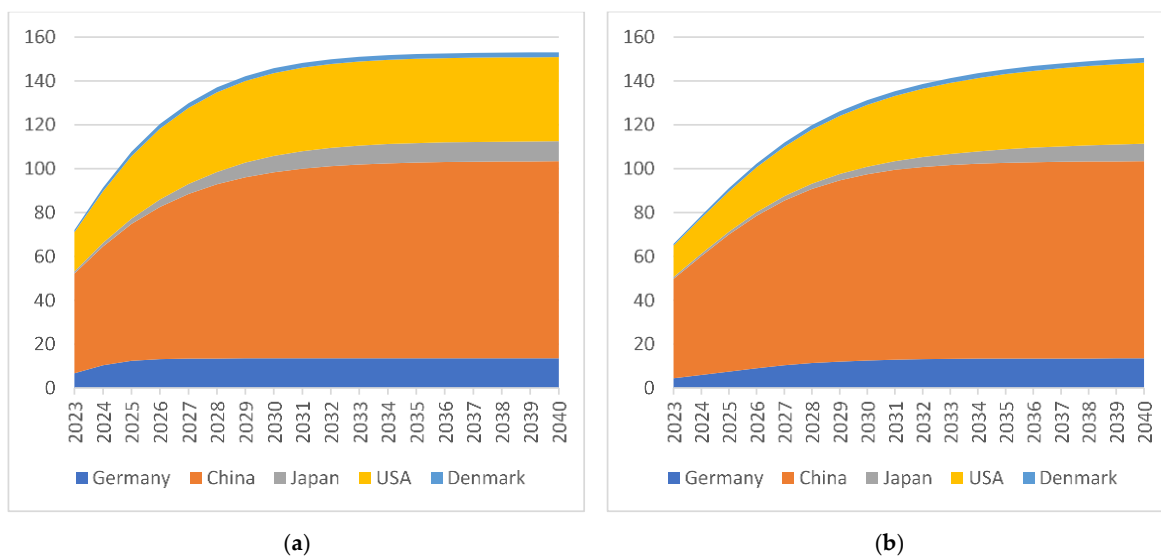


Abbildung 4: Szenarios für Baseline- und MLP-Pfade für Wind in GW/a
 Quelle: Hembach-Stunden et al (2024), supplementary material, Figure S4

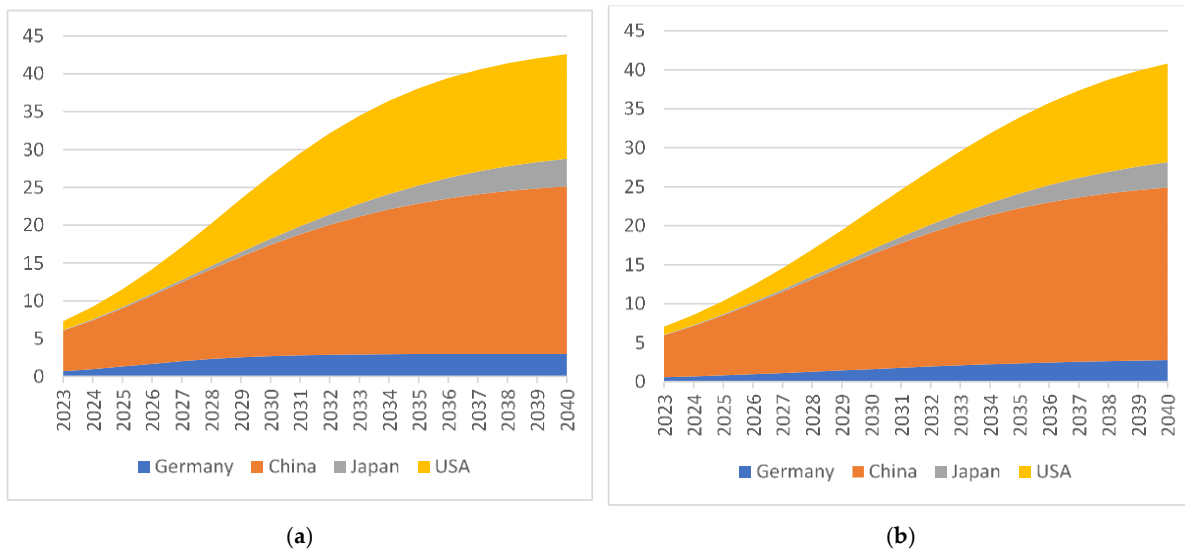


Abbildung 5: Szenarios für Baseline- und MLP-Pfade für Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen in Mio. Fahrzeugen/a

Quelle: Hembach-Stunden et al (2024), supplementary material, Figure S5

Weiterhin sind die Unterschiede zwischen den MLP-Pfaden und den Basispfaden bei H₂-Elektrolyseuren und Elektrofahrzeugen stärker ausgeprägt als bei PV. Dies ist auf die relativ große Unsicherheit hinsichtlich der künftigen Nachfrage nach H₂-Elektrolyseuren, insbesondere in den USA und Japan, bis zum Jahr 2040 zurückzuführen. Die großen Unsicherheiten des Bedarfs an H₂-Elektrolyseuren für diese beiden Länder resultieren zum einen aus Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Nachfrage nach Wasserstoff, vor allem aber aus der Frage wie dieser Bedarf gedeckt wird, d.h. der Aufteilung der H₂-Produktion auf Elektrolyseure, auf H₂-Produktion aus Erdgas unter Nutzung von Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (CCS/CCU), und – vor allem im Falle Japans – auf H₂-Importe.

Wie bereits erwähnt, stellen die Ergebnisse des vorliegenden Teilvorhaben A eine Quantifizierung des MLP-Ansatzes dar. D.h. sie dienen als empirische Grundlage gesellschaftlicher Transformationsdynamiken und die abgeleiteten explorativen Pfade dienen als Input für die Modellierung und Bindeglied zwischen MLP-Ansatz und Szenarien. Die daraus entstandenen Modellierungsergebnisse zeigen folgendes (vgl. ausführlich Teilvorhaben B sowie Hembach-Stunden et al (2024)):

Mit Blick auf die Technologien bestehen erhebliche Unterschiede hinsichtlich des Low-Carbon-Leakage-Risikos. Dabei ändern sich Handelsmuster und internationale Arbeitsteilung bei Technologien, die bereits relativ ausgereift sind (z. B. PV) bei weiterer Verbreitung in den Szenarien kaum. Dies ist unabhängig von ggfs. zuvor stattgefundenen Verlagerungen. Im Gegensatz dazu zeigen aufstrebende Technologien wie Wasserstoff-Elektrolyseure dynamischere und variabelere Muster, da politische und marktliche Strukturen noch in der Entwicklung begriffen sind. Die Entwicklung der internationalen Arbeitsteilung, der damit verbundenen Industrien und Handelsströme mit der weiteren Verbreitung der neuen Technologien in den Szenarien unterliegt noch den Einflussfaktoren. Dabei ist aufgrund der Neuheit dieser Technologien und der damit verbundenen Industrien die aktuellen Entwicklungen noch nicht vollständig in den verfügbaren Daten abbildbar.

Mit Blick auf die Länder spielt die Größe des „Heimatmarkts“ eine entscheidende Rolle. Länder mit großen Inlandsmärkten wie China und die USA haben einen Wettbewerbsvorteil bei der Verbreitung der neuesten Technologien im Vergleich zu kleineren Märkten wie Japan und Deutschland. Kleinere Länder können jedoch durch eine strategische Politikgestaltung und eine verstärkte regionale Zusammenarbeit und Koordinierung ihr höheres Risiko regionale Zusammenarbeit und Koordination verringern.

Das Verständnis der technologischen und länderspezifischen Unterschiede ist entscheidend für genaue Prognosen und wirksame politische Entscheidungen. So unterstreichen die Unterschiede zwischen ausgereiften und neuen Technologien die Notwendigkeit maßgeschneiderter Ansätze für Marktanalysen und -prognosen, die den unterschiedlichen Reifegraden technologischen Reifegrad berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen eine verbesserte Darstellung der Dynamik der realen Welt. Insgesamt ist aber eine Verbesserung der Datenharmonisierung und Erfassung sauberer Energietechnologien und ihrer technischen Komponenten, sowie verbesserte Daten zu technologiespezifischen Kosten und die Integration von Lernkurveneffekten notwendig.

2.2 der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Die geleistete Arbeit war notwendig und angemessen, da die Frage nach der weiteren Entwicklung der industriellen Basis im Zuge der Energiewende essentiell ist. So bestand die Forschungsfrage darin, unter welchen Umständen sich WSK, d.h. Leitmärkte für EWT, herausbilden und eventuell international verlagern, vor allem angesichts der Tatsache, dass auch in anderen Ländern ähnliche Transformationen wie in Deutschland stattfinden. Hier hat das vorliegenden Teilvorhaben A soziotechnischer Analysen (MLP-Ansatz) quantifiziert und die empirische Basis dafür erhoben, um gesellschaftliche und politische Dynamiken verschiedenen Ländern abzubilden. Durch diese numerische Abbildung von Akteursverhalten bei der Einführung neuer Technologien in Gegenwart von Markt- und Diffusionsbarrieren konnten im Gesamtvorhaben (d.h. einschl. Teilvorhaben B) unter Berücksichtigung von internationalem Wettbewerb und Handelsbeziehungen die Entwicklung internationaler WSK von EWT abgebildet werden.

Das Vorhaben liefert wichtiges Orientierungswissen für eine künftige Industriepolitik, die auch die Bedürfnisse aktueller Energie- und Klimapolitik berücksichtigt. Das vorliegende Teilvorhaben A liefert die empirische Basis dazu und zeigt die damit einhergehenden Herausforderungen auf. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für Politik und weitere Forschung.

2.3 des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Wie im Verwertungsplan angegeben, bestehen keine unmittelbaren wirtschaftlichen Erfolgsaussichten, da kein eigenes wirtschaftliches Interesse der Verbundpartner existiert. Wie oben angegeben, liegt die Verwertung in der Lieferung der empirischen

Basis für ein Orientierungswissen für eine künftige Industriepolitik sowie in der Weiterführung der wissenschaftlichen Grundlagen dazu.

**2.4 des während der Durchführung des Vorhabens dem
Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet
des Vorhabens bei anderen Stellen,**

Keine.

**2.5 der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach
Nr.11.**

Aus dem Projekt sind die in Abschnitt 1.1. genannten Veröffentlichungen entstanden bzw. im Entstehen. Sie entsprechen dem geänderten Verwertungsplan des Verlängerungsantrags, wobei die mit dem Projektpartner gemeinsam vorgesehenen Diskussions- und Synthesepapiere im o.g. Ergebnispapier (Hembach-Stunden et al. 2024) zusammengefasst wurden. Auf die vorgesehenen Konferenzbesuche wurde verzichtet, da die Ergebnisse erst zum (verlängerten) Projektende hin erarbeitet werden konnten.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Noch keine	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht gemäß Anlage 2 zu Nr. 8.2 NKBF 98 Förderkennzeichen: 03EI1024A: Low Carbon Leakage: Wertschöpfungsketten und Markt- und Diffusionsbarrieren in einem erweiterten Handelsmodellrahmen: Akteursverhalten in Leitmärkten, Handelsstrukturen und struktureller Wandel im Kontext unterschiedlicher Transformationsgeschwindigkeiten. Teilvorhaben A: Soziotechnische Analysen.	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Matschoss, Patrick	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.08.2024
	6. Veröffentlichungsdatum - NOCH OFFEN -
	7. Form der Publikation TIB, IZES-website
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) IZES gGmbH - Altenkesseler Str. 17, Geb. A1, 66115 Saarbrücken - Albrechtstr. 22, 10117 Berlin Verbundpartner: - Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforshung (GWS)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution Siehe oben
	10. Förderkennzeichen 03EI1024A
	11. Seitenzahl 17
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Scharnhorststraße 34-37 10115 Berlin	13. Literaturangaben s. Schlussbericht
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 5
16. Zusätzliche Angaben Keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) PTJ, Geschäftsbereich ESI 1, Frau J. Ludwig, Jülich, 17.02.2025	
18. Kurzfassung (der gesamten Studie) Gegenstand des Low Carbon Leakage (LCL-) Vorhabens ist die Frage, unter welchen Bedingungen sich Wertschöpfungsketten (WSK) in Deutschland, d.h. Leitmärkte für Energiewende-relevante Technologien (EWT), entwickeln und wann sie sich international verlagern könnten. So wurde untersucht, wie sich Akteursverhalten bei der Einführung neuer Technologien in Gegenwart von Markt- und Diffusionsbarrieren sowie unter Berücksichtigung von internationalem Wettbewerb und Handelsbeziehungen darstellen. Zudem wurde analysiert, welche gesellschaftlichen Voraussetzungen hierfür bestehen. Dies wurde sowohl durch Modellierung internationaler WSK von EWT in einem globalen Handelsmodell (Teilvorhaben B des Projektpartners) als auch durch soziotechnische Analysen (Teilvorhaben A, vorliegender Bericht) untersucht. Im vorliegenden Teilvorhaben A wurde der Multi-Level-Perspective- (MLP-) Ansatz quantitativ weiterentwickelt und die Ergebnisse dem Vorhabenpartner zur Verfügung gestellt. Der MLP-Ansatz bietet einen verbal-analytischen, häufig auf Fallstudien basierenden Rahmen, unter welchen Voraussetzungen Innovationen ihre Nische verlassen und zur neuen dominanten Technologie werden können und erfasst somit regulativ-politisch bedingte Übergangsdynamiken, d.h. damit einhergehende Abweichungen von Modelltypischen „idealen“ Referenzpfaden. Methodisch wurde der verbal-analytischen MLP-Ansatz quantifiziert Indikatoren für die jeweiligen Länder-Technologie-Kombinationen recherchiert. Für vier Technologien (PV, Wind, Elektrofahrzeuge und H2-Elektrolyseure) und Länder (China, Deutschland, USA, Japan und – nur für Wind – Dänemark) wurden Pfade „Baseline“- und „MLP-Pfade“ abgeleitet und an den Projektpartner übergeben.	
19. Schlagwörter Energiewende, Energiewende-Technologien, carbon-leakage, low-carbon-leakage, Leitmärkte, Wertschöpfungsketten, MLP-Ansatz, Quantifizierung, Indikatoren, Daten, Datenrecherche, Deutschland, internationaler Wettbewerb, Handelspartner	
20. Verlag IZES gGmbH	21. Preis Kostenlos

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Not yet available	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Final Report in accordance with Annex 2 to No. 8.2 NKBF 98 Funding Code: 03E11024A Low Carbon Leakage: Value Chains and Market and Diffusion Barriers in an Extended Trade Model Framework: Actor Behavior in Lead Markets, Trade Structures, and Structural Change in the Context of Different Transformation Speeds. Subproject A: Socio-technical Analyses.	
4. author(s) (family name, first name(s)) Matschoss, Patrick	5. end of project 30 Aug. 2024 6. publication date - <i>STILL OPEN</i> - 7. form of publication See above
8. performing organization(s) (name, address) IZES gGmbH <ul style="list-style-type: none"> • Altenkesseler Str. 17, Geb. A1, 66115 Saarbrücken • Albrechtstr. 22, 10117 Berlin Consortium Partner <ul style="list-style-type: none"> • The Institute of Economic Structures Research (GWS) 	9. originator's report no. TIB, IZES-website 10. reference no. 03E11024A 11. no. of pages 17
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Scharnhorststraße 34-37 10115 Berlin	13. no. of references See final report 14. no. of tables 5 15. no. of figures 5
16. supplementary notes None	
17. presented at (title, place, date) PTJ, Division ESI 1, Ms J. Ludwig, Jülich, 17 Feb. 2025	
18. abstract The subject of the Low Carbon Leakage (LCL) project is the question of under what conditions value chains (VCs) in Germany, i.e., lead markets for energy transition-relevant technologies (ETTs), develop and when they might relocate internationally. The project investigated how actor behavior manifests itself during the introduction of new technologies in the presence of market and diffusion barriers, and taking into account international competition and trade relations. In addition, the societal preconditions for this were analyzed. This was investigated both through modeling international VCs of ETTs in a global trade model (sub-project B of the project partner) and through socio-technical analyses (sub-project A, this report). In this sub-project A, the Multi-Level Perspective (MLP) approach was quantitatively further developed and the results were made available to the project partner. The MLP approach offers a verbal-analytical framework, often based on case studies, under which conditions innovations can leave their niche and become the new dominant technology, thus capturing regulatory-politically induced transition dynamics, i.e., deviations from model-typical "ideal" reference paths. Methodologically, the verbal-analytical MLP approach was quantified, and indicators were researched for the respective country-technology combinations. For four technologies (PV, wind, electric vehicles, and H2 electrolysers) and countries (China, Germany, USA, Japan, and – only for wind – Denmark), "baseline" and "MLP paths" were derived and provided to the project partner.	
19. keywords Energy Transition, Energy Transition Technologies, Carbon Leakage, Low Carbon Leakage, Lead Markets, Value Chains, Multi-Level Perspective (MLP) Approach, Quantification, Indicators, Data, Data research, Germany, International Competition, Trading Partners	
20. publisher IZES gGmbH	21. price For free