



Erfolgsfaktoren der Verbreitung von Energieinnovationen

Befunde und Schlussfolgerungen einer Diffusionsanalyse von 29 Energiewendetechnologien

Dr. Tobias Froese, Dr. Jens Clausen, Prof. Dr. Klaus Fichter

Erstellt im Rahmen des Forschungsprogramms

Transformation des Energiesystems Niedersachsen (TEN.efzn) im

Transfer-Innovationsbereich I: Grundlagen der Transferarbeit

Teilprojekt I.2: Innovations- und Diffusionspfadanalysen Energietechnologien

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Fak. II, Department für Wirtschafts- und Rechtswissenschaften

Apl. Professur für Innovationsmanagement und Nachhaltigkeit

Kontakt:

Prof. Dr. Klaus Fichter, klaus.fichter@uol.de

IMPRESSUM

KURZTITEL

Erfolgsfaktoren der Verbreitung von Energieinnovationen

AUTOREN

Tobias Froese (Carl von Ossietzky Universität Oldenburg)

M tobias.froese@uni-oldenburg.de

Jens Clausen (Borderstep Institut)

M clausen@borderstep.de

Klaus Fichter (Carl von Ossietzky Universität Oldenburg)

M klaus.fichter@uol.de

VERLAG

© Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2026

ZITIERVORSCHLAG

Froese, T.; Clausen, J. & Fichter, K. (2026). Erfolgsfaktoren der Verbreitung von Energieinnovationen - Befunde und Schlussfolgerungen einer Diffusionsanalyse von 29 Energiewendetechnologien. Oldenburg: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:715-oops-76539>.



zukunft.
niedersachsen

Diese Veröffentlichung ist im Rahmen des Forschungsprogramms „Transformation des Energiesystems Niedersachsen“ (TEN.efzn) am Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn) entstanden.

Gefördert mit Mitteln aus zukunft.niedersachsen, dem gemeinsamen Wissenschaftsförderprogramm des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur und der VolkswagenStiftung.

INHALTSVERZEICHNIS

Impressum.....	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
SUMMARY (DE)	v
SUMMARY (EN)	v
1 Einleitung.....	1
2 Methodik: Diffusionspfadanalysen ausgewählter Energiewendetechnologien	4
2.1 Fallauswahl im Zielbild eines transformierten Energiesystems	4
2.2 Diffusionspfadanalyse	7
3 Zusammenfassende Auswertung der Diffusionspfadanalyse von 29 Energiewendetechnologien.....	9
3.1 Gruppierung und Charakterisierung der Energiewendetechnologien	9
3.1.1 Einordnung nach Technologiefeldern	9
3.1.2 Einordnung nach ersten Anbietern	9
3.1.3 Einordnung nach Verbreitungsgrad	10
3.1.4 Einordnung im Energietechnologiesystem	11
3.2 Deskriptive Auswertung der Einflussphären und -faktoren	13
3.2.1 Überblick: Fördernde, bremsende, ambivalente und gestaltbare Faktoren	13
3.2.2 Produktbezogene Faktoren.....	17
3.2.3 Adopterbezogene Faktoren	20
3.2.4 Anbieterbezogene Faktoren.....	23
3.2.5 Branchenbezogene Faktoren	24
3.2.6 Politische Faktoren.....	26
3.2.7 Pfadbezogene Faktoren	28
4 Analytische Einordnung und Handlungsoptionen	31
4.1 Diffusionsgruppenspezifische Handlungsoptionen	31
4.1.1 Einordnung nach Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad: „Poor Dog“, „Missing X“ oder „Star“?.....	31
4.1.2 Vom „Poor Dog“ zu „Missing X“	34
4.1.3 Von „Missing X“ zu „Stars“	34

4.2	Technologiefeldspezifische Handlungsoptionen.....	36
4.2.1	Vergleich der Faktorbewertungen je Technologiefeld.....	36
4.2.2	Diffusionsbedingungen und Handlungsoptionen je Technologiefeld.....	40
5	Fazit	44
5.1	Erfolgsfaktoren der Diffusion von Energiewendetechnologien	45
5.1.1	Klare politische Leitplanken mit Lernbereitschaft verbinden	45
5.1.2	Infrastrukturen, Institutionen und Kompetenzen als Voraussetzungen stärken.....	46
5.1.3	Gezielte Exnovation fossiler Strukturen.....	47
5.1.4	Wirtschaftlichkeit politisch und unternehmerisch ermöglichen	48
5.1.5	Den Wandel kommunikativ erhellen	49
5.2	Methodische Limitationen und Ausblick	50
	Quellen.....	52
	Anhang.....	56
	Anhang A: Fallprofil Teil 1: Eckdaten und Diffusionsstand	56
	Anhang B: Fallprofil Teil 2: Codesystem zur Erhebung der Einflussfaktoren	56

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für 29 Energiewendetechnologien	2
Abbildung 2: Strukturbild eines transformierten klimaneutralen Energiesystems im Überblick	5
Abbildung 3: Kumulierte durchschnittliche Diffusionsdynamik aller 29 Fälle	14
Abbildung 4: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für 29 Energiewendetechnologien	32
Abbildung 5: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für 29 Energiewendetechnologien (grün) im Vergleich zu einer branchenübergreifenden Stichprobe von 130 Umweltinnovationen (rot)	33
Abbildung 6: Durchschnittliche Bewertung der einzelnen Faktoren nach drei Gruppen von Fällen	35
Abbildung 7: Durchschnittliche Bewertung der 22 Faktoren nach Technologie-Gruppen	38
Abbildung 8: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für 29 Energiewendetechnologien	39
Abbildung 9: Weltweite Investitionen in die Transformation des Energiesystems 2004 bis 2023	44

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Untersuchte Fälle in der Diffusionsanalyse	6
Tabelle 2: Einbindung der Einzeltechnologien in das Energiesystem	12
Tabelle 3: Merkmale zur Beschreibung der Innovation und ihres Verbreitungsgrades	56
Tabelle 4: Einflussfaktoren und Codierung der Diffusionsanalyse	56

SUMMARY (DE)

Im Rahmen der Transferplattform des Forschungsprogramms „Transformation des Energiesystems Niedersachsen“ (TEN.efzn) untersucht das Teilprojekt I.2 die Diffusionsbedingungen von Energiewendetechnologien. In diesem Kontext wurden Diffusionspfadanalysen von 29 Energiewendetechnologien aus den Technologiefeldern Stromversorgung, Wärmeversorgung, Smart Technology sowie Wasserstoff und CO₂ durchgeführt und in vier Materialbänden dokumentiert. Die vorliegende Studie wertet die Diffusionspfadanalysen technologiefeldübergreifend aus. Hierzu werden übergeordnete Treiber wie funktionale Vorteile, engagierte Branchenverbände und etablierte Anbieter, aber auch Hemmnisse wie Fachkräfteengpässe und fossile Pfadabhängigkeiten identifiziert. Zudem werden die untersuchten Technologien auf Basis ihres aktuellen Verbreitungsgrads und ihrer Diffusionsdynamik als „Poor Dogs“, „Missing X“ und „Stars“ der Energiewende gruppiert. Darauf aufbauend werden gruppen- und technologiefeldspezifische Handlungsoptionen abgeleitet und übergeordnete Erfolgsfaktoren für die Verbreitung von Energiewendeinnovationen in Politik, Wirtschaft und Forschung herausgearbeitet. Diese Erfolgsfaktoren bestehen insbesondere darin, klare politische Leitplanken mit Lernbereitschaft zu verbinden, technische, soziale und organisatorische Voraussetzungen für den Ausbau erneuerbarer Energien zu schaffen, die Exnovation fossiler Strukturen gezielt zu gestalten, Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen und die Energiewende durch adressatengerechte und faktenbasierte Kommunikation zu begleiten.

SUMMARY (EN)

As part of the transfer area of the research programme “Transformation des Energiesystems Niedersachsen” (TEN.efzn; English: “Transformation of Lower Saxony’s Energy System”), subproject I.2 examines the diffusion conditions of energy transition technologies. In this context, diffusion path analyses were conducted for 29 energy transition technologies in the fields of electricity supply, heat supply, smart technologies, and hydrogen and CO₂. The results were documented in four volumes. This study evaluates the diffusion path analyses across all technology fields. To this end, overarching drivers such as functional advantages, committed industry associations and established providers are identified, along with barriers such as skills shortages and fossil path dependencies. In addition, the investigated technologies are grouped as “Poor Dogs”, “Missing X” and “Stars” of the energy transition based on their current degree of diffusion and their diffusion dynamics. Building on this, group- and technology-field-specific options for action are derived, and overarching success factors for the diffusion of energy transition innovations in policy, business and research are identified. These success factors consist in particular of combining clear political guidelines with a willingness to learn, creating the technical, social and organisational conditions for the expansion of renewable energies, deliberately shaping the exnovation of fossil structures, enabling economic viability, and supporting the energy transition through target-group-oriented and fact-based communication.

1 Einleitung

Ein sich zusehends erwärmendes Klima, wachsende Energieabhängigkeiten und Versorgungsrisiken sowie der rasche technologische Fortschritt und das Zielbild einer klimaneutralen Wirtschaft bis 2045 machen die Transformation des Energiesystems zu einer zentralen Zukunftsaufgabe für Deutschland und Europa. Um das Bundesland Niedersachsen langfristig als leistungsfähigen Standort dieser Transformation zu positionieren, unterstützt Niedersachsen im Rahmen des Forschungsprogramms TEN.efzn gezielt die Erforschung und Entwicklung praxisnaher Lösungen für die technischen und gesellschaftlichen Herausforderungen der Energiewende.

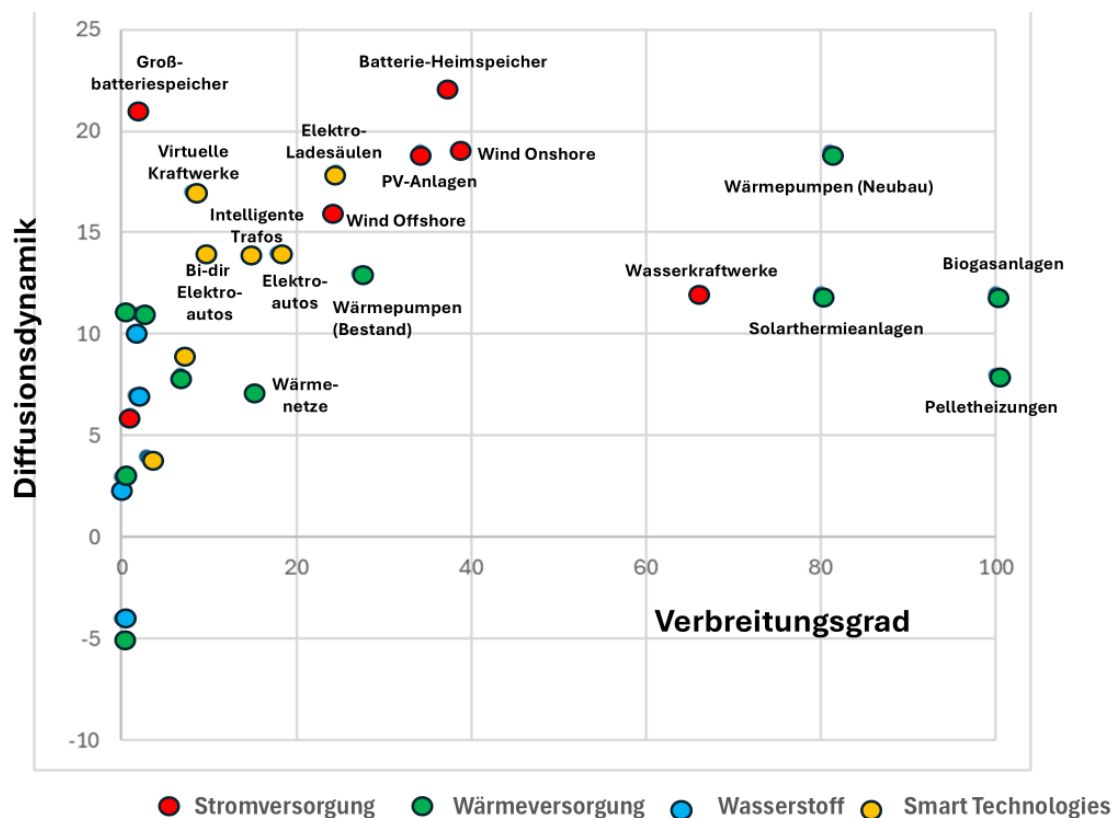
Damit Energiewendetechnologien wie Smart Meter, Photovoltaikanlagen und große Batteriespeicher ihre transformatorische Wirkung entfalten können, genügt ihre technische Verfügbarkeit und Adoption durch einzelne Vorreiter allein nicht – entscheidend ist ihre breite, gesellschaftliche Diffusion¹. Aus Sicht der Diffusionsforschung (Clausen & Fichter, 2021; Rogers, 2003) bedeutet dies einerseits, dass fossile Pfadabhängigkeiten überwunden und klimaschädliche Technologien verdrängt werden müssen, und andererseits, dass neue Energiewendetechnologien eine breite Akzeptanz und Anwendung finden sowie in sozio-kulturelle, wirtschaftliche und politische Strukturen integriert werden müssen. Erst wenn die Technologien von einer kritischen Masse übernommen werden und sich in alltäglichen Praktiken, Geschäftsmodellen und regulatorischen Rahmensetzungen verankern, entfalten sie eine systemische Wirkung und werden Teil einer Transformation des Energiesystems.

Im Teilprojekt I.2 „Innovations- und Diffusionspfadanalysen Energietechnologien“, welches als Grundlagenarbeit im Rahmen des Transferbereichs des TEN.efzn Forschungsprogramms fungiert, ergänzen wir die Forschung über innovative und leistungsfähige Energietechnologien um eine Analyse ihrer sozio-technischen Erfolgsbedingungen. Zu diesem Zweck wurden 29 ausgewählte Energietechnologien, die Bedeutung für die Transformation des Energiesystems in Niedersachsen haben, mit Hilfe der Methodik der Diffusionspfadanalyse (Clausen & Fichter, 2019; Fichter & Clausen, 2013, 2021) untersucht. Aufgrund ihrer Bedeutung und Zielsetzung im Kontext der Transformation des Energiesystems bezeichnen wir sie im Rahmen dieser Arbeit als „Energiewendetechnologien“. Die untersuchten Technologien lassen sich vier Technologiefeldern zuordnen – Stromversorgung, Wärmeversorgung, Smart Technology sowie Wasserstoff und CO₂ – und spiegeln damit die sozio-technische Breite der Energiewende wider. Die Ergebnisse der durchgeführten Diffusionspfadanalysen sind den vier Technologiefeldern entsprechend in vier Materialbänden dokumentiert (Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d). Die vorliegende Studie bildet nun den übergeordneten Abschluss der im Teilprojekt I.2 durchgeführten Diffusionspfadanalysen. Ziel ist es, technologiefeldübergreifende Erfolgsfaktoren der Verbreitung von Energiewendetechnologien herauszuarbeiten, die gewonnenen Erkenntnisse in gesellschafts- und energiepolitische Zusammenhänge einzuordnen und daraus zentrale Handlungsempfehlungen für Politik und Praxis abzuleiten.

¹ Der in der Innovations- und Transformationsforschung gängige Fachterminus der „Diffusion“ wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit dem umgangssprachlichen Begriff der „Verbreitung“ gleichgesetzt. Beide Begriffe werden synonym verwendet.

Zum Einstieg in die Materie zeigt die folgende Abbildung 1 die Ergebnisse sämtlicher 29 Diffusionspfadanalysen, indem sie zu jeder Technologie den jeweils ermittelten *Verbreitungsgrad* auf der X-Achse und die *Diffusionsdynamik* auf der Y-Achse festhält. Dem Ansatz der Diffusionspfadanalyse nach Clausen und Fichter (2019) sowie Fichter und Clausen (2013, 2021) folgend, stellt die Diffusionsdynamik hierbei den kumulierten Wert, der sich aus den Einzelbewertungen von 22 relevanten Einflussfaktoren (z. B. Wirtschaftlichkeit, Verhaltensänderungen, institutionelle Hemmnisse) ergeben hat, dar.

Abbildung 1: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für 29 Energiewendetechnologien



Quelle: Eigene Darstellung (basierend auf Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d).

Die oben dargestellte, auf 29 einzelnen Diffusionspfadanalysen aufbauende Darstellung bietet einen kompakten Überblick darüber, wo die einzelnen Technologien im Diffusionsprozess stehen (Verbreitungsgrad) und welche Dynamik ihre Verbreitung aktuell aufweist (Diffusionsdynamik).

Um auf dieser Grundlage Handlungskontexte und Empfehlungen zur Stärkung der Energiewende herauszuarbeiten, gliedert sich die vorliegende Studie wie folgt: Kapitel 2 stellt das methodische Vorgehen zur Erstellung von Diffusionsprofilen mittels der Diffusionspfadanalyse vor und erläutert die Auswahl der untersuchten Fälle beziehungsweise Technologien. Kapitel 3 wertet die 29 Diffusionsprofile zusammenfassend aus, indem zentrale Einflussfaktoren wie relativer Vorteil und Qualifizierung technologieübergreifend betrachtet werden. Kapitel 4 führt die Analyse weiter und leitet konkrete Handlungsoptionen ab. Dazu wird einerseits der Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Diffusions-

faktoren und dem Verbreitungsgrad untersucht, um Unterschiede zwischen weniger und stärker verbreiteten Technologien sichtbar zu machen. Andererseits werden die vier Fallgruppen Stromversorgung, Wärmeversorgung, Smart Technologies sowie Wasserstoff und CO₂ verglichen, um feldspezifische Handlungsoptionen abzuleiten. Kapitel 5 zieht schließlich ein übergeordnetes Fazit und formuliert Erfolgsfaktoren für die Verbreitung von Energiewendetechnologien, die sich sowohl an Forschende als auch an politische und wirtschaftliche Akteure richten.

2 Methodik: Diffusionspfadanalysen ausgewählter Energiewendetechnologien

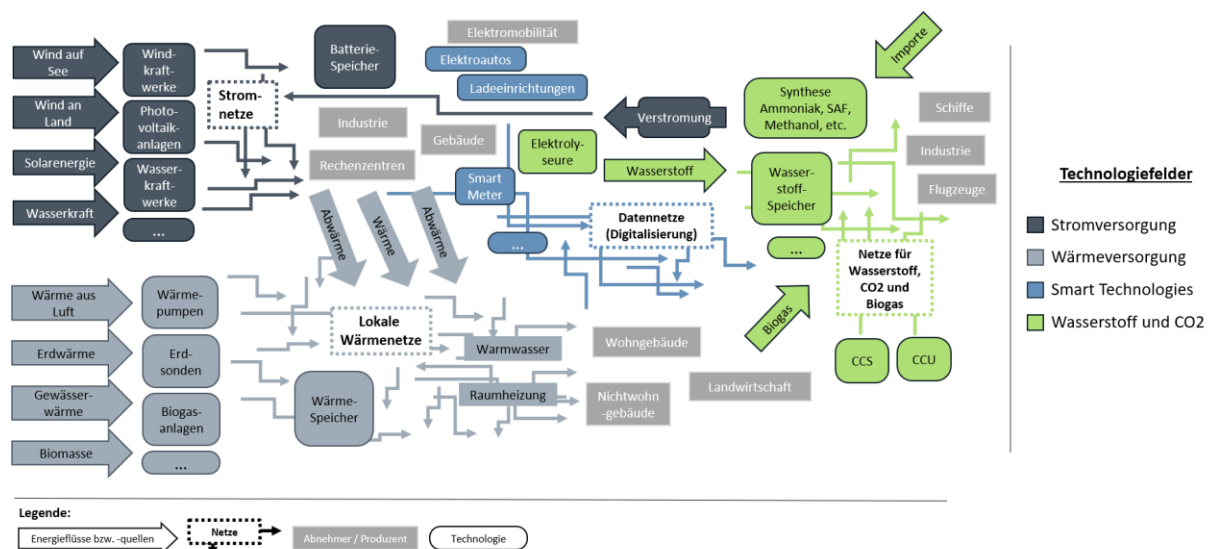
Der Prozess der Verbreitung von Innovationen in der Gesellschaft ist seit Jahren Gegenstand der Diffusionsforschung (Gruber, 2020; Hojnik & Ruzzier, 2016; Rogers, 2003). Eine erprobte Methode dieses Forschungsfeldes ist die Diffusionspfadanalyse, mit der sich die Diffusionsdynamik und Verbreitung ausgewählter Innovationen gezielt untersuchen lassen (Fichter & Clausen, 2013). Um diese Methode im Rahmen des Teilprojekts I.2 „Innovations- und Diffusionspfadanalysen Energietechnologien“ des Transferbereichs des TEN.efzn Forschungsprogramms gezielt anzuwenden, wurde zunächst ein Zielbild eines zukünftigen, klimaneutralen Energiesystems entwickelt. Innerhalb dieses Zielbildes konnten 29 relevante Energiewendeinnovationen identifiziert werden, die anschließend mittels Diffusionspfadanalyse untersucht wurden.

2.1 Fallauswahl im Zielbild eines transformierten Energiesystems

Um die Dynamiken der sich entfaltenden Energiewende insgesamt erfassen zu können, ist es erforderlich, die gesamte Wertschöpfungskette des Energiesystems – zumindest ausschnittsweise – in den Blick zu nehmen. Es sollten also Technologien der Energiegewinnung, des Transports, der Speicherung und des Verbrauchs analysiert werden. Zudem ist es wesentlich, vom Zielbild eines zukünftigen, durch die Energiewende transformierten Energiesystems auszugehen, das sich durch Treibhausgasneutralität (Klimaneutralität), Versorgungssicherheit und Resilienz, Effizienz, Bezahlbarkeit, soziale Tragfähigkeit und industrielle Wettbewerbsfähigkeit auszeichnet. Nur so können jene Innovationen, die im Kontext des anvisierten Energiesystems von Relevanz sind, identifiziert und hinsichtlich ihrer Diffusionshemmnisse, -treiber und -potenziale untersucht werden.

Abbildung 2 skizziert das dieser Studie zugrundeliegende technische Strukturbild eines transformierten Energiesystems – einschließlich der für die Strom, Wärme und Gas- bzw. Treibstoffversorgung notwendigen Technologien und ihrer gegenseitigen Verknüpfungen bzw. Abhängigkeiten. Die Abbildung stützt sich auf verschiedene Vorarbeiten der Autoren. Zu nennen sind hier insbesondere ein im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeiteter Überblick über für die Transformation des Energiesystems relevante Einzeltechnologien (Fichter & Clausen, 2021), Forschungsarbeiten zu den Dynamiken der Transformation des Energiesystems mit Fokus auf Strom- und Wärmeversorgung (Clausen, 2019a, 2019b; Clausen & Beucker, 2019a, 2019b) sowie Analysen des Technologiefelds Wasserstoff (Clausen, 2022; Kern, Schmelzle, Clausen, et al., 2023; Kern, Schmelzle & Hummel, 2023).

Abbildung 2: Strukturbild eines transformierten klimaneutralen Energiesystems im Überblick



Quelle: Eigene Darstellung.

Wie in Tabelle 1 aufgeführt, wurden vor dem Hintergrund des Ziel- und Strukturbildes eines transformierten Energiesystems 29 Energiewendelösungen (inkl. Varianten) für tiefergehende Diffusionsanalysen ausgewählt. Diese 29 Energieinnovationen wurden in vier Gruppen bzw. Technologiefelder eingeordnet. Die Zuordnung zu den Gruppen war in den meisten Fällen eindeutig. Die Energiegenossenschaften wurden als einzige soziale Innovation in unserem Sample der Stromversorgung zugeordnet, weil etwa drei Viertel der Energiegenossenschaften sich mit der Produktion und Vermarktung von Strom beschäftigen und nur ein Viertel mit Wärme (DGRV, 2024). Bei den restlichen 28 Energieinnovationen handelt es sich um technische Ansätze, die hier als Energiewendetechnologien bzw. technische Innovationen gefasst werden.

Die detaillierten Ergebnisse der 29 fallbasierten Diffusionsanalysen sind – entsprechend den vier Technologiefeldern – in vier Bänden dokumentiert. Die folgenden vier Bände bilden somit – sofern nicht ausdrücklich andere Quellen genannt werden – die primäre Grundlage sämtlicher in der vorliegenden Studie getroffenen Aussagen:

- Band 1: Stromversorgung (Froese & Clausen, 2026a)
- Band 2: Wärmeversorgung (Froese & Clausen, 2026b)
- Band 3: Smart Technology (Froese & Clausen, 2026c)
- Band 4: Wasserstoff und CO₂ (Froese & Clausen, 2026d)

Tabelle 1: Untersuchte Fälle in der Diffusionsanalyse

Technologiefeld	Angesprochene TEN.efzn Forschungsplattformen	Untersuchte Fälle bzw. Energiewendetechnologien
Stromversorgung	• FP 1: Wind • FP 3: Digitalisierung	• Windkraftwerke an Land • Offshore-Windkraftanlagen • Photovoltaikanlagen • Wasserkraftwerke • Energiegenossenschaften • Große Batteriespeicher • Batterie-Heimspeicher
Wärmeversorgung	• FP 4: Geoenergiesysteme • FP 5: Wärme	• Wärmepumpen für Neubauten und Ein- und Mehrfamilienhäuser im Bestand • Betrieb warmer Wärmenetze • Erdsonden und Erdsondenfelder für Wärmepumpenanlagen • Hochtemperatur-Wärmepumpen • Großwärmepumpen in Wärmenetzen • Biogasanlagen • Pelletheizungen • Solarthermieranlagen • Langzeitwärmespeicher
Smart Technology	• FP 3: Digitalisierung	• Intelligente Transformatoren • Betrieb virtueller Kraftwerke • Elektroautos (ohne und mit bi-direktionalem Laden) • Ladeeinrichtungen für die Elektromobilität • Smart Meter • Dynamische Stromtarife
Wasserstoff und CO ₂	• FP 2: Wasserstoff	• Elektrolyseure • Brennstoffzellen (Wasserstoff und Methanol) • 100 % H₂-Ready Heizthermen (H₂-Thermen) • Abscheidung von CO₂ (Carbon Capture)

Bei der Auswahl der 29 untersuchten Fälle spielten – neben dem in Abbildung 2 skizzierten Zielbild eines transformierten Energiesystems sowie der pragmatischen Restriktion, dass die vorhandene Arbeitszeit für etwa 25 bis 30 Fällen ausreichte – zwei Faktoren eine wesentliche Rolle.

Erstens erfolgte die Auswahl der 29 untersuchten Fälle im Kontext des übergeordneten TEN.efzn Forschungsprogramms, welches sich aus sechs Forschungsplattformen und der Transferplattform zusammensetzt. Ein zentrales Ziel unserer Diffusionspfadanalysen, die Teil der Grundlagenforschung im Rahmen der Transferplattform sind, besteht darin, die Arbeiten der sechs TEN.efzn Forschungsplattformen zu unterstützen. Zu diesem Zweck wurden deren thematische Schwerpunkte in der Fallauswahl berücksichtigt. Tabelle 1 führt dementsprechend in der mittleren Spalte jene Forschungsplattformen auf, die durch die jeweiligen Technologiefelder bzw. durch die Energiewendetechnologien und die entsprechenden Diffusionsprofile besonders angesprochen werden. Die Forschungsplattform

6 „Soziale Dynamiken der Energietransformation“ wird hier nicht aufgeführt, da sie sich keiner spezifischen Technologie bzw. keinem einzelnen Technologiefeld zuordnen lässt.

Zweitens enthält Abbildung 2 einzelne Technologien, die zwar für das transformierte Energiesystem notwendig sind, sich jedoch nicht für eine Diffusionspfadanalyse eignen. Da Diffusionsanalysen untersuchen, wie sich in großer Stückzahl produzierte Produkte oder Dienstleistungen in verschiedenen Anwendergruppen verbreiten, setzt die Methode ausreichende Verkaufszahlen sowie Anwenderinnen und Anwender voraus. Diese Bedingung ist beispielsweise im Kontext des Stromnetzes meist nicht erfüllt. Trotz seiner formalen und rechtlichen Aufteilung in Übertragungs- und Verteilnetze, ist das Stromnetz ein technisch funktional zusammenhängendes System. In diesem lassen sich nur begrenzt einzelne Produkte oder Dienstleistungen, die in großer Stückzahl verbreitet werden können, individuell betrachten. Lediglich drei Komponenten des Stromnetzes (intelligente Trafos, Smart Meter und dynamische Stromtarife) wurden daher in der Analyse aufgegriffen. Ähnliches gilt für das Datennetz, welches für die Energiewirtschaft unverzichtbar ist. Des Weiteren ist für Technologien wie die Fischer-Tropsch-Synthese oder die CO₂-Endlagerung angesichts der erwartbar geringen Zahl benötigter Anlagen kein relevanter Verbreitungsprozess zu erwarten, sodass sie ebenfalls nicht sinnvoll diffusionsanalytisch untersucht werden können.

2.2 Diffusionspfadanalyse

Die in diesem Projekt angewendete Forschungsmethode ist die Diffusionspfadanalyse, die qualitative und quantitative Forschungselemente miteinander kombiniert und auf jede der 29 identifizierten Energiewendetechnologien bzw. -innovationen angewendet wurde. Sie wurde im Projekt „Diffusionspfade von Umweltinnovationen“ auf Basis einer breiten Literaturanalyse entwickelt (Clausen, Fichter & Winter, 2011; Fichter & Clausen, 2013) und im Rahmen des vom Umweltbundesamt beauftragten Projektes „Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy“ (Clausen & Fichter, 2019) weiterentwickelt. In den folgenden Absätzen wird die Methode kurz erläutert. Weiterführende Darstellungen finden sich in den Materialbänden, die der vorliegenden übergeordneten Auswertung zugrunde liegen (Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d).

Der Methodik von Clausen und Fichter (2019) folgend, besteht der Ansatz der Diffusionspfadanalyse im Kern darin, dass auf Basis von Sekundärquellen für jeden untersuchten Innovationsfall ein individuelles, qualitatives Fall- bzw. Diffusionsprofil nach einem standardisierten Schema erstellt wird. Dieses Schema umfasst zunächst zentrale Eckdaten zum Innovationsgegenstand und zu seiner bisherigen Diffusion. Zu den Eckdaten zählen eine einführende Beschreibung der Innovation sowie Darstellungen der Markteinführung und der Einbindung in ein umgebendes Technologiesystem. Zudem wird der Diffusionsstand und -verlauf dargestellt. Der aktuelle Diffusionsstand wird hierbei über die Variable „Verbreitungsgrad“ als prozentuale Marktdurchdringung operationalisiert. Hierzu werden – abhängig von Innovations- und Marktcharakter – eine geeignete Bezugsgröße (z. B. Gesamtmarkt oder politische Ausbauziele) sowie eine passende Diffusionsgröße (z. B. aktueller Bestand, jährlicher Absatz) festgelegt. Die Merkmale dieses ersten Teils des Fallprofils sind in Anhang A festgehalten.

Im zweiten Teil umfasst das Fallprofil ein Codesystem aus 22 potenziell relevanten Einflussfaktoren, die den Diffusionsverlauf beeinflussen können. Diese Faktoren gliedern sich in produktbezogene, adopterbezogene, anbieterbezogene, branchenbezogene, politische und pfadbezogene Faktoren. Da

Innovationen nicht direkt befragt werden können, werden die Ausprägungen der 22 Einflussfaktoren in einem mehrköpfigen Forschungsteam auf Basis von Sekundärquellen qualitativ hergeleitet und anschließend ordinalen 3er- bzw. 5er-Skalen (0 bis +2 bzw. -2 bis +2) codiert bzw. eingeordnet. Die Codierungen werden zunächst individuell vorgenommen und anschließend im Forschungsteam abgeglichen, um intersubjektive Nachvollziehbarkeit und eine annähernde Interrater-Reliabilität sicherzustellen. Die Codierung folgt dem Nullhypothesenprinzip: Standardmäßig wird je Faktor ein Einfluss von 0 angenommen; nur bei eindeutig belegbarer Evidenz erfolgt eine Bewertung als förderlich (1/2) oder hemmend (-1/-2). Abschließend wird aus den 22 Einzelbewertungen durch einfache Addition der ordinale Spitzenindikator „Diffusionsdynamik“ als Summenindex gebildet. Das vollständige Codesystem zur Erhebung der Einflussfaktoren ist in Anhang B hinterlegt.

Da der Verbreitungsgrad, die Codierungen bzw. Faktorbewertungen sowie der Spitzenindikator „Diffusionsdynamik“ für eine Vielzahl von Innovationen erhoben werden², entsteht im Ergebnis ein Datensatz, der qualitatives Material systematisch quantifiziert. Dies macht die gewonnenen Daten für deskriptive statistische Auswertungen sowie Querschnittsvergleiche zwischen Innovationsfällen zugänglich, ohne einen Kausalitätsanspruch zu erheben.

² Im Falle dieses Projektes sind es 29 Energiewendetechnologien.

3 Zusammenfassende Auswertung der Diffusionspfadanalyse von 29 Energiewendetechnologien

3.1 Gruppierung und Charakterisierung der Energiewendetechnologien

Basierend auf den durchgeführten Diffusionspfadanalysen lassen sich Energiewendetechnologien entlang verschiedener deskriptiver Dimensionen gruppieren und charakterisieren. Zu diesen Dimensionen zählen das Technologiefeld, die ersten Anbieter, der aktuelle Diffusionsstand und -verlauf sowie die Einbettung der jeweiligen Technologie in das Energiesystem.

3.1.1 Einordnung nach Technologiefeldern

Wie bereits im Methodenteil (Kapitel 2.1) dargestellt, können die 29 untersuchten Energiewendetechnologien in vier Technologiefeldern aufgeteilt werden: Stromversorgung, Wärmeversorgung, Smart Technology sowie Wasserstoff und CO₂. Diese vier Technologiebereiche unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich ihrer Funktion im Energiesystem sowie ihrer technischen, physikalischen und chemischen Grundlagen. So dienen Technologien der Strom- und Wärmeversorgung vor allem der Energiebereitstellung, während Smart Technologies auf digitale Steuerung und Systemintegration zielen und Wasserstoff- und CO₂-Technologien chemisch-technische Umwandlungsprozesse adressieren. Tabelle 1 auf Seite 6 ordnet die 29 Energiewendetechnologien diesen vier Technologiefeldern zu.

3.1.2 Einordnung nach ersten Anbietern

Innovationen im Energiesystem gehen teilweise auf etablierte Unternehmen, teilweise auf Start-ups zurück, die diese am Markt eingeführt haben. Einige Innovationen sind einigermaßen zeitgleich auf mehrere Ursprungsunternehmen zurückzuführen. Welche Unternehmen wir jeweils als erste Anbieter identifiziert haben, ist den vier Bänden von Fallprofilen (Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d) zu entnehmen.

Als Innovationen, deren Markteinführung auf neu gegründete Unternehmen zurückgehen, sehen wir:

- Energiegenossenschaften
- Batterie-Heimspeicher
- Biogasanlagen
- Pelletheizungen
- Langzeitwärmespeicher
- Virtuelle Kraftwerke
- Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge
- Dynamische Stromtarife

Auf etablierte Unternehmen als erste Anbieter gehen zurück:

- Offshore-Windkraftanlagen
- Wasserkraftwerke
- Erdsonden sowie Erdsondenfelder für Wärmepumpen
- Wärmenetze
- Hochtemperatur-Wärmepumpen
- Großwärmepumpen

- Elektrolyseure
- Brennstoffzellen
- H₂-Thermen
- CO₂-Abscheidung
- Intelligente Transformatoren
- Smart Meter

Auf beide, also sowohl neue wie etablierte Unternehmen, lassen sich zurückführen:

- Onshore-Windkraftanlagen
- Photovoltaikanlagen
- Große Batteriespeicher
- Wärmepumpen für Neu- und Bestandsbauten
- Solarthermieranlagen
- Elektroautos mit und ohne bi-direktionales Laden

Viele Innovationen im Energiesystem gehen ausschließlich (12) oder anteilig (6) auf etablierte Unternehmen zurück. Aber auch Start-ups haben durch ihre Aktivität wesentliche Innovationen beigetragen. Ausschließlich trifft dies auf acht Innovationen zu, anteilig auf sechs. Auffällig ist, dass alle drei untersuchten Dienstleistungen (Energiegenossenschaften, Virtuelle Kraftwerke, Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge) von Start-ups in den Markt eingeführt wurden. Zudem wird bei genauerer Betrachtung klar, dass z.B. Photovoltaikanlagen zwar in industriellem Maßstab zunächst von Großunternehmen wie z.B. Sharp hergestellt wurden, ihre Nutzbarmachung für die Energiewende aber oft in der Hand kleiner Marktakteure lag.

3.1.3 Einordnung nach Verbreitungsgrad

Die untersuchten Technologien der Energiewende sind zu einem großen Teil (19 von 29) im Massenmarkt angekommen. Hierbei ist allerdings zu unterscheiden, ob die quantitative Verbreitung weitgehend ausgeschöpft und tendenziell sogar rückläufig ist – dies ist beispielsweise bei Wasserkraft, Biogasanlagen, und Pelletheizungen der Fall – oder ob Technologien zwar im Massenmarkt angekommen sind aber weiterhin eine klare Wachstumsdynamik aufweisen. Zu letzteren zählen unter anderem Wärmepumpen, Photovoltaik, Onshore-Windkraftwerke und Heimspeicher.

Zudem scheinen sich weitere Produkte und Dienstleistungen auf dem Weg in den Massenmarkt zu befinden. Dies sind große Batteriespeicher, Großwärmepumpen in Wärmenetzen, Smart Meter, Elektrolyseure, Anlagen zur CO₂-Abscheidung (Carbon Capture) und dynamische Stromtarife.

Nur fünf der von uns untersuchten Produkte und Dienstleistungen verbleiben bislang in Marktnischen und lassen auf Grundlage der Absatzzahlen keine eindeutige Entwicklungstendenz erkennen. Dies sind Energiegenossenschaften, Langzeitwärmespeicher, Brennstoffzellen, H₂-Thermen bzw. „Wasserstoff-Ready“ Heizthermen und Hochtemperatur-Wärmepumpen.

Bei den *Energiegenossenschaften* ist z.B. festzustellen, dass es um die Jahre 2012 und 2023 zwei Gründungswellen gab. Zwei Untersuchungen auf Basis von Daten aus den Jahren 2014 (Clausen & Beucker, 2016) und 2023 (Dannemann, 2025; DZ Bank, 2023, 2024) zeigen jedoch, dass Genossenschaften jeweils lediglich rund 1 % der Gesamtinvestitionen der Energiewende zugeordnet werden

konnten. Gemessen an den Gesamtinvestitionen der Energiewende scheinen Genossenschaften damit ein Nischenphänomen zu bleiben. Vor dem Hintergrund der derzeitigen regulatorischen, finanziellen und marktlichen Rahmenbedingungen deutet wenig darauf hin, dass sich die Diffusionsdynamik kurzfristig deutlich beschleunigt. Diese Einordnung ist jedoch abhängig von der Entwicklung des Gesamtinvestitionsvolumens der Energiewende (historisch und künftig).

Ähnlich wird mit *Langzeitwärmespeichern* seit Jahrzehnten experimentiert. Ob dieser hohe Aufwand zu Erstellung und Betrieb jemals zur Entstehung eines Massenmarktes führt, erscheint derzeit jedoch unsicher.

Gleichermaßen gehen wir auch mit Blick auf *Brennstoffzellen* nicht von einem zeitnahen Ausbruch aus der Nische aus. Über fast zwei Jahrzehnte wurde ihre breite Marktdiffusion im Bereich der Mobilität erwartet. Die Zahl der Wasserstoff-PKW ist in Deutschland jedoch auf einem sehr niedrigem Niveau und zuletzt auch wieder rückläufig (KBA, 2026). Parallel dazu sinkt auch die Zahl der H₂-Tankstellen – nicht nur in Deutschland – rasch (Handelsblatt, 2026). Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass Brennstoffzellen eher eine Nische in der stationären Energieversorgung einnehmen werden.

Ob *Wasserstoff-Ready Heizthermen* überhaupt jemals in großen Stückzahlen Wasserstoff verbrennen werden, ist bis auf weiteres offen.

Im Kontrast zu den vorherigen Fällen gehen wir hinsichtlich *Hochtemperatur-Wärmepumpen* davon aus, dass diese mit steigenden CO₂-Preisen zukünftig schnell in den Massenmarkt vorrücken könnten.

3.1.4 Einordnung im Energietechnologiesystem

Für jeden analysierten Fall wurden Überlegungen angestellt, mit welchen anderen analysierten Technologien die jeweilige Fokustechnologie entweder Upstream (also Richtung Energiequelle) oder Downstream (also Richtung Energieverbrauch) verbunden ist oder Synergien entwickelt. Das Ergebnis dieser Überlegungen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Einbindung der Einzeltechnologien in das Energiesystem

		Stromversorgung						Wärmeversorgung										Smart Technology					Wasserstoff & CO2			Mit wie vielen Technologien hängt die Fokustechnologie zusammen?	Mit wie vielen Technologien hängen Technologien des Technologiefelds im Durchschnitt zusammen?					
		Wind Onshore	Wind Offshore	PV-Anlagen	Wasserkraftwerke	Energiegenossenschaft	Batteriespeicher	Heimspeicher	Wärmepumpen Neubau	Wärmepumpen Bestand	Erdsonden	Sondenfelder	Wärme Wärmenetze	Hochtemperatur WP	Großwärmepumpen	Biogasanlagen	Pellettheizungen	Solarthermieanlagen	Langzeitwärmespeicher	Elektroautos	Elektroautos bi-dir	Int. Transformatoren	Virt. Kraftwerke	Ladeeinrichtungen	Smart Meter	Dyn Stromtarife	Elektrolyseure	Brennstoffzellen	H2-Thermen	CO2-Abscheidung		
Stromversorgung	Wind Onshore						1	1	1	1				1	1					1	1	1	1	1	1	1	1				14	8,6
	Wind Offshore						1	1	1	1				1	1					1	1	1	1	1	1	1	1				14	
	PV-Anlagen						1	1	1	1				1	1					1	1	1	1	1	1	1	1				14	
	Wasserkraftwerke																														0	
	Energiegenossenschaft	1	1	1	1		1	1					1		1	1															9	
	Batteriespeicher	1	1	1	1																1	1									6	
Heimspeicher				1																					1	1					3	
Wärmeversorgung	Wärmepumpen Neubau	1	1	1	1		1	1			1	1									1	1	1	1							12	6,1
	Wärmepumpen Bestand	1	1	1	1		1	1				1	1								1	1		1	1						12	
	Erdsonden								1	1																					2	
	Sondenfelder								1	1																					2	
	Wärme Wärmenetze	1	1	1	1		1	1				1				1	1		1	1		1	1		1	1					15	
	Hochtemperatur WP	1	1	1	1		1																								5	
	Großwärmepumpen	1	1	1	1		1									1					1	1		1	1						10	
	Biogasanlagen															1							1								2	
	Pellettheizungen																1							1							0	
	Solarthermieanlagen								1	1			1																		4	
Langzeitwärmespeicher						1										1														3		
Smart Technology	Elektroautos	1	1	1	1		1	1														1		1							8	9,6
	Elektroautos bi-dir	1	1	1	1		1	1															1	1	1	1					10	
	Int. Transformatoren								1	1			1	1	1						1	1		1	1	1	1				13	
	Virt. Kraftwerke	1	1	1			1		1	1			1	1	1						1			1	1	1	1				14	
	Ladeeinrichtungen	1	1	1	1		1														1	1	1			1	1				11	
	Smart Meter	1	1	1					1			1									1	1									8	
	Dyn Stromtarife						1		1												1					1					3	
Wasserstoff & CO2	Elektrolyseure	1	1	1	1		1						1		1				1									1	1	1	11	3,3
	Brennstoffzellen																										1				1	
	H2-Thermen																										1				1	
	CO2-Abscheidung																														0	
Wie viele Technologien benötigen die Fokustechnologie?		13	13	14	11	2	15	10	9	9	2	3	9	5	8	2	0	2	3	6	6	12	11	7	13	13	7	1	1	0		
Wie viele Technologien benötigen Technologien des Technologiefelds im Durchschnitt?		11,1						4,7						9,7					2,3													

Quelle: Eigene Darstellung. Eine 1 steht überall dort, wo die Technologie in der linken Spalte (der entsprechenden Zeile) entweder auf die Technologie der jeweiligen Spalte angewiesen ist oder von ihr profitiert bzw. Synergien entwickelt.

Am stärksten mit anderen Technologien verknüpft (waagerechte Summe) sind die Technologien der Digitalisierung (Smart Technologies) mit durchschnittlich 9,6 verknüpften Technologien. Es folgen die Technologien der Stromversorgung mit 8,6 verknüpften Technologien sowie die Wärmeversorgungs-technologien mit 6,1 Verknüpfungen. Deutlich abgeschlagen liegen die Wasserstoff- und CO₂-Technologien mit 3,3 verknüpften Technologien.

Die stärkste Bedeutung für andere Technologien haben die Technologien der Stromversorgung mit durchschnittlich 11,1 Technologien, für die die jeweilige Technologie nützlich ist. Bei den Smart Technologies liegt dieser Wert bei 9,7 und bei den Wärmeversorgungstechnologien bei 4,7. Die Wasserstoff- und CO₂-Technologien bilden auch hier mit 2,3 Verknüpfungen das klare Schlusslicht.

Mit Blick auf die in Tabelle 2 ebenfalls angegebenen Zahlen abhängigen und verknüpften Technologien je Technologie fallen abschließend drei Gruppen ins Auge, die an klassische systemtheoretische Überlegungen zu zentralen Knotenpunkten, Integration (bzw. Sektorkopplung) und Peripherie des Energiesystems anschließen.

- **Zentraltechnologien:** Die Technologien dieser Gruppe bilden die zentralen Knotenpunkte des Energiesystems. Hierzu zählen Stromerzeugungstechnologien aus den Bereichen Wind und PV wie auch zentrale Technologien der Stromversorgung wie intelligente Transformatoren und virtuelle Kraftwerke. Diese Technologien sind sowohl „upstream“ mit zahlreichen anderen Technologien verknüpft als auch „downstream“ für die Funktion und das Wachstum vieler weiterer Technologien von zentraler Bedeutung.
- **Integrationstechnologien:** Die Technologien dieser Gruppe tragen oftmals zur Integration erneuerbarer Energien in ein flexibles, sektorübergreifend gekoppeltes Energiesystem bei. Hierzu zählen unter anderem große Batteriespeicher und Heimspeicher, Smart Meter und dynamische Stromtarife. Diesen Technologien ist gemeinsam, dass die Zahl der ‚downstream‘ abhängigen Technologien jeweils deutlich größer ist als die Zahl der ‚upstream‘ verknüpften Technologien.
- **Periphere Spezialtechnologien:** Zu den Technologien dieser Gruppe zählen Wasserstofftechnologien, CO₂-Abscheidung, Pelletheizungen und Biogasanlagen, aber auch Erdsonden und Sondenfelder. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur mit wenigen Technologien verknüpft sind und für die Sektorkopplung nur eine begrenzte Rolle spielen.

3.2 Deskriptive Auswertung der Einflussphären und -faktoren

Um die Dynamik der Energiewende systematisch zu erfassen, wurden – wie in Kapitel 2 dargestellt – 29 konkrete Energiewendetechnologien jeweils anhand von 22 Einflussfaktoren aus sechs zentralen Einflussphären (Produkt, Adopter, Anbieter, Branche, Politik und zurückliegender Diffusionspfad) analysiert (Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d).³ Im Folgenden geben wir zunächst einen Überblick darüber, welche fördernden und hemmenden Dynamiken sich über die 29 Einzelfälle und 22 Einflussfaktoren hinweg abzeichnen. Anschließend betrachten wir die Einflussphären und ihre jeweiligen Faktoren – erneut technologieübergreifend – im Einzelnen.

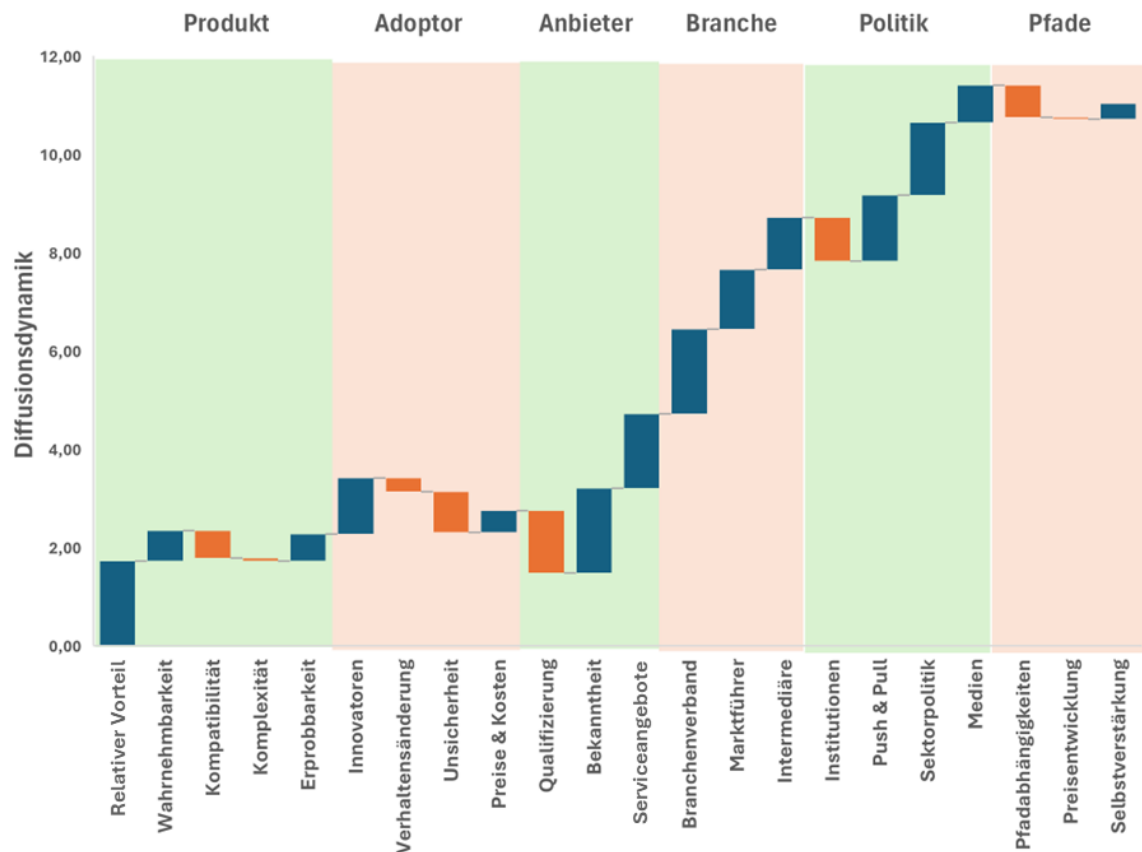
3.2.1 Überblick: Fördernde, bremsende, ambivalente und gestaltbare Faktoren

Die vergleichende Analyse der 29 Energiewendetechnologien zeigt, dass die Diffusion von Energiewendeinnovationen weder einheitlich förderlich noch durchgängig gehemmt verläuft. Eine sich auf breiter Front selbst verstärkende Dynamik kann somit bislang nicht angenommen werden. Vielmehr

³ Die zugrundeliegenden Bewertungen der einzelnen Faktoren wurden durch ein Codierteam aus zwei Personen, Autoren der Studie, durchgeführt. Die Codierung wurde im Verlauf des Jahres 2025 durchgeführt, in einer Zeit, in der der durch die Ampel-Koalition in die Energiewende hineingebrachte Schwung noch deutlich zu spüren war, in der aber auch die bremsenden Effekte des neuen Kanzlers und seiner Wirtschaftsministerin, die der Energiewende erkennbar mit Skepsis gegenüberstehen, bereits bemerkbar machten. Trotz aller Versuche, objektiv einzustufen, fließen in die Bewertung so immer wieder subjektive Hintergrundeinschätzungen ein.

ergibt sich ein differenziertes Bild aus fördernden, bremsenden sowie ambivalenten und teils gestaltbaren Einflussfaktoren. Die folgende Abbildung 3 stellt die untersuchten 22 Faktoren und ihre kumulierte durchschnittliche Wirkung im Überblick dar.

Abbildung 3: Kumulierte durchschnittliche Diffusionsdynamik aller 29 Fälle



Quelle: Eigene Darstellung.

Fördernde Faktoren

Insgesamt lassen sich neun Faktoren identifizieren, die im Durchschnitt die Verbreitung von Energiewendetechnologien wirksam fördern. Diese verteilen sich, wie im Folgenden dargestellt, auf die Bereiche Produkt, Adoptor, Anbieter, Branche und Politik. Im Bereich der Pfadentwicklungen hingegen konnten keine im Mittel eindeutig fördernden Faktoren festgestellt werden.

Im Bereich der *Produkteigenschaften* erweist sich insbesondere der **relative Vorteil**, den Technologien der Energiewende gegenüber ihren am Markt verfügbaren Wettbewerbstechnologien aufweisen, als ein im Durchschnitt stark fördernder Faktor. Auch wenn weitere Faktoren (Wahrnehmbarkeit und Erprobbarkeit) tendenziell ebenfalls förderlich wirken, sind Energiewendetechnologien in erster Linie funktionaler und nützlicher als ihre Vorgängertechnologien.

Mit Blick auf die *adoptorbezogenen* Faktoren erweist sich das Vorhandensein von Pionierkunden und Nutzer-**Innovatoren** häufig als entscheidender Einflussfaktor. Es gibt bzw. gab also häufig Gruppen

von Nutzer-Innovatoren, die im Zeitraum des Markteintritts erste Produkte trotz bestehender Unsicherheiten kauften und so dazu beigetragen haben, die Marktentwicklung in Gang zu bringen.

Seitens der *Anbieter* von Energiewendetechnologien wirken sich sowohl ihre **Bekanntheit** als auch umfassende **Serviceangebote** im Mittel förderlich auf die Marktdurchdringung aus. Hinsichtlich vieler Technologien boten bereits früh auch große Unternehmen die Produkte an, sodass Kundinnen und Kunden bei bekannten Anbietern mit hoher Reputation kaufen konnten. Aufgrund ihrer Erfahrung und Ressourcen sind diese Unternehmen häufig in der Lage, bereits frühzeitig vollständige Serviceangebote (z.B. Notfallservice, Wartungsarbeiten und Software-Updates) anzubieten und dadurch bestehende Unsicherheiten zu verringern.

Die übergeordneten Akteure der *Branche* erweisen sich insgesamt als überraschend förderlich: **Branchenverbände**, **Marktführer** und **Intermediäre** setzen sich, letztere oft mit staatlicher Unterstützung, für die Verbreitung der neuen Technologien im Markt ein.

Zuletzt spielen im Bereich der *Politik* insbesondere **staatliche Push- und Pull-Aktivitäten** sowie **Sektorpolitiken** eine fördernde Rolle. Politische Unterstützung gibt es durch Ordnungsrecht und Förderungen wie auch übergreifende Konzepte für die Strom- und Wärmeversorgung und den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft.

Bremssende Faktoren

Insgesamt lassen sich sechs Faktoren ausmachen, die die Diffusionsdynamik von Energiewendetechnologien hemmen. Diese verteilen sich auf die Einflussbereiche Produkt, Adopter, Anbieter, Politik und Pfad. Allein hinsichtlich der Branche lassen sich keine im Durchschnitt bremssenden Faktoren identifizieren

Unter den *produktbezogenen* Faktoren ist der bremssende Faktor die **Kompatibilität**. So erfordern z.B. Windkraft an Land, Großwärmepumpen, eine große Zahl an Wärmepumpen im Quartier oder Ladeeinrichtungen für den elektrischen Verkehr die Integration der neuen Lösung in das bestehende Gesamtsystem der Stromversorgung und damit technischen und finanziellen Aufwand, aber auch Lernen und Anpassung. Zentral dürfte an vielen Stellen die notwendige Ertüchtigung des Stromnetzes sein. Findet sie nicht statt, stößt die Elektrifizierung der Anwendungen schnell an Grenzen.

Bei den *adopterbezogenen* Faktoren erweisen sich die Faktoren **Verhaltensänderung** und insbesondere **Unsicherheit** als wirksame Bremsen. Die Bremswirkung des Faktors Verhaltensänderung ist im Durchschnitt gering, aber produktspezifisch durchaus vorhanden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Energiewende zu großen Teilen in Versorgungsnetzen und bei der Energiegewinnung stattfindet. Dort sind erfahrene Fachkräfte aktiv, die Planung, Bau und Betrieb komplexer technischer Anlagen beherrschen. Die Veränderung der eingesetzten Technologie ändert diese grundsätzliche Aufgabe und Kompetenz nicht. Einige der untersuchten Energiewendetechnologien bzw. -produkte – etwa Elektroautos inkl. Ladeeinrichtungen, Pelletheizungen, Smart Meter und dynamische Stromtarife – zielen jedoch auf den Markt der Endverbraucherinnen und -verbraucher. Mit diesen Produkten ist grundsätzlich eine Verhaltensänderung verbunden, die potenzielle Kundinnen und Kunden nicht selten von der Anschaffung abschreckt.

Unsicherheiten – die nicht nur Konsumentinnen und Konsumenten abschrecken, sondern auch Investoren und Unternehmen – ergeben sich insbesondere durch unklare Entwicklungen hinsichtlich Infrastruktur, politischer sowie regulatorischer Rahmenbedingungen und Wirtschaftlichkeit. Besonders große Unsicherheit hinsichtlich Infrastruktur, Regulierung, politischer Ziele, Kosten und Marktchancen besteht in Bezug auf alle vier untersuchten Technologien des Wasserstoff- und CO₂-Sektors. Darüber hinaus verbinden sich mit mehr als Hälfte der untersuchten Energiewendetechnologien Unsicherheiten, die vielfach auf unklare politische und regulatorische Rahmenbedingungen zurückzuführen sind – etwa die weitere Förderung der Wärmewende und der Biogasproduktion, die Durchsetzung von Smart Meters, der weitere Ausbau der Wasserkraft und Investitionen in das Stromnetz.

Bei den *anbieterbezogenen* Faktoren treffen wir wenig überraschend auf den Aspekt **der Qualifizierung**. Der bestehende Fachkräftemangel in Kombination mit dem nötigen Aufwand, um neues Personal auszubilden oder bestehende Personal zu qualifizieren, hemmen die Diffusion fast aller Energiewendetechnologien deutlich.

Im Bereich der *Politik* sind **institutionelle Hemmnisse** von Bedeutung. Bei 20 von 29 untersuchten Fällen stießen wir auf Regulierungen und Normen, die die Verbreitung von Energiewendetechnologien behindern. Ein Beispiel sind hier langwierige Genehmigungsverfahren im Bereich der Windkraft und des Netzausbaus.

Im Bereich der *pfadbezogenen* Faktoren, in denen historisch selbstverstärkende oder hemmende Dynamiken der Energiewende betrachtet werden, treten insbesondere **Pfadabhängigkeiten** als zumeist bremsender Faktor hervor. Die Bedeutung des Wortes ‚Wende‘ zielt in im Kontext der Energiewende darauf, das Energiesystem im Kern neu zu denken und grundsätzlich zu verändern. Das bestehende bzw. alte Energiesystem mit seinen zahlreichen Regeln und Gewohnheiten sowie milliarden schweren Investitionen in Infrastrukturen, Produktionsanlagen und in Nutzung befindlichen Produkten, impliziert jedoch deutliche Beharrungskräfte.

Ambivalente und teils optimierbare Faktoren

Sieben weitere Faktoren wirken im Durchschnitt weder klar fördernd noch klar hemmend auf die Diffusion der untersuchten Energiewendetechnologien. Hierzu zählen auf der Produktebene die Wahrnehmbarkeit, die Komplexität und die Erprobbarkeit, auf Seiten der Adoptoren Preise und Kosten sowie auf der Politikebene die mediale Berichterstattung. Mit Blick auf den bisherigen Diffusionspfad kommen außerdem die Preisentwicklung und selbstverstärkende Effekte, beispielsweise Nachahmungseffekte, hinzu.

Hinsichtlich dieser Faktoren – und auch der anderen 14 Faktoren – ist abschließend zu unterscheiden, ob Faktoren lediglich bewertbar oder auch gezielt beeinflussbar sind. Zu den schwer veränderbaren Faktoren gehören z.B. die produktbezogenen Faktoren Komplexität und Erprobbarkeit. Andererseits existieren Faktoren, die eher leicht veränderbar sind und sich im historischen Verlauf auch tatsächlich entwickelt haben. Hierzu zählen die Preise und Kosten sowie die Preisentwicklung.

Diese beiden Faktoren wurden über die verschiedenen Energiewendetechnologien hinweg bislang im Durchschnitt eher niedrig bewertet, sind für den Erfolg im Massenmarkt jedoch von zentraler Bedeu-

tung und zugleich in gewissem Maße gestaltbar, etwa durch Kostensenkungen, Skaleneffekte und geeignete Förderstrategien. Die systematische Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Energiewendetechnologien stellt daher einen wesentlichen Hebel für ihre breitere Diffusion dar.

Politische Gestaltbarkeit zeigt sich beispielhaft in den durch das Stromeinspeisungsgesetz und später durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geschaffenen Rahmenbedingungen, die bei Windkraft, Photovoltaik und Bioenergie erhebliche Skaleneffekte und Kostensenkungen ermöglicht haben. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Entwicklungen mit durch die EEG-Umlage finanzierten Kosten im dreistelligen Milliardenbereich verbunden sind. Unternehmerische Gestaltungsräume zeigen sich beispielhaft im Design-to-cost-Engineering, welches zur Entwicklung des Post-Streetscooters eingesetzt wurde (Clausen, 2017), sowie im niederländischen Konzept der industrialisierten Wärmedämmung „Stroomversnelling“ (Clausen, 2019c; Tappeser, 2017).

Es erscheint daher abschließend erstrebenswert, systematisch nach Wegen zur Kostensenkung bzw. Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Energiewendeinnovationen zu suchen, um so einerseits hohe Investitionen in Infrastrukturen zu reduzieren und andererseits auch Käuferkreise mit begrenzter Zahlungsfähigkeit zu erschließen (cf. Bilharz, 2007).

3.2.2 Produktbezogene Faktoren

Zusammenfassend zeigen die produktbezogenen Faktoren der Energiewendetechnologien ein differenziertes, insgesamt aber eher positives Bild: Viele Technologien überzeugen durch klare funktionale oder soziale Vorteile, etwa in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Autarkie oder Systemnutzen. Diffusionshemmnisse entstehen dagegen weniger aus mangelndem Nutzen als vielmehr aus begrenzter Sichtbarkeit, eingeschränkter Kompatibilität mit bestehenden Infrastrukturen und einer häufig nur eingeschränkt möglichen Erprobung.

Faktor 1. Relativer Vorteil der Innovation: Welchen funktionellen oder sozialen Vorteil hat die Innovation im Vergleich zum Vorgänger- oder Konkurrenzprodukt?

In der Gesamtbewertung wird den untersuchten Energiewendetechnologien zumeist ein starker relativer Vorteil zugesprochen. Es gibt jedoch relevante Ausnahmen, bei denen der Vorteil unsicher, bedingt oder stark nutzer- oder kontextabhängig ist.

Der Mehrzahl der untersuchten Fälle wurde ein klarer funktionaler Nutzen oder ein starker sozialer Vorteil zugeordnet. Funktionale Vorteile dominieren zumeist bei Technologien, die die Leistung und Wirtschaftlichkeit auf der Energiesystemebene verbessern. Beispielsweise punkten Windkraftanlagen mit hohen Volllaststunden und niedrigen Stromgestehungskosten und große Batteriespeicher mit Reserveleistungen zum Ausgleich von Überschüssen und Engpässen. Intelligente Transformatoren sowie Smart Meter (mit dynamischen Tarifen) ermöglichen u.a. effizienteren Netzbetrieb und Lastverschiebung und Langzeitwärmespeicher punkten durch saisonale Nutzbarkeit. Sozial und psychologisch punkten hingegen vor allem Technologien im Gebäude- bzw. Haushaltskontext, die Endnutzern Autarkie, Resilienz und den Ausdruck von Klimaschutz und Teilhabe ermöglichen. Zum Beispiel ver-

bindet Photovoltaik klimafreundliches Handeln mit größerer Unabhängigkeit von Netz- und Versorgerkonditionen, Heimspeicher, bi-direktionales Laden und Pelletheizungen erhöhen den Autarkiegrad und Energiegenossenschaften ermöglichen Mitsprache und gemeinsame „Hilfe zur Selbsthilfe“.

In sechs Fällen wurde nur ein weniger ausgeprägter, relativer Vorteil gesehen: Erdsonden, Wärmepumpen im Bestand, Solarthermieranlagen, Brennstoffzellen, H₂-Thermen und dynamischen Stromtarife. Gemeinsam ist diesen Fällen, dass der Vorteil stark kontextabhängig, mit Einschränkungen verbunden oder in der Realisierung aufwendig ist. So ist die Installation von Wärmepumpen im Bestand sehr aufwendig, H₂-Ready-Thermen bieten ihren Vorteil ausdrücklich nur unter mehreren Bedingungen (Umbausatz, Netzgebiet, bezahlbarer Wasserstoff) und dynamische Stromtarife sind besonders attraktiv bei großen, flexibel verschiebbaren Lasten, während bei geringem Verbrauch und geringer Flexibilität häufig der Festpreistarif wirtschaftlicher bleibt.

Bei der CO₂-Abscheidung wurde als einzigem Fall kein Nutzen bzw. Vorteil erkannt, da die Technologie ausgesprochen aufwendig und teuer ist, und zumindest in Bezug auf die zentrale Option der CO₂-Endlagerung noch keine sichere und erprobte Lagertechnologie existiert.

Faktor 2. Wahrnehmbarkeit: Ist die Nutzung der Innovation durch Dritte wahrnehmbar, ohne dass durch besondere Informationsanstrengungen auf sie hingewiesen wird?

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass viele Technologien entweder kommunikativ „unsichtbar“ bleiben oder Technologien zwar sichtbar sind, aber mit Akzeptanzproblemen verbunden sind. Das spricht dafür, dass zur Diffusionsförderung häufig aktive Information bzw. Signale, sozio-ökonomische Einbettung sowie Konfliktmanagement nötig sind.

Nur in drei Fällen – und zwar bei Elektroautos (mit und ohne bi-direktionalem Laden) sowie bei Ladeeinrichtungen – wurde eine deutlich positive und alltagsnahe Wahrnehmbarkeit festgestellt. Hier ist die Nutzung direkt beobachtbar und wird als praktisch nützlich erlebt.

Viele andere Technologien – wie Windkraft- und Photovoltaikanlagen, Wasserkraftwerke, große Batteriespeicher und die verbreiteten Luftwärmepumpen, Biogasanlagen sowie Solarthermieranlagen, Langzeitwärmespeicher und Elektrolyseure – sind zwar ebenfalls gut durch Dritte wahrnehmbar, werden jedoch aufgrund ihrer räumlichen Präsenz und/oder öffentlicher Debatten von einer größeren Gruppe von Menschen als ambivalent oder negativ wahrgenommen.

Zahlreiche Technologien wie z.B. Erdsonden, Heimspeicher oder intelligente Transformatoren sind in der Öffentlichkeit ohne Zusatzinformation kaum oder gar nicht wahrnehmbar.

Faktor 3. Kompatibilität: Ist die Innovation an ihr Umfeld technisch, institutionell und kulturell anschlussfähig?

Insgesamt ist die Kompatibilität über die Technologien hinweg nur bedingt gegeben. Zwar sind viele Energiewendetechnologien grundsätzlich anschlussfähig, doch Systemanpassungen (Netze, Infrastruktur, Standards, etc.) und kulturell-politische Spannungen wirken häufig als leichte bis deutliche Diffusionshemmnisse und müssen aktiv adressiert werden, damit Diffusion gelingt.

Ungefähr die Hälfte der untersuchten Fälle ist an ihr Umfeld technisch, institutionell und kulturell gut anschlussfähig. Gemeinsam ist diesen Technologien, dass sie auf etablierte Infrastrukturen und Regeln direkt aufsetzen oder diese stabilisieren (z. B. Offshore-Wind und Wasserkraft im Stromsystem, große Batterie- und Heimspeicher sowie virtuelle Kraftwerke als netzdienliche Ergänzungen).

In vielen Fällen bedingen Energiewendetechnologien aber auch Änderungen an anderen Komponenten der Systeme, mit denen Energie gewonnen, verteilt oder genutzt wird oder sie führen zu kulturellen Irritationen. Hier häufen sich Muster wie lokal knapper Netzanschluss und Flächen-/Platzkonkurrenz (Windkraft an Land, PV-Freiflächen, Großwärmepumpen, öffentliche Ladepunkte), zusätzliche bauliche Eingriffe und Genehmigungen (Erdsonden, Solarthermie) sowie Schnittstellen- und Standardisierungsbedarf oder Deutungskonflikte (Smart Meter, E-Autos), wodurch Anschlussfähigkeit zwar erreichbar bleibt, aber aktive Lern-, Umbau- und Koordinationsprozesse voraussetzt.

Als völlig unkompatibel wurden Wasserstoff-Ready Heizthermen eingestuft, da noch nirgends in Deutschland ein Wasserstoffnetzgebiet geplant ist. Wo eine tragende Systemumgebung (Netze, Zuständigkeiten, verlässliche Pfade) noch fehlt, kippt Kompatibilität somit von „anpassungsbedürftig“ zu „derzeit nicht herstellbar“ – mit entsprechend stark hemmender Wirkung auf die Diffusion.

Faktor 4. Komplexität: Ist die Innovation für den Adopter komplex und bedarf es besonderen Fachwissens zum Verständnis?

In 27 der insgesamt 29 Fälle behindert eine aus unserer Sicht teilweise vorhandene Komplexität von Energiewendetechnologien deren Verbreitung nicht. Damit wirkt der Faktor „Komplexität“ insgesamt eher neutral: Entscheidend ist, ob Komplexität beim Adopter als zusätzliche Entscheidungs- oder Bedienlast ankommt und ob Wartung, Service und Zuständigkeiten klar geregelt sind.

Dies ist damit zu begründen, dass Spezialwissen zwar nötig ist, aber zumeist bei professionellen Herstellern, Betreibern und Dienstleistern gebündelt ist. Zum Beispiel ist ein Windkraftwerk, ein Erdsondenfeld oder eine Großwärmepumpe selbstverständlich komplex, aber diejenigen, die mit der Anlage umgehen müssen wie z.B. Unternehmen der Energiewirtschaft oder im Falle des Erdsondenfeldes Ingenieurbüros und Bohrunternehmen das Umgehen mit der Komplexität gewohnt sind. Endkunden nah (PV, Heimspeicher, Wärmepumpe, Ladepunkte) wird Komplexität zudem über Fachinstallation, Automatisierung und eine kurze Lernphase in der Bedienung abgeschirmt.

Nur bei zwei Technologien wird ein leicht bremsender Effekt erwartet: bei Langzeitwärmespeichern, weil es bisher in Deutschland keine Branche gibt, die in relevantem Umfang mit ihrer Planung oder ihrem Bau Erfahrung hätte, sowie bei dynamischen Stromtarifen, die hier als klassisches Endkundenprodukt gesehen werden, deren aus der Volatilität der Preise folgende ökonomische Komplexität Kundinnen und Kunden abschrecken mag. Gemeinsam ist beiden, dass fehlende Routinen bzw. ökonomische Abwägungen dominieren. Die Diffusion hängt hier besonders von Kompetenzaufbau und einer Reduktion der Entscheidungskomplexität durch Standards und Automatisierung ab.

Faktor 5. Erprobbarkeit: Kann die Innovation ohne großen Aufwand durch den Adopter erprobt werden?

Die Erprobbarkeit von Energiewendetechnologien ist selten niederschwellig. Zumeist muss sie über Pilotierung, Referenzen und schrittweises Lernen organisiert werden. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Erprobbarkeit von Technologien der Energiewende angesichts der Tatsache zu beurteilen ist, dass viele Technologien in großem Umfang von großen Unternehmen der Energiebranche genutzt werden.

Als uneingeschränkt erprobbar wurden nur die beiden untersuchten Arten von Elektroautos eingestuft, für die zeitlich begrenzte Miet- oder Leasingverträge abschließbar sind. Dadurch können Nutzende alltagspraktische Erfahrungen sammeln, Reichweiten- und Ladealltag testen und bei Nichtgefallen ohne hohe Umstiegskosten wieder aussteigen.

Im Gegensatz dazu sind bspw. Onshore-Windkraftanlagen nicht im klassischen Sinne erprobbar. Werden sie allerdings durch ein Unternehmen erworben, welches mittelfristig plant, 100 Stück davon zu errichten, so kann die Errichtung einer ersten Anlage, auch wenn sie nicht einfach zurückgegeben werden kann, durchaus als aufwendige Erprobung gewertet werden. Vergleichbar eingestuft wurden Brennstoffzellen und intelligente Transformatoren sowie weitere großskalige Vorhaben wie Offshore-Wind, Elektrolyseure oder Carbon Capture and Storage-Anlagen. Auch Betreiber-Piloten (z.B. öffentliche Ladepunkte) oder (periodisch) kündbare Vertragsmodelle (virtuelle Kraftwerke, dynamische Tarife, Energiegenossenschaften) ermöglichen Erprobung, bleiben aber organisatorisch und finanziell anspruchsvoll.

Nicht erprobbar sind vor allem standortgebundene, umbauintensive und vertraglich stark bindende Lösungen wie PV am Standort, Wärmepumpen (inkl. Erdsonden), Wärmenetze, (Groß-)Wärmepumpen in Netzen, Pelletheizungen, Solarthermie, Langzeitwärmespeicher, Smart Meter, Wasserkraft oder H2-Ready-Thermen. Für diese Gruppe gewinnen die systematische Dokumentation guter Beispiele, standardisierte Rollout-Prozesse, Garantien und nachvollziehbare Leistungsdaten an Bedeutung, weil ein Rückbau oder Wechsel kurzfristig kaum möglich ist.

3.2.3 Adopterbezogene Faktoren

Die adopterbezogenen Faktoren zeigen insgesamt, dass die Diffusion von Energiewendetechnologien vor allem dann voranschreitet, wenn Pioniergruppen frühe Nachfrage erzeugen, die Rahmenbedingungen hinreichend klar sind und die Wirtschaftlichkeit überzeugt. Bremsend wirken dagegen insbesondere Unsicherheiten sowie Preis-, Kosten- und Wirtschaftlichkeitsfragen, während Verhaltensänderungen vor allem bei endkundennahen Technologien stärker ins Gewicht fallen.

Faktor 6. Nutzer-Innovatoren: Lassen sich im Innovationsprozess bzw. bei der Markteinführung Innovatoren auf der Anwenderseite identifizieren?

Als Diffusionstreiber sind Nutzer-Innovatoren dort besonders wirksam, wo sie als sichtbare Pionier-Community Feedback, Referenzen und Legitimation liefern. Mit Blick auf die untersuchten Innovatio-

nen entsteht jedoch insgesamt ein gemischtes Bild. Für viele Technologien prägen entweder eher institutionelle Akteure und Herstellerprogramme als „Innovatorenkreise“ den Markthochlauf oder es gibt keine ausgeprägten Nutzer-Innovatoren.

Explizite Informationen über ausgeprägte Gruppen von Nutzer-Innovatoren liegen in der Windbranche vor (Oelker, 2005), aber auch bei Energiegenossenschaften, Biogasanlagen und rund um die Elektromobilität. Gemeinsam ist diesen Fällen ein klar erkennbares Pionierökosystem bzw. eine technikaffine Erstnutzerbasis (z.B. Wind-Pioniersektor, Bioenergiedörfer/Genossenschaften, E-Autos und öffentliche Ladepunkte).

Die Energiewende-Community, die aus der Umweltbewegung der 1970er Jahre hervorgegangen ist, findet sich hinter den Erstanwendern zahlreicher Innovationen der Strom- und Wärmeversorgung wieder. Dieses Muster bündelt sich vor allem bei endkundennahen Investitionen mit Autarkie- und Klimaschutzmotiven (PV, Wärmepumpen/Erdsonden, Solarthermie, Heimspeicher)

Im Gegensatz dazu dominieren bei großskaligen Systemtechnologien eher kleine professionelle First-Mover (Stadtwerke/Projektgesellschaften bei Batteriespeichern, einzelne Netzbetreiber bei intelligenten Transformatoren und Smart-Meter-Piloten, Industrieakteure bei Elektrolyseuren und Carbon Capture).

Für Wärmenetze (Innovation aus dem 19. Jahrhundert) sowie für Hochtemperaturwärmepumpen und H₂-Thermen (beide noch nicht auf dem Markt) liegen keine Informationen zu Nutzer-Innovatoren vor.

Faktor 7. Notwendigkeit von Verhaltensänderung: Verlangt die Anwendung der Innovation beim Adopter eine Verhaltensänderung?

Im Feld der Konsumprodukte stellt die Notwendigkeit von Verhaltensänderungen ein zentrales Hemmnis der Diffusion von Produkten im Markt dar. Energiewendetechnologien zielen aber zu einem großen Teil nicht auf den Markt der Konsumentinnen und Konsumenten, sondern werden an Unternehmen im Energiesektor verkauft. Dadurch werden Verhaltensanpassungen häufig professionalisiert bzw. an Fachpersonal delegiert und verlieren somit als eigenständiger Diffusionsdämpfer an Gewicht.

Bei der Mehrzahl der Fälle sehen wir insoweit keine notwendige Verhaltensänderung, von der ein wesentliches Bremsen der Diffusion zu erwarten wäre. Typisch dafür sind investitions- und betriebsnahe Technologien, die in vorhandene Planungs-, Genehmigungs- und Steuerungsroutinen passen (Windenergie, Wasserkraft, große Batteriespeicher, Elektrolyseure, intelligente Transformatoren, virtuelle Kraftwerke) sowie Infrastrukturen, die für Nutzende weitgehend „unsichtbar“ bleiben (z.B. Wärmenetze, Langzeitwärmespeicher).

Einige Produkte dieser Analyse zielen jedoch auf den Markt der Verbraucherinnen und Verbraucher. Dies sind z.B. Elektroautos inkl. Ladeeinrichtungen, Pelletheizungen, Smart Meter und dynamische Stromtarife. Mit diesen Produkten ist grundsätzlich eine Verhaltensänderung verbunden. Auch die Verbreitung der CO₂-Abscheidung stellt die Unternehmen zumindest strategisch-ökonomisch vor große Herausforderungen eines anderen Verhaltens. Genauso erfordert die Verbreitung der Hochtemperatur-Wärmepumpe für die Dekarbonisierung der Prozesswärme ein völliges Umdenken bei

der Planung und dem Bau von Produktionsanlagen. Bei diesen Fällen sehen wir daher eine leicht hemmende Wirkung der Notwendigkeit einer Verhaltensänderung auf die Diffusion.

Keine der untersuchten Technologien erfordert starke Verhaltensänderungen. Besonders tiefgreifende Anforderungen erscheinen eher als strategisch-ökonomisches Umdenken auf Organisationsebene (CO₂-Abscheidung, Hochtemperatur-Wärmepumpen für Prozesswärme) und wirken damit vor allem als Lern- und Entscheidungsaufwand.

Faktor 8. Unsicherheiten bei Adoptoren: Inwieweit gab oder gibt es unter den Adoptoren Unsicherheiten bezüglich der Innovation?

Unsicherheit über die Zukunft neuer Technologie schreckt nicht nur private Konsumentinnen und Konsumenten ab, sondern auch Unternehmen. Bei den untersuchten Energiewendetechnologien beobachten wir zwar häufig Unsicherheiten, diese sind jedoch meist nicht besonders stark ausgeprägt.

Die bestehenden Unsicherheiten sind oftmals darauf zurückzuführen, wie klar die Politik den Kurs vorgibt: die weitere Förderung der Wärmewende und der Biogasproduktion, die Durchsetzung von Smart Meters, der weitere Ausbau der Wasserkraft. In solchen und anderen Feldern haben wir für 14 Innovationen einen leicht bremsenden Effekt von Unsicherheiten festgestellt. Weitere wiederkehrende bestehen hinsichtlich der Eignung im Alltag (z.B. E-Autos und Ladepunkte: Reichweite/Infrastruktur, Smart Meter und dynamische Tarife: Datenschutz, Kompatibilität und Einsparlogik) und hinsichtlich Lieferketten- und Preisfragen (z.B. Pelletheizungen).

Besonders große Unsicherheit sehen wir in Bezug auf alle vier Fälle des Wasserstoff- und CO₂-Sektors. Die zukünftigen Aussichten zur Verbreitung von großen Stückzahlen von Brennstoffzellen in Fahrzeugen werden trüber, weil die Verkäufe wasserstoffgetriebener PKW weltweit zurückgehen und in einigen Ländern wie Dänemark, Österreich und seit Anfang des Jahres 2026 auch in Deutschland die Zahl der Tankstellen stark zurückgeht. Ob die H₂-Ready Therme jemals kommt, ist aufgrund der Unsicherheiten um künftige Wasserstoffnetzgebiete ebenfalls unklar. Beispielsweise stoppt der Stahlkonzern Arcelor-Mittal bereits sein Projekt für grünen Stahl mit Wasserstoff (Tagesschau, 2025). Sowohl bei der Nachfrage wie beim Angebot von Wasserstoff ist der Punkt, ab dem die Entwicklung sicher nach oben geht, noch nicht erreicht. Und auch die Zukunft der CO₂-Abscheidung ist unsicher. Die Nutzung von CO₂ in großen Mengen hängt an der Zukunft von Wasserstoff und grünen Treibstoffen, die Endlagerung ist in Bezug auf die Sicherheit der Lager umstritten.

Faktor 9. Preise, Kosten, Wirtschaftlichkeit: Inwieweit fördern oder hemmen Preis-, Kosten- oder Wirtschaftlichkeitsaspekte die Adoption?

Insgesamt zeigt sich, dass Preis-, Kosten- und Wirtschaftlichkeitsaspekte die Diffusion vieler Energiewendetechnologien stark beeinflussen. Zudem gibt es im Bereich der Preise und Investitionskosten und insgesamt der Wirtschaftlichkeit der Energiewendetechnologien erhebliche Unterschiede. Wo sich Investitionen bereits unter heutigen Marktbedingungen tragen oder klare Erlösperspektiven bestehen, beschleunigt dies die Adoption deutlich. Wo hohe Anfangskosten, unsichere Amortisation oder laufende Mehrkosten dominieren, wirkt der Faktor klar bremsend.

Besonders günstig bewertet sind vor allem etablierte Stromerzeugungs-, Speicher- und Netzintegrationstechnologien mit gesunkenen Kosten oder gut erschließbaren Erlösen, etwa Windkraft, Photovoltaik, Batteriespeicher, intelligente Transformatoren, virtuelle Kraftwerke und Wärmepumpen im Neubau. Diese Technologien werden gegenwärtig – vornehmlich von wirtschaftlichen Interessen getrieben – in großem Umfang ausgebaut. Leicht positive Bewertungen finden sich vor allem dort, wo Wirtschaftlichkeit häufig gegeben ist, aber stärker von Nutzungsprofil, Förderbedingungen oder Kontext abhängt, etwa bei Wärmepumpen im Bestand, E-Autos, Ladeinfrastruktur, dynamischen Tarifen, Großwärmepumpen, Biogas oder Energiegenossenschaften.

Neutral bewertet sind vor allem Technologien mit ausgeglichenen Vor- und Nachteilen oder stark fallabhängiger Amortisation, etwa Wärmenetze, Solarthermie und Pelletheizungen.

Dagegen werden Investitionen vor allem bei kapitalintensiven, infrastrukturell aufwendigen oder von unsicheren Folgepreisen abhängigen Technologien gebremst, etwa bei Erdsonden, Elektrolyseuren, Hochtemperaturwärmepumpen, Langzeitwärmespeichern, Brennstoffzellen, H₂-Thermen, CO₂-Abscheidung und insbesondere bei Smart Metern.

3.2.4 Anbieterbezogene Faktoren

Insgesamt wirken die anbieterbezogenen Faktoren eher förderlich, werden jedoch durch den ausgeprägten Fachkräfte- und Qualifizierungsengpass deutlich relativiert. Diffusionsvorteile ergeben sich vor allem dort, wo reputationsstarke Anbieter, standardisierte Angebote und verlässliche Serviceketten vorhanden sind.

Faktor 10. Qualifizierungsaufwand: Erfordert die Produktion oder die Erbringung der Dienstleistung hohen Aufwand zur Qualifikation des erforderlichen Personals?

Bei 26 der untersuchten 29 Fälle sehen wir den Fachkräftemangel und damit die Notwendigkeit, in Aus- und Weiterbildung zu investieren, als bremsenden Faktor. Fachpersonal, sowohl im Handwerk wie in technischen Bereichen mit akademischer Ausbildung, ist knapp und parallel dazu muss das vorhandene Personal sich immer wieder in neue Themen einarbeiten. Innerhalb der 22 untersuchten Faktoren ist der Qualifizierungsaufwand derjenige mit der insgesamt höchsten bremsenden Wirkung. Für die Diffusion heißt das: Nicht fehlende Nachfrage, sondern knappe personelle Umsetzungskapazitäten werden vielfach zum Engpass.

Besonders stark bremsend wirkt der Faktor bei komplexen Infrastruktur-, Industrie- und Wärmetechnologien, die spezialisierte Entwicklung, Produktion, Installation und Betrieb zugleich verlangen, etwa Windkraft, Photovoltaik, Batteriespeicher, Wärmepumpen, Wärmenetze und Langzeitwärmespeicher. Leicht bremsend ist der Aufwand vor allem dort, wo qualifiziertes Personal zwar nötig ist, aber stärker auf bestehende Berufsprofile oder Organisationen aufgebaut werden kann, etwa bei Wasserkraft, Erdsonden, Biogas, E-Autos, virtuellen Kraftwerken, Ladepunkten sowie Wasserstoff- und CO₂-Technologien. Neutral bleibt der Faktor nur bei vergleichsweise eingespielten Anwendungen wie Pelletheizungen, Solarthermie und dynamischen Stromtarifen.

Faktor 11. Bekanntheitsgrad und Reputation der Anbieter: Existieren bereits Anbieter der Innovation, die über einen hohen Bekanntheitsgrad und hohe Reputation verfügen?

In fast allen Fällen konnten bekannte Anbieter identifiziert werden, die die Verbreitung der Innovation legitimieren und konsequent fördern. Im Umkehrschluss ist mangelnde Anbieterreputation nur selten ein eigenständiges Hemmnis. Eine Ausnahme ist allein der Langzeitwärmespeicher, für den es in Deutschland aufgrund stark begrenzter Nachfrage keine spezialisierten Anbieter gibt

Besonders günstig bewertet sind vor allem Technologien, die von großen, etablierten Industrie-, Energie- oder Automobilunternehmen getragen werden, etwa Windkraft, Speicher, Wärmepumpen, Solarthermie, E-Autos und Ladeinfrastruktur. Typisch ist hier, dass bekannte Marken Vertrauen schaffen, Investitionsentscheidungen erleichtern und den Innovationen Sichtbarkeit verleihen.

In einigen anderen Fällen sind die Anbieter eher kleiner und etwas weniger bekannt. Das betrifft vor allem lokal oder mittelständisch geprägte Felder wie Energiegenossenschaften, Erdsonden, Wärmenetze und Pelletheizungen.

Faktor 12. Vollständigkeit und Verfügbarkeit der Serviceangebote: Wird die Innovation mit einem vollständigen Servicepaket angeboten und ist sie für den Kundenkreis einfach verfügbar?

Für einen großen Teil der untersuchten Fälle (23) sind Serviceleistungen flächendeckend verfügbar. Damit wirkt dieser Faktor für die Diffusion überwiegend unterstützend oder zumindest nicht hemmend. Übergreifend zeigt sich: Standardisierte, seriennahe und breit vermarktete Technologien verfügen eher über geschlossene Liefer- und Serviceketten als lokale, projektförmige oder stark individualisierte Lösungen.

Besonders günstig bewertet sind daher vor allem etablierte, technisch standardisierte und über bestehende Handwerks-, Industrie- oder Vertriebsstrukturen verfügbare Technologien wie Windkraft, Photovoltaik, Speicher, Wärmepumpen, Biogas, Solarthermie, E-Autos, Ladepunkte oder Smart Meter. Leichte Einschränkungen zeigen sich vor allem bei noch jungen oder aktuell angespannten Märkten, etwa bei Hochtemperatur-Wärmepumpen, Brennstoffzellen und Transformatoren.

Bei Wärmenetzen, Energiegenossenschaften und Langzeitwärmespeicher ist die Serviceverfügbarkeit eingeschränkt. Gemeinsam ist ihnen, dass sie standort- und fallbezogen geplant, organisiert oder aufgebaut werden müssen und daher kaum als vollständiges Standardpaket verfügbar sind.

3.2.5 Branchenbezogene Faktoren

Die branchenbezogenen Faktoren wirken insgesamt überwiegend förderlich, allerdings sehr ungleich je nach Technologiefeld. Besonders günstig ist die Lage dort, wo starke Verbände, etablierte Marktführer und unterstützende Intermediäre den Ausbau aktiv tragen, etwa bei Windkraft, Photovoltaik oder Ladeinfrastruktur. Schwächer bleibt die branchenbezogene Unterstützung dagegen bei Nischentechnologien, in jungen Märkten und überall dort, wo etablierte Akteure zwischen Energiewendeinnovation und fossilem Bestandsgeschäft lavieren, etwa bei Elektroautos oder H₂-Thermen.

Faktor 13. Rolle des Branchenverbandes: Existiert ein Branchenverband, verfügt er über politischen Einfluss und setzt er diesen für die Förderung der Innovation ein?

Insgesamt wirken Branchenverbände überwiegend diffusionsfördernd, weil starke, politisch anschlussfähige Verbände den Markthochlauf stützen. Es bestehen jedoch auch Nischentechnologien, die keine starken Verbände hinter sich haben und somit stärker von politischen Rahmenbedingungen und anderen Akteuren abhängig sind.

Besonders günstig ist die Lage bei inzwischen etablierteren Energiewendefeldern wie beispielsweise Windkraft oder öffentlicher Ladeinfrastruktur, bei denen starke und politisch anschlussfähige Verbände aktiv sind. Aber auch bei Großwärmepumpen in Wärmenetzen und dynamischen Stromtarifen wirkt die Verbändelandschaft trotz noch junger Marktstrukturen unterstützend.

Etwas weniger ausgeprägt sind die Anstrengungen zur Förderung bei den Automobilverbänden mit Bezug auf das Elektroauto, da sich die Verbrenner-Fraktion, gerade im Bereich der Zulieferer, immer wieder als bremsender Faktor erweist.

Energiegenossenschaften und virtuelle Kraftwerke verfügen zwar über Verbände, deren Lobbywirkung ist jedoch eher gering. Auch die Aktivitäten der Thermotechnikverbände zur Unterstützung der Wasserstofftherme wie auch der Solarthermie machen eher einen verhaltenen Eindruck.

Für Langzeitwärmespeicher gibt es weder Hersteller noch einen Verband.

Faktor 14. Rolle der Marktführer: Wer sind die Marktführer in der Branche, in dem die Innovation eingeführt wurde und fördern oder hemmen sie die Diffusion?

Die Rolle der Marktführer für die Diffusion ist überwiegend förderlich. In vielen Technologiefeldern bestehen etablierte Anbieter, die Innovationen in starkem (11) oder etwas schwächeren (14) Ausmaß antreiben, weil sie an bestehende Geschäftsmodelle, Kompetenzen und Kundenmärkte anschließen können.

Bremsend wirkt der Faktor vor allem dort, wo Märkte noch unreif sind oder starke Bindungen an fossile Infrastrukturen fortbestehen. Zu den kleineren, sich noch entwickelnden Märkten zählen die Märkte für Großwärmepumpen, Hochtemperatur-Wärmepumpen und Langzeitwärmespeicher. Auch andere Märkte stagnieren zumindest hierzulande, wie z.B. der für Biogasanlagen. Im Markt für Elektroautos positionieren sich die Marktführer zwar positiv, aber letztlich nicht eindeutig, weil sie ihre Verbrenner-Kundschaft nicht verunsichern wollen. Auch bei 100%-H₂-Ready-Thermen ist die Rolle der Marktführer gespalten: Während die thermotechnische Industrie die Technologie anbietet, relativieren Teile der Gaswirtschaft und viele kommunale Versorger die Perspektive einer flächendeckenden künftigen Versorgung über Gasverteilnetze, was die Diffusion eher bremst.

Faktor 15. Intermediäre als Change Agents: Inwieweit haben Marktintermediäre (z.B. Handelsunternehmen) und Politikintermediäre (z.B. Energie-, Effizienz-, Klimaschutzagenturen) bis dato den Diffusionsverlauf beschleunigt oder gebremst?

Bezüglich der Einflussnahme von Intermediären ergibt sich insgesamt ein gemischtes Bild. Agenturen legen den Schwerpunkt ihrer Informationsarbeit in erster Linie auf Konsumentinnen und Konsumenten sowie auf Unternehmen in ihrer Rolle als Energieverbraucher. Energieversorgungsunternehmen werden hingegen in der Regel nicht angesprochen.

Deutliche Informations- und Veranstaltungsaktivitäten zeigen zahlreiche Klimaschutz- und Energieagenturen bei Energiewendetechnologien für die häusliche Energiewende, etwa Wärmepumpen, Erdsondenanlagen, Solarthermie und Photovoltaikanlagen.

Begrenzt unterstützend bleiben Intermediäre vor allem in neueren, digitalen oder stärker kommunal geprägten Feldern wie Wärmenetzen, Großwärmepumpen, Smart Metern, dynamischen Tarifen, Ladeinfrastruktur und E-Autos. Produkte, die von Energieversorgungsunternehmen gekauft und betrieben werden, nehmen in den Informationskanälen der Agenturen also eine untergeordnete Rolle ein.

Eine thematische Ausnahme bilden Windkraftwerke an Land. In diesem Falle zielen Agenturen mit ihren Aktivitäten jedoch weniger die Gewinnung neuer Betreiber, als vielmehr auf die Reduzierung potenziellen Widerstands.

3.2.6 Politische Faktoren

Insgesamt wirken politische Rahmenbedingungen meist förderlich auf die Diffusion von Energiewendetechnologien, vor allem wenn Regulierung, Förderung und Sektorpolitiken klare und verlässliche Orientierung bieten. Gleichzeitig können regulatorische Komplexität, inkonsistente Förderlogiken, infrastrukturelle Engpässe und mediale Polarisierung die Verbreitung deutlich behindern. Bei dieser Einschätzung ist zu berücksichtigen, dass politische Faktoren besonders wandlungsanfällig sind und die Analysen dieser Studie den Stand des Jahres 2025 abbilden. Seitherige Veränderungen können sowohl neue Impulse als auch zusätzliche Irritationen und Unsicherheiten erzeugt haben.

Faktor 16. Institutionelle Hemmnisse: Inwieweit haben gesetzliche oder behördliche Regelungen die Verbreitung der Innovation bis dato gehemmt?

Insgesamt wirken Regelungen zwar nicht als flächendeckende Blockade, aber als wichtiger Selektionsfaktor: Besonders gebremst werden Technologien, deren Diffusion von komplexen Genehmigungen, Netzinfrastrukturen oder einem unpassenden Förder- und Marktdesign abhängt.

Wo keine wesentlichen Hemmnisse erkennbar sind, handelt es sich häufig um technologisch oder regulatorisch „unkritische“ Felder beziehungsweise um Bereiche, in denen andere Engpässe wichtiger sind, etwa Offshore-Wind, Heimspeicher, Hochtemperatur-Wärmepumpen, Transformatoren oder virtuelle Kraftwerke.

In 14 Fällen gab es Hinweise auf leicht hemmende Effekte von Vorschriften und Normen. Hierzu zählen vor allem bei genehmigungs- und anschlussabhängigen Technologien wie Wind an Land, Photo-

voltaik, Wärmepumpen, Erdsonden, Wärmenetze, Großwärmepumpen, Elektrolyseure, Brennstoffzellen oder CCS. Typisch sind hier planungsrechtliche Anforderungen sowie ungelöste Anschluss- und Infrastrukturfragen.

Stärker behindert werden aus unserer Sicht die folgenden Technologien, bei denen bestehende Regulierungen die Nutzungsmöglichkeiten grundlegend verengen oder wirtschaftlich entwerten:

- Wasserkraftwerke, denen die Naturschützer in den letzten Jahren durch die Forderung nach Flüssen ohne Querbauwerke das Leben schwermachen. Dementsprechend schwierig ist es, den Bau neuer Anlagen genehmigt zu bekommen.
- Energiegenossenschaften, deren Verwaltung im Energiemarkt sehr aufwendig sein kann, z.B. wenn auch der Stromhandel angeboten wird. In Form neuer EU-Regeln zu EE-Gemeinschaften wird an Verbesserungen gearbeitet (Europäisches Parlament und Rat, 2018). Diese sollen lokal erzeugten Strom auch gemeinsam und zeitgleich nutzen dürfen, was auch einen Impuls zur Gründung neuer Genossenschaften geben könnte.
- Neue Biogasanlagen, die mit den aktuell gültigen EEG-Regelungen nicht mehr finanzierbar sind.
- Wasserstoff-Ready-Thermen, die zwar verkauft und eingebaut werden dürfen, denen aber die aktuellen Planungen der Gasnetzbetreiber und die hohen Anforderungen an die Ausweisung eines Wasserstoff-Netzgebietes entgegenstehen (Die Bundesregierung, 2023).
- Smart Meter und damit zusammenhängend dynamische Stromtarife, die sich in Deutschland nur langsam und mit hohen Kosten verbreiten, weil die deutschen Richtlinien für Smart Meter im internationalen Vergleich extrem hohe (und wenig genutzte) Anforderungen an Funktionalitäten stellen (Wölbert, 2025).

Faktor 17. Staatliche Push- und Pull-Aktivitäten: Inwieweit wurde die Innovation durch regionale, nationale oder EU-weite Vorschriften (Push) oder Förderaktivitäten (Pull) in ihrer Verbreitung beschleunigt?

Staatliche Push- und Pull-Aktivitäten stützen 11 der untersuchten Produkte und Dienstleistungen deutlich und 17 mäßig. Somit wirken staatliche Regelungen oder Förderungen insgesamt klar diffusionsfördernd. Diese Einschätzung bezieht sich auf einen längeren Zeitraum und schließt auch EU-weite Vorgaben ein. Sie ist nicht mit der Förder- und Regulierungslinie der seit Mai 2025 amtierenden Bundesregierung gleichzusetzen, die Verschiebungen in Prioritäten, Instrumenten und Verlässlichkeit staatlicher Unterstützung mit sich bringt.

Besonders stark unterstützt werden bzw. wurden vor allem zentrale Infrastruktur- und Elektrifizierungsfelder sowie die Wärmewende, etwa Wind an Land, große und kleine Speicher, Wärmepumpen, Wärmenetze, Großwärmepumpen sowie die Ladeinfrastruktur. Typisch sind hier verbindliche Vorgaben, Ausbauplanung und investive Förderung, die direkt in den Markthochlauf eingreifen.

Eingeschränkte oder unstete Förderung zeigt sich vor allem bei Offshore-Wind, Photovoltaik, Wasserkraft, Energiegenossenschaften, Biogas, Pellet- und Solarthermie, E-Autos, virtuellen Kraftwerke, Elektrolyseure oder CCS. Hier fördern staatliche Aktivitäten zwar grundsätzlich, bleiben aber oft projektbezogen, widersprüchlich oder zu schwach, um starke Diffusionsimpulse auszulösen.

Bei H2-Ready-Thermen – für die zwar die Mehrkosten gefördert würden, die aber nicht mehr kostet als eine normale Gastherme – bleibt die Förderung faktisch wirkungsschwach.

Faktor 18. Sektorpolitiken: Ist die Innovation Teil eines Technologiesystems, das auf regionaler, nationaler oder EU-Ebene gezielt gefördert wird?

Insgesamt begünstigen die Sektorpolitiken in Deutschland vor allem Technologien, die eng an zentrale politische Transformationsziele gekoppelt sind. Betrachtet man die letzten Jahre unter der Ampelregierung und der aktuellen schwarz-roten Bundesregierung, gilt bzw. galt dies insbesondere für die Strom- und Wärmeversorgung (z. B. Ausbau von Wind und Photovoltaik, Speicher, Wärmepumpen und Wärmenetze) sowie für Netz- und Digitalisierungsfunktionen (z. B. Smart Meter und die Digitalisierung des Energiesystems). Auch der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ist sektorpolitisch verankert, allerdings mit teils konkurrierenden Prioritäten.

Eher schwächer oder ambivalent ist die Wirkung von Sektorpolitiken dort, wo Potenziale begrenzt sind, die Förderung vor allem indirekt wirkt oder politische und wirtschaftliche Prioritäten konkurrieren. Beispielsweise gibt es bei Elektrolyseuren, CCS und E-Mobilität einerseits Förderungen, andererseits aber Unsicherheiten hinsichtlich Priorisierung, Wirtschaftlichkeit und praktischer Umsetzung.

Faktor 19. Medien und Kampagnen: Inwieweit haben Medien (Presse, Rundfunk etc.) und Kampagnen von NGOs den Diffusionsverlauf beschleunigt oder gebremst?

Medien und Kampagnen wirken insgesamt eher selektiv als breit diffusionsprägend: Sie verstärken vor allem bereits sichtbare Technologien und sind teils stark von aktuellen lokalen oder geopolitischen Entwicklungen geprägt, etwa vom russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine. Nur wenige Energiewendetechnologien sind konstant ein häufiges Thema in den Medien oder Gegenstand von Kampagnen. Hemmend wirken Medien vor allem in einzelnen konfliktgeladenen Feldern.

Ein häufiges Thema in den Medien oder Gegenstand von Kampagnen sind Technologien mit einer hohen Alltagsnähe, Anschlussfähigkeit an Verbraucherthemen sowie kommunaler Relevanz. Hierzu gehören in letzter Zeit Wärmenetze, Heimspeicher und Wärmepumpen.

Die Wirkung ist hierbei jedoch heterogen. Hemmend wirken Medien vor allem bei konflikt- und symbolpolitisch aufgeladenen Technologien wie E-Autos; Windkraft und Wärmepumpen. Die als „Heizungshammer“ geführte mediale Debatte um Wärmepumpen zeigt hierbei exemplarisch, dass Medien die Diffusion einer Technologie aktiv bremsen können. Auch um Windkraft, sowohl an Land wie auch auf See, wird mitunter eine negative, emotional aufgeladene und faktenferne Debatte geführt (bspw. zu Themen wie Infraschall oder optischer Ästhetik). Zugleich existieren jedoch auch positive Berichterstattungen zu Windkraft, sodass sich kein einheitliches Bild ergibt.

17 weitere Technologien sind zumindest sporadisch und meist positiv Medienthema. Hierzu zählen vor allem Lösungen wie Photovoltaik, Speicher, Ladepunkte oder Elektrolyseure.

Hinsichtlich fünf weiterer Technologien ist kaum mediale Aktivität zu verzeichnen, sodass eine entsprechende Wirkung durch Medien und Kampagnen nicht festzustellen ist. Dies betrifft vor allem wenig sichtbare, erklärungsbedürftige oder stark fachliche Technologien wie Wasserkraftwerke, Langzeitwärmespeicher, H₂-Thermen, virtuelle Kraftwerke und letztlich auch Smart Meter.

3.2.7 Pfadbezogene Faktoren

Die pfadbezogenen Faktoren deuten insgesamt darauf hin, dass die Diffusion von Energiewendetechnologien bislang stärker durch Beharrungskräfte des bestehenden Energiesystems als durch selbstverstärkende Dynamiken geprägt ist. Positive Pfadeffekte zeigen sich vor allem bei einzelnen Technologien wie Photovoltaik, Speichern oder virtuellen Kraftwerken, während in vielen anderen Feldern fossile Lock-ins, hohe Kosten und das Ausbleiben kritischer Massen bremsend wirken.

Faktor 20. Pfadabhängigkeiten: Inwieweit haben technologische oder wirtschaftliche Pfadabhängigkeiten die bisherige Diffusionsgeschwindigkeit gebremst?

Nur bei wenigen Energiewendetechnologien lässt sich feststellen, dass diese durch Pfadabhängigkeiten eher gefördert werden. Die meisten Energiewendetechnologien werden überwiegend durch bestehende fossile Systeme, langlebige Anlagen und eingeübte Praktiken gebremst.

Positiv wirken Pfadabhängigkeiten inzwischen allerdings bei Technologien, die Flexibilitäten ermöglichen und somit auf dem Pfad zu volatilen Energiequellen aufbauen. Ein deutlicher Impuls für die Verbreitung ergibt sich beispielsweise für virtuelle Kraftwerke, da immer mehr Wind- und Sonnenstrom die Marktposition dieser systematisch verbessert. Etwas weniger stark ist dadurch auch die Verbreitung von Heimspeichern und die sich andeutende Verbreitung großer Batteriespeicher zu erklären. Die Verbreitung von PV-Anlagen wiederum entwickelte sich einige Jahre lang aufgrund langfristig steigender Strompreise dynamisch, zeigt allerdings aktuell wieder eine Abschwächung der Marktdynamik.

Bei einigen Energiewendetechnologien, insbesondere bei Wasserkraftwerken, Biogasanlagen und Energiegenossenschaften, sind keine wirksamen Pfadabhängigkeiten identifizierbar, die die Diffusion fördern oder hemmen würden.

Im Falle von Wärmepumpen im Neubau ist das Ergebnis ähnlich, aber der Hintergrund ein anderer. Hier wirken fördernde und bremsende Pfadabhängigkeiten gegeneinander. Zum einen wird es für Architekten und Bauunternehmen, auch aufgrund mangelnder gesetzlich zugelassener Alternativen, immer normaler, Wärmepumpen vorzusehen. Andererseits ist das Vertrauen in eine „lauwarme“ Heizung immer noch beschränkt und ändert sich nur langsam. Die Wirkung der Pfadabhängigkeiten wurde daher ebenfalls auf Null veranschlagt.

Bei allen anderen Energiewendetechnologien gilt es in Zukunft unterschiedliche Erscheinungsformen von Lock-ins im fossilen Energiesystem zu überwinden, die im Falle der Langzeitwärmespeicher, der CO₂-Abscheidung und der Smart Meter unserer Einschätzung besonders stark ausfallen.

Faktor 21. Preisentwicklung: Wie hat sich der (inflationsbereinigte) Preis im Verlauf des Diffusionsprozesses entwickelt?

Bei acht Energiewendetechnologien konnten wir sinkende Preise oder eine steigende Wirtschaftlichkeit feststellen, die die Diffusion begünstigen. Insgesamt wirkt die Preisentwicklung damit selektiv: Sie unterstützt vor allem standardisierbare, international skalierte Strom- und Mobilitätstechnologien, bremst aber viele Wärme- und Infrastrukturlösungen.

Besonders günstig schneiden Technologien ab, die von globalen Lernkurven und Serienfertigung profitieren. Neben Onshore-Windkraftanlagen sind dies Batterie- und Heimspeicher, die aufgrund des weltweiten Elektroauto-Booms von Skaleneffekten der Batterieproduktion profitieren. Zudem sind es die Preise von Elektroautos selber, die von dieser Diffusionsentwicklung beeinflusst werden: Auch ohne Förderung sind sie in immer mehr Kostenpositionen – insbesondere bei Energie- und Wartungskosten – zunehmend preiswerter als Verbrenner. Auch mit Blick auf die Neuwagenpreise ist eine Tendenz auszumachen, die in wenigen Jahren auf Preisparität und später auf Preisvorteile hindeutet. Zuletzt sind sinkende Preise auch bei PV-Anlagen und Elektrolyseuren zu beobachten. Bei virtuellen Kraftwerken verbessern stetig bessere Marktbedingungen (z.B. wachsender Bedarf an Flexibilitätsleistungen) die Wirtschaftlichkeit.

Bei einem breiten Spektrum von Technologien der Wärmewende haben wir es dagegen mit hohen oder noch steigenden Preisen zu tun. Die Preisentwicklung ist zu einem kleinen Teil auch auf hohe Förderungen zurückzuführen, in der Regel jedoch vor allem auf allgemein steigende Preise für technische Zulieferprodukte, Rohmaterialien, Arbeitskosten, Zölle u.a.m.. Dieses Problem schildert die DUH (2025) zum Beispiel hinsichtlich der Wärmepumpe.

Faktor 22. Selbstverstärkende Effekte: Sind im sozialen System des Diffusionsprozesses selbstverstärkende Effekte wie z.B. Nachahmungseffekte aufgrund von Vorbildern/ Prominenten/ Meinungsführern oder kritische Masse-Phänomene zu

Insgesamt tragen selbstverstärkende Effekte nur in einer Minderheit der Fälle nennenswert zur Diffusion bei; übergreifend sind sie also eher ein verstärkender Zusatzmechanismus als ein Basistreiber. Konkret sind bei neun der untersuchten 29 Fälle selbstverstärkende Effekte zu vermuten. Diese neun Fälle sind Windkraft an Land, PV-Anlagen, Strom-Heimspeicher, große Batteriespeicher, Wärmenetze, Wärmepumpen im Neubau, Großwärmepumpen, Elektroautos, Ladeeinrichtungen und intelligente Transformatoren.

Die selbstverstärkenden Diffusionsdynamiken dieser Technologien ergeben sich zumeist aus sichtbaren wirtschaftlichen Vorteilen, günstigen regulatorischen Rahmenbedingungen, steigender Nachfrage oder wechselseitigen Verstärkungen zwischen komplementären Technologien. Konkret können finanzielle Anreize für beteiligte Akteure – etwa Kommunen bei Windkraftprojekten – sowie die wahrgenommene Rentabilität, insbesondere im Bereich der Eigenstromversorgung, lokale oder milieuspezifische Nachahmungseffekte auslösen. Bei Industrie- und Infrastrukturakteuren wirken darüber hinaus die branchenspezifische Sichtbarkeit und Kommunikation, beispielsweise durch Pilot- oder Ausbauprojekte im Bereich intelligenter Transformatoren, sowie das Erreichen einer kritischen Masse an Nutzern – etwa bei Wärmenetzen oder Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge – als Katalysatoren für Lerneffekte, Nachahmung und weiteren Ausbau.

Wo solche Effekte ausbleiben, dominieren projektförmige Einzelentscheidungen, geringe Fallzahlen oder eine noch nicht erreichte kritische Masse, etwa bei Offshore Windanlagen, Elektrolyseuren, Smart Metern, CCS oder Brennstoffzellen.

4 Analytische Einordnung und Handlungsoptionen

Nachdem im vorherigen Kapitel eher deskriptive und zusammenfassende Gruppierungsansätze und Auswertungen einzelner Einflussphären und -faktoren vorgestellt wurden, wird im Folgenden die analytische Perspektive vertieft. Dies gelingt, indem die Betrachtung von Gruppierungen (vgl. Kapitel 3.1) mit der Betrachtung der Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 3.2) kombiniert wird.

Kapitel 4.1 widmet sich zunächst dem Zusammenhang zwischen dem Spitzenindikator „Diffusionsdynamik“ und dem aktuellen Verbreitungsgrad. Aus diesem Zusammenhang lassen sich drei analytische Diffusionsgruppen – „Poor Dogs“, „Missing X“ und „Stars“ – ableiten. Darauf aufbauend werden Faktoren und Handlungsfelder herausgearbeitet, die durch eine Steigerung der Diffusionsdynamik potenziell zu einem höheren Verbreitungsgrad beitragen können.

Kapitel 4.2 greift anschließend die vier der Studie zugrunde liegenden Technologiefelder erneut auf (vgl. Kapitel 2.1 und 3.1.1) und vergleicht diese systematisch miteinander, um technologiefeldspezifische Konsequenzen und Handlungsoptionen abzuleiten.

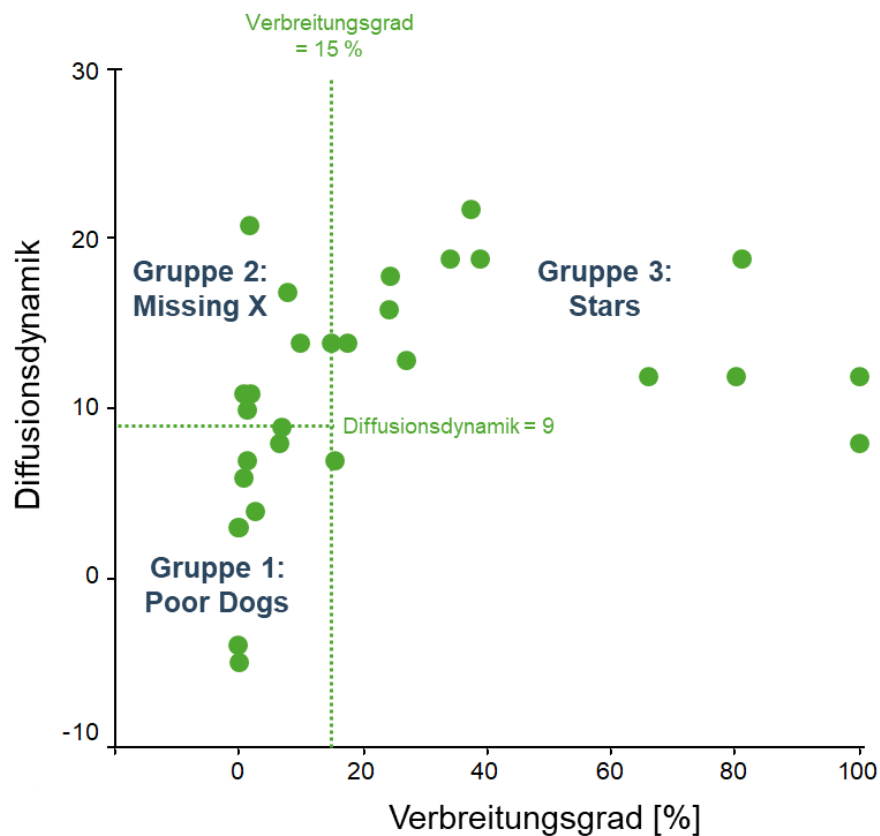
4.1 Diffusionsgruppenspezifische Handlungsoptionen

4.1.1 Einordnung nach Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad: „Poor Dog“, „Missing X“ oder „Star“?

Die folgende Abbildung 4 stellt je Energiewendetechnologie den errechneten Wert des Spitzenindikators „Diffusionsdynamik“ und den aktuellen Verbreitungsgrad dar.⁴ Die Diffusionsdynamik ergibt sich hierbei jeweils durch einfache Addition der 22 Einzelbewertungen aller Faktoren. Die Grafik deutet ein konsistentes Bild an, in dem die Diffusionsdynamik und der Verbreitungsgrad miteinander korrelieren. Beispielsweise wurde in Fällen mit nur geringem Verbreitungsgrad auch die Diffusionsdynamik als sehr niedrig bewertet – teilweise sogar mit Summenwerten unter 0.

⁴ In zwei Projekten, in denen die Diffusion großer Zahlen von Innovationen untersucht wurde (Clausen & Fichter, 2019; Fichter & Clausen, 2013), wurden Zusammenhänge zwischen einzelnen Faktoren und der abhängigen Variablen Verbreitungsgrad durch die Errechnung statistischer Korrelationen untersucht. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ist eine statistische Analyse und die Berechnung von Korrelationen und Signifikanzen jedoch aufgrund der zu geringen Fallzahl von 29 statistisch nicht aussagekräftig.

Abbildung 4: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für 29 Energiewendetechnologien

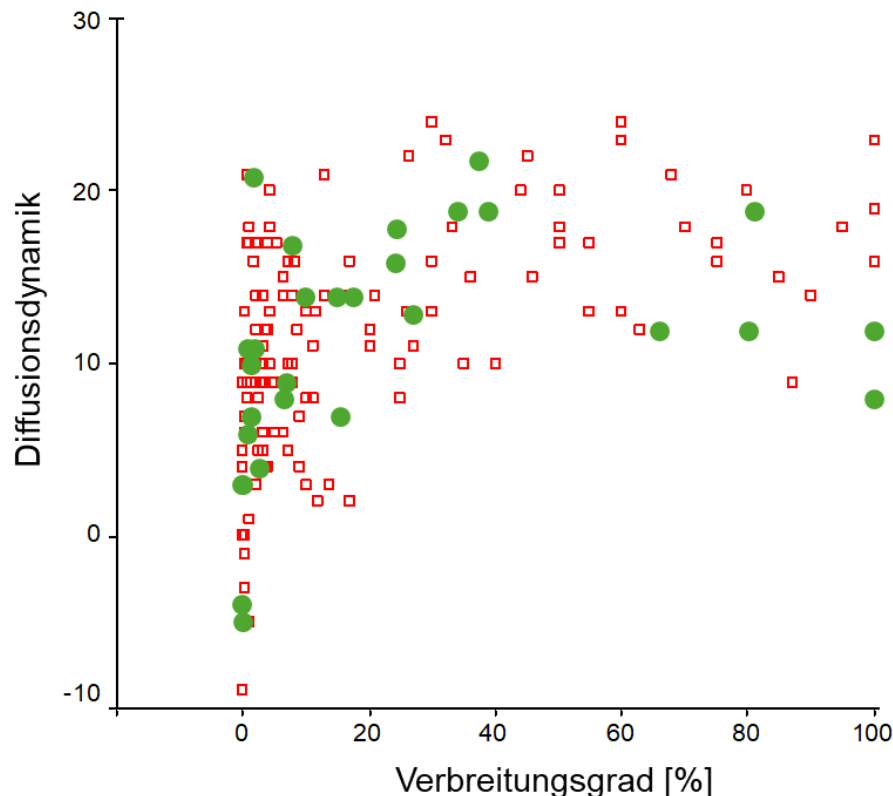


Quelle: eigene Darstellung

Die Struktur der Ergebnisse entspricht damit den Ergebnissen eines Vorgängerprojektes von Clausen und Fichter (2019), in dem 130 Umweltinnovationen untersucht wurden.

Abbildung 5 legt die Ergebnisse der beiden Studien daher zum Vergleich übereinander.

Abbildung 5: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für 29 Energiewendetechnologien (grün) im Vergleich zu einer branchenübergreifenden Stichprobe von 130 Umweltinnovationen (rot)



Quelle: Darstellung aus Clausen & Fichter (2019) (rot) gemeinsam mit den Ergebnissen der aktuellen Analyse (blau)

In der früheren Analyse (Clausen & Fichter, 2019) konnten drei Gruppen von Diffusionsfällen unterschieden werden: „Poor Dogs“⁵, „Missing X“⁶ und „Stars“⁷. Wie bereits in Abbildung 4 angedeutet, lässt sich ein ähnliches Muster auch in Bezug auf die unsere neue Analyse zu Energiewendetechnologien ausmachen.

- **Gruppe 1 „Poor Dogs“:** Fälle mit einem Wert von bis zu 9 beim Indikator Diffusionsdynamik bei einem Verbreitungsgrad von maximal 15 %
- **Gruppe 2 „Missing X“:** Fälle mit einem Wert von über 9 beim Indikator Diffusionsdynamik bei einem Verbreitungsgrad von maximal 15 %
- **Gruppe 3 „Stars“:** Fälle mit einem Verbreitungsgrad von 15 % bis 100 %

Bezogen auf die aktuelle Analyse sind die Fälle diesen Gruppen wie folgt zuzuordnen:

- **„Poor Dogs“ (9 Fälle):** H2-Thermen, CO₂-Abscheidung, Hochtemperatur-Wärmepumpen, Langzeitwärmespeicher, Energiegenossenschaften, Brennstoffzellen, Smart Meter, Erdsonden und dynamische Stromtarife
- **„Missing X“ (6 Fälle):** Großwärmepumpen, Elektrolyseure, Batteriespeicher, Sondenfelder, virtuelle Kraftwerke und Elektroautos mit Möglichkeit zum bi-direktionalen Laden

⁵ Innovationen, die in einer Nische stecken und aufgrund einer geringen Diffusionsdynamik aktuell wenig Chancen auf Verbreitung haben.

⁶ Innovationen mit noch geringer Verbreitung, die sich durch eine gewisse Diffusionsdynamik auszeichnen, denen für den Durchbruch und die breite Diffusion aber noch etwas fehlt („Missing X“).

⁷ Innovationen, die eine hohe Verbreitung und Diffusionsdynamik aufweisen und daher die Marktdurchdringung geschafft haben und somit als „Stars“ eingestuft werden können.

- **„Stars“ (14 Fälle):** Intelligente Transformatoren, Warme Wärmenetze, Elektroautos, Wind Offshore, Ladeeinrichtungen, Wärmepumpen in Bestandsgebäuden, PV-Anlagen, Heimspeicher, Wind Onshore, Wasserkraftwerke, Solarthermieranlagen, Wärmepumpen im Neubau, Biogasanlagen und Pelletheizungen

4.1.2 Vom „Poor Dog“ zu „Missing X“

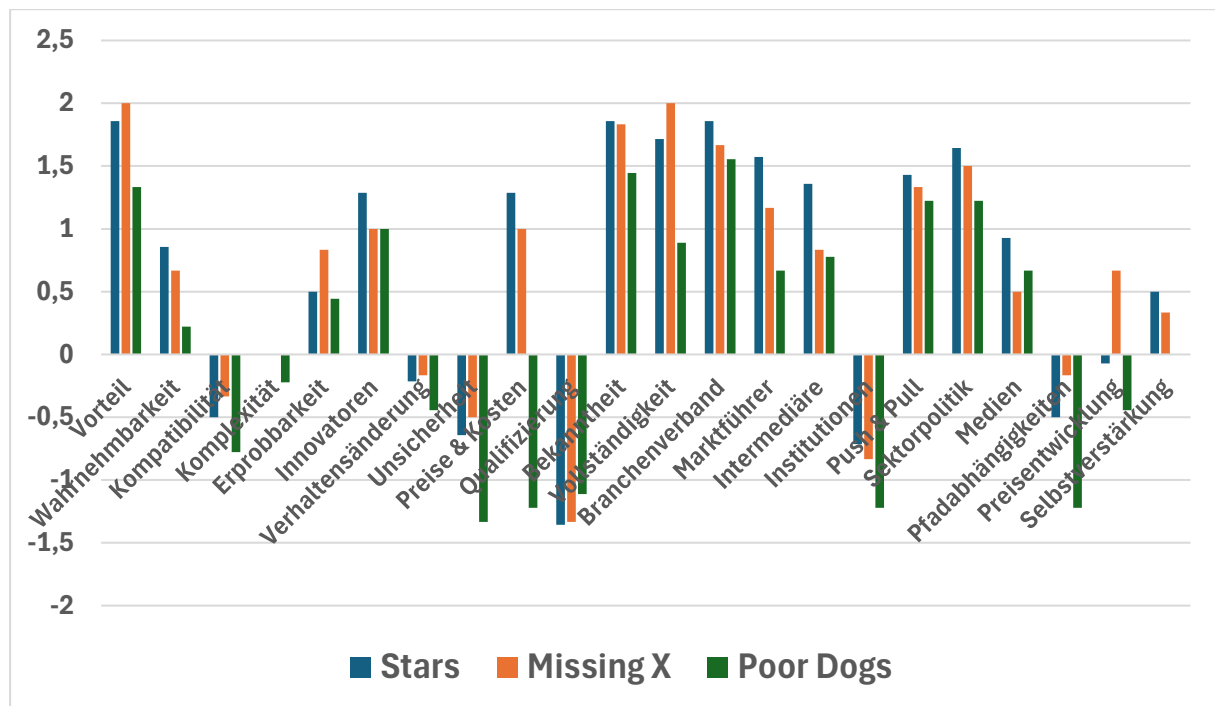
In früheren Untersuchungen mit größerer Fallzahl (Clausen & Fichter, 2019) fiel auf, dass sich die Diffusionsfälle der Gruppe „Missing X“ durch bekanntere Anbieter mit vollständigeren Angeboten sowie aktivere Marktführer und Branchenverbände, Intermediäre sowie Medien und Kampagnen von den „Poor Dogs“ abheben. In diesen Fällen haben die Akteure ihre Hausaufgaben gemacht, Partnerschaften geschlossen und Vertriebsstrukturen aufgebaut.

In der aktuellen Untersuchung fallen die „Poor Dogs“ in der Bewertung von 21 von 22 Faktoren hinter die „Missing X“ zurück. Während die „Poor Dogs“ im Durchschnitt eine Diffusionsdynamik von 3,4 haben, liegen die „Missing X“ mit einer durchschnittlichen Diffusionsdynamik von 14,0 fast gleichauf mit den Stars mit 14,6. Besonders groß sind die Unterschiede der Bewertung „Poor Dogs“ und „Missing X“ bei den Faktoren **relativer Vorteil, Unsicherheit, Vollständigkeit der Services, Position der Marktführer, Pfadabhängigkeiten und Preisentwicklung**. Verglichen mit der Vorgängeruntersuchung beziehen sich die wesentlichsten Unterschiede nicht vornehmlich auf Vertriebskanäle und Medien/Kampagnen, sondern auch auf „materielle“ Faktoren wie einen zu geringen relativen Vorteil, zu hohe Unsicherheit, zu hohe Pfadabhängigkeiten und eine zu wenig dynamische Preisentwicklung. Bei der vorliegenden Stichprobe von Energiewendetechnologien könnte daher die Anstrengung, einzelne Produkte aus der Gruppe der „Poor Dogs“ in die Gruppe der „Missing X“ zu bewegen, sehr groß werden.

4.1.3 Von „Missing X“ zu „Stars“

In die Gruppe der „Stars“ schafften es im branchenübergreifenden Sample der Vorgängerstudie von Clausen und Fichter (2019) primär diejenigen adopterfreundlichen Diffusionsfälle, die zu ihrem Umfeld kompatibel sind, geringe Verhaltensänderungen erfordern und mit geringeren Unsicherheiten verbunden sind, die dank einem guten Kosten-Nutzen-Verhältnis sehr vorteilhaft und wirtschaftlich sind und bei denen der Preis im Laufe der Zeit sinkt. Wirklich erfolgreich verbreitet werden also diejenigen Innovationen, die adopterfreundliche Eigenschaften haben und bei denen die Rahmenbedingungen des Marktes (relative Preisunterschiede zu weniger nachhaltigen „Wettbewerbsprodukten“) die Adoption fördern.

Abbildung 6: Durchschnittliche Bewertung der einzelnen Faktoren nach drei Gruppen von Fällen



Quelle: eigene Darstellung

In der aktuellen Untersuchung (vgl. Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026d, 2026c) sind es mitunter andere Faktoren, die eine unterschiedliche Beurteilung der „Missing X“ und der „Stars“ aufweisen. Am größten sind die Unterschiede (in der Grafik die relative Höhe des blauen und des orangenen Balkens) in der Beurteilung hinsichtlich der Aktivität der Intermediäre sowie beim Faktor Medien und Kampagnen. Dies legt nahe – obgleich Preise und Kosten weiterhin ein wichtiger Treiber sind, dass das Erklärungsmodell für den Schritt von „Missing X“ zu „Stars“ insgesamt neu durchdacht werden muss.

Wenn wir an dieser Stelle nochmal einen Blick auf die durchschnittliche Bewertung der einzelnen Faktoren werfen, dann stellen wir fest, dass die meisten Energiewendetechnologien als sehr vorteilhaft beurteilt werden. Dies gilt besonders, wenn Klimafreundlichkeit als Vorteil gesehen wird, was jedoch nicht bei allen Menschen (Adoptorguppen) eine hohe Bedeutung hat.

Umso bedeutsamer ist der zweite Aspekt des Kosten-Nutzen-Verhältnisses, nämlich die Kosten und die Wirtschaftlichkeit. Derzeit bieten die Kosten und die Wirtschaftlichkeit vieler Energiewendetechnologien noch Angriffspunkte für Kritik, wie sich 2023 im Rahmen der sogenannten Heizungshammerkampagne deutlich zeigte. Basierend auf unseren Analysen, ist die **Senkung der Kosten von Innovationen der Energiewende somit aus zwei Gründen von zentraler Bedeutung:**

- Konsumentinnen und Konsumenten werden durch hohe Preise abgeschreckt. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass viele Verbraucherinnen und Verbraucher selbst dann von einem Kauf absehen, wenn ein teures Produkt letztlich wirtschaftlich ist. Oftmals ist das primäre Kriterium für die Kaufentscheidungen, dass der Kaufpreis im Rahmen der persönlichen Liquidität bezahlbar erscheint.

- Hohe Investitionen in technische Anlagen und Infrastrukturen verursachen erhebliche Transformationskosten für Unternehmen und öffentliche Haushalte. Diese Kosten werden zudem in der öffentlichen Debatte über die Energiewende häufig als zentrales Konterargument gegen Energiewendetechnologien aufgegriffen.

Somit kommt der Kostensenkung rund um Energiewendetechnologien höchste Bedeutung für deren Diffusion zu. Doch – und auch dies zeigen unsere Analysen deutlich – selbst wenn das Kosten-Nutzen-Verhältnis einer Technologie vorteilhaft ist, kann die Diffusion durch Hinweise auf die Notwendigkeit von Verhaltensänderungen und das Sähen von Unsicherheit gebremst werden.

Zusammenfassend hängt die Überführung von Energiewendetechnologien des Typs „Missing X“ in die Gruppe der „Stars“ und damit die Verschiebung großer Marktanteile zugunsten von Energiewendetechnologien davon ab, dass...

- (1) der Nutzen von Produkten verstanden wird,
- (2) Kosteneffizienz und Wirtschaftlichkeit für die Innovation sprechen,
- (3) Verhaltensänderungen als begrenzt bzw. machbar dargestellt und verstanden werden und
- (4) Unsicherheiten in der Breite der Gesellschaft ausgeräumt werden.

Die Diffusion von Energiewendetechnologien darf daher nicht nur technisch-funktionell gesehen werden, sondern muss flankiert werden durch Kommunikationsanstrengungen, politische Maßnahmen sowie unternehmerische Strategien und Geschäftsmodelle, die die vier aufgeführten Aspekte in den Fokus nehmen. Umgekehrt entfalten bspw. Medienkampagnen, die Energiewendetechnologien entlang dieser Aspekte gezielt angreifen, eine entsprechend destruktive Wirkung auf deren Diffusion.

4.2 Technologiefeldspezifische Handlungsoptionen

4.2.1 Vergleich der Faktorbewertungen je Technologiefeld

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wurden vier Technologiefeldgruppen gebildet, innerhalb derer jeweils 5 bis 10 Energiewendetechnologien untersucht wurden (Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d). Die vier Gruppen umfassen die Stromversorgung, die Wärmeversorgung, Smart Technologie sowie Wasserstoff und CO₂. Die Einteilung basiert zum einen auf den Technologiefeldern eines antizipierten, durch die Energiewende transformierten Energiesystems der Zukunft und orientiert sich zum anderen an den im Gesamtprojekt TEN.efzn gebildeten Forschungsplattformen.⁸

Die folgende Grafik ermöglicht einen Vergleich der durchschnittlichen Bewertung der 22 Faktoren separat nach den vier gebildeten Technologiegruppen. Wesentliche Unterschiede in der Bewertung der Gruppen finden sich bei den folgenden Faktoren:

- Relativer Vorteil: Wasserstoff und CO₂-Technologien schneiden im Durchschnitt schlechter ab.

⁸ In zwei Vorgängerprojekten, in denen die Diffusion großer Zahlen von Innovationen untersucht wurde (Clausen & Fichter, 2019; Fichter & Clausen, 2013), wurden Gruppen ähnlicher Innovationen durch das statistische Verfahren der Clusterung errechnet. Das ist aufgrund der geringen Fallzahl in diesem Projekt nicht möglich. Dennoch wird im Folgenden ein Gruppenvergleich durchgeführt.

Erfolgsfaktoren der Verbreitung von Energieinnovationen

- Erprobbarkeit: Wärmeversorgungstechnologien sind grundsätzlich kaum erprobbar, da ihre Erprobung meist mit der Verlegung von Leitungen oder ähnlicher Infrastruktur verbunden ist und ihre probeweise Anwendung daher erhebliche „sunk-cost“ verursacht.
- Verhaltensänderung: Smart Technologies erfordern besonders weitreichende Verhaltensänderungen.
- Unsicherheiten: Bei Wasserstoff und CO₂-Technologien sind die Unsicherheiten im Vergleich zu den anderen Technologiefeldgruppen relativ hoch.
- Preise, Kosten und Wirtschaftlichkeit: Diese werden bei Stromversorgung und Smart Technologies überwiegend positiv bewertet, bei Wärmeversorgung neutral bis ambivalent und bei Wasserstofftechnologien deutlich negativ.
- Aktivitäten von Marktführern und Intermediären: Diese sind bei Wasserstoff und CO₂-Technologien bislang vergleichsweise schwach entwickelt.
- Preisentwicklung: Für Wärmeversorgungstechnologien zeigen sich im Durchschnitt deutliche Preissteigerungen.

Abbildung 7: Durchschnittliche Bewertung der 22 Faktoren nach Technologie-Gruppen



Quelle: Eigene Darstellung.

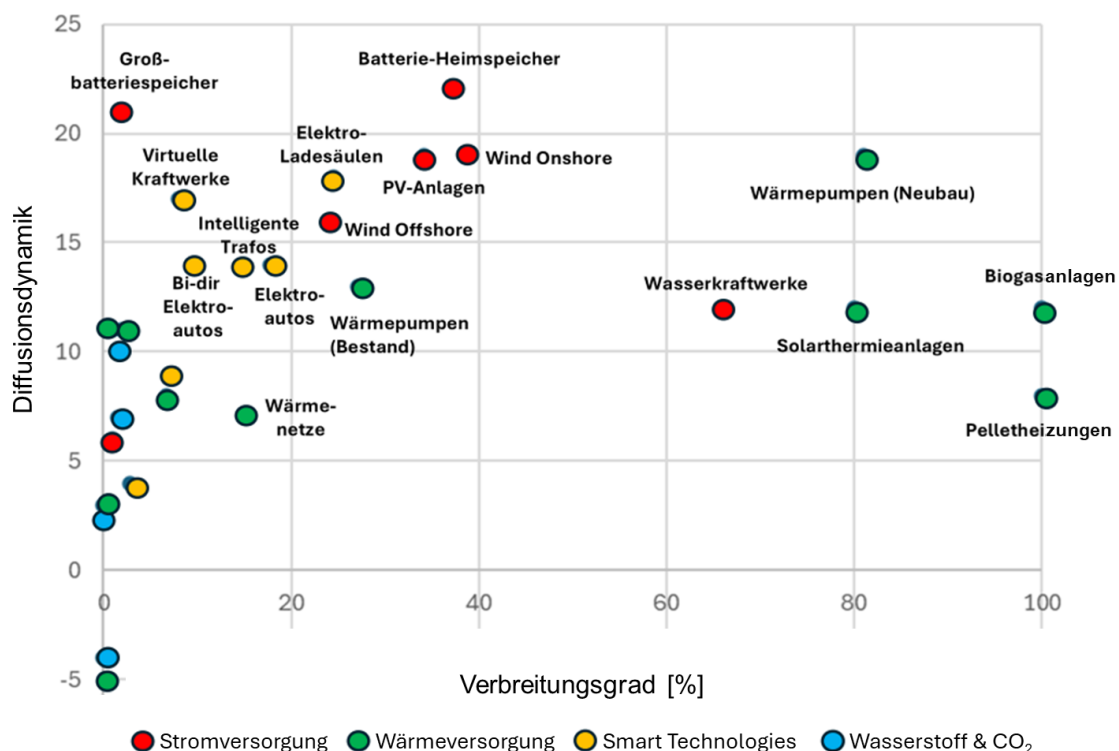
Eine andere Form des Gruppenvergleichs bezieht sich auf die Diffusionsdynamik und den Verbreitungsgrad der einzelnen Diffusionsfälle. Verändert man Abbildung 4 so, dass die Gruppenzugehörigkeit erkennbar wird, dann werden weitere Sachverhalte deutlich.

Die vier Produkte mit dem höchsten Verbreitungsgrad gehören alle in die Gruppe der **Wärmeversorgung**. Dieses Ergebnis ist jedoch erklärungsbedürftig, da Pelletheizungen und Biogasanlagen hier mit

100 % eingestuft wurden – und dies nicht, weil sie den Absatzmarkt dominieren, sondern weil ihre Gesamtzahl schon jetzt so hoch ist, dass die Biomasse, die sie in Energie umsetzen, knapp wird. Auch solarthermische Anlagen erreichen nur deshalb einen hohen Verbreitungsgrad, weil auf immer mehr Dächern Photovoltaikanlagen den Platz in Anspruch nehmen. Entsprechend gehen Langfristszenarien wie das Szenario O45-Strom (Fraunhofer ISI, 2024) lediglich von einem Beitrag der Solarwärme von 11 TWh/a aus. Da der BSW-Solar bereits heute eine Wärmeerzeugung durch Solarthermie von 8,8 TWh (BSW Solar, 2025) dokumentiert, errechnet sich ein Verbreitungsgrad von 80 %. Alle drei Innovationen könnten grundsätzlich in vielen weiteren Anwendungsfällen eingesetzt werden, aber ihr zugänglicher Markt wird durch sozio-technische Rahmenbedingungen eingeschränkt.

Im Vergleich dazu werden Wärmepumpen in 81 % aller neu errichteten Gebäude installiert und 8,5 %, oft Mehrfamilienhäuser, werden an Fernwärme angeschlossen (Destatis, 2025).

Abbildung 8: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für 29 Energiewendetechnologien



Quelle: eigene Darstellung

Sowohl bei der **Strom-** wie bei der **Wärmeversorgung** sind Fälle mit sehr niedrigem wie auch sehr hohem Verbreitungsgrad enthalten.

Bei den vier Fällen aus der Gruppe Stromversorgung mit dem höchsten Verbreitungsgrad bemisst sich dieser durchweg am anvisierten Ausbauziel des Jahres 2030 und liegt bei PV, Onshore-Wind und Batterie-Heimspeichern zwischen 35 und 40 % und bei Wasserkraftwerken bei 60 %.

Die **Smart Technologies** erreichen Verbreitungsgrade zwischen 2,8 % (Smart Meter) und 24,5 % (Ladeeinrichtungen für Elektroautos).

Die **Wasserstoff- und CO₂-Technologien** erreichen Verbreitungsgrade zwischen 0 % (CO₂-Abscheidung und H₂-Thermen) und 1,5 % (Brennstoffzellen und Elektrolyseure).

Insbesondere bei den Wasserstoff- und CO₂-Technologien ist das nächste Ziel, sie marktfähig zu bekommen und sie aus dem Bereich der „Poor Dogs“ in den Bereich „Missing X“ voranzubringen.

Bei den anderen drei Technologiegruppen – Strom, Wärme und Smart Technologies – liegt der Schwerpunkt darauf, ihre Marktanteile gegenüber konventionellen und fossilen Lösungen zu erhöhen.

4.2.2 Diffusionsbedingungen und Handlungsoptionen je Technologiefeld

Die Analyse der einzelnen Technologiefelder offenbart kein einheitliches Diffusionsmuster, sondern sektorspezifische Herausforderungen, Pfade und – daraus ableitbare – Handlungsoptionen. Diese Aspekte werden im Folgenden je Technologiefeld zusammenfassend dargestellt.

Stromversorgung

Die untersuchten sieben Energiewendetechnologien der Stromversorgung weisen überwiegend hohe Diffusionsdynamiken auf und sind größtenteils im Massenmarkt angekommen. Sie profitieren somit von Skaleneffekten und sinkenden Kosten. Technologien wie Photovoltaik, Windenergie, Heim- und Großbatteriespeicher profitieren zusätzlich von der wachsenden Nachfrage nach Flexibilität und Systemintegration. Gleichzeitig bleiben Netzausbau, Genehmigungen, öffentliche Kommunikation und Schwankungen in politischen und regulatorischen Rahmensetzungen zentrale Bremsen.

Einzigste Ausnahme hinsichtlich der hohen Diffusionsdynamiken sind Energiegenossenschaften und hinsichtlich des Diffusionsgrades wiederum die Energiegenossenschaften sowie die Batterie-Großspeicher. Ein zentraler Faktor, der Energiegenossenschaften und Batterie-Großspeicher in der Vergangenheit vom Massenmarkt ferngehalten hat, ist beziehungsweise war ihre begrenzte Wirtschaftlichkeit. Dieser Faktor befindet sich jedoch im Wandel. Im Fall der Batteriespeicher sind die Batteriepreise in den letzten Jahren bereits so niedrig geworden, dass es einen klaren Business-Case für am Markt operierende Großspeicher gibt (PV Magazin, 2025a). Batteriespeicher weisen dementsprechend inzwischen eine hohe Diffusionsdynamik auf und sind auf dem Weg in den Massenmarkt. In Bezug auf Energiegenossenschaften könnte der mit § 42c EnWG eingeführte Rechtsrahmen zum Energy Sharing, also zur gemeinsamen Nutzung von erneuerbar erzeugtem Strom, neue wirtschaftliche Anreize schaffen und damit ihre weitere Verbreitung ebenfalls begünstigen (dena, 2025; Wiesenthal, Aretz, Ouanes & Petrick, 2022). Ob diese Wirkung tatsächlich eintritt, wird sich jedoch erst mit der Umsetzung ab Juni 2026 und den weiteren regulatorischen Konkretisierungen zeigen.

Vor dem Hintergrund dieser Fälle sehen wir eine zentrale Diffusionsstrategie darin, die schon jetzt niedrigen Kosten der Stromerzeugung aus Wind und Sonne dazu zu nutzen, immer mehr Menschen in den Regionen der Anwendung dieser Technologien von ihnen wirtschaftlich profitieren zu lassen, um so die Unterstützergruppe sukzessive auszuweiten.

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass insbesondere die zentralen Stromerzeugungstechnologien aus Wind und Sonne Gegenstand öffentlicher Kontroversen, negativer Framings sowie irreführender

oder sachlich unzutreffender Darstellungen sind. Diese Diskurse werden unter anderem von Akteuren des rechten politischen Spektrums getragen oder verstärkt. Zentrale Aufgabe der Kommunikation zur Festigung der Marktposition dieser Stromerzeugungstechnologien wird es daher sein, den verschiedenen Formen von Angriffen konsequent, immer wieder und letztlich langfristig eine Kommunikation entgegenzusetzen, die aufklärt und falschen Behauptungen entgegentritt.

Wärmeversorgung

Im Bereich der Wärmeversorgung ist die Diffusion im Vergleich zur Stromversorgung im Durchschnitt langsamer und komplexer bzw. differenzierter, da sie stark von Bestandsgebäuden, Wärmenetzen und sozialen Praktiken abhängt. Beispielsweise diffundieren Wärmepumpen im Neubau schnell (Verbreitungsgrad 81 %), während der Bestand deutlich träger bleibt. Zudem sind zum Beispiel Hochtemperatur- und Großwärmepumpen wichtige systemische Bausteine im Wohn- und Industriebereich, sie stehen noch in einer frühen Phase und diffundieren bisher nur langsam.

Zugleich gibt es auch unter den untersuchten neun Energiewendetechnologien der Wärmeversorgung bereits eine Reihe von Erfolgsfällen (Stars) mit hoher Diffusionsdynamik und hohem Verbreitungsgrad. Wärmepumpen und Wärmenetze verbreiten sich zunehmend und Wärmenetze rund um Biogasanlagen wie auch Pelletheizungen haben sich in Marktnischen etabliert. Ein weiteres Wachstum von um Biogasanlagen und Pelletheizungen könnte zukünftig jedoch zu Knappheiten führen. Großwärmepumpen sind gegenwärtig dabei, sich im Markt für Großwärmeerzeuger zu etablieren. Dieser Prozess wird aufgrund eines Hinterherhinkens der Dekarbonisierung der Prozesswärme für Hochtemperatur-Wärmepumpen jedoch noch länger dauern.

Mit Solarwärmanlagen und Langzeitwärmespeichern wurden zwei Technologien der Low-Exergy Energieversorgung untersucht, die sich nur langsam und in einem begrenzten Markt verbreiten.

Die zentrale Strategie für die Dekarbonisierung des Wärmesektors besteht aus unserer Sicht in der weiteren Förderung von Wärmepumpen und Wärmenetzen, flankiert von ökonomischen Initiativen zur Senkung der Investitions- und Betriebskosten. Zudem sind integrierte Energiesysteme für Gebäude, die auf möglichst preiswerte Wärmeversorgung und hohe Autarkie zielen, wichtig. Zu solchen Systemen zählen neben Luft- und Erdwärmepumpen auch PV-Anlagen, Smart-Meter, dynamische Stromtarife und Gebäude-Energiemanagementsysteme.

Smart Technologies

Die „Smart Technologies“ tragen nicht nur zur Digitalisierung bei, sie hängen auch stark von der Digitalisierung der Infrastruktur ab und zeigen, dass Nutzerfreundlichkeit, institutionelle Gestaltung und wirtschaftliche Anreize entscheidend sind.

Innerhalb der sechs untersuchten Energiewendetechnologien der Smart Technologies gibt es eine Gruppe von fünf Technologien, die gerade in den Massenmarkt vordringen. Dies sind zum einen Elektroautos und die dazugehörigen Ladeinfrastrukturen. Sie sind für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors zentral und mit einigen Jahren Verspätung wird gegenwärtig absehbar, dass der Elektro-

antrieb wohl auch die Zukunft des Schwerlastverkehrs darstellen wird. Weitere zentrale Smart Technologies sind intelligente Transformatoren und virtuelle Kraftwerke, die sich gegenwärtig beide weitgehend marktgetrieben verbreiten.

Unterstützung benötigen dagegen Smart Meter und potenziell auch dynamische Stromtarife, die den Bottleneck zur Realisierung eines der Erzeugung folgenden Verbrauchs darstellen. Ihre Diffusion stockt bislang – nicht primär wegen technischer Mängel, sondern wegen regulatorischer Überkomplexität, geringer Wirtschaftlichkeit für viele Haushalte und schleppender Umsetzung durch Unternehmen. Hier benötigt es eine konsistente Strategie zum Rollout in die Fläche.

Wasserstoff und CO₂

Zuletzt zeigt sich im Bereich Wasserstoff und CO₂ das Dilemma einer hohen strategischen Relevanz bei zugleich fehlender Wirtschaftlichkeit, unvollständiger Infrastruktur und einer bislang unzureichend klaren Vision für Entwicklung und Diffusion. Elektrolyseure sind teilweise technisch ausgereift, aber wirtschaftlich und systemisch noch schwer darstellbar. Brennstoffzellen haben sich im Pkw-Bereich bislang nicht durchgesetzt, könnten aber in einzelnen Nischen – etwa bei Notstrom oder speziellen Anwendungen – relevant bleiben. CCS erscheint vor allem für schwer vermeidbare Emissionen als mögliche Ergänzung, ist aber teuer, politisch umstritten und auf neue Infrastruktur angewiesen.

Die Wasserstoffwirtschaft insgesamt bleibt damit ein Feld mit hohem strategischem Anspruch, aber offenem Diffusionspfad. Sie ist zwar schon seit Jahrzehnten Gegenstand von Plänen und Überlegungen (z.B. Büttner, 1991), aufgrund der ebenfalls seit Jahrzehnten extrem niedrigen Preise für fossile Energie kam sie über die wissenschaftliche Konzeption hinaus jedoch kaum voran. Hinzu kommt, dass aufgrund der Vorstellungen verschiedener Verkehrsminister große Anteile der verfügbaren Forschungsmittel in die Sackgasse der Wasserstoffmobilität gesteckt wurden (Fichter, Clausen, Kern, Schmelzle & Hummel, 2023; Kern, Schmelzle, Clausen, et al., 2023).

Die Diffusion zentraler Technologien der Wasserstoffwirtschaft wurde an keiner Stelle wirksam vorangetrieben. Elektrolyseure zur Herstellung von grünem Wasserstoff konnten mit fossilem grauem Wasserstoff aus Erdgas nicht konkurrieren. Brennstoffzellen für PKW erlebten seit der zweiten Hälfte der 2010er Jahre bis etwa 2022 einen langsamen Anstieg der Verkaufszahlen auf niedrigem Niveau. Seither brechen die Absatzzahlen weltweit ein und in Deutschland geht nicht nur der Bestand an Wasserstoff-PKW bereits wieder zurück, auch die Tankstellen werden wieder abgebaut. Ob und ggf. wann Brennstoffzellen in LKW ein ähnliches Schicksal erleiden, ist noch nicht abzusehen.

Stationäre Brennstoffzellen, z.B. zur mobilen Stromerzeugung, scheinen sich eine Marktnische zu erobern, die aber gegenwärtig noch klein ist und nur knapp 100.000 Stück p.a. umfasst. Von Millionenstückzahlen, die in der PKW-Branche erwartet wurden, ist man weit entfernt.

H2-Ready-Heizthermen sind das nächste Massenprodukt, auf dem Hoffnungen der Wasserstoffwirtschaft ruhen. Gegenwärtig werden von Viessmann und Vaillant bereits Thermen verkauft, die durch einen in Zukunft verfügbaren Umrüstsatz für die Verbrennung von 100 % Wasserstoff umgerüstet werden können. Ob aber jemals in großem Umfang Wasserstoff-Verteilnetze entstehen werden, ist offen.

Die zentrale Strategie der Wasserstoffwirtschaft sehen wir in einer Konzentration auf den Aufbau von Elektrolysekapazitäten und den Ausbau des Wasserstoff-Kernnetzes, um Wasserstoff-Kraftwerke versorgen zu können, die zur Deckung von Spitzenlasten im Stromsystem und – wo möglich – mittels Kraft-Wärme-Kopplung auch in Wärmenetzen eingesetzt werden können. Ergänzend zum Wasserstoff-Kernnetz sollte ein CO₂-Netz gebaut werden, mit dem abgeschiedenes CO₂ zu Synthesanlagen transportiert werden kann, die aus Wasserstoff Kerosin herstellen, um den Flugverkehr mit Treibstoff zu versorgen. Die Schifffahrt wird vermutlich eher auf Ammoniak als Treibstoff setzen, sodass für die Produktion solcher Treibstoffe kein CO₂ benötigt wird.

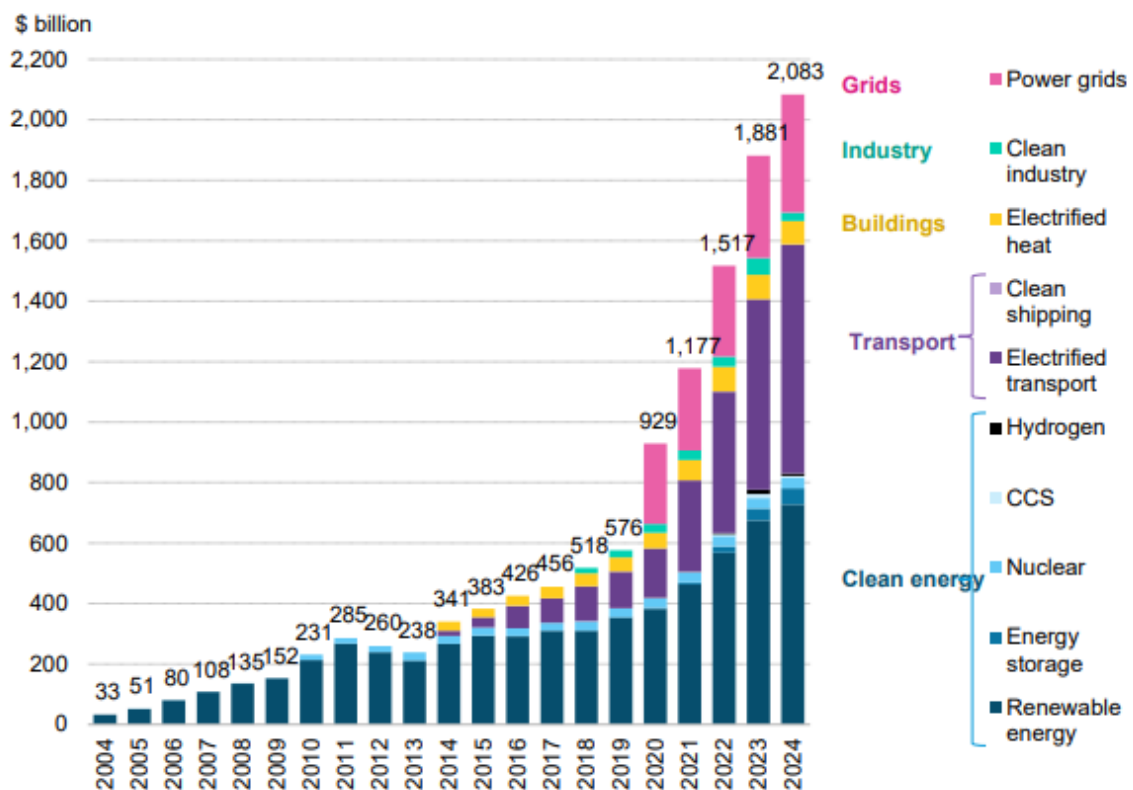
Ebenso dürfte es sinnvoll sein, die jahrzehntelange und letztlich wenig erfolgreiche Förderung von Wasserstoffanwendungen in der Mobilität und von H₂-Thermen im Kleinverbrauch einzustellen. Stattdessen erscheint eine Priorisierung solcher Anwendungen erforderlich, für die auf absehbare Zeit keine tragfähigen Alternativen zur Verfügung stehen (Fichter et al., 2023).

5 Fazit

Die vorliegende übergreifende Auswertung bündelt die Ergebnisse von vier Materialbänden (Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d), die im Rahmen des Teilprojekts I.2 „Innovations- und Diffusionspfadanalysen Energietechnologien“ des TEN.efzn-Forschungsprogramms entstanden sind. Sie arbeitet somit zentrale Muster der Technologiediffusion auf Basis von 29 Einzelanalysen zu Energiewendetechnologien aus den Bereichen Stromversorgung, Wärmeversorgung, Smart Technology sowie Wasserstoff und CO₂ heraus. Im Fokus steht dabei die integrierte Betrachtung hemmender und fördernder Einflussfaktoren sowie daraus ableitbarer Schlussfolgerungen für die Verbesserung von Diffusionsdynamiken.

Über alle vier Materialbände hinweg wird deutlich, dass die Energiewende kein rein technisches Modernisierungsprojekt ist, sondern ein dynamischer, umkämpfter und sozio-technischer Transformationsprozess unserer Gesellschaft. Zwar wird ihr langfristiger Zielhorizont von zentralen Akteuren der Energiewirtschaft zunehmend als stabil eingeschätzt. So konstatierte Vattenfall-Deutschlandchef Robert Zurawski, „die Energiewende [ist] mittlerweile unumkehrbar“ (Bauchmüller & Salavati, 2025). Auch Aurélie Alemany, Vorstandsvorsitzende der enercity AG, sieht mit der bestätigten Klimaneutralität bis 2045 einen stabilen Rahmen; „alles andere ist dann eine Frage der Umsetzung“ (Kutsche & Schrader, 2025). Schaut man sich die Entwicklung der weltweiten Investitionen in die Transformation des Energiesystems 2004 bis 2024 an (Abbildung 9), so scheinen diese Aussagen in der Tat naheliegender.

Abbildung 9: Weltweite Investitionen in die Transformation des Energiesystems 2004 bis 2023



Quelle: Kennedy (2025)

Gerade die von Alemany angesprochene Umsetzung bleibt jedoch konflikthaft: Die Energiewende erfordert erhebliche Investitionen, greift tief in Infrastrukturen, Märkte und Alltagspraktiken ein und trifft auf Widerstände gesellschaftlicher und politischer Akteure sowie fossiler Interessengruppen. So werden etwa Strompreiszonen insbesondere in Süddeutschland vehement abgelehnt, obwohl Modellierungen auch dort sinkende Strompreise erwarten lassen (Ariadne Projekt, 2025). Zudem wird die Energiewende politisch gezielt zum Gegenstand gesellschaftlicher Polarisierung gemacht. So versucht etwa die AfD, durch die Herabwürdigung der Energiewende und die Betonung möglicher negativer Folgen einen Gegensatz zwischen „der Bevölkerung“ und „linken Eliten“ zu konstruieren, um gesellschaftliche Konfliktlinien zu verschärfen und daraus politisches Kapital zu schlagen (Heinrich Böll Stiftung, 2024).

Die Diffusion von Energiewendetechnologien ist damit weder trivial noch vorgegeben, sondern muss politisch, ökonomisch und gesellschaftlich gestaltet werden. Vor diesem Hintergrund werden die aus den Einzelanalysen gewonnenen Erkenntnisse im Folgenden in fünf übergreifenden Faktoren gebündelt, die den Erfolg der Energiewende und ihrer Technologien maßgeblich mitbestimmen.

5.1 Erfolgsfaktoren der Diffusion von Energiewendetechnologien

5.1.1 Klare politische Leitplanken mit Lernbereitschaft verbinden

Politik und Regulierung sind zentrale Gestaltungskräfte technologischer Diffusion. Energiewendetechnologien verbreiten sich nicht allein aufgrund technischer Reife oder langfristiger Wirtschaftlichkeit. Basierend auf unseren Materialbänden (Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d) erscheint es für die Diffusion von Energiewendetechnologien entscheidend, dass politische Rahmenbedingungen eine langfristige Orientierung geben, Investitionssicherheit schaffen und den Aufbau von Märkten, Infrastrukturen und Serviceökosystemen ermöglichen.

Dies zeigen erfolgreiche Diffusionspfade ebenso wie stockende Entwicklungen. Photovoltaik mit einem Verbreitungsgrad von 34,2 Prozent relativ zum 2030-Ziel und Wärmepumpen mit einem Anteil von 48 Prozent im aktuellen Heizungsabsatz (BWP e.V., 2026) beziehungsweise 74 Prozent im Neubau (PV Magazin, 2025b) profitierten von konsistenten politischen Instrumenten wie EEG, GEG, BEG-Förderung und kommunaler Wärmeplanung. Auch in anderen Bereichen hängt Diffusion wesentlich von klaren politischen Rahmensetzungen ab: etwa von Flächenausweisung und Planungsrecht im Stromsektor, von dynamischen Stromtarifen im Bereich digitaler Energietechnologien oder von Infrastrukturplanung, Förderkulissen und neuen Marktordnungen im Wasserstoff- und CO₂-Bereich.

Umgekehrt bremsen politische Unsicherheit, abrupte Kurswechsel und regulatorische Überkomplexität die Diffusion. Besonders deutlich wird dies bei Elektroautos: Die Einführung der Umweltprämie im Jahr 2020 beschleunigte den Markthochlauf deutlich und trug zu Marktanteilen von bis zu 30 Prozent bei. Ihr abrupter Wegfall im Jahr 2023 führte hingegen zu einem spürbaren Rückgang der Neuzulassungen (Allianz-Direct, 2025).

Der Erfolgsfaktor liegt daher in klaren, langfristig verlässlichen und zugleich lernfähigen Leitplanken. Verlässlichkeit bedeutet aus unserer Sicht nicht, Instrumente unverändert fortzuführen, sondern

Ziele und Übergangspfade – beispielsweise die im Bundes-Klimaschutzgesetz verankerten Ziele die Emissionen bis 2045 schrittweise auf Netto-Treibhausgasneutralität zu reduzieren (Umweltbundesamt, 2025) – so konsistent einzuhalten, dass Haushalte, Unternehmen, Kommunen und Investoren ihre Entscheidungen daran ausrichten können. Lernbereitschaft bleibt notwendig, weil sozio-technische Rahmenbedingungen, wie technologische Innovationen, Marktbedingungen und soziale Akzeptanz, dynamisch sind. Politische Anpassungen sollten deshalb möglich sein, aber transparent, nachvollziehbar und ohne abrupte Brüche erfolgen. Wo Politik konsistent und vorausschauend ist, entstehen Investitionen, Lernkurven und Serviceökosysteme, wo sie stoppt, schwankt oder widersprüchlich ist, geraten selbst technisch ausgereifte Lösungen ins Stocken.

5.1.2 Infrastrukturen, Institutionen und Kompetenzen als Voraussetzungen stärken

Wie sowohl das Ziel- und Strukturbild eines transformierten Energiesystems (Abbildung 2, S. 5) als auch die Gruppierungen und Charakterisierungen in Kapitel 3.1 andeuten, diffundieren Energiewendetechnologien nicht als isolierte Einzeltechnologien, sondern als miteinander verknüpfte Technologiekonfigurationen. Der zweite Erfolgsfaktor besteht daher darin, ihren Markthochlauf nicht linear und einzeltechnologiebezogen zu verstehen, sondern als sektorübergreifenden und industriepolitisch flankierten Aufbau neuer Energiesysteme zu gestalten.

Dabei ist die Unterscheidung zwischen anwendernahen Endkundentechnologien einerseits und systemrelevanten technischen, sozialen und organisatorischen Infrastrukturen andererseits zentral. Sichtbare und anwendernahe Technologien wie Photovoltaik, Wärmepumpen oder Elektroautos verbreiten sich in der Regel, sobald ihr Nutzen individuell erfahrbar, sozial sichtbar sowie wirtschaftlich plausibel und finanzierbar ist. Ihr Nutzen ist jedoch von Hintergrundtechnologien, Betreibermodellen und Dienstleistungen wie Smart Metern, intelligenten Netzkomponenten, Speicherinfrastrukturen, Wasserstoffnetzen, virtuellen Kraftwerken oder Energiegenossenschaften abhängig. Beispielsweise sind Speichertechnologien, intelligente Messsysteme, dynamische Stromtarife, Lastmanagement, Energiegenossenschaften sowie die Vernetzung dezentraler Erzeugungsanlagen in virtuellen Kraftwerken zentrale Voraussetzungen, um das Potenzial von Photovoltaik und Windkraft technisch, ökonomisch und sozial auszuschöpfen.

Gerade bei diesen Hintergrundtechnologien zeigt sich, dass ihre Diffusion maßgeblich von institutionellen Rahmenbedingungen geprägt und aktuell mitunter behindert wird. Dies betrifft etwa Energiegenossenschaften, die im Energiemarkt teils mit hohem Verwaltungsaufwand konfrontiert sind, insbesondere wenn sie auch Stromhandel anbieten. Neue EU-Regelungen zu Energy Sharing und Erneuerbare-Energien-Gemeinschaften können hier Entlastung schaffen und die gemeinschaftliche Nutzung lokal erzeugten Stroms erleichtern (Europäisches Parlament und Rat, 2018; Wiesenthal et al., 2022). Weitere Hürden betreffen neue Biogasanlagen, die unter den aktuellen EEG-Regelungen kaum wirtschaftlich betrieben werden können, sowie wasserstofffähige Gasthermen, deren Einsatz durch Netzplanungen und hohe Anforderungen an Wasserstoff-Netzgebiete begrenzt wird (Die Bundesregierung, 2023). Auch Smart Meter verbreiten sich u.a. aufgrund hoher regulatorischer Technik- und Datenschutzerfordernisse bislang nur langsam (Wölbert, 2025). Zuletzt ist – wie in Abbildung 3 (S. 14) ersichtlich – der Aufbau von Kompetenzen beziehungsweise die Qualifikation von Fachpersonal ein entscheidender Faktor für die effiziente Entwicklung, Implementierung und Nutzung von Energiewendetechnologien, der noch deutlich stärker ausgebaut werden muss.

Zusammengefasst hängen die Resilienz und der Erfolg künftiger Energiesysteme entscheidend davon ab, infrastrukturelle und institutionelle Voraussetzungen, Qualifikationsbedarfe sowie systemische Abhängigkeiten zwischen Technologien frühzeitig zu erkennen und bestehende Hemmnisse gezielt abzubauen. Entscheidend ist dabei, für systemrelevante technische, soziale und kompetenzbezogene Voraussetzungen fördernde Bedingungen zu schaffen, da sie die Grundlage dafür bilden, dass anwendernahe Technologien ihren Nutzen im Energiesystem tatsächlich entfalten können.

5.1.3 Gezielte Exnovation fossiler Strukturen

Technologische und soziale Innovationen verbreiten sich nicht in einem neutralen Umfeld, sondern treffen stets auf bestehende sozioökonomische, technische und politische Strukturen. Ergänzend zu den zuvor angesprochenen technischen, sozialen und organisatorischen Strukturen, die aufgebaut werden müssen, ist die gezielte Beendigung (Exnovation) fossiler Energiequellen und -technologien daher eine notwendige Bedingung, um Barrieren und Lock-outs für Energiewendetechnologien abzubauen und Raum für deren Diffusion zu schaffen.

Diese Einschätzung leitet sich insbesondere aus Abbildung 3 (S. 14) ab, die zeigt, dass über alle untersuchten Technologien hinweg vor allem Kompatibilität, Unsicherheit, Qualifizierung, Institutionen und Pfadabhängigkeiten die Diffusionsdynamik von Energiewendetechnologien bremsen. Zusammengefasst lassen sich diese Faktoren als Ausdruck sozioökonomischer, technischer und politischer Pfadabhängigkeiten verstehen. Im Vergleich zu fossilen Energietechnologien fehlt es Energiewendetechnologien demnach häufig an Kompatibilität mit dem bestehenden Energiesystem sowie mit etablierten Gewohnheiten und gefühlten Sicherheiten, Qualifikationen, Investitionsmustern und institutionellen Rahmenbedingungen.

Konkret zeigt sich dies an den jahrzehntelangen Investitionen in Öl-, Gas- und Kohleinfrastrukturen und ihren sozio-technischen sowie ökonomischen Lock-in-Effekten, die bis heute als struktureller Bremsklotz für klimaneutrale Alternativen wirken. Beispielsweise bestehen fossile Lock-ins im Wärmebereich: Öl- und Gasheizungen sowie Gasnetze binden Haushalte, Kapital und Infrastruktur oft über Jahrzehnte. Wir gehen davon aus, dass bestehende Gasnetze und die Erwartung, diese Infrastrukturen künftig durch Wasserstoff, Biomethan oder eine sogenannte „Bio-Treppe“ weiter nutzen zu können, Hoffnungen auf gasförmige Lösungen im Gebäudebereich begünstigen. Gerade diese erhoffte Anschlussfähigkeit an bestehende Strukturen kann jedoch fossile Pfadabhängigkeiten verlängern, obwohl die breite Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit grüner Gase für die Gebäudewärme hochunsicher sind. Deshalb müssen Wärmepumpen und erneuerbare Wärmenetze, etwa auf Basis von Großwärmepumpen, Abwärme oder Geothermie, nicht nur gefördert, sondern auch fossile Pfadabhängigkeiten aktiv abgebaut werden. Ebenso erschweren verbrennergeprägte Mobilitätskulturen die gesellschaftliche Anschlussfähigkeit von Elektrofahrzeugen, während Gaskraftwerke sowie fossile Heizsysteme und Industrieanlagen mit langen Abschreibungszeiten den Umstieg auf erneuerbare und klimaneutrale Technologien verzögern.

Insgesamt wird deutlich, dass Diffusion in der Energiewende nicht allein durch Innovation, Förderung und Markteinführung neuer Technologien erreicht werden kann. Zudem können einige Technologien, etwa Elektrolyseure, CCS oder H₂-Heizungen im Gebäudebereich, zwar teilweise an bestehende Industrie- und Netzstrukturen anknüpfen, sie drohen aber zugleich bestehende Pfadabhängigkeiten

zu stabilisieren. Die zentrale Lehre lautet daher: Exnovation, verstanden als geordneter Ausstieg aus fossilen Technologien, ist ebenso wichtig wie die Förderung von Innovation und Diffusion der Energiewendetechnologien. Ohne klare politische Strategien zum Rückbau blockierender Infrastrukturen, Routinen und Regulierungen werden Energiewendetechnologien bestenfalls ein Add-on zum fossilen System, jedoch nicht der materielle Kern einer tatsächlichen Wende des Energiesystems.

5.1.4 Wirtschaftlichkeit politisch und unternehmerisch ermöglichen

Wirtschaftlichkeit ist ein zentraler Erfolgsfaktor für die Diffusion von Energiewendetechnologien. Dementsprechend zeigt sich besonders bei Massenmarkttechnologien wie Photovoltaik, Windenergie an Land, Elektrofahrzeugen und Batteriespeichern, dass sinkende Stückkosten, Skaleneffekte und Lernkurven eine dynamische Verbreitung begünstigen können.

Wirtschaftlichkeit entsteht jedoch nicht automatisch und sie hat unterschiedliche Facetten. Während man argumentieren kann, dass sie objektiv von den Gesamtkosten über den Lebenszyklus („Total Cost of Ownership“) abhängt, hängt sie in der Praxis oftmals davon ab, wie Haushalte und Unternehmen Anfangsinvestitionen und die relative Wirtschaftlichkeit gegenüber bestehenden fossilen Optionen wahrnehmen. Hohe Anfangsinvestitionen, unsichere Amortisationszeiten und kurzfristige Preisvergleiche mit fossilen Alternativen können die Diffusion von Energiewendetechnologien somit auch dann bremsen, wenn sie langfristig wirtschaftlich vorteilhaft sind.

Besonders zu betrachten sind daher Steuerbegünstigungen, Entlastungsmaßnahmen oder unvollständig eingepreiste Klimaerwärmungsfolgekosten fossiler Energieträger, die die Wirtschaftlichkeit erneuerbarer Energien und Energiewendetechnologien vergleichsweise unattraktiv erscheinen lassen. Beispiele hierfür sind die Energiesteuerbegünstigung für Kerosin im inländischen Flugverkehr oder die Abschaffung der Gasspeicherumlage, die mit rund 3,4 Milliarden Euro aus dem Klima- und Transformationsfonds finanziert wird, während eine allgemeine Senkung der Stromsteuer ausbleibt (Die Bundesregierung, 2026). Solche Preis- und Förderstrukturen beeinflussen Investitionsentscheidungen und können die Diffusion klimafreundlicher Alternativen verlangsamen.

Wirtschaftlichkeit muss deshalb aktiv ermöglicht werden. Dazu gehören auf politischer Ebene der Abbau klimaschädlicher Fehlanreize, verlässliche CO₂-Preissignale, zielgenaue Förderprogramme sowie auf unternehmerischer Ebene Geschäftsmodelle, die hohe Anfangsinvestitionen und Risiken senken oder zeitlich strecken. Beispielsweise trägt das CO₂-Kostenaufteilungsgesetz (CO₂KostAufG), demzufolge sich Vermieter an den CO₂-Kosten für Warmwasser und Heizung in ihren Liegenschaften beteiligen müssen, über CO₂-Preissignalen zum Umstieg auf zukunftsfähige Wärmelösungen bei. Auf der Ebene von Unternehmen und Endkunden können zudem etwa Contracting-, Miet- und Pachtmodelle dazu beitragen, Investitionsrisiken zu verteilen und Technologien wie Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen oder Batteriespeicher für mehr Haushalte zugänglich zu machen.

Zusammengefasst ist Wirtschaftlichkeit kein rein objektives Ergebnis von Nutzen- und Lebenszykluskostenbetrachtungen, sondern wird politisch und unternehmerisch mitgestaltet. Ein erfolgreicher Markthochlauf von Energiewendetechnologien setzt daher voraus, dass klimafreundliche Alternativen nicht nur langfristig effizient, sondern auch kurzfristig verfügbar, finanzierbar und gegenüber fossilen Optionen wettbewerbsfähig sind.

5.1.5 Den Wandel kommunikativ erhellen

Als weiterer eigenständiger und zentraler Erfolgsfaktor der Energiewende zeichnet sich Kommunikation ab. Mit Blick auf die durchgeführten Analysen (Froese & Clausen, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d) sowie das verwendete Analyseraster (Anhang B) liegt dieser Faktor insbesondere an der Schnittstelle von relativem Vorteil der Innovation (Faktor 1), Medien und Kampagnen (Faktor 19) sowie Pfadabhängigkeiten (Faktor 20).

Energiewendetechnologien sind fossilen Alternativen vielfach nicht nur klimapolitisch überlegen, sondern bieten darüber hinaus funktionale, ökonomische und soziale Vorteile, etwa hinsichtlich langfristiger Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit, dezentraler Wertschöpfung, Autarkiepotenzialen und Teilhabe am Energiesystem. Zugleich entfalten sie ihre Wirkung nicht in einem neutralen Umfeld: Sie greifen in etablierte Praktiken, gewachsene Infrastrukturen, etablierte Geschäftsmodelle und bestehende Machtverhältnisse ein. Ihre Verbreitung ist daher Teil eines gesellschaftlichen Transformationsprozesses, der durch Pfadabhängigkeiten, Gewohnheiten, Akteursinteressen und gesellschaftliche Deutungskonflikte geprägt ist.

Ein Beispiel hierfür ist die Elektromobilität: Elektrofahrzeuge sind Verbrennern bei Wartungs-, Energie- und Gesamtkosten in vielen Fällen bereits überlegen oder holen deutlich auf. Zudem entwickeln sich Batterietechnologie und Ladeinfrastruktur dynamisch weiter: Reichweiten steigen, Ladezeiten sinken, und die Verfügbarkeit öffentlicher Ladepunkte nimmt zu. Dennoch prägen Vorbehalte und Unsicherheiten hinsichtlich Anschaffungskosten, erforderlichen Verhaltensänderungen, Reichweite und Ladeinfrastruktur weiterhin die öffentliche Wahrnehmung (Clausen, 2025).

Vor diesem Hintergrund muss der relative Vorteil von Energiewendetechnologien nicht nur technisch, ökonomisch und regulatorisch realisiert, sondern auch öffentlich nachvollziehbar vermittelt werden. Dies ist umso wichtiger, als diese Technologien in politischen und medialen Auseinandersetzungen häufig mit irreführenden oder verkürzenden Behauptungen konfrontiert werden — etwa mit Blick auf Kosten, Klimawirkung, Versorgungssicherheit, wie im Zusammenhang mit dem Blackout in Spanien, oder Alltagstauglichkeit. Solche Narrative können Unsicherheit erzeugen, Akzeptanz mindern und Investitionsentscheidungen verzögern. Um diesen Unsicherheiten zu begegnen, dürfte eine Kommunikation, die primär technische Funktionen erklärt und den Klimanutzen erläutert, in der Regel nicht ausreichen.

Erfolgreiche Transformationspolitik bedarf daher einer kontinuierlichen, evidenzbasierten und zielgruppengerechten Kommunikation. Diese sollte die tatsächlichen Vorteile von Energiewendetechnologien transparent herausstellen, Fehl- und Desinformationen sachlich korrigieren und die gesellschaftliche Relevanz der Transformation nachvollziehbar vermitteln. Besonders vielversprechend erscheint dabei eine Kommunikation, die konkrete Erfahrungen von Menschen und Unternehmen sichtbar macht, die Energiewendetechnologien bereits zu ihrem Vorteil nutzen. Solche Erfahrungsberichte können abstrakte Nutzenversprechen greifbarer machen und sollten neben der Nutzungspraxis auch Kosten, Einsparpotenziale und wirtschaftliche Rahmenbedingungen berücksichtigen. Überzeugende Kommunikation ist damit kein Begleitprozess, sondern eine zentrale Voraussetzung dafür, dass Energiewendetechnologien verstanden, politisch unterstützt und praktisch verbreitet werden.

5.2 Methodische Limitationen und Ausblick

Die vorliegende Auswertung erlaubt eine vergleichende Betrachtung zentraler Diffusionsmuster von Energiewendetechnologien, ist jedoch mit methodischen Einschränkungen verbunden. Der verwendete Spitzenindikator „Diffusionsdynamik“⁹ bildet kein metrisches Maß, sondern ein ordinales Ranking ab. Höhere Werte verweisen somit auf günstigere Diffusionsbedingungen, erlauben jedoch keine proportionalen Aussagen über Abstände zwischen einzelnen Technologien. Zudem beruht der Spitzenindikator auf einer ungewichteten Summenbildung der einzelnen Einflussfaktoren. Damit wird allen Faktoren rechnerisch dieselbe Bedeutung zugeschrieben, obwohl ihre Relevanz je nach Technologie, Marktsegment und Akteurskonstellation unterschiedlich ausfallen kann. Hinzu kommt, dass der Verbreitungsgrad je nach Markt- und Technologielogik unterschiedlich bestimmt wird: etwa als Anteil am jährlichen Absatzmarkt, als Fortschritt gegenüber politischen Ausbauzielen oder als Ausschöpfung technisch-ökologischer Potenziale. Dies ist praktisch kaum anders zu handhaben, führt aber dazu, dass Ergebnisse vor allem als strukturierte Vergleiche von Diffusionsbedingungen zu interpretieren sind, nicht als exakte quantitative Messungen von Diffusionserfolgen.

Vor diesem Hintergrund könnte die Aussagekraft der Befunde künftig weiter erhöht werden, indem die Codierungen und Schlussfolgerungen systematisch mit weiteren Expertinnen und Experten aus Energieforschung, Wirtschaft, Politik und Praxis reflektiert werden. Ein mögliches Vorgehen wäre ein Delphi-Verfahren auf Basis der Bewertungstabellen, um die Einschätzungen intersubjektiv und ggf. Technologiebezogen oder sektorspezifisch weiter abzusichern und strittige Bewertungen transparenter zu machen. Ebenfalls weiter zu diskutieren ist die Bedeutung der horizontalen und vertikalen Summenbildung, also sowohl der Aggregation einzelner Einflussfaktoren je Technologie bzw. Diffusionsprofil als auch der technologieübergreifenden Verdichtung einzelner Faktoren.

Darüber hinaus bleiben einige blinde Flecken, die Ansatzpunkte für anschließende Forschungsarbeiten bieten. Erstens erfassen Diffusionspfadanalysen größere geopolitische und industriepolitische Dynamiken nur begrenzt. Für den Diffusionserfolg einer Technologie ist nicht allein relevant, ob sie sich im nationalen Markt verbreitet, sondern auch, welche Akteure, Wertschöpfungsketten und Abhängigkeiten damit verbunden sind. So kann etwa die Diffusion von Wärmepumpen oder Offshore-Windkraftanlagen sowohl durch inländische bzw. europäische Anbieter als auch durch außereuropäische Unternehmen getragen werden. Beide Pfade können zu quantitativ hohen Verbreitungsgraden führen, haben jedoch unterschiedliche Konsequenzen für Aspekte wie technologische und ressourcenbezogene Souveränität, Autonomie, Resilienz, Versorgungssicherheit und industrielle Wertschöpfung. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten solche qualitativen Unterschiede hinsichtlich der gesellschafts-, geopolitischen und industriepolitischen Ausgestaltung von Diffusionsprozessen stärker berücksichtigen.

Zweitens – und an den vorherigen Punkt anknüpfend – werden technologieübergreifende Deutungs- und Konfliktmuster sowie soziale Wechselwirkungen zwischen Technologien bislang nur unzu-

⁹ Der Spitzenindikator „Diffusionsdynamik“ ergibt sich aus der ungewichteten Summe der Bewertungen von 22 potenziellen Einflussfaktoren der Technologiediffusion, die je Technologie individuell analysiert und bewertet werden.

reichend erfasst. Wir gehen davon aus, dass sich Widerstände gegen Energiewendetechnologien mitunter nicht allein aus technologiespezifischen Vorbehalten speisen. Vielmehr können einzelne Technologien zu Projektionsflächen gesellschaftlicher Konflikte werden, wenn politische Akteure in der Auseinandersetzung um die Energiewende Potenziale zur politischen Mobilisierung, gesellschaftlichen Spaltung und Wählergewinnung erkennen (Deutsches Institut für Menschenrechte, 2025; Heinrich Böll Stiftung, 2024). Zudem nehmen wir an, dass einzelne Technologien indirekt die Akzeptanz, das Wissen und die Investitionsbereitschaft gegenüber anderen Energiewendetechnologien erhöhen können. Beispielsweise könnten Balkonkraftwerke als niedrigschwellige Einstiegstechnologie zur Sichtbarkeit und Alltagserfahrung der Energiewende beitragen und dadurch auch die Offenheit gegenüber Photovoltaik, Batteriespeichern, Wärmepumpen oder Elektromobilität stärken. Solche sozio-politischen Hintergrunddynamiken und sozio-technischen Wechselwirkungen zwischen Technologien sollten mit Blick auf Diffusionsdynamiken künftig stärker untersucht werden.

Drittens zeigt sich, dass unterschiedliche Technologien unterschiedlichen Diffusionslogiken folgen. Privat- und Endkundentechnologien wie Elektroautos, Wärmepumpen, Heimspeicher oder Balkonkraftwerke verbreiten sich über andere Adoptionsmechanismen als großskalige Infrastrukturen wie Offshore-Windparks, Wasserstoffnetze oder CO₂-Infrastrukturen, in denen B2B-Marktbeziehungen dominieren. Während bei Endkundentechnologien Sichtbarkeit, Wirtschaftlichkeit, einfache Verfügbarkeit und soziale Nachahmungseffekte eine wichtige Rolle spielen, hängen Großanlagen stärker von Investitionsvolumina, Genehmigungsverfahren, professionellen Betreiberstrukturen, Netzan-schlüssen und langfristiger Regulierungssicherheit ab. Auch Beteiligungsmodelle wie Energiegenossenschaften sind daher nicht für alle Technologien gleichermaßen geeignet: Sie können bei Photovoltaik oder kleineren lokalen Projekten eine wichtige Rolle spielen, stoßen bei kapitalintensiven Großinfrastrukturen (bspw. Windkraftanlagen oder Wärmenetzen) jedoch an Grenzen. Für zukünftige Forschung liegt daher ein möglicher Ansatzpunkt darin, die Methodik der Diffusionspfadanalyse um stärker technologie- und akteursspezifische Differenzierungen sowie gegebenenfalls um kontextsensitive Varianten der Bewertung weiterzuentwickeln.

Zusammenfassend ergibt sich für zukünftige Forschung die Aufgabe, Diffusionsanalysen stärker mit Perspektiven auf geopolitische Abhängigkeiten, soziale Wechselwirkungen sowie akteurs- und technologiespezifische Diffusionslogiken zu verbinden. Damit ließe sich noch genauer bestimmen, unter welchen Bedingungen Energiewendetechnologien nicht nur technisch verfügbar sind, sondern auch gesellschaftlich anschlussfähig sind und zu einer resilienteren, sozial gerechten und klimaneutralen Zukunft beitragen.

Quellen

- Allianz-Direct. (2025). Elektroauto-Statistiken 2025. Zugriff am 3.6.2026. Verfügbar unter: <https://www.allianzdirect.de/zahlen-daten-fakten/elektroauto-statistiken/>
- Ariadne Projekt. (2025). *Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045. Ariadne-Report*. Potsdam. Zugriff am 30.7.2025. Verfügbar unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/report-szenarien-zur-klimaneutralitaet-2045/>
- Bauchmüller, M. & Salavati, N. (2025, Juli 20). Die Energiewende ist mittlerweile unumkehrbar. *Süddeutsche Zeitung*.
- Bilharz, M. (2007). Key Points nachhaltigen Konsums (Wissenschaftliche Nachhaltigkeitsforschung). *Nachhaltiger Konsum und Verbraucherpolitik im 21. Jahrhundert*. (Band 1, S. 105–138). Marburg: Metropolis. Zugriff am 9.2.2017. Verfügbar unter: http://www.keypointer.de/fileadmin/media/Bilharz_2007_Key-Points-nachhaltigen-Konsums_Buchbeitrag.pdf
- BSW Solar. (2025). *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. Berlin. Zugriff am 13.6.2020. Verfügbar unter: https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2022/02/BSW_Solar_Faktenblatt_Solarwaerme.pdf
- Büttner, S. (1991). *Solare Wasserstoffwirtschaft: Königsweg oder Sackgasse* (Beiträge zur kommunalen und regionalen Planung). Frankfurt am Main Bern New York Paris: Lang.
- BWP e.V. (2026). *Branchenstudie 2026 Marktentwicklung, Prognosen & Handlungsempfehlungen*. Berlin. Zugriff am 3.6.2026. Verfügbar unter: https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/2026-03-30_BWP-Branchenstudie_2026_final.pdf
- Clausen, J. (2017). *Der Post-Streetscooter. Fallstudie im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Zugriff am 28.3.2017. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/2017-03-e2g-emobility_streetscooter_borderstep.pdf
- Clausen, J. (2019a). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Elektromobilität Norwegen*. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J. (2019b). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen Fallbeispiel Stromversorgung Deutschland*. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J. (2019c). *Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen*. [CliDiTrans Werkstattbericht 3-4]. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 20.11.2019. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/09/IndustrieVierNull-CliDiTrans20190912.pdf>
- Clausen, J. (2022). *Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen*. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 27.6.2022. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2022/06/AP2-Wasserstoff-Potenziale-Bedarfe_27-6-2022.pdf
- Clausen, J. (2025). *Verbrenner oder Elektro? Ein Vergleich der Vor- und Nachteile*. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 6.9.2025. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2025/08/E-Autos-Kostenvorteile_20250813.pdf
- Clausen, J. & Beucker, S. (2016). *Materialband 9: Energiedienstleistungen. Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und

- Nachhaltigkeit. Zugriff am 24.8.2017. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2016/11/9_UBA-Materialband-EnergieDL-PUB_final.pdf
- Clausen, J. & Beucker, S. (2019a). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Wärmeversorgung Dänemark*. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 20.6.2019. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/06/W%C3%A4rmeversorgung-Daenemark-Go-19-6-2019.pdf>
- Clausen, J. & Beucker, S. (2019b). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Wärmeversorgung Schweden*. Berlin.
- Clausen, J. & Fichter, K. (2019). The diffusion of environmental product and service innovations: Driving and inhibiting factors. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 31, 64–95. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.003>
- Clausen, J. & Fichter, K. (2021). *Die Diffusion von Umweltinnovationen: Ein Beitrag zur Weiterentwicklung der deutschen Umweltinnovationspolitik* (Umwelt, Innovation, Beschäftigung). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Clausen, J., Fichter, K. & Winter, W. (2011). *Theoretische Grundlagen für die Erklärung von Diffusionsverläufen von Nachhaltigkeitsinnovationen*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2014/07/Clausen-Fichter-Winter-Theoretische_Grundlagen_fuer_die_Erklaerung_von_Diffusionsverlaeufen_von_Nachhaltigkeitsinnovationen-2011.pdf
- Dannemann, B. (2025). Genossenschaftsgründungen 2024. Zugriff am 21.6.2025. Verfügbar unter: <https://www.dgrv.de/genossenschaftsgruendungen-2024/>
- dena. (2025). *WUNergy eG: Aufbau einer Energy Sharing Community in Wunsiedel - Praxisbericht und wissenschaftliche Einordnung* (S. 34). Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH. Zugriff am 3.7.2025. Verfügbar unter: <https://www.dena.de/infocenter/wunergy-eg-aufbau-einer-energy-sharing-community-in-wunsiedel/>
- Destatis. (2025, Juni 4). Mehr als zwei Drittel der im Jahr 2024 errichteten Wohngebäude heizen mit Wärmepumpen. Zugriff am 13.7.2025. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/06/PD25_N031_31_51.html
- Deutsches Institut für Menschenrechte. (2025). *Warum ist die AfD gefährlich?* Berlin. Zugriff am 29.7.2025. Verfügbar unter: https://www.institut-fuer-menschenrechte.de/fileadmin/Redaktion/Publikationen/Weitere_Publikationen/Warum_ist_die_AfD_gefaehrlich_ES.pdf
- DGRV. (2024). *DGRV-Jahresumfrage Energiegenossenschaften 2024*. Zugriff am 19.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.dgrv.de/news/energiegenossenschaften-2024/>
- Die Bundesregierung. (2023, Dezember 20). *Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze*. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/BJNR18A0B0023.html>
- Die Bundesregierung. (2026, April 17). Das macht die Bundesregierung für Entlastungen bei den Energiepreisen. Zugriff am 3.6.2026. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/senkung-energiepreise-haushalt-2358526>
- DUH. (2025). *Forderungspapier für einen Wärmepumpenhochlauf*. Radolfzell: Deutsche Umwelthilfe. Zugriff am 21.2.2025. Verfügbar unter:

- https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Pressemitteilungen/Energie/2025-01-21_DUH_Forderungspapier_f%C3%BCr_einen_W%C3%A4rmepumpenhochlauf_final.pdf
- DZ Bank. (2023, Mai 22). Gründungsboom für nachhaltige Wirtschaft: 42 neue Energiegenossenschaften 2022 / stärkster Zuwachs seit 2016. Zugriff am 19.2.2025. Verfügbar unter: <https://www.dzbank.de/content/dzbank/de/home/die-dz-bank/presse/pressemitteilungen/2023/gruendungsboom-fuernachhaltigewirtschaft42neueenergiegenossensch.html>
- DZ Bank. (2024, November 17). Genossenschaften im Aufwind: Zukunftsmodell mit Tradition. Zugriff am 19.2.202 n. Chr. Verfügbar unter: <https://www.dzbank.de/content/dzbank/de/home/die-dz-bank/presse/pressemitteilungen/2024/genossenschaften-im-aufwind--zukunftsmodell-mit-tradition.html>
- Europäisches Parlament und Rat. (2018). *RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung)*. Brüssel. Zugriff am 24.5.2025. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj?locale=de>
- Fichter, K. & Clausen, J. (2013). *Erfolg und Scheitern „grüner“ Innovationen*. Marburg: Metropolis. Verfügbar unter: <https://www.metropolis-verlag.de/Erfolg-und-Scheitern-gruener-Innovationen/944/book.do>
- Fichter, K. & Clausen, J. (2021). Diffusion of environmental innovations: Sector differences and explanation range of factors. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 38, 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.10.005>
- Fichter, K., Clausen, J., Kern, F., Schmelzle, F. & Hummel, M. (2023). *Priorisierung und Richtungssicherheit als Aufgabe der Wasserstoffpolitik*. Berlin: Borderstep Institut & Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. Zugriff am 5.2.2024. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2023/11/Policy-Insights-H2A_11-2023.pdf
- Fraunhofer ISI. (2024). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Gebäudesektor. Zugriff am 4.1.2025. Verfügbar unter: https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_20240702_O45_Webinar_Gebaeude.pdf
- Froese, T. & Clausen, J. (2026a). *Diffusionsprofile von Energietechnologien: Verbreitungspotenzial und Einflussfaktoren - Band 1: Stromversorgung*. Oldenburg. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:715-oops-76443>
- Froese, T. & Clausen, J. (2026b). *Diffusionsprofile von Energietechnologien: Verbreitungspotenzial und Einflussfaktoren - Band 2: Wärmeversorgung*. Oldenburg. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:715-oops-76458>
- Froese, T. & Clausen, J. (2026c). *Diffusionsprofile von Energietechnologien: Verbreitungspotenzial und Einflussfaktoren - Band 4: Wasserstoff und CO2*. Oldenburg. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:715-oops-76065>
- Froese, T. & Clausen, J. (2026d). *Diffusionsprofile von Energietechnologien: Verbreitungspotenzial und Einflussfaktoren - Band 3: Smart Technology*. Oldenburg. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:715-oops-76056>
- Gruber, M. (2020). An evolutionary perspective on adoption-diffusion theory. *Journal of Business Research*, 116, 535–541. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.02.024>
- Handelsblatt. (2026, Januar 13). Zahl der Wasserstoff-Tankstellen schrumpft deutlich. Zugriff am 3.6.2026. Verfügbar unter:

- <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/elektromobilitaet/alternative-antriebe-zahl-der-wasserstoff-tankstellen-schrumpft-deutlich/100190923.html>
- Heinrich Böll Stiftung. (2024). *Was die AfD wirklich will – und was wir entgegenen*. Berlin. Zugriff am 29.7.2025. Verfügbar unter: <https://weiterdenken.de/de/zur-sache-afd>
- Hojnik, J. & Ruzzier, M. (2016). What drives eco-innovation? A review of an emerging literature. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 19, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.09.006>
- KBA. (2026). *Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben. Monatsergebnisse Dezember 2025 FZ 28*. Flensburg. Zugriff am 3.6.2026. Verfügbar unter: https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ28/fz28_2025_12.xlsx?__blob=publicationFile&v=2
- Kennedy, R. (2025). Global clean energy investment hit \$2.1 trillion in 2024, says BNEF. Zugriff am 31.7.2025. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.com/2025/01/31/global-clean-energy-investment-hit-2-1-trillion-in-2024-says-bnef/>
- Kern, F., Schmelzle, F., Clausen, J., Hummel, M., Anzengruber, C., Fichter, K. et al. (2023). *Die deutsche Wasserstoffpolitik und ihre Auswirkungen auf die Wasserstoffwirtschaft und alternative Transformationspfade. Projektbericht „Wasserstoff als Allheilmittel?“*. Berlin. Zugriff am 29.5.2023. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2023/05/IOeW_Borderstep_H2A_AP3-Bericht_20230515.pdf
- Kern, F., Schmelzle, F. & Hummel, M. (2023). Hydrogen as a panacea for decarbonising everything? Exploring contested hydrogen pathways in Germany. *Environmental Research Letters*, 18(11), 114017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acff0e>
- Kutsche, K. & Schrader, D. (2025, Juli 29). Kann ich sagen, dass es niemals einen Blackout geben wir? Nein. *Hannoversche Allgemeine Zeitung*.
- Oelker, J. (2005). *Windgesichter. Aufbruch der Windenergie in Deutschland*. Dresden: Sonnenbuch. Verfügbar unter: <http://www.sonnenbuch.de/windgesichter/start.htm>
- PV Magazin. (2025a, Mai 13). Batteriespeicher Rendite: Überzeugende Erträge für zukunftsorientierte Investoren. Zugriff am 3.6.2026. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/unternehmensmeldungen/batteriespeicher-rendite-ueberzeugende-ertraege-fuer-zukunftsorientierte-investoren/>
- PV Magazin. (2025b, Oktober 24). Wärmepumpen dominieren den Heizungsmarkt im Neubau. Zugriff am 3.6.2026. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/2025/10/24/waermepumpen-dominieren-den-heizungsmarkt-im-neubau/>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations*. New York: Free Press.
- Tagesschau. (2025, Juni 20). ArcelorMittal stoppt Pläne für „grüne“ Stahlproduktion. Zugriff am 24.7.2025. Verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/arcelor-mittal-absage-wasserstoff-100.html>
- Tappeser, V. (2017). *Energiesprung NL. Standardisierung und Skalierung energetischer Sanierungsmaßnahmen im industriellen Maßstab. Fallstudie im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Im Erscheinen*. Berlin.
- Umweltbundesamt. (2025, April 22). Treibhausgasminderungsziele Deutschlands. Zugriff am 7.5.2026. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg>

Wiesenthal, J., Aretz, A., Ouanes, N. & Petrick, K. (2022). *Energy Sharing: Eine Potenzialanalyse*. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

Wölbert, C. (2025, März 23). Kommentar zu Smart Meter: zu teuer, zu komplex, zu spät. Zugriff am 29.7.2025. Verfügbar unter: Kommentar zu Smart Meter: zu teuer, zu komplex, zu spät

Anhang

Anhang A: Fallprofil Teil 1: Eckdaten und Diffusionsstand

Tabelle 3: Merkmale zur Beschreibung der Innovation und ihres Verbreitungsgrades

Merkmal	Beschreibung und ggf. mögliche Ausprägungen
Beschreibung des Diffusionsfalls	Beschreibung der Innovation, deren Diffusionspfad erforscht werden soll.
Markteinführung	Angabe, ob die Markteinführung durch etablierte Anbieter, neue Unternehmen oder beide erfolgte. Weiter wird angegeben, wann die Markteinführung erfolgte.
Einbindung in Technologiesystem	Angabe, ob die Diffusion des Produktes als Teil eines Technologiesystems von der Diffusion anderer Produkte oder Dienstleistungen abhängig ist. Wenn dies der Fall ist, wird zudem ausgeführt, inwiefern eine Abhängigkeit besteht und welche Produkte zu dem Technologiesystem gehören.
Diffusionsstand und -verlauf	Angabe eines Marktindikators, der als Referenzbasis zur Bestimmung des Diffusions- bzw. Verbreitungsgrades gewählt wurde. Zudem wird der Verbreitungsgrad prozentual in Bezug auf die Referenzbasis berechnet. Zuletzt wird der Diffusionsverlauf betrachtet. Die Entwicklung seit der Markteinführung wird hierbei möglichst grafisch dargestellt und interpretiert. Bei dieser Interpretation wird auch angegeben, ob die Innovation noch Nischenangebot, auf dem Weg in den Massenmarkt oder im Massenmarkt angekommen ist.

Anhang B: Fallprofil Teil 2: Codesystem zur Erhebung der Einflussfaktoren

Tabelle 4: Einflussfaktoren und Codierung der Diffusionsanalyse

Produktbezogene Faktoren	Bewertungscodierung
1. Relativer Vorteil der Innovation: Welchen funktionellen oder sozialen Vorteil hat die Innovation im Vergleich zum Vorgänger- oder Konkurrenzprodukt?	2: neue nützliche Funktion oder starker sozialer Vorteil 1: weniger wesentliche neue Funktion oder kleiner sozialer Vorteil 0: kein relativer Vorteil erkennbar
2. Wahrnehmbarkeit: Ist die Nutzung der Innovation durch Dritte wahr-	2: Deutlich UND in der Öffentlichkeit wahrnehmbar 1: Weniger deutlich oder nur in Innenräumen u. ä. wahrnehmbar

Erfolgsfaktoren der Verbreitung von Energieinnovationen

nehmbar, ohne das durch besondere Informationsanstrengungen auf sie hingewiesen wird?	0: Nicht wahrnehmbar
3. Kompatibilität: Ist die Innovation an ihr Umfeld technisch, institutionell und kulturell anschlussfähig?	0: neutral -1: Anschlussfähigkeit erfordert Aufwand oder Lernen -2: Anschlussfähigkeit nur schwer herzustellen
4. Komplexität: Ist die Innovation für den Adopter komplex und bedarf es besonderen Fachwissens zum Verständnis?	0: unkomplex -1: leicht komplex -2: bedarf besonderen Fachwissens
5. Erprobbarkeit: Kann die Innovation ohne großen Aufwand durch den Adopter erprobt werden?	2: Einfach und mit im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit geringen Kosten erprobbar 1: Aufwendig erprobbar 0: Nicht erprobbar
Adopterbezogene Faktoren	Codierung
6. Nutzer-Innovatoren: Lassen sich im Innovationsprozess bzw. bei der Markteinführung Innovatoren auf der Anwenderseite identifizieren?	2: Die Existenz einer größeren Gruppe von Innovatoren ist bekannt 1: Die Existenz einer kleinen Gruppe von Innovatoren ist bekannt 0: Nicht bekannt.
7. Notwendigkeit von Verhaltensänderung: Verlangt die Anwendung der Innovation beim Adopter eine Verhaltensänderung?	0: keine Verhaltensänderung erforderlich -1: Verhaltensänderung erforderlich -2: deutliche Verhaltensänderung erforderlich
8. Unsicherheiten bei Adoptoren: Inwieweit gab oder gibt es unter den Adoptoren Unsicherheiten bezüglich der Innovation?	0: keine Unsicherheiten bekannt -1: kleine Unsicherheiten -2: deutliche Unsicherheiten
9. Preise, Kosten, Wirtschaftlichkeit: Inwieweit fördern oder hemmen Preis-, Kosten- oder Wirtschaftlichkeitsaspekte die Adoption?	2: hohe Wirtschaftlichkeit oder billiger 1: leicht wirtschaftlich oder etwas billiger 0: neutral -1: leicht unwirtschaftlich oder etwas teurer -2: deutlich unwirtschaftlich oder deutlich teurer
Anbieterbezogene Faktoren	Codierung
10. Qualifizierungsaufwand: Erfordert die Produktion oder die Erbringung der Dienstleistung hohen Aufwand zur Qualifikation des erforderlichen Personals?	0: neutral -1: hoher Qualifizierungsaufwand wirkt leicht hemmend -2: hoher Qualifizierungsaufwand wirkt deutlich hemmend
11. Bekanntheitsgrad und Reputation der Anbieter: Existieren bereits Anbieter der Innovation, die über einen hohen Bekanntheitsgrad und hohe Reputation	2: Bekannte Unternehmen mit hoher Reputation bieten die Innovation an 1: weniger bekannte Unternehmen bieten die

verfügen?	Innovation an 0: nur unbekannte Anbieter
<i>12. Vollständigkeit und Verfügbarkeit der Serviceangebote:</i> Wird die Innovation mit einem vollständigen Servicepaket angeboten und ist sie für den Kundenkreis einfach verfügbar?	2: Verfügbarkeit und Service sind überall sichergestellt 1: kleine Einschränkungen in Verfügbarkeit oder Service 0: neutral -1: schlechte Verfügbarkeit oder fehlender Service wirken leicht hemmend -2: schlechte Verfügbarkeit oder fehlender Service wirken deutlich hemmend
Branchenbezogene Faktoren	Codierung
<i>13. Rolle des Branchenverbandes:</i> Existiert ein Branchenverband, verfügt er über politischen Einfluss und setzt er diesen für die Förderung der Innovation ein?	2: starke und aktive Unterstützung 1: weniger starke oder weniger aktive Unterstützung 0: kein Branchenverband bzw. keine Aktivität -1: leicht hemmender Einfluss -2: deutlich hemmender Einfluss
<i>14. Rolle der Marktführer:</i> Wer sind die Marktführer in der Branche, in dem die Innovation eingeführt wurde und fördern oder hemmen sie die Diffusion?	2: Marktführer haben die Innovation von Anfang an mit eingeführt 1: Marktführer haben die Innovation leicht gefördert 0: Marktführer verhielten sich neutral -1: Marktführer haben die Diffusion leicht behindert -2: Marktführer haben engagiert gegen die Diffusion gekämpft
<i>15. Intermediäre als Change Agents:</i> Inwieweit haben Marktintermediäre (z.B. Handelsunternehmen) und Politikintermediäre (z.B. Energie-, Effizienz-, Klimaschutzagenturen) bis dato den Diffusionsverlauf beschleunigt oder gebremst?	2: viele Intermediäre haben die Diffusion engagiert gefördert 1: einige Intermediäre haben sich für die Diffusion eingesetzt 0: keine aktiven Intermediäre bekannt -1: einige Intermediäre bremsen die Diffusion -2: viele Intermediäre bremsen die Diffusion
Politische Faktoren	Codierung
<i>16. Institutionelle Hemmnisse:</i> Inwieweit haben gesetzliche oder behördliche Regelungen die Verbreitung der Innovation bis dato gehemmt?	0: keine Hemmnisse -1: kleine Hemmnisse -2: deutliche Hemmnisse
<i>17. Staatliche Push- und Pull-Aktivitäten:</i> Inwieweit wurde die Innovation durch regionale, na-	2: deutliche Förderung 1: eingeschränkte Förderung 0: keine Förderung

Erfolgsfaktoren der Verbreitung von Energieinnovationen

tionale oder EU-weite Vorschriften (Push) oder Förderaktivitäten (Pull) in ihrer Verbreitung beschleunigt?	-1: kleine Hemmnisse -2: deutliche Hemmnisse
<i>18. Sektorpolitiken:</i> Ist die Innovation Teil eines Technologiesystems, das auf regionaler, nationaler oder EU-Ebene gezielt gefördert wird?	2: eine Sektorpolitik ist bekannt und wird aktiv verfolgt. 1: eine Sektorpolitik ist eher schwach wirksam. 0: Nicht bekannt.
<i>19. Medien und Kampagnen:</i> Inwieweit haben Medien (Presse, Rundfunk etc.) und Kampagnen von NGOs den Diffusionsverlauf beschleunigt oder gebremst?	2: die Innovation wurde durch die Medien deutlich gefördert 1: die Innovation wurde durch die Medien etwas gefördert 0: über die Innovation wird nur selten berichtet -1: Medienberichte etc. wirkten hemmend -2: Medienberichte etc. wirkten deutlich hemmend
Pfadbezogene Faktoren	Codierung
<i>20. Pfadabhängigkeiten:</i> Inwieweit haben technologische oder wirtschaftliche Pfadabhängigkeiten die bisherige Diffusionsgeschwindigkeit gebremst?	2: die Innovation hat sich sehr schnell zum dominanten Design entwickelt 1: in einigen Marktsegmenten erreicht die Innovation den Status des dominanten Designs 0: neutral -1: Vorgängerprodukte haben über ein leichtes Lock-in die Diffusion gebremst -2: Vorgängerprodukte haben über ein starkes Lock-in die Diffusion stark verzögert
<i>21. Preisentwicklung:</i> Wie hat sich der (inflationsbereinigte) Preis im Verlauf des Diffusionsprozesses entwickelt?	2: Preis ist seit der Markteinführung (z.B. durch „economies of scale“ oder Folgeinnovationen) - stark gesunken 1: Preis ist wenig gesunken 0: Preis ist gleichgeblieben -1: Preis ist leicht gestiegen -2: Preis ist deutlich gestiegen
<i>22. Selbstverstärkende Effekte:</i> Sind im sozialen System des Diffusionsprozesses selbstverstärkende Effekte wie z.B. Nachahmungseffekte aufgrund von Vorbildern/ Prominenten/ Meinungsführern oder kritische Masse-Phänomene zu beobachten?	2: deutliches „kritische Masse Phänomen“ 1: leichtes „kritische Masse Phänomen“ 0: keine selbstverstärkenden Effekte