

TECH FOR
NET ZERO
ALLIANZ

Klimaneutralität 2045 – Neue Technologien für Deutschland

TECH FOR NET ZERO ALLIANZ

Um die nationalen und internationalen Energiewende- und Klimaziele zu erreichen, bedarf es der Zusammenarbeit einer breiten Gruppe an Stakeholdern, die technologische Innovationen entwickeln, umsetzen und vorantreiben. Die Tech for Net Zero Allianz setzt sich aus den führenden Innovationsakteuren in Deutschland zusammen, die gemeinsam die Potenziale von innovativen Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland demonstrieren und Impulse für politische Entscheidungsträger definieren. In der Allianz sind Start-ups, etablierte Unternehmen, Investoren, Think-Tanks, Bundesagenturen und Vertreterinnen und Vertreter aus Forschung und Wissenschaft organisiert.

Gemeinsam zeigen sie auf, wo Handlungsbedarf besteht, um Deutschlands Rolle als technologischen Vorreiter, Treiber der Energiewende und als innovativen Wirtschaftsstandort zu festigen. So soll ein aktiver Beitrag geleistet werden, um die nächste Phase der Energiewende und den Weg hin zu einem klimaneutralen Energiesystem zu gestalten. Die Allianz fokussiert sich dabei auf die politischen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Rahmenbedingungen, die technologischen Innovationen und disruptiven Geschäftsmodellen den Weg bereiten.

Weitere Informationen unter www.techfornetzero.de

Danksagung

Dieser Bericht wurde von der Deutschen Energie-Agentur (dena) in Zusammenarbeit mit Breakthrough Energy und 1.5° Ventures erstellt. Ein besonderer Dank richtet sich an die Mitglieder der Tech for Net Zero Allianz, die während des Projekts wertvolle Anregungen, Hinweise und Perspektiven aus der Praxis eingebracht haben.

- **Dr. Christoph Arndt**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- **Wido Witecka**, Agora Energiewende
- **Juan Gomez Trillos**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- **Dr. Jörg Zimmermann**, Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS
- **Peter Mellwig**, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu)
- **Florian Knappe**, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu)
- **Dr. Kai-Philipp Kairies**, RWTH Aachen (ISEA)
- **Dr. Clemens Schneider**, Fraunhofer IEG
- **Andreas Lukaschik**, Tennet TSO
- **Dr. Stephan Barth**, ForWind – Center for Wind Energy Research
- **Dr. Eckart Lindwedel**, AFRY Management Consulting
- **José Zúñiga**, AFRY
- **Jan Grisard**, AFRY
- **Dr. Tjark Siefkes**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- **Philippe Rodríguez**, International Council on Clean Transportation (ICCT)
- **Alex Auf der Maur**, Prognos AG
- **Dr. Reiner Buck**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Institute of Solar Research)

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Vorwort	4
Zusammenfassung der Ergebnisse	5

01 Einleitung 6

01.01 Innovationen ermöglichen die Klimaneutralität	7
01.02 Methodik der Analyse	10

02 20 innovative Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität 12

Innovationen im Energiesektor

02.01 Elektrolyseure der Megawatt-Klasse	16
02.02 Feststoffbatterien	18
02.03 Hochtemperaturspeicher zu Strom und Wärme (Carnot-Batterie)	20
02.04 Neue Anwendungsfelder für Photovoltaik	22
02.05 Agri-Photovoltaik	24

Innovationen im Verkehrssektor 27

02.06 E-Kerosin	28
02.07 Wasserstoff als Schiffstreibstoff	30
02.08 Akkumulatorenrecycling	32
02.09 Wasserstoffzüge	34
02.10 Brennstoffzellen-Lkw	36
02.11 Vehicle-to-Grid-Charging	38

Innovationen im Gebäudesektor

02.12 Alternativer Beton	42
02.13 Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung	44
02.14 Erneuerbare Fernwärme aus Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie	46

Innovationen im Industriesektor

02.15 Wasserstoffreduktion von Eisenerz	50
02.16 CCU/S in der Zementindustrie: das Oxyfuel-Verfahren	52
02.17 Methanol-to-Olefin-Prozess	54
02.18 Elektrischer Steamcracker-Hochofen	56
02.19 CSP zur Erzeugung industrieller Prozesswärme	58
02.20 CO ₂ -Direktabscheidung und -speicherung (DACCS)	60

02.21 Zwischenfazit:

Entscheidende Instrumente zur Innovationsförderung	62
----------------------------------------------------	----

03 Eine politische Roadmap zur Förderung von Klimainnovationen 64

03.01 Fit-for-55 mit Fokus auf Innovationsförderung verhandeln	65
03.02 Nationale Klima- und Energiepolitik als Innovationstreiber nutzen	73
03.03 Aktive Innovationspolitik für Climate-Tech	78

04 Schlussfolgerung 82

Abbildungsverzeichnis	84
Tabellenverzeichnis	84
Literaturverzeichnis	84
Appendix	87

Vorwort



Der Europäische Green Deal ist ein Wendepunkt für unsere Art, Wirtschaft zu denken.

Wirtschaft und Klimaschutz sind keine Gegensätze mehr, sondern sorgen in einer symbiotischen Beziehung für unsere nachhaltige Zukunft. Um diese Vision Wirklichkeit werden zu lassen, hat sich die Weltgemeinschaft in Paris Klimaziele gesetzt und die EU-Kommission ihr Fit-for-55-Paket geschnürt. Der Bundesrepublik Deutschland kommt durch ihre Rolle als Vorreiterin der Energiewende und führender Innovations- und Technologiestandort hierbei eine besondere Bedeutung zu. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, ist eine Kombination von ambitionierter Klima- und Energiepolitik und aktiver Innovationspolitik unabdingbar.

Die Mammutaufgabe einer Dekarbonisierung aller Wirtschaftsbereiche braucht Erfindergeist und Mut.

Für einen zeitnahen Umbau der gesamten Wirtschaft sind kosmetische Maßnahmen zu wenig. Es sind vielmehr disruptive Veränderungen notwendig – diese können jedoch nur Innovationen aus dem Klimatechnologiebereich liefern. Dabei können viele der Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität nur mit Innovationen gelöst werden, die noch in einem frühen Entwicklungsstadium sind. Um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen, ist es demzufolge essenziell, Rahmenbedingungen zu schaffen, die es diesen innovativen Klimatechnologien ermöglichen, schneller in den Markt einzutreten und zu wachsen.

Nur wenn die erforderlichen regulatorischen Puzzleteile ineinandergreifen, kann der Umbau zu einer klimaneutralen Gesellschaft gelingen.

Sei es, sei es, Forschungserkenntnisse mittels standardisierter Ausgründungen schnell in den Markt zu bringen, durch eine EEG-Reform einen Innovationschub zu generieren, für Kostenwahrheit durch einen sektorübergreifenden CO₂-Preis zu sorgen, grüne Leitmärkte zu schaffen, CO₂-Schattenpreise in der öffentlichen Verwaltung einzuführen oder, wo erforderlich, der Carbon Contracts for Difference zu nutzen: Nur ein koordiniertes Zusammenspiel verschiedener Maßnahmen kann den angestrebten Erfolg – ein klimaneutrales Deutschland, als Inspiration für Europa und darüber hinaus – gewährleisten. Die Tech for Net Zero Allianz hat daher eine Roadmap zur Förderung von Climate Tech in der Legislaturperiode 2021–2025 erstellt. Diese soll der Politik, aber auch den Klimatechnologie-Stakeholdern sowie der interessierten Öffentlichkeit als Leitfaden in eine klimaneutrale Zukunft dienen. Wir stehen darüber hinaus auch in der neuen Legislaturperiode in gewohnter Weise für fachlichen Input, Diskussionen und besonders für die Begleitung der Umsetzung gerne zur Verfügung.

Herzlichst Ihr

Andreas Kuhlmann

Vorsitzender der Geschäftsführung
der Deutschen Energie-Agentur (dena)

Zusammenfassung der Ergebnisse

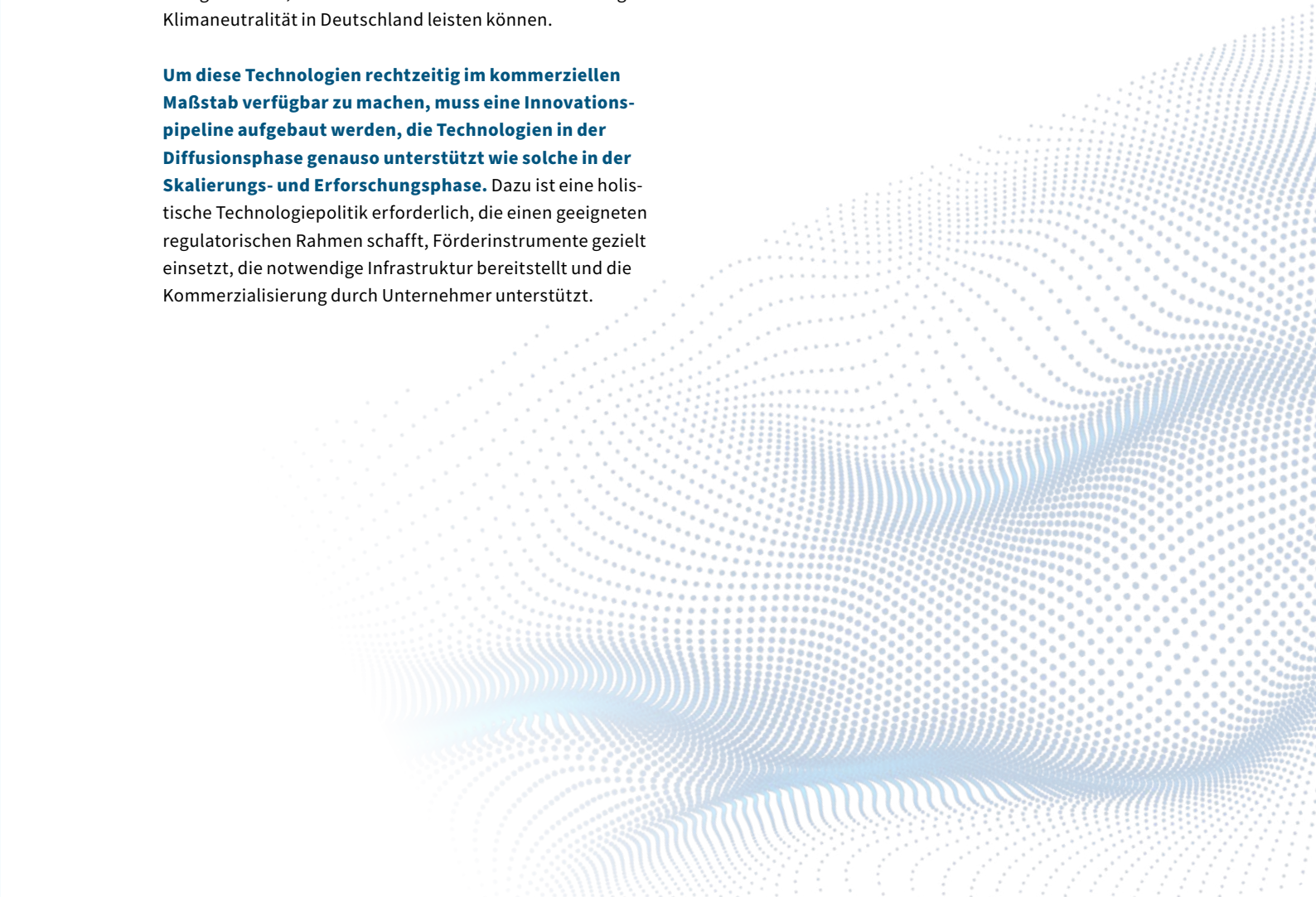
Die Pariser Klimaziele können nur durch den massiven Einsatz an hocheffizienter Klimatechnologie erreicht werden. Die gesamte Wirtschaft muss in nur wenigen Jahren dekarbonisiert werden, um Deutschland bis 2045 klimaneutral zu machen. Das betrifft alle Sektoren von der Energieversorgung über die Industrie, den Verkehr sowie sämtliche Gebäude und Infrastrukturen bis zur Landwirtschaft. Hochrechnungen der Internationalen Energieagentur (IEA) zeigen, dass mehr als die Hälfte der notwendigen Treibhausgasreduktion durch Technologien ermöglicht wird, die erst noch im Markt skaliert werden müssen.

Die 20 Beispielinnovationen in diesem Report zeigen auf, dass zahlreiche Klimalösungen bereits von Spitzenwissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern an Forschungsinstituten sowie von Technologie-Start-ups entwickelt werden. Viele von ihnen sind technisch bereits ausgereift und müssen nun skaliert werden. Neben neuen Anwendungsfeldern für die Photovoltaik zählen neuartige Energiespeicher, elektrifizierte Antriebssysteme, grüner Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe, alternative Baumaterialien sowie technische CO₂-Senken zu den entscheidenden Technologieklassen, die in Zukunft einen wesentlichen Betrag zur Klimaneutralität in Deutschland leisten können.

Um diese Technologien rechtzeitig im kommerziellen Maßstab verfügbar zu machen, muss eine Innovationspipeline aufgebaut werden, die Technologien in der Diffusionsphase genauso unterstützt wie solche in der Skalierungs- und Erforschungsphase. Dazu ist eine holistische Technologiepolitik erforderlich, die einen geeigneten regulatorischen Rahmen schafft, Förderinstrumente gezielt einsetzt, die notwendige Infrastruktur bereitstellt und die Kommerzialisierung durch Unternehmer unterstützt.

Das Fit-for-55-Paket der Europäischen Kommission enthält bereits wichtige Impulse, die durch die Bundesregierung aktiv im Sinne der Innovationsförderung mitgestaltet werden sollten. Dieser Report macht anhand einer Roadmap Vorschläge, wie dies sichergestellt werden kann. Über Fit-for-55 hinaus müssen auch bei der Gestaltung der nationalen Klima- und Energiepolitik die richtigen Anreize gesetzt werden, um Märkte für dringend benötigte Klimatechnologien zu öffnen.

Um die Kommerzialisierung und Verbreitung der Innovationen zu beschleunigen, müssen auch die innovationspolitischen Rahmenbedingungen für Start-ups verbessert werden, die Klimatechnologien entwickeln. Das beinhaltet einen einfacheren Zugang zu Wagniskapital (via Matching Grants und Ausweitung des DeepTech Future Fonds) genauso wie günstigere Bedingungen für Ausgründungen aus Forschungseinrichtungen. So kann Deutschland sich gleichzeitig industriepolitisch profilieren und seinen Status als Standort für zukunftssträchtige Industrien erhalten.



01 Einleitung



01.01

Innovationen ermöglichen die Klimaneutralität

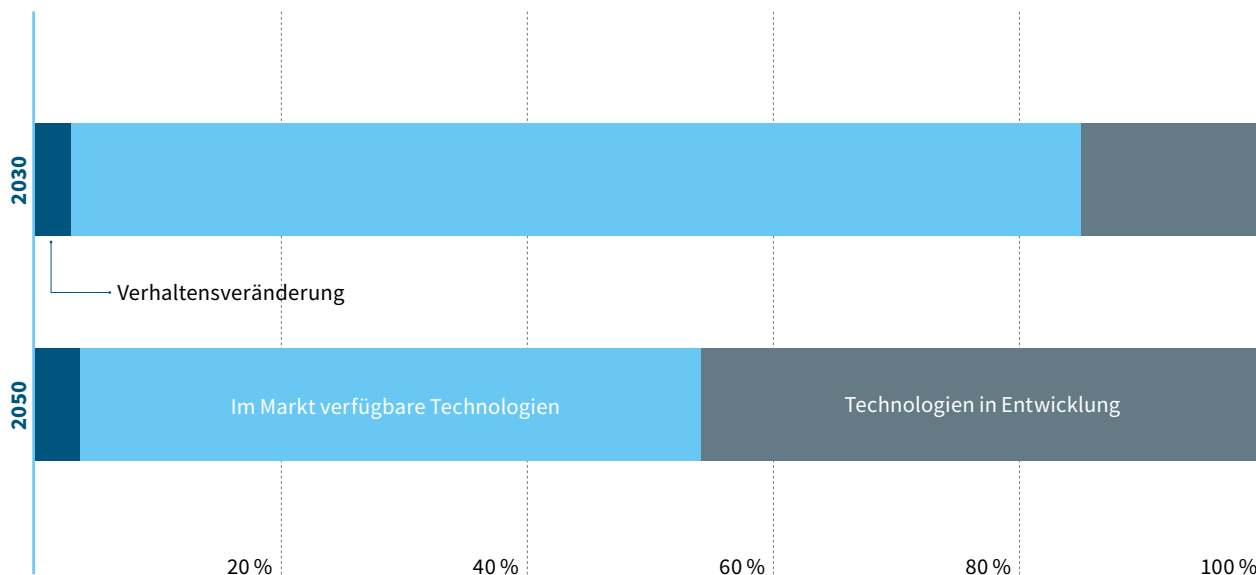


Abbildung 1: Ursprung der jährlichen Emissionseinsparung 2030 und 2050 (relativ zu 2020)¹

Die heute verfügbaren Technologien werden nicht ausreichen, um Deutschland klimaneutral² aufzustellen.

Die International Energy Agency (IEA) schätzt, dass fast 50 % der Emissionseinsparungen, die für Net Zero benötigt werden, durch Technologien erfolgen werden, die sich noch im Demonstrations- oder Entwicklungsstadium befinden (Abbildung 1). Besonders in der Schwerindustrie sowie dem Fern- und Lastverkehr sind Lösungen noch nicht kommerzialisiert. Damit innovative Lösungen für diese Sektoren rechtzeitig verfügbar sind, sind heute immense Leistungen zur Förderung neuer Technologien in allen drei Marktstadien notwendig (siehe Infobox 1).

Vorhandene Technologien in der Diffusionsphase (siehe Infobox 2) müssen innerhalb kürzester Zeit ausgerollt werden. Gleichzeitig muss die Entwicklungszeit neuer Technologien in der Erforschungsphase vom Pilotprojekt zur skalierbaren Lösung drastisch reduziert werden. Heute skalierbare Technologien müssen schnellstens an den Markt herangeführt werden, um die notwendigen Skaleneffekte zu erreichen.

Dabei muss die Dauer, beispielsweise in der dies bei der Entwicklung eines globalen Photovoltaik-Marktes erfolgte, noch einmal drastisch unterboten werden.

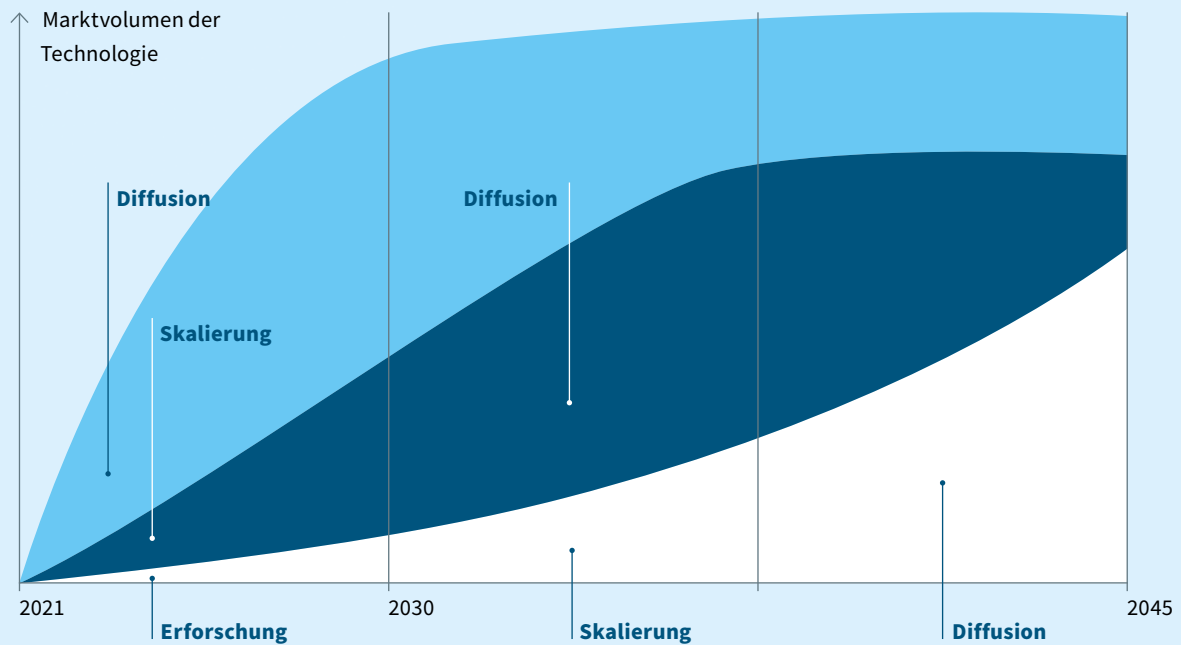
Um eine derartige Beschleunigung der Innovationszyklen zu erreichen, muss die Bundespolitik in der kommenden Legislaturperiode entschlossen die richtigen Rahmenbedingungen schaffen. Diese sollten eine Innovationspipeline zum Ziel haben, die die benötigten Technologien in allen drei Entwicklungsstadien unterstützt und zum richtigen Zeitpunkt verfügbar macht.

Diese Studie zeigt 20 vielversprechende Technologien auf, die einen essenziellen Beitrag zur deutschen Treibhausgasneutralität bis 2045 leisten können, und erläutert, wie ihre erfolgreiche Skalierung gelingen kann (Abschnitt 2). Dabei wird auch diskutiert, welche politischen Instrumente zu ihrer Förderung geeignet sind und welche Maßnahmen die Bundespolitik in der neuen Legislaturperiode ergreifen sollte (Abschnitt 3).

1 Angelehnt an IEA, 2021.

2 Definition klimaneutral: siehe Annex.

Infobox 1: Entwicklungsphasen und Marktvolumen neuer Technologien



Diffusionsphase

Technologie ist marktreif und jetzt kommerziell einsetzbar



Skalierungsphase

Konzept ist bewiesen und bis 2030 kommerziell einsetzbar



Erforschungsphase

Konzeptvalidierung notwendig, Skalierung erst nach 2030

Abbildung 2: Marktentwicklung zwischen 2021 und 2045, nach Entwicklungsstatus³

Neue Technologien lassen sich in drei Kategorien gemäß ihrem Entwicklungsstatus klassifizieren: Erforschungs-, Skalierungs- und Diffusionsphase. Technologien in der Diffusionsphase sind heute marktreif und kommerziell einsetzbar. Technologien in der Skalierungsphase dagegen sind noch nicht wettbewerbsfähig und werden erst in den kommenden

zehn Jahren eigenständig am Markt bestehen können; ihr Konzept hat sich allerdings schon bewährt. Technologien in der Erforschungsphase benötigen dagegen noch Unterstützung bei der Konzeptionierung. Ihre Kommerzialisierbarkeit ist also noch unsicher und wenn sie erfolgt, erst nach 2030 zu erwarten.

³ Angelehnt an Capgemini Invent, 2020.

Infobox 2: Technologien in der Diffusionsphase bilden die Grundlage für die Treibhausgasneutralität

Alle Szenarien zur deutschen Treibhausgasneutralität beruhen auf der schnellen Verbreitung einiger weniger Technologien, die schon heute kommerziell im Einsatz sind. Nach Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen werden diese Technologien bis 2030 nahezu allein für die bis dahin notwendigen Emissionsreduktionen in Deutschland verantwortlich sein (Abbildung 1)⁴. Insofern stellt die politische Unterstützung der weiteren Skalierung dieser Technologien die Grundvoraussetzung für alle Anstrengungen in Richtung Klimaneutralität dar. Abbildung 3 zeigt die entscheidenden Technologien aufgeschlüsselt nach Sektoren.

Abgesehen von ihrer herausragenden Rolle bei der Emissionsvermeidung sind diese Technologien noch aus einem

anderen Blickwinkel bemerkenswert: Nicht wenige von ihnen galten vor wenigen Jahren noch als hoch innovativ, haben aber durch aktive Setzung der richtigen politischen Rahmenbedingungen und der folgenden Weiterentwicklung durch Entrepreneurure eine Reife erreicht, mit der sie heute ihre Märkte dominieren und fossiler Konkurrenz in vielerlei Hinsicht überlegen sind. Diese State-of-the-Art-Technologien bilden das Rückgrat des Wegs zur Klimaneutralität und zeigen gleichzeitig, wie erfolgreiche Skalierung von Klimainnovationen gestaltet werden kann. Häufig konnte sich Deutschland in diesem Prozess als Leitmarkt etablieren und profitiert noch heute volkswirtschaftlich von der daraus resultierenden Technologieführerschaft.

Abbildung 3: Klimatechnologien in der Diffusionsphase



Verkehr
Batterieelektrische Pkw und Leichttransporter



Industrie
Abwärmenutzung



Gebäude
Luftwärmepumpen, Solarthermie, energetische Sanierungsmaßnahmen



Energie
Windturbinen On- und Offshore, Aufdach- und Freiflächen-Photovoltaik

4 McKinsey & Company, 2020.

01.02

Methodik der Analyse

Der Identifikation und Bewertung der Climate-Tech-Innovationen aus Abschnitt 2 liegt ein vierstufiger Prozess zugrunde (Abbildung 4).

Zunächst wurde eine Metaanalyse bestehender Studien und Reports zur Identifikation von Klimainnovationen durchgeführt. Auch die Mitglieder der Tech for Net Zero Allianz wurden über eine Umfrage beteiligt. In diesem Prozess ließen sich 145 Innovationen ermitteln. Diese Liste wurde nach den vier Verbrauchssektoren Energie, Industrie, Gebäude, Verkehr sowie nach dem Entwicklungsstatus (siehe Infobox 1) aufgeschlüsselt. Für die Innovation Factsheets standen Technologien in der Skalierungs- und Erforschungsphase im Fokus. Anschließend fand eine erste Vorauswahl nach DeepTech-Technologien statt. DeepTech umfasst Hardware-basierte Technologien, die durch ihren hohen Kapitalbedarf separat von beispielsweise digitalen Geschäftsmodellen oder der Änderung landwirtschaftlicher Praktiken zu betrachten sind. Auch wenn die Bereiche Energieeffizienz, Digitalisierung sowie Netze/Infrastruktur ebenfalls große Innovationspotenziale aufweisen, beschränkt sich die Analyse in diesem Bericht außerdem auf solche Innovationen, die direkt kohlenstoffintensive Technologien und Prozesse ersetzen können.

Die verbliebenen 97 Innovationen wurden weiterhin durch Expertinnen und Experten bei der Deutschen Energie-Agentur (dena) gemäß ihrem technischen Anwendungspotenzial in Deutschland bewertet. Dabei spielte auch das

Treibhausgasreduktionspotenzial der jeweiligen Technologien eine Rolle.

Die daraus hervorgegangenen 20 Innovationen sind daher als eine Auswahl besonders vielversprechender technologischer Innovationen für den deutschen Kontext zu verstehen.

Diese ausgewählten Innovationen wurden in strukturierten qualitativen Interviews mit externen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Think-Tanks und Unternehmen analysiert. Dabei standen ein Technology Assessment (unter anderem Technologiereifegrad und Treibhausgasminderungspotenzial) sowie die Identifikation von Barrieren und Handlungsoptionen für den Markthochlauf im Vordergrund. Die Ergebnisse wurden für diesen Report in kurzen Factsheets zusammengefasst.

Zur Erarbeitung der in diesem Bericht formulierten Politikempfehlungen wurden über das Jahr 2021 hinweg drei Innovation Round Tables mit den Mitgliedern der Tech for Net Zero Allianz sowie Stakeholdern aus Wissenschaft und Politik veranstaltet. In diesen entwickelten die Mitglieder auf Basis von Vorschlägen der Deutschen Energie-Agentur (dena), Breakthrough Energy und 1,5° Ventures mögliche Ansatzpunkte für eine förderliche Innovations-, Klima- und Energiepolitik.



Tabelle 1: Innovation Round Tables der Tech for Net Zero Allianz

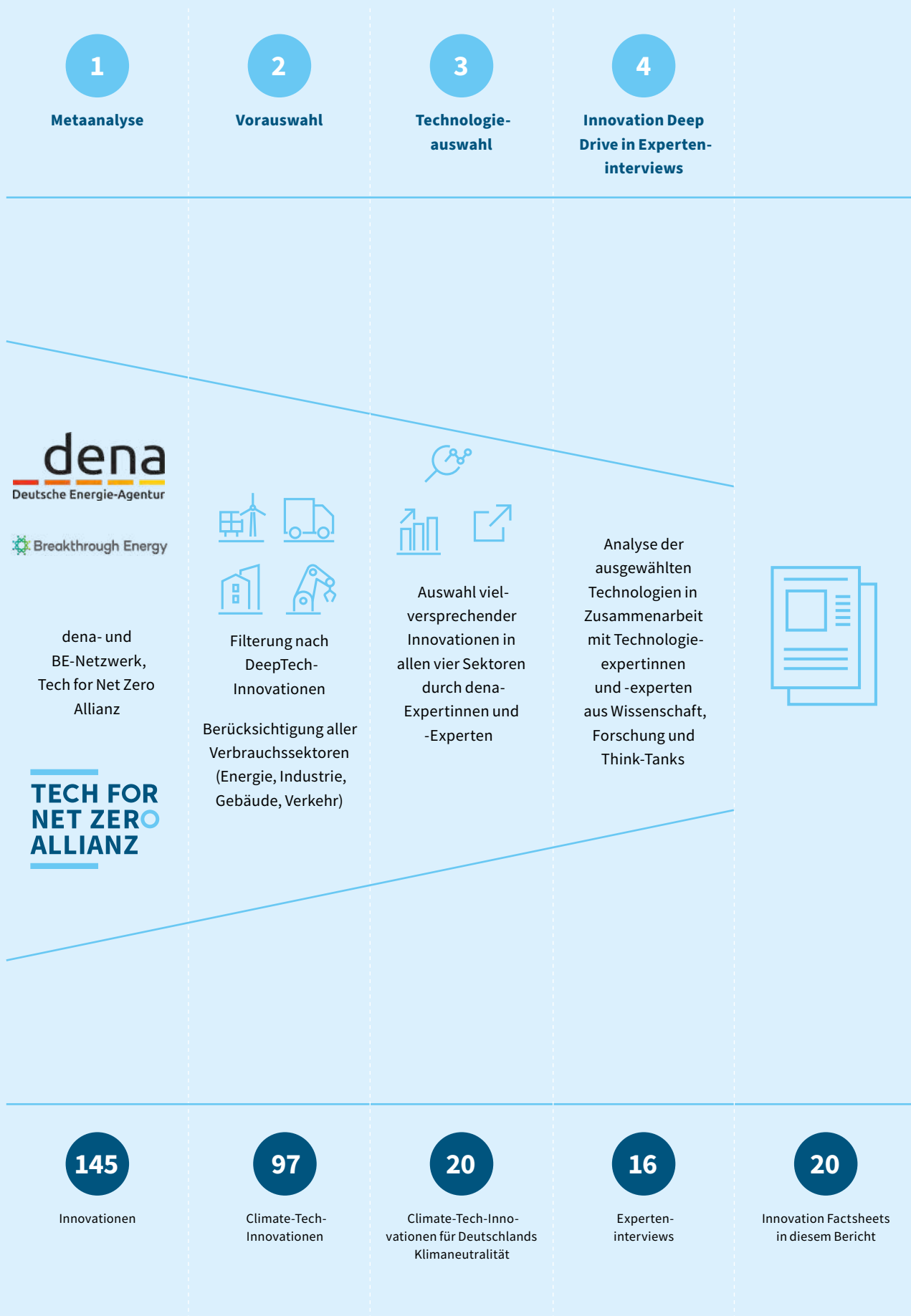


Abbildung 4: Auswahlprozess der 20 Innovationen

02

20 innovative Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität

Die Technologien, die zur Erreichung der deutschen Klimaneutralität benötigt werden, sind heute bereits weitestgehend bekannt. Viele von ihnen befinden sich allerdings noch in der Skalierungs- und Erforschungsphase und benötigen daher politische Unterstützung, um eine schnelle Marktpenetration zu ermöglichen. Die in diesem Abschnitt in Form von Kurzsteckbriefen (Innovation Factsheets) vorgestellten 20 Klimainnovationen (Tabelle 2) gehören zu diesen Technologien. Sie bilden alle vier Verbrauchssektoren (Energie, Mobilität, Gebäude und Industrie) ab. Neben einer kurzen Erläuterung der Technologie stellen die Innovation Factsheets

auch den Technologiereifegrad dar. Dieser gibt auf einer Skala von 1 bis 9 den Entwicklungsstand der Technologien an. Abbildung 5 zeigt, wie die Einsatzfähigkeit der jeweiligen Technologie sich mit steigendem TRL erhöht. Neben dem TRL beinhalten die Innovation Factsheets auch ein theoretisches Treibhausgasreduktionspotenzial für das Zieljahr 2045.⁵ Dieses dient der Einordnung der Wirksamkeit der jeweiligen Technologie und der Vergleichbarkeit untereinander.⁶ Über diese einordnenden Elemente hinaus stellen die Steckbriefe konkrete politische Maßnahmen vor, die den Markthochlauf der jeweiligen Technologie unterstützen können.

 Energie	01	Elektrolyseure der Megawatt-Klasse
	02	Feststoffbatterien
	03	Hochtemperaturwärmespeicher
	04	Neue Anwendungsfelder Für Photovoltaik
	05	Agri-Photovoltaik
	06	E-Kerosin
 Verkehr	07	Wasserstoffschiffe
	08	Akkumulatorenrecycling
	09	Wasserstoffzüge
	10	Brennstoffzellen-Lkw
	11	Vehicle-to-Grid-Charging
 Gebäude	12	Alternativer Beton
	13	Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung
	14	Großwärmepumpen, Geothermie und Solarthermie
 Industrie	15	Wasserstoffreduktion von Eisenerz
	16	CCU für Zementproduktion (Oxyfuel-Prozess)
	17	Methanol-Olefin-/Aroma-Prozess
	18	Elektrischer Steamcracker-Hochofen
	19	CSP zur Gewinnung industrieller Prozesswärme
	20	Direct Air Carbon Capture (DACCS)

Tabelle 2: 20 Klimainnovationen für Deutschland

⁵ Weisen Studien lediglich das THG-Reduktionspotenzial für 2050 aus, so wurde diese Zahl ebenfalls für das Zieljahr 2045 herangezogen.

⁶ Der Appendix dieses Dokuments beinhaltet eine Einordnung des Treibhausgasreduktionspotenzials.

Technologiereifegrad

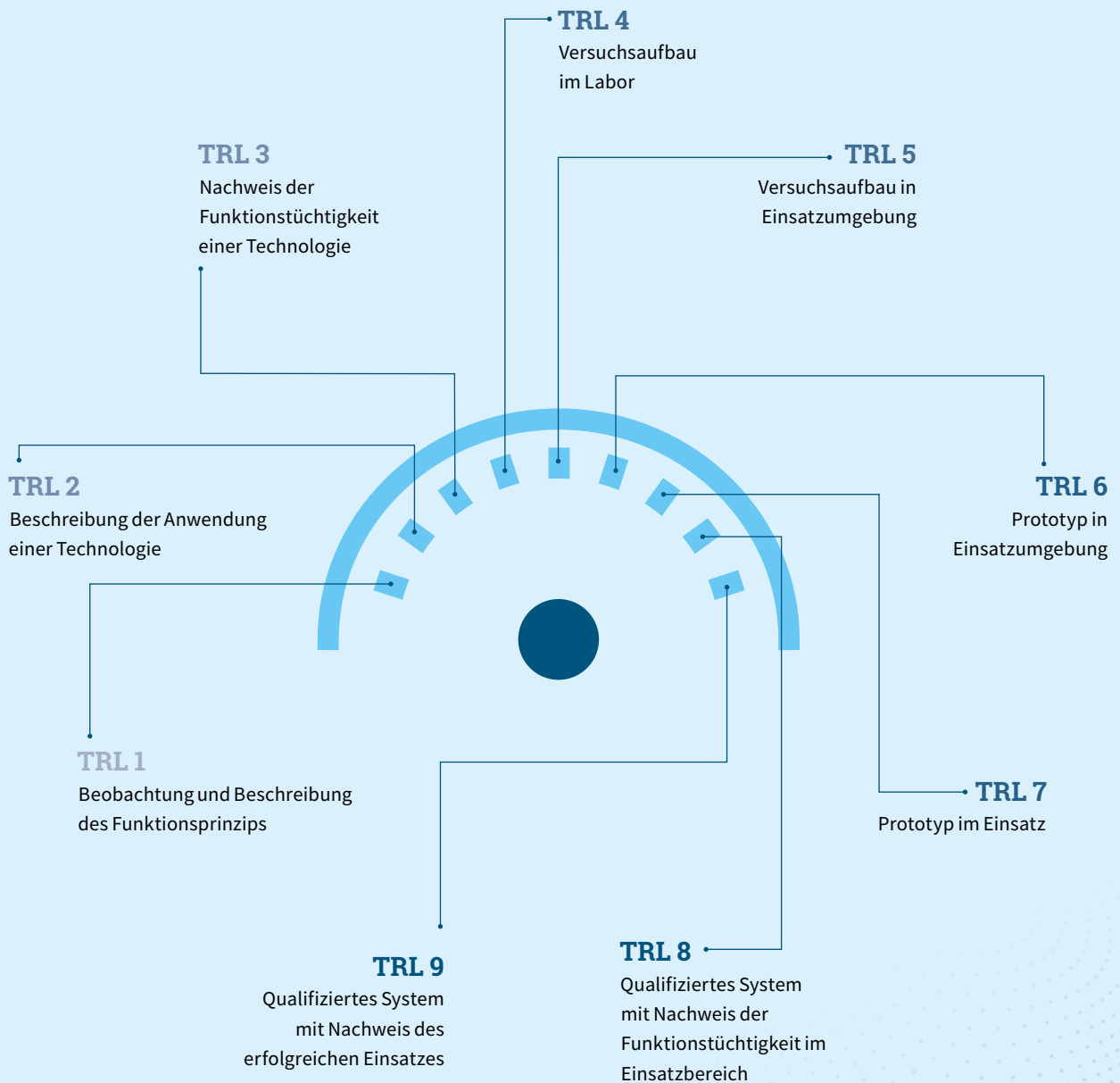
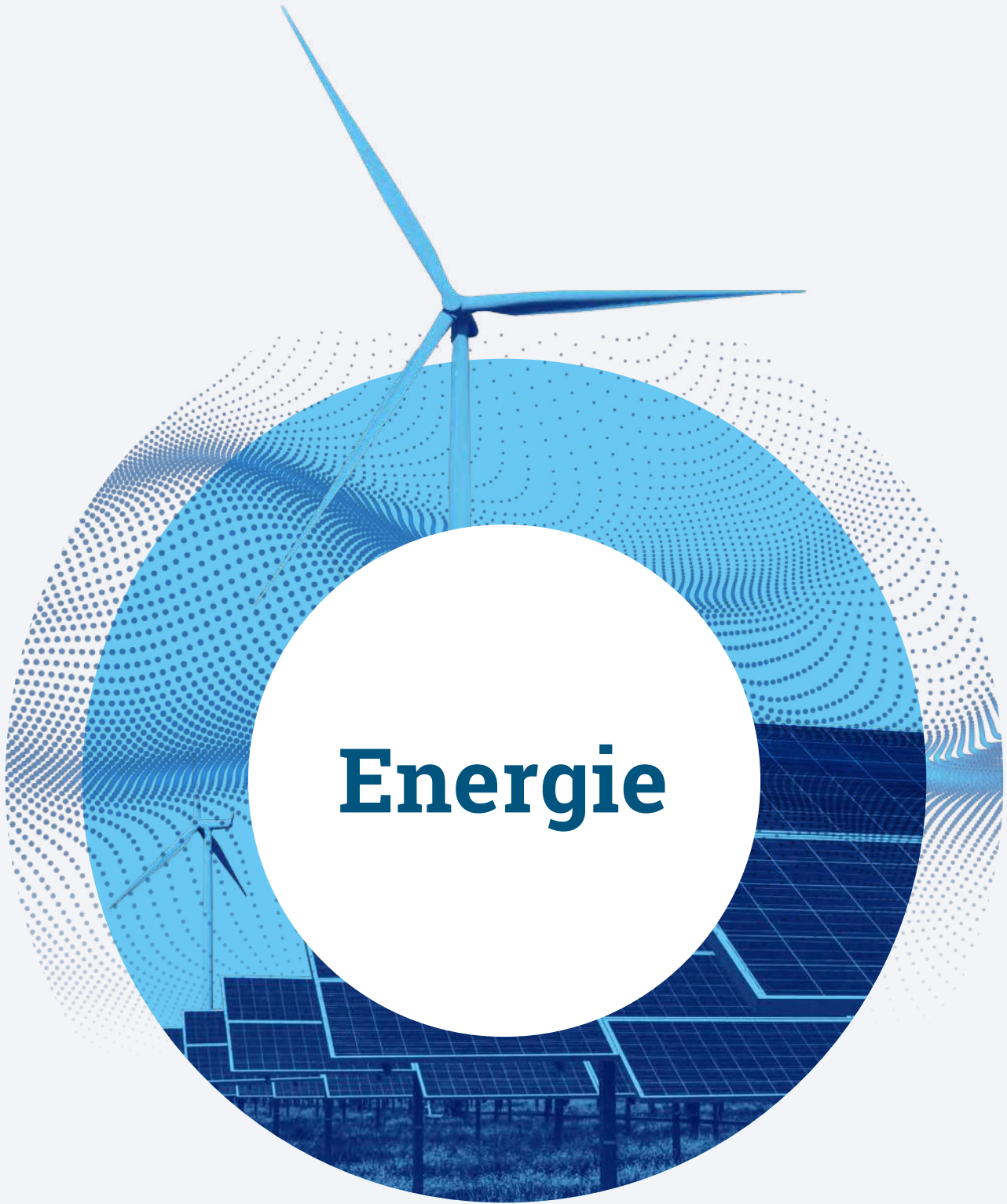


Abbildung 5: Technologiereifegrad



Energie

Innovationen im Energiesektor

 Energie	01	Elektrolyseure der Megawatt-Klasse	Seite 16
	02	Feststoffbatterien	Seite 18
	03	Hochtemperaturspeicher zu Strom und Wärme (Carnot-Batterie)	Seite 20
	04	Neue Anwendungsfelder für Photovoltaik	Seite 22
	05	Agri-Photovoltaik	Seite 24
 Verkehr	06	E-Kerosin	Seite 28
	07	Wasserstoff als Schiffstreibstoff	Seite 30
	08	Akkumulatorenrecycling	Seite 32
	09	Wasserstoffzüge	Seite 34
	10	Brennstoffzellen-Lkw	Seite 36
	11	Vehicle-to-Grid-Charging	Seite 38
 Gebäude	12	Alternativer Beton	Seite 42
	13	Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung	Seite 44
	14	Erneuerbare Fernwärme aus Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie	Seite 46
 Industrie	15	Wasserstoffreduktion von Eisenerz	Seite 50
	16	CCU/S in der Zementindustrie: das Oxyfuel-Verfahren	Seite 52
	17	Methanol-to-Olefin-Prozess	Seite 54
	18	Elektrischer Steamcracker-Hochofen	Seite 56
	19	CSP zur Gewinnung industrieller Prozesswärme	Seite 58
	20	CO ₂ -Direktabscheidung und -speicherung (DACCS)	Seite 60

02.01

Elektrolyseure der Megawatt-Klasse



Sektor:
Energie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
8-9

ca. **5** Mio. t
CO₂Äq/a

THG-Reduktionspotenzial

Elektrolyseure spalten mithilfe von elektrischer Energie Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff auf und bilden damit die Grundlage für die Anwendung von grünem Wasserstoff als Energieträger in Verkehr und Industrie. Um grünen Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen zu erzeugen, sind weitere Technologieinnovationen notwendig, insbesondere auf dem Gebiet der Protonenaustauschmembran-(PEM-), Anionenaustauschmembran-(AEM-) und Festoxid-(SO-)Elektrolyseure. Eine Skalierung sowohl in Anlagenformat als auch der Anzahl der Anlagen verspricht Technologiesprünge und Skaleneffekte, die entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff sind.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Zusätzlich zu großen Mengen importierten Wasserstoffs werden im Jahr 2045 Berechnungen zufolge 44 TWh Wasserstoff in Deutschland produziert werden müssen⁷, um den prognostizierten Bedarf zu decken. Das Vorhandensein von ausreichend erneuerbarer Energie vorausgesetzt, spart die Erzeugung dieser Menge per Elektrolyse gegenüber der Methandampfreformierung, dem fossilen Erzeugungsprozess von Wasserstoff, 5,15 Mio. t CO₂-Äq pro Jahr.

Pilotprojekte und Unternehmen

Das deutsche Start-up Enapter entwickelt AEM-Elektrolyseure der Megawatt-Klasse und strebt einen Vertriebsstart bis 2022 an. Das Unternehmen investiert in Forschung und Entwicklung sowie Produktion am Standort Saerbeck in Nordrhein-Westfalen. Das Unternehmen Sunfire vertreibt bereits heute Hochtemperatur-SOEC-Elektrolyseure für industrielle Anwendungen, in denen Wasserdampf zur Verfügung steht.

Darüber hinaus plant ein Firmenkonsortium um Vattenfall, Shell und Mitsubishi Heavy Industries (MHI) im Rahmen des Projekts Green Hydrogen Hub die Installation eines Großelektrolyseurs im Hamburger Hafen, der mit 100 MW Leistung zu den größten Anlagen Europas zählen wird.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Die Marktentwicklung von Elektrolyseuren wird gegenwärtig durch verschiedene Faktoren behindert. Insbesondere der Kostennachteil gegenüber fossilen Erzeugungspfaden für Wasserstoff ist noch immer signifikant. Hohe Stromgestehungskosten, aber auch Steuern und Abgaben stellen einen bedeutenden Kostenblock im Betrieb dar und reduzieren die Wettbewerbsfähigkeit von Elektrolyseuren.

Außerdem fehlt eine klare Klassifizierung von Elektrolyseuren im Energierecht, was zu rechtlichen Unsicherheiten bei ihrem Betrieb führt. Die aus Redispatch 2.0 entstehenden Verpflichtungen (je nach Klassifizierung) stellen ein bedeutendes Risiko für den wirtschaftlichen Betrieb dar, da sie die Volllaststunden reduzieren.

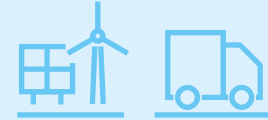
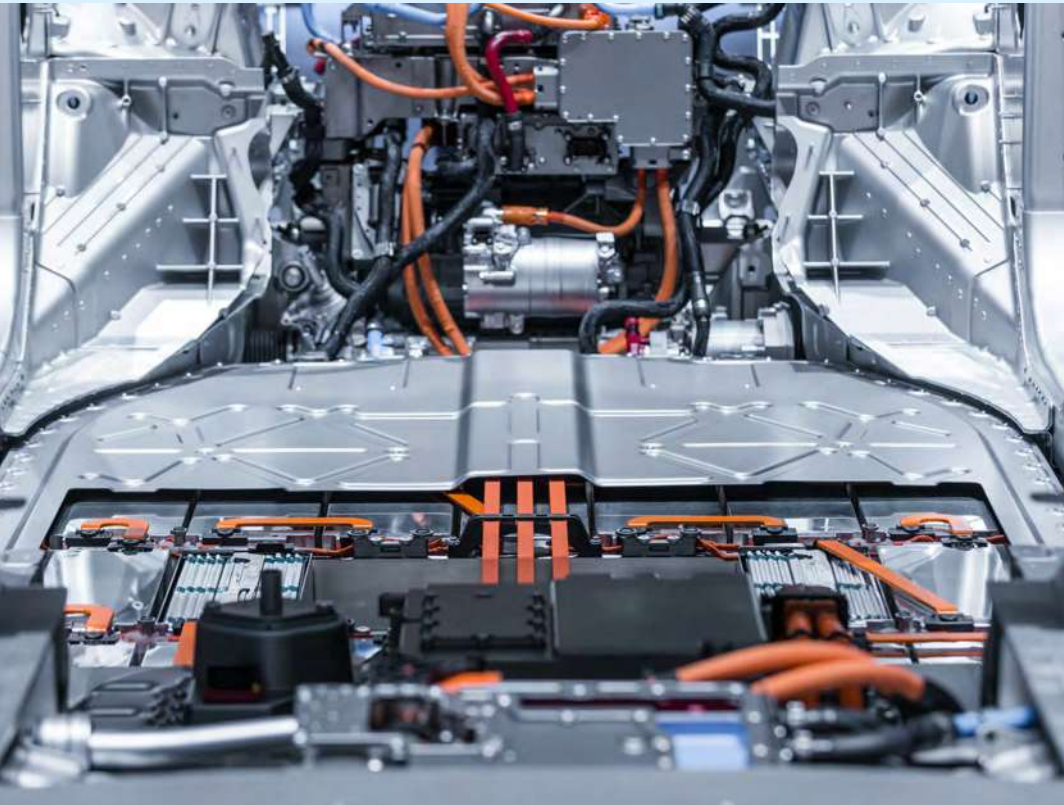
Maßnahmen für den Markthochlauf

- Eine klare rechtliche Definition von Elektrolyseuren im Energierecht ist erforderlich
- Ein hoher CO₂-Preis stärkt die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff gegenüber fossiler Konkurrenz
- Eine Kombination verschiedener angebotsseitiger Impulse würde grünen Wasserstoff aus Elektrolyse wettbewerbsfähiger machen:
 - Ein überarbeitetes Netzengpassmanagement sollte die systemdienliche Einbindung von Elektrolyseuren ins Stromnetz ermöglichen und neue Geschäftsmodelle befördern
 - Elektrolyseure sollten als Energiewandler von der Zahlung von Steuern und Abgaben (insbesondere der EEG-Umlage) befreit werden
- Gleichzeitig muss durch Carbon Contracts for Difference das Investment in Wasserstofftechnologien in der Industrie angereizt werden. So würde auch eine Nachfrage nach grünem Elektrolyse-Wasserstoff geschaffen.

⁷ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021b.

02.02

Feststoffbatterien



Sektor:
Energie/Verkehr



Entwicklungsstand:
Erforschungsphase



Technologiereifegrad:
4

mehrere
Mio. t CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial⁸

Feststoffbatterien gelten als nächste Generation der Akkumulatoren. Sie unterscheiden sich von herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien durch den Einsatz eines festen statt flüssigen Elektrolyts. Neben einer längeren Zykluslebensdauer, einer Reduzierung des Materialeinsatzes, kürzeren Ladezeiten und einer höheren Energiedichte gelten sie auch als sicherer, da der entflammbare flüssige Elektrolyt entfällt. Aufgrund dieser Vorteile werden Feststoffbatterien als vielversprechende Technologie insbesondere für die Elektromobilität gesehen.

⁸ Die Emissionsminderung lässt sich für Energiespeicher als „Enabling Technology“ nur in Verbindung mit dem Projekt (Einsatz, Leistung, Kapazität) quantifizieren.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Das jährliche Zubaupotenzial von Feststoffbatterien in Deutschland wird auf 2 GWh im Jahr 2030 sowie 40 GWh in 2050 geschätzt. Dies entspricht rund 1 % der globalen Kapazitäten. Hierbei handelt es sich weniger um ein technisches als um ein wirtschaftliches Potenzial. Bei entsprechender Nachfrage und Zahlungsbereitschaft wäre eine wesentlich größere Installation im Jahr 2050 möglich. Einer Studie der britischen Forschungseinrichtung Faraday zufolge werden bis 2040 fast 80 % aller Anwendungen von Feststoffbatterien in Elektrofahrzeugen genutzt. Die restliche Nutzung entfällt auf stationäre Speicher, mobile elektronische Anwendungen und Flugzeuge.

Durch die großflächige Nutzung von Feststoffbatterien in Elektroautos wird eine Kostendegression auf unter 60 US-Dollar pro kWh bis 2030 erwartet.

Pilotprojekte und Unternehmen

Die Entwicklung von Feststoffbatterien wurde in den letzten Jahren hauptsächlich durch Unternehmen und Start-ups vorangetrieben, insbesondere Automobilhersteller. Ein Großteil der Partnerschaften entfiel auf Akteure aus der Forschung sowie entlang der Lieferkette einer Batterie. So haben BMW und Ford im Mai 2021 eine Entwicklungspartnerschaft mit Solid Power, einem Hersteller von Feststoffbatterien für Elektrofahrzeuge, abgeschlossen. Solid Power plant, Anfang 2022 mit der Produktion von Automotive-tauglichen Batterien zu beginnen. Volkswagen beteiligte sich bereits 2012 am Batteriespezialisten QuantumScape und plant, bis 2025 eine Fertigungsanlage für Feststoffbatterien aufzubauen.

Toyota gibt an, derzeit mit über 1.000 Patenten das führende Unternehmen im Bereich Feststoffbatterien zu sein. Es gründete 2020 zusammen mit Panasonic das Joint Venture Prime Planet Energy & Solutions mit dem Ziel, 2025 eine limitierte Produktion zu starten. Hierbei ist davon auszugehen, dass es sich um Kleinserienproduktionen oder Prototypen handelt. Fraunhofer Ise betrachtet eine Kommerzialisierung der Feststoffbatterien für den Zeitraum 2025–2030 als realistisch. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Kompetenzcluster „FestBatt“ mit 16 Mio. €. In diesem forschen 14 wissenschaftliche Einrichtungen an Batterien der nächsten Generation.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Die kommerzielle Nutzung von Feststoffbatterien ist aktuell noch nicht wirtschaftlich. Die Umstellung des Elektrolyts bringt noch einige Herausforderungen mit sich. Die Ionen müssen nicht mehr durch einen flüssigen, sondern durch einen festen Elektrolyten wandern. Darüber hinaus ist es wichtig, Festelektrolyte herzustellen, die dicht gepackt werden können, aber gleichzeitig flexibel bleiben, sodass die Ionen und Elektrolyten leicht fließen können. Dies verhindert eine Massenproduktion von Feststoffbatterien und führt zu höheren Kosten.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Ausbau der Forschungsaktivitäten auf nationaler sowie internationaler Ebene (siehe FestBatt-Cluster)
- Fertigungssynergien zwischen Autoherstellern und Herstellern stationärer Speicher erschließen
- Förderung von regulatorischen Rahmenbedingungen für Stromspeicher
 - Life-Cycle-Assessment für Batterien, um frühzeitig die regulatorischen Rahmenbedingungen für ressourceneffiziente Technologien zu verbessern
- Aufbau nationaler oder europäischer Produktionskapazitäten

02.03

Hochtemperaturspeicher zu Strom und Wärme (Carnot-Batterie)



Sektor:
Energie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
6-8

mehrere
Mio. t CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial⁹

Mit steigendem Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien am Energiesystem Deutschlands und der Welt wächst der Bedarf an ressourcenschonenden und kostengünstigen Möglichkeiten, große Mengen an Strom flexibel zu speichern und wiedereinzusetzen. Hochtemperaturspeicher (sogenannte Carnot-Batterien) eignen sich für diesen Zweck ideal. Bei der Nutzung von Hochtemperaturspeichern als Flexibilitätsoption im Energiesystem wird zunächst mithilfe einer Wärmepumpe oder eines Heizstabes bis 1.500 °C elektrische Energie in Hochtemperaturwärme umgewandelt.

⁹ Die Emissionsminderung lässt sich für Energiespeicher als „Enabling Technology“ nur in Verbindung mit dem Projekt (Einsatz, Leistung, Kapazität) quantifizieren.

Diese Wärme wird dabei durch ein Wärmeträgermedium in den Speicher übertragen. Die Trägermittel sind beispielsweise Luft, Salz oder Wasser und in der Lage, zwischen 500 und 1.300 °C zu speichern. Bei Bedarf wird die gespeicherte Wärme mittels eines Wärmekraftprozesses in Strom zurückverwandelt. Die erzeugte Wärmeenergie kann auch direkt für Industrieprozesse < 1.300 °C verwendet oder ins Fernwärmenetz < 100 °C eingespeist werden.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Außer Betrieb gegangene Kohlekraftwerke eignen sich besonders gut als Einsatzgebiet für HT-Speicher. Sie verfügen über die notwendige Infrastruktur, wie beispielsweise eine Turbine zur Dampferzeugung oder einen Anschluss an das Fernwärmenetz. Dementsprechend ist auch das quantitative Zubaupotenzial eng an die verfügbare stillgelegte Kraftwerksstruktur gekoppelt. Das gesamte wirtschaftlich nutzbare Potenzial beläuft sich folglich auf 43–47 GWel (20 GWel Braunkohle-, 23 GWel Steinkohle-, 4 GWel Mineralölkraftwerke). Dieses Potenzial bezieht sich in erster Linie auf die elektrische Leistung, welche von HT-Speichern bereitgestellt werden kann. Die abgeleitete Speicherkapazität hängt von der Dimensionierung des Wärmeübertragers ab, welcher die Wärme in Wasserdampf umwandelt und die Turbine betreibt. Je höher die Temperatur, desto höher die Effizienz des HT-Speichers.

Pilotprojekte und Unternehmen

In der Praxis wird diese Technologie ausgiebig erprobt. Beispielsweise setzt RWE in Zusammenarbeit mit der FH Aachen und dem deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik ein wegweisendes Pilotprojekt um, bei dem ein Kohlekraftwerk im rheinischen Revier zu einem Wärmespeicherkraftwerk umgerüstet wird. Die Lumenion GmbH wurde mit dem deutschen Innovationspreis für ihren neuartigen Hochtemperaturstahlspeicher ausgezeichnet. Auch die Kraftblock GmbH, die modulare Hochtemperaturwärmespeicher entwickelt, wurde bereits für die Nachhaltigkeit des Systems ausgezeichnet.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Effizienz und Kosten von Strom-Wärme-Strom-Speichern sind stark abhängig von deren Konfiguration und den eingesetzten Technologien. Während ein System mit Heizstab zu geringeren Investitionskosten führt, treibt die Nutzung einer Hochtemperaturwärmepumpe und eines Organic-Rankine-Cycle (ORC) die Kosten stark in die Höhe. Auch der Gesamtwirkungsgrad wird maßgeblich durch die Komponenten sowie den Grad der Abwärmenutzung bestimmt. Daraus resultiert ein Wirkungsgradbereich von 20–80 %. Eine technische Optimierung der Systemkomponenten und eine weitere Kostendegression durch Skalierung sind notwendig, um die wirtschaftliche Attraktivität von Hochtemperaturspeichern zu erhöhen.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Bestehende Maßnahmen für günstige Finanzierungsprojekte, Risikoabsicherung und Förderhilfen müssen ausgebaut werden. Die Förderung soll sich über den HT-Speicher hinaus auf das komplette Speichersystem inklusive aller Komponenten wie Belade-/Entladestationen und Energiewandler erstrecken.
- Klare und identische Definition von Energiespeichern auf EU- und nationaler Ebene
- Diskriminierungen sowie Komplexität abbauen und für Energiespeicher im Rahmen der Bandbreite der Flexibilitätsoptionen einen technologieoffenen und fairen Wettbewerb untereinander ermöglichen
- Optimierung von Netzentgeltregelungen und Abschaffung der Einstufung von HT-Speichern als Verbraucher und Erzeuger bei Wandlung zwischen Sektoren mit bürokratischen und umlagebehafteten Konsequenzen

02.04

Neue Anwendungsfelder für Photovoltaik



Sektor:
Energie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
7-9

ca. **59** Mio. t
CO₂-Äq/a
THG-Reduktionspotenzial¹⁰

Der Großteil des Photovoltaik-Ausbaus erfolgte in Deutschland bislang durch Aufdach- und Freiflächenanlagen. Um den enormen Ausbaudarf für das Ziel der Klimaneutralität 2045 zu decken, bedarf es vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz und zur Sicherstellung der Akzeptanz des EE-Ausbaus der Erschließung weiterer potenzieller Flächen. Integrierte Photovoltaik-Anwendungen wie Floating Photovoltaik (FPV), Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV), Urbane Photovoltaik (UPV), Fahrzeugintegrierte Photovoltaik (VIPV) oder Photovoltaik in Verkehrswegen (RIPV) machen es möglich, bereits für andere Zwecke erschlossene Flächen wie unter anderem Gebäudehüllen, Verkehrswege und versiegelte Siedlungsflächen für die Solarstromerzeugung zu nutzen.

¹⁰ Basierend auf einem Emissionsfaktor von 38 gr CO₂-Äq/kWh im Jahr 2045.

Sie mitigieren damit nicht nur Flächennutzungskonflikte und fördern die Akzeptanz, sondern schaffen zusätzliche Synergieeffekte wie Materialeinsparungen oder Schutzfunktionen (z. B. Schallschutz).

Anwendungspotenzial in Deutschland

Fraunhofer ISE nennt für die Floating Photovoltaik ein technisches Leistungspotenzial von 66 GWp für das Jahr 2050 bei einem technischen Flächenpotenzial von 730 km². Bei der bauwerkintegrierten Photovoltaik unterscheidet das Forschungsinstitut hinsichtlich Dach- und Fassadenflächen. Während für Dachflächen ein technisches Potenzial von 840 GWp (Flächenpotenzial von 2.800 km²) angegeben wird, sind es für Fassadenflächen jeweils 660 GWp sowie 2.200 km². Das technische Flächenpotenzial für urbane Photovoltaik, die Nutzung von versiegelten Flächen, beziffert sich für das Jahr 2050 auf 89 GWp für eine Fläche von 280 km². Die Nutzung von Photovoltaik in Verkehrswegen umfasst auf einer Fläche von 1.550 km² ein technisches Potenzial von 455 GWp (440 GWp Straße und 15 GWp Schiene), während sich das technische Potenzial für fahrzeugintegrierte Photovoltaik auf 82 GWp bei einem technischen Flächenpotenzial von 270 km² beläuft.

Pilotprojekte und Unternehmen

Das BMWi fördert die Entwicklung von fahrzeugintegrierter Photovoltaik für das On-Board-Laden von Elektro-Nutzfahrzeugen in Kooperation mit unter anderem Fraunhofer IVI sowie die Entwicklung von wandintegrierten Photovoltaik-Elementen für den Lärmschutz (RIPV mit unter anderem Megasol Energie AG, Energiegenossenschaft Inn-Salzach EG und der Bundesanstalt für Straßenwesen). Darüber hinaus wurden im Rahmen eines von der Europäischen Kommission geförderten Projekts mit Industriepartnern wie z. B. Meyer Burger und SMA Solar Technology neu entwickelte BIPV-Schindeln erforscht.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Floating Photovoltaik kann in den offenen Photovoltaik-Ausschreibungen (EEG 2021) aufgrund des erhöhten Montage- und Serviceaufwands mit Stromgestehungskosten der FFA nicht mithalten (10–15 % teurer). Ferner unterliegt sie komplexen Genehmigungsverfahren bezüglich des Naturschutzes. BIPV mit hohem Integrationsgrad ist aktuell wenig verbreitet und aufgrund der geringen Automatisierung noch nicht wirtschaftlich. VIPV erfordert individualisierte Fertigung je nach Anwendungsfeld, neue Herstellungsprozesse sowie Materialien. Im Bereich der UPV und RIPV gibt es im Gegensatz zu FFA technische Notwendigkeiten bei der Planung und Installation wie rutschfeste Module, lange Lebensdauer bei hoher Beanspruchung, blendfreie Aufbauten, geringeres Gewicht bei Überdachungen oder geringe Schalltransmission, die eine Kommerzialisierung erschweren.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Individuelle Mindestmengen im Bereich der Innovationsausschreibungen für die einzelnen Technologien
- Harmonisierungen der Bau- und Elektroanforderungen (IEC 61730 und IEC 61215)
- Anreize zu Erzeugung und Verbrauch von lokal erzeugtem Photovoltaik-Strom („energy sharing“, P2P-Handel, Mieterstrom)
- Einführung einer Solarpflicht, um geeignete Gebäudeflächen bereitzustellen

02.05

Agri-Photovoltaik



Copyright: BayWa r.e.



Sektor:
Energie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
9

ca. **97** Mio. t
CO₂-Äq/a
THG-Reduktionspotenzial¹¹

Agri-Photovoltaik bezeichnet ein Verfahren, das die parallele Nutzung einer Fläche für die Produktion von Photovoltaik-Strom sowie landwirtschaftlichen Erzeugnissen ermöglicht. Sie bietet damit die Möglichkeit, Photovoltaik-Anlagen großflächig auszubauen und gleichzeitig landwirtschaftliche Flächen als wichtige Ressource für die Nahrungsmittelproduktion zu erhalten. Während hoch aufgeständerte Konstruktionen einen Anbau unter den Modulen erlauben, ermöglichen bodennahe Montagen diesen zwischen den Modulreihen. Vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz von Nahrungsmittel- und Energieerzeugung sowie der Aufgabe der Akzeptanzsicherung kann Agri-Photovoltaik nicht nur weitere Photovoltaik-Ausbaupotenziale erschließen, sondern schützt darüber hinaus auch die Anbaukulturen.

¹¹ Basierend auf einem Emissionsfaktor von 38 gr CO₂-Äq/kWh im Jahr 2045.

Die Photovoltaik-Konstruktionen helfen die Klimaresilienz der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion zu erhöhen, indem sie sie vor Extremwetterereignissen sichern. So bilden die Agri-Photovoltaik-Anlagen einen Schutz vor Hagel, Frost und Starkregen und reduzieren die Verdunstung und die Sonneneinstrahlung.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Das technische Potenzial für Agri-Photovoltaik beläuft sich laut Fraunhofer ISE für 2050 auf eine installierte Leistung von 2.550 GWp sowie einen Ertrag von 2.550 TWh verteilt auf einer Fläche von 29.000 km². Lediglich 4 % der gesamten deutschen Ackerfläche würden ausreichen, um bilanziell die aktuelle Stromnachfrage Deutschlands zu decken.

Pilotprojekte und Unternehmen

Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft erforscht im Verbund mit unter anderem BayWa r.e. und den Elektrizitätswerken Schönau EWS Agri-Photovoltaik als Resilienzkonzept zur Anpassung an den Klimawandel im Obstbau. Darüber hinaus wird im Projekt APV-MaGa eine dreifache Landnutzung – Anbau von Nahrungsmitteln, Solarstromproduktion sowie Regenwassergewinnung und -speicherung über die Photovoltaik-Module – in Westafrika getestet. Gefördert wird das Projekt über das Rahmenprogramm Forschung für Nachhaltige Entwicklung vom BMBF.

... der gesamten deutschen Ackerfläche würden ausreichen, um bilanziell die aktuelle Stromnachfrage Deutschlands zu decken

4 %

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Im Bereich der Agri-Photovoltaik bremsen momentan die hohen Investitionskosten der hoch aufgeständerten Anlagen den Ausbau. Darüber hinaus mangelt es derzeit an Erfahrungswerten hinsichtlich der Schattentoleranz der Pflanzen.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Individuelle Mindestmengen im Bereich der Innovationsausschreibungen für die einzelnen Technologien
- Erweiterung der Flächenkulisse für bodennahe APV
- Technologieprämie für hoch aufgeständerte APV
- Abbau von regulatorischen Hindernissen:
 - Agri-Photovoltaik nur im Ackerbau förderfähig und nicht im aussichtsreichen Bereich der Sonder- und Dauerkulturen
 - Agri-Photovoltaik verhindert den Anspruch auf landwirtschaftliche Beihilfen (§ 12 Abs. 3 Nr. 6 DirektZahlDurchfV)
 - Agri-Photovoltaik als privilegiertes Bauvorhaben einstufen (§ 35 BauGB)



Verkehr

Innovationen im Verkehrssektor

 <p>Energie</p>	01	Elektrolyseure der Megawatt-Klasse	Seite 16
	02	Feststoffbatterien	Seite 18
	03	Hochtemperaturspeicher zu Strom und Wärme (Carnot-Batterie)	Seite 20
	04	Neue Anwendungsfelder für Photovoltaik	Seite 22
	05	Agri-Photovoltaik	Seite 24
 <p>Verkehr</p>	06	E-Kerosin	Seite 28
	07	Wasserstoff als Schiffstreibstoff	Seite 30
	08	Akkumulatorenrecycling	Seite 32
	09	Wasserstoffzüge	Seite 34
	10	Brennstoffzellen-Lkw	Seite 36
	11	Vehicle-to-Grid-Charging	Seite 38
 <p>Gebäude</p>	12	Alternativer Beton	Seite 42
	13	Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung	Seite 44
	14	Erneuerbare Fernwärme aus Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie	Seite 46
 <p>Industrie</p>	15	Wasserstoffreduktion von Eisenerz	Seite 50
	16	CCU/S in der Zementindustrie: das Oxyfuel-Verfahren	Seite 52
	17	Methanol-to-Olefin-Prozess	Seite 54
	18	Elektrischer Steamcracker-Hochofen	Seite 56
	19	CSP zur Gewinnung industrieller Prozesswärme	Seite 58
	20	CO ₂ -Direktabscheidung und -speicherung (DACCS)	Seite 60

02.06

E-Kerosin



Sektor:
Verkehr



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
7-8

ca. **31** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial¹²

Während sich für Straßen, Schienen- und Seeverkehr batterieelektrische oder Brennstoffzellenantriebe eignen, werden im Flugverkehr auch in Zukunft Kraftstoffe mit hoher Energiedichte benötigt werden. Erneuerbares, synthetisches Kerosin, das aus CO₂ und grünem Wasserstoff hergestellt wird (sogenanntes E-Kerosin oder Power-to-Liquid-Kerosin/PtL-Kerosin), stellt ein direktes Substitut für fossiles Kerosin dar. Es kann wie herkömmliches Kerosin ohne Umrüstungen in Flugzeugtriebwerken verbrannt werden, da es die gleichen Eigenschaften aufweist und verbrennt gleichzeitig sauberer.

¹² Annahme: Emissionsfaktor 3,15 t CO₂ pro Tonne fossiles Kerosin, Kerosinbedarf konstant.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Speziell für den Flugverkehr ist der Mindestanteil von PtL-Kerosin, das fossilem Flugkerosin beigemischt wird, auf 0,5 % in 2026 bis 2 % in 2030 festgelegt. Das entspricht einem Bedarf von rund 200.000 t E-Kerosin in 2030. Bis 2045 müsste der Anteil an sogenannten Sustainable Aviation Fuels (SAFs) jedoch auf nahezu 100 % gesteigert werden, um CO₂-Neutralität zu erreichen. Einen konstanten Kerosinbedarf angenommen, würde dies die Emission von 31 Mio. t CO₂ pro Jahr vermeiden.

Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von heimischem erneuerbarem Strom, der Basis für grünen Wasserstoff, kann die nötige Menge nicht allein durch die inländische Produktion gedeckt werden. Folglich ist Deutschland bei der PtL-Produktion auch in Zukunft auf Energieimporte angewiesen.

Pilotprojekte und Unternehmen

Im Oktober 2021 eröffnete das Start-up INERATEC, eine Ausgründung des Karlsruhe Institute of Technology (KIT), die weltweit größte Power-to-Liquid-Anlage zur Herstellung von E-Kerosin in Werlte, Niedersachsen. Die jährliche Produktionskapazität wird 350 t betragen, die am Hamburger Flughafen von deutschen Fluggesellschaften abgenommen werden. Diese Pilotanlage wird als Wegbereiter für weitere, modular aufgebaute Power-to-Liquid-Anlagen von INERATEC weltweit dienen.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Angesichts der langen Vorlaufzeiten, die für große kommerzielle Produktionsanlagen erforderlich sind, ist die schnelle Schaffung solider regulatorischer Rahmenbedingungen von entscheidender Bedeutung.

Heute ist E-Kerosin gegenüber fossilem Kerosin noch etwa fünfmal so teuer (unter günstigen Produktionsbedingungen). Daher muss bei der Steigerung von E-Kerosin-Beimischungsquoten stets ein gemeinsames Vorgehen zumindest innerhalb der EU angestrebt werden, um Wettbewerbsverzerrungen zum Nachteil europäischer Fluggesellschaften zu vermeiden. Diese führen sonst zu Rebound-Effekten, wie dem sogenannten „Tankering“. Diese Praxis beschreibt das Mitführen von Treibstoff, der über den Bedarf des Hinfluges hinausgeht, damit am Zielort für den Rück- oder Weiterflug nicht getankt werden muss, wodurch die Mindestquoten für E-Kerosin umgangen werden können. Das zusätzliche Gewicht des zusätzlich transportierten Treibstoffs verursacht dann vermeidbare Mehremissionen.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Als übergreifendes, technologieunabhängiges Instrument unterstützt ein angemessener CO₂-Preis (ETS) die Wettbewerbsfähigkeit von nachhaltigem Kerosin
- Als angebotsseitige Unterstützung sollten weiterhin Fördermittel für Investitionen in Produktionsanlagen zur Verfügung gestellt werden, um den Kostennachteilen der Early Adopters zu begegnen
- Eine Besteuerung von Energieträgern, die die Klimawirksamkeit miteinbezieht, würde synthetischem Kerosin gegenüber dem fossilen Pendant Vorteile verschaffen
- Als nachfrageseitiger Impuls bieten sich Beimischungsquoten an. Die in Deutschland bereits beschlossene Quote von 2 % in 2030 ist allerdings zu gering, um eine schnelle Skalierung der Produktion zu stimulieren. Hier sollte im Rahmen der Verhandlungen um die ReFuelEU-Aviation-Richtlinie eine höhere Quote gefunden werden, die dann auch in ganz Europa Anwendung findet.
- Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie in Deutschland sollten darüber hinaus verstärkt Energiepartnerschaften mit Drittländern geschlossen werden, um eine internationale Wertschöpfungskette zu etablieren

02.07

Wasserstoff als Schiffstreibstoff



Sektor:
Verkehr



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
5

ca. **1** Mio. t
CO₂Äq/a

THG-Reduktionspotenzial¹³

In der Schifffahrt werden mit dem Ziel der deutschen Klimaneutralität bis 2045 alternative Antriebsstoffe benötigt. Neben Biokraftstoffen werden strombasierte Kraftstoffe, wie beispielsweise synthetisches Methanol oder E-Diesel, hier eine Rolle spielen. Auch die direkte Verwendung von grünem Wasserstoff stellt insbesondere in der Binnen- und Küstenschifffahrt eine vielversprechende klimafreundliche Alternative zur Verwendung fossiler Kraftstoffe dar. Das größte Potenzial hat dabei die Umwandlung in Antriebsstrom mittels Brennstoffzellen.

¹³ Basierend auf Frachtvolumen der deutschen Binnengüterschifffahrt; gegenüber Transport des gleichen Volumens mit fossil betriebenen Schiffen.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte und des Gewichts von H₂-Tanks eignet sich der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff in der Schifffahrt eher für Schiffe mit geringeren Anforderungen an die Reichweite. Konkret ergeben sich daraus in Deutschland zunächst Einsatzpotenziale in der Küsten- und Binnenschifffahrt. Die nationale Wasserstoffstrategie nennt die Förderung von Fahrzeugen mit H₂-Brennstoffzellenantrieben und der Nutzung von H₂ als Kraftstoff in der Küsten- und Binnenschifffahrt als Ziel.

Pilotprojekte und Unternehmen

Das Projekt HySeas III, finanziert durch das Rahmenprogramm Horizont 2020 der Europäischen Union, entwickelt ein Wasserstoffbrennstoffzellen-basiertes Antriebssystem für eine RoPax-Fähre. Der Wasserstoff für den Betrieb soll aus lokalen erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden und somit Emissionsfreiheit gewährleisten.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

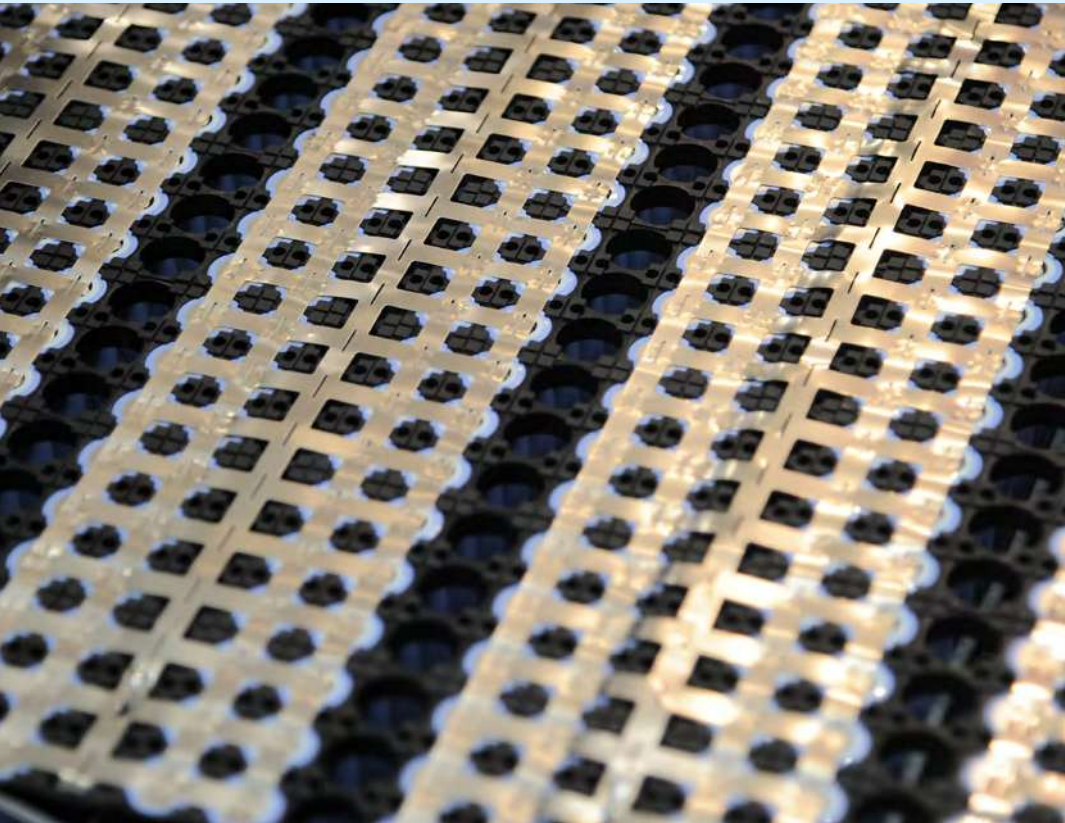
Eine Kernherausforderung ist die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff und dessen Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu herkömmlichem Schiffsdiesel (VLSFO). Der Einsatz erfordert außerdem den Aufbau einer Betankungsinfrastruktur. Wie bei anderen Anwendungsfällen für Wasserstoff bedingen sich auch hier Angebots- und Nachfrageentwicklung.

Empfehlungen für den Markthochlauf

- **Infrastrukturen schaffen**
 - Der Auf- und Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur in Häfen auf nationaler und EU-Ebene ist die Grundlage für wasserstoffbetriebene Schifffahrt
 - Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zu konkurrenzfähigen Einkaufspreisen muss sichergestellt werden (siehe Innovation Factsheet: Elektrolyseure der Megawatt-Klasse)
- **Förderinstrumente einsetzen**
 - Internalisierung der Kosten fossiler Kraftstoffe durch Bepreisung von CO₂-Emissionen
 - Intensivierung der F&E-Förderung für Wasserstoffantriebe für die Schifffahrt ist weiterhin notwendig
 - Auch sollte im Rahmen der COP 26 der Druck auf eine Verschärfung der GHG-Minderungsziele der IMO (International Maritime Organisation) erhöht werden, um auch außerhalb Europas die Marktentwicklung voranzutreiben

02.08

Akkumulatorenrecycling



Sektor:
Verkehr



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
7-8

ca. **8** Mio. t
CO₂Äq/a

THG-Reduktionspotenzial¹⁴

Energiespeicher sind ein zentraler Baustein der Energiewende. Schätzungen zufolge wird die Nachfrage nach Akkuleistung bis 2030 von heutigen 200 GWh um ein Zehnfaches auf 2.000 GWh steigen. Um diese enorme Nachfrage möglichst umweltverträglich zu decken, besonders in Hinblick auf die Verwendung von Rohstoffen wie Lithium, Kobalt, Nickel oder Mangan, richtet sich der Fokus auf Möglichkeiten des Batterierecyclings. Neben der Erhöhung der Effizienz des Recyclings und der Rückgewinnungsrate kritischer Rohstoffe ist auch die Förderung der Forschung in diesem Gebiet wichtig, um Skalierbarkeit von Batterierecyclingsanlagen zu ermöglichen. Darüber hinaus bietet die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus die Möglichkeit, Second-Life-Potenziale zu nutzen und dadurch erhebliche Ressourcen einzusparen.

¹⁴ Basierend auf einer nationalen Produktionskapazität von 280 GWh.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Stand 2020 entfallen über 90 % des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien auf den asiatischen Markt. Prognosen zufolge wird der europäische Anteil am Batterierecycling bis 2025 zunehmen. Im Jahr 2030 werden die bestehenden und geplanten Zellfabriken in Deutschland eine jährliche Produktionskapazität von rund 280 Gigawattstunden erreichen. Bei der Inlandsproduktion können Merkmale wie das recyclingfähige Design berücksichtigt werden, um die Effizienz beim Recycling zu erhöhen. Es wird erwartet, dass die Kapazitäten auch nach 2030 weiter steigen werden. In großen Teilen der Wertschöpfungskette für Fahrzeugbatterien von der Zellproduktion bis zum Recycling bestehen in Deutschland bereits wichtige Kompetenzen.

Pilotprojekte und Unternehmen

In Salzgitter begann Anfang 2021 das Pilotprojekt des Automobilkonzerns VW, bei welchem Hochvolt-Fahrzeugbatterien, für die keine anderweitige Verwendung („second life“) möglich ist, recycelt werden. Im Fokus steht dabei besonders die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe, die in den Batterien enthalten sind. Der Umfang des Recyclings beschränkt sich derzeit noch auf ca. 3.000 Fahrzeugbatterien pro Jahr. Spätestens ab 2030, wenn größere Mengen an Batterien ihre Nutzungsdauer erreicht haben, wird diese Zahl deutlich ansteigen. Ziel des VW-Konzerns ist es, durch die Pilotanlage den Anteil an recycelten Rohstoffen von derzeit 53 auf 72 % zu heben. Durch die Integration aller Teile des Rohstoffkreislaufs der Batterien in die Unternehmensprozesse soll ein nachhaltiger Wertschöpfungszyklus ermöglicht werden.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Nicht nur bei der Batterieproduktion liegt Europa derzeit noch deutlich hinter der Konkurrenz aus asiatischen Ländern wie China und Südkorea zurück. Rund 90 % des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien finden derzeit auf dem asiatischen Markt statt. Diese Konkurrenz kann eine Hürde für die Etablierung bzw. Skalierung eines wirtschaftlichen Batterierecyclings in Deutschland sein.

Zudem ist der Recyclingprozess von Akkumulatoren sehr energieaufwendig. Erfolgt die Versorgung nicht ausschließlich durch erneuerbare Energien, entstehen je nach Verfahren klimaschädliche Emissionen.

Darüber hinaus ist die in Deutschland gesetzlich vorgeschriebene Batterierecyclingquote von 50 %, die sich allerdings auf das Gesamtgewicht bezieht, nur bedingt aussagekräftig. Diese Quote kann allein durch Gehäuse und ähnliche größere Bauteile erreicht werden. Entscheidend sind aber gerade die kritischen Rohstoffe, die in kleinen Mengen in den Batterien enthalten sind.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Damit zukunftsorientierte Recyclingprozesse frühzeitig geschaffen werden können, bedarf es einer verstärkten und kooperativen Entwicklungsarbeit aller Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Dabei soll nicht nur die Möglichkeit des Recyclings, sondern auch die Wieder- oder Weiterverwendung von Altbatterien berücksichtigt werden. Als angebotsseitige Unterstützung sollten weiterhin Fördermittel für Investitionen in Produktionsanlagen zur Verfügung gestellt werden, um den Kostennachteilen der Early Adopters zu begegnen.
- Umsetzung eines nachhaltigen und recyclingfreundlichen Batteriedesigns durch die Hersteller, um Demontage und Recycling zu erleichtern
- Überarbeitung der EU-Richtlinie von 2006 zu Batterien und Akkumulatoren durch geeignete Anpassungen an neue Herausforderungen, die besonders durch die Elektrifizierung des Automobilbereichs entstanden sind
- Förderung und Aufbau von Zellfabriken in Europa, welche konkurrenzfähig zum asiatischen Markt sind
- Überarbeitung der EU-Richtlinie 2006 zum Recycling von Altbatterien mit dem Ziel, die Rohstoffe Graphit, Lithium oder Kobalt zu mindestens 90 % zurückzugewinnen

02.09

Wasserstoffzüge



Sektor:
Verkehr



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
8-9

ca. **1** Mio. t
CO₂Äq/a

THG-Reduktionspotenzial¹⁵

Genau wie Züge, die per Oberleitung mit Energie versorgt werden, werden auch Wasserstoffzüge von Elektromotoren angetrieben. Die elektrische Energie zu deren Versorgung stammt allerdings aus einer Brennstoffzelle, in der Wasserstoff mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft reagiert. Eine entsprechende Wasserstofftankinfrastruktur vorausgesetzt, kann das Fahrzeug vollkommen unabhängig von einer Oberleitung elektrisch und emissionsfrei fahren.

¹⁵ Bei vollständigem Ersatz der heutigen Diesellokflotte durch Wasserstoffzüge.

Anwendungspotenzial in Deutschland

40 % des deutschen Schienennetzes sind nicht elektrifiziert, verfügen also über keine Oberleitung. Auf diesen Streckenabschnitten werden fast ausschließlich Dieselloks eingesetzt, deren Betrieb jährlich 400 Mio. Liter Diesel benötigt. Damit einher gehen die Emissionen von über 1 Mio. t CO₂ pro Jahr. Die Installation von Oberleitungen auf diesen Strecken ist technisch zwar realisierbar, jedoch nur selten rentabel, weshalb in den letzten 12 Jahren gerade einmal 60 Kilometer elektrifiziert wurden. Wasserstoffzüge sind geeignet, diese Lücke zu schließen und so einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung des Bahnverkehrs zu leisten. Aus bevorstehenden Ausschreibungen der Deutschen Bahn ergibt sich ein Potenzial von 2.500 Neufahrzeugen für den öffentlichen Personennahverkehr, die mit Wasserstoffzügen statt Dieselloks besetzt werden sollten.

Pilotprojekte und Unternehmen

Der Hersteller Alstom hat mit dem Coradia iLint ein serienfähiges Modell entwickelt, das schon seit September 2018 an zwei Verkehrsbetriebe in Niedersachsen und Hessen verkauft wurde. Die benötigten Brennstoffzellen liefert das Climate-Tech-Start-up Hydrogenics. Auch Siemens will das Modell Mireo H ab 2023 im Regelverkehr einsetzen – erste Strecken in Baden-Württemberg und Bayern wurden schon identifiziert.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Wasserstoffzüge sind technisch ausgereift und kommerziell marktfähig. Hemmnis für die Skalierung ist allerdings einerseits die fehlende Wasserstoffinfrastruktur und andererseits der hohe Preis für grünen Wasserstoff. Um in Konkurrenz mit Dieselantrieben und anderen alternativen Antriebssystemen zu treten, ist die Schaffung übergeordneter Infrastrukturen erforderlich.

Empfehlungen für den Markthochlauf

- **Infrastrukturen schaffen:**
 - Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zu konkurrenzfähigen Einkaufspreisen sicherstellen (siehe Innovation Factsheet: Elektrolyseure der Megawatt-Klasse)
 - Identifikation prioritärer Strecken und gezielter Aufbau von H₂-Tankinfrastruktur
- **Förderinstrumente einsetzen**
 - Internalisierung der Kosten fossil-betriebener Loks durch Bepreisung von CO₂-Emissionen
 - Ausrichtung der Besteuerung von Treibstoffen nach CO₂-Emissionen

... wasserstoffbetriebene Neufahrzeuge für den öffentlichen Personennahverkehr

2.500

02.10

Brennstoffzellen-Lkw



Sektor:
Verkehr



Entwicklungsstand:
Erforschungsphase



Technologiereifegrad:
7

ca. **28** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial¹⁶

Ein H₂-Lkw wird durch elektrische Energie angetrieben, die zuvor durch einen elektrochemischen Prozess in einer Brennstoffzelle unter Verwendung von Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt wurde. Wird der dazu verwendete Wasserstoff per Elektrolyse mit erneuerbarer Energie gewonnen, ergibt sich ein nahezu treibhausgasneutraler Antrieb. Aufgrund der Möglichkeit, Wasserstoff in Tanks zu speichern, der potenziell hohen Reichweite sowie der schnellen Betankungsmöglichkeit sind H₂-Brennstoffzellenantriebe eine vielversprechende Alternative für den zukünftigen Straßenschwerlastverkehr.

¹⁶ Im Vergleich zu heutigen durchschnittlichen Emissionen im Güterverkehr von 110 g CO₂Äq pro Tonnenkilometer.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Insbesondere beim Transport von hohen Lasten und auf langen Distanzen können Brennstoffzellen-Lkw ihre Stärken gegenüber anderen Antriebsalternativen ausspielen. Schätzungen gehen in 2045 von 66.000 brennstoffzellenbetriebenen Last- und Sattelzügen auf deutschen Straßen aus, die dieselbetriebene Lkw ersetzen würden.

Pilotprojekte und Unternehmen

Der Hersteller Hyundai will im Jahr 2022 die ersten 30 Wasserstoffbrennstoffzellen-Lkw nach Deutschland liefern. Cellcentric, ein Joint Venture aus Daimler Truck und der Volvo Group, plant, ab dem Jahr 2025 die Großserienproduktion für H₂-Lkws aufzunehmen und dafür eine Gigafactory für Brennstoffzellen zu errichten. Während die finale Standortentscheidung für das Jahr 2022 erwartet wird, läuft die Vorserienproduktion schon in Esslingen bei Stuttgart. Das Start-up Nikola hat gemeinsam mit Iveco ein Produktionswerk für batterieelektrische und brennstoffzellenbetriebene Lkw in Ulm eröffnet.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

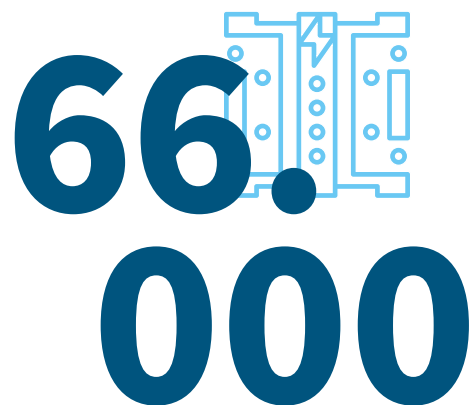
Wie auch bei anderen Technologien im Wasserstoffsektor zu beobachten, limitiert die nicht ausreichende Verfügbarkeit von wettbewerbsfähigem grünem Wasserstoff und das Fehlen einer Verteil- und Tankinfrastruktur den Markthochlauf. Zusätzlich fehlen im Markt für Brennstoffzellen-Lkw einheitliche Betankungsstandards.

Darüber hinaus liegen die Anschaffungskosten für einen Brennstoffzellen-Lkw heute noch ein Mehrfaches über denen für einen konventionellen Diesel-Lkw. Zwar werden diese Investitionsmehrausgaben bereits durch das KsNI-Programm gefördert, aber es besteht weiterhin ein Kostennachteil.

Insofern ist auch hier eine Kombination aus angebots- und nachfrageseitigen Impulsen notwendig, um der Technologie zum Durchbruch zu verhelfen.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- **Infrastrukturen schaffen:**
 - Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zu konkurrenzfähigen Einkaufspreisen sicherstellen (siehe Innovation Factsheet: Elektrolyseure der Megawatt-Klasse)
 - Auf- und Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur entlang nationaler und internationaler Fernstraßen
 - Etablierung einheitlicher Standards und Normen für die Tankinfrastruktur von Brennstoffzellen-Lkw
- **Förderinstrumente einsetzen**
 - Internalisierung der Kosten fossil-betriebener Lkw durch Anpassungen der Mautbestimmungen sowie Bepreisung von CO₂-Emissionen
 - Ausrichtung der Besteuerung von Treibstoffen nach CO₂-Emissionen
 - Einrichtung und Aufrechterhaltung von Förderprogrammen zur Anschaffung von Brennstoffzellen-Lkw sowie zur Errichtung von H₂-Tankstellen



66.000

... brennstoffzellenbetriebene Last- und Sattelzüge bis 2045 auf deutschen Straßen

02.11

Vehicle-to-Grid-Charging



Copyright: The Mobility House



Sektor:
Energie/Verkehr



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
9

ca. **60** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial

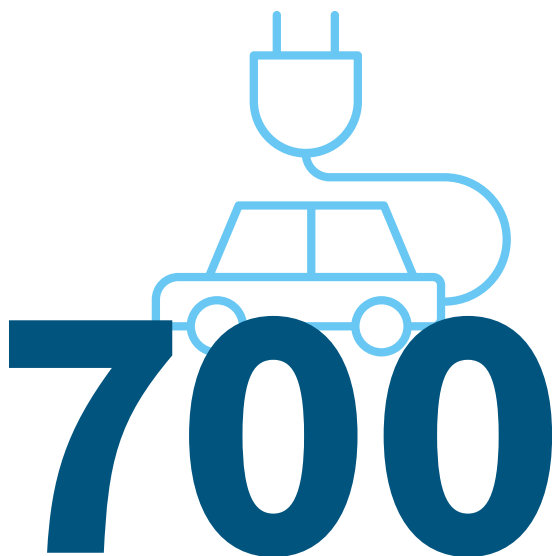
Vehicle-to-Grid (V2G) beschreibt ein Konzept, in dem ergänzend zum reinen Strombezug von Elektrofahrzeugen ebenfalls die Rückspeisung von Strom aus den Batterien in das Stromnetz ermöglicht wird. Es wird daher häufig als Synonym für den Begriff bidirektionales Laden verwendet. Im Hinblick auf die steigende Tendenz an erneuerbaren Energien und den Rückgang von thermischen Kraftwerken stellt sich die Frage, wie sich Synergien zwischen dem Einstieg in die Elektromobilität sowie deren steigendem Anteil an Elektrofahrzeugen und dem Ausbau erneuerbarer Energien ergeben. Durch die Eigenschaft der V2G-Funktion kann sie in verschiedenen Ebenen im Energiesystem, wie beispielsweise Optimierung lokaler Verbrauch/Eigenheimoptimierung, netzdienstliches Laden/Netzdienstleistungen (Verteilnetz), Vermarktung von Strom und im Sinne der Systemdienstleistungen (Netzstabilität und Zwischenspeicherung von erneuerbaren Energien), vorteilhaft eingesetzt werden.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Das deutschlandweite Anwendungspotenzial von V2G ist eng gekoppelt mit der Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen und dem gleichzeitig nötigen Ausbau der Ladeinfrastruktur. Hierzu gibt es eine Reihe an Studien zu Markthochlaufszenerarien zur deutschen Entwicklung der Elektroauto-Neuzulassungen und des Bestandes bis zum Jahr 2030 bzw. 2050. So gehen die Nationale Plattform Elektromobilität und der VDA von 14 Mio. Elektroautos in 2030 aus. Das entspricht einem Speicherpotenzial von ca. 700 GWh (das ist die 17-fache Speichermenge der heutigen Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland). Demzufolge ist die Marktdurchdringung von batterieelektrischen Fahrzeugen direkt proportional zu dem Anwendungspotenzial in Deutschland.

Pilotprojekte und Unternehmen

BMW, Bosch.IO, Daimler, FfE, Fraunhofer Institute IAO, IFAM, Kostal und weitere erforschen in verschiedenen Projekten und Reallaboren wie BDL, i rEzEPT und unit-e2 die technische Umsetzung in unterschiedlichen Anwendungsfällen. Amprion, Tennet und The Mobility House haben bereits Pilotprojekte für Primärregelung und Redispatch umgesetzt und die technische Machbarkeit bewiesen. In Großbritannien gibt es Reallabore mit insgesamt über 600 Fahrzeugen.



700 GWh

... Speicherpotenzial

Herausforderungen bei der Marktentwicklung



Im Fokus steht dabei die Entwicklung intelligenter Steuerungssysteme für das Netz und den Energiemarkt. Diese müssen Nachfragespitzen und Überlastungen des Netzes verhindern, die durch das zeitgleiche Laden vieler Elektroautos hervorgerufen werden können. Weiterhin müssen Elektroautos bevorzugt dann geladen werden, wenn viel erneuerbare Energie im System ist. Dazu müssen Letztverbraucher über entsprechende Vergütungen oder Entlastungen dazu angeregt werden, aktiv ihr Elektrofahrzeug im Sinne der Systemdienstleistungen einzusetzen.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen von mobilen Speichern sowie Gleichstellung mobiler mit stationären Speichern (keine Doppelbesteuerung beim Ein- und Ausspeisen)
- Ausbau von Ladeinfrastruktur zu Hause und am Arbeitsplatz mit eindeutig definierter Steuerbarkeit (Schnittstelle und Kommunikationsprotokoll)
- Anpassung der Netz- (z. B. § 14a) und Energiemarktprodukte an die kosteneffiziente Teilnahme von Elektroautos
- Abschluss und schnelle Implementierung (z. B. über Förderzusagen) der technischen Arbeiten an ISO 15118-20 sowie des Smart Meter Gateways hinsichtlich der Funktionalität der Steuerbarkeit bzw. Zulassen alternativer, kostengünstiger und schnellerer Steuerungsmöglichkeiten



Innovationen im Gebäudesektor

 Energie	01	Elektrolyseure der Megawatt-Klasse	Seite 16
	02	Feststoffbatterien	Seite 18
	03	Hochtemperaturspeicher zu Strom und Wärme (Carnot-Batterie)	Seite 20
	04	Neue Anwendungsfelder für Photovoltaik	Seite 22
	05	Agri-Photovoltaik	Seite 24
 Verkehr	06	E-Kerosin	Seite 28
	07	Wasserstoff als Schiffstreibstoff	Seite 30
	08	Akkumulatorenrecycling	Seite 32
	09	Wasserstoffzüge	Seite 34
	10	Brennstoffzellen-Lkw	Seite 36
	11	Vehicle-to-Grid-Charging	Seite 38
 Gebäude	12	Alternativer Beton	Seite 42
	13	Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung	Seite 44
	14	Erneuerbare Fernwärme aus Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie	Seite 46
 Industrie	15	Wasserstoffreduktion von Eisenerz	Seite 50
	16	CCU/S in der Zementindustrie: das Oxyfuel-Verfahren	Seite 52
	17	Methanol-to-Olefin-Prozess	Seite 54
	18	Elektrischer Steamcracker-Hochofen	Seite 56
	19	CSP zur Gewinnung industrieller Prozesswärme	Seite 58
	20	CO ₂ -Direktabscheidung und -speicherung (DACCS)	Seite 60

02.12

Alternativer Beton



Sektor:
Gebäude



Entwicklungsstand:
Erforschungsphase



Technologiereifegrad:
7

ca. **12** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial

Beton als grundlegender Baustoff und der für seine Herstellung typischerweise verwendete Zement spielen bei der Treibhausgasintensität des Bausektors eine zentrale Rolle. Entscheidend für die Umweltbilanz von Beton ist der emissionsintensive Prozess der Zementherstellung (siehe Factsheet Oxyfuel-Verfahren). Neben der Reduktion der Treibhausgase im Herstellungsprozess sind innovative Ersatzwerkstoffe und die Wiederverwendung von Altbeton und mineralischen Bauabfällen ein wichtiger Hebel zur Verbesserung der Umweltbilanz. Bei ressourcenschonendem oder Recyclingbeton (R-Beton oder RC-Beton) wird der üblicherweise notwendige Kies oder Naturstein teilweise durch Gesteinskörnungen aus rezyklierten mineralischen Bauabfällen ersetzt. Er kann dann ohne Qualitätseinbußen eingesetzt werden.

Darüber hinaus ermöglichen innovative Verbundwerkstoffe wie Carbon- oder Textilbeton, bei denen Fasern aus Hochleistungsfaserstoffen wie Carbon oder Glasfasern als Bewehrung eingesetzt werden, die Fertigung von Bauteilen mit wesentlich geringeren Querschnitten (und damit Betonmengen). In zahlreichen Forschungsprojekten wurden und werden aktuell außerdem neue Ansätze für die Herstellung von Biobeton erforscht. Dieser wird aus biobasierten Rohstoffen oder mithilfe von Bakterien hergestellt. So ist es bereits möglich, mit kalkproduzierenden Bakterien CO₂-neutrale Alternativen als Zementersatzstoffe zu „züchten“. Geforscht wird auch an der Verwendung landwirtschaftlicher Reststoffe als Ersatz für chemische und mineralische Zusatzstoffe von Beton. Ein weiterer innovativer Ansatz ist der Einsatz von Pilzwurzelgeflechten (Myzelien), um Betonteile miteinander zu verbinden oder auch Betonsteine mit einer klimafreundlichen, kompostierbaren Dämmung aus Pilzmyzel und organischen Stoffen zu füllen.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Im Jahr 2017 waren 20,5 Mio. t CO₂Äq in Deutschland allein der Zementproduktion zuzuschreiben. Während die weltweite Nachfrage voraussichtlich steigen wird, wird der Zementverbrauch in Deutschland nach Prognosen sinken oder stagnieren. Das Ziel, die Emissionen bis 2030 gegenüber 1990 zu halbieren und bis 2045 klimaneutral zu werden, ist allerdings auch bei sinkendem Verbrauch nicht mit dem Treibhausgaspotenzial von 587 kg CO₂Äq pro Tonne Zement zu vereinbaren. Durch Verbreitung der genannten Alternativen könnte diese Intensität um bis zu 60 % gesenkt werden¹⁷. Dies entspräche einem Reduktionspotenzial von 12,3 Mio. t CO₂Äq.

Pilotprojekte und Unternehmen

- Die solidian GmbH mit Sitz in Baden-Württemberg produziert nachhaltige und nicht korrosive Bewehrungen aus Carbon-, Glas- und Basaltfasern, die für verschiedene Zwecke eingesetzt werden können. Im Jahr 2015 wurde in Albstadt-Ebingen bereits die weltweit erste Brücke aus reinem Carbonbeton errichtet. In ihrer Umweltbilanz weist sie eine Halbierung des Primärenergieverbrauchs und eine 30-prozentige Reduzierung der CO₂-Emissionen aus.
- Ein Forscherteam der TU München entwickelt gemeinsam mit dem Start-up TechnoCarbon einen alternativen Beton, der aus natürlichem Granit und Carbonfasern aus Salzwasseralgen hergestellt wird und so ohne Zement auskommt.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

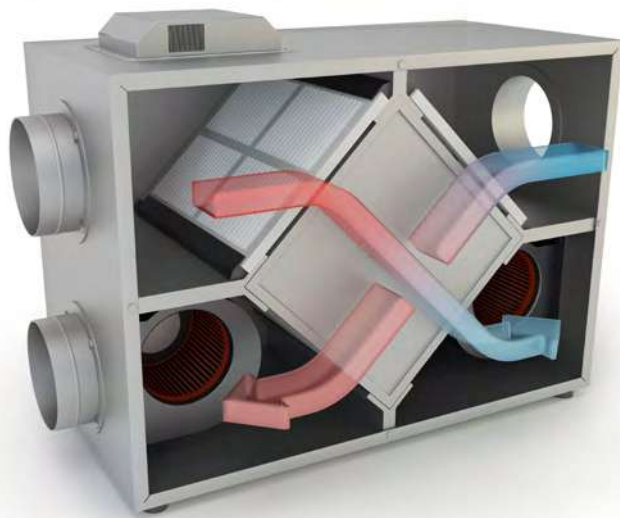
Beton ist ein Massenbaustoff, dessen Wettbewerbsfähigkeit hauptsächlich durch den Preis bestimmt wird. Sowohl der Beton selbst als auch der eingesetzte herkömmliche Zement sind bislang meist deutlich günstiger als klimafreundlichere Substitute. Da gegenwärtige Ausschreibungsverfahren dies nicht honorieren, finden die Alternativen in der breiten Masse keine Anwendung.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- F&E-Aktivitäten müssen weiterhin gefördert werden
- Nachhaltigkeitszertifizierungen für Baumaterialien müssen in der Bauplanung stärker eingefordert werden, damit der Einsatz nachhaltiger Baustoffe gefördert werden kann
- In Bauverträgen sollte eine spezifischere Aufschlüsselung der verwendeten Betonsorten und ein verpflichtender Mindestanteil an Sekundärmaterialien oder klimafreundlichen Baustoffen eingefordert werden
- Bei der Vergabe von (öffentlichen) Aufträgen sollte die Klimabilanz der genutzten Baustoffe mehr Beachtung finden (Green Procurement). Eine Quote für alternative und klimafreundliche Baustoffe würde hier effektiv einen Nachfrageimpuls setzen.

02.13

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung



Sektor:
Gebäude



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
9

ca. **15** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial

Eine ausreichende Raumluftqualität in Innenräumen von Gebäuden kann in der Regel über eine manuelle Fensterlüftung nicht sichergestellt werden. Zudem geht ein enormer Anteil der Heizwärme verloren, werden Gebäude manuell über Fenster gelüftet. Eine mechanische bzw. ventilatorgestützte Lüftungsanlage schafft hier Abhilfe. Wird in die Anlage ein Wärmetauscher integriert, können bis zu 95 % der Wärmeenergie aus der Abluft zurückgewonnen werden. Dabei wird die thermische Energie der Abluft aus dem Innenraum an die zugeführte Frischluft übertragen, ohne dass es zu einer Vermischung beider Luftströme kommt. Dies reduziert den Heizenergiebedarf enorm, verbessert die Luftqualität und beugt durch eine konstant geregelte Luftzirkulation der Schimmelbildung vor.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Hohe Energieeffizienzziele für Gebäude in Deutschland erfordern heute eine anspruchsvolle Wärmedämmung und effiziente Anlagentechnik. Da bei energieeffizienten Gebäuden die Lüftungswärmeverluste einen Großteil der Gesamtwärmeverluste ausmachen, bietet sich ein großes Potenzial für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Demnach sollte neben der Optimierung der Gebäudehülle gleichzeitig die Lüftungsanlage angepasst werden. Schätzungen zufolge können damit im Jahr 2045 etwa 95 TWh Wärmeenergie zurückgewonnen werden. Die großflächige Anwendung von Wärmerückgewinnungsanlagen könnte insofern die Emission von bis zu 15,2 Mio. t CO₂ pro Jahr verhindern (im Vergleich zur Erzeugung dieser Wärmeenergie mit dem zu erwartenden Fernwärmemix).

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Überarbeitung des GEG hinsichtlich einer Verschärfung der Neubauanforderungen
- Erhöhung der Förderhöhe für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung über die KfW/BAFA
- Akzeptanzsteigerung der Öffentlichkeit durch Sensibilisierung für Notwendigkeit, Vorteile und Ungefährlichkeit von Lüftungsanlagen im Allgemeinen und Wärmerückgewinnungssystemen im Speziellen

Pilotprojekte und Unternehmen

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sind von verschiedenen Herstellern kommerziell erhältlich. Nichtsdestotrotz wird die Technologie kontinuierlich weiterentwickelt, unter anderem vom Mönchengladbacher Start-up getAir. Als Teil der innovativen Haustechnik wurde eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung auch im Rahmen der ersten seriellen Sanierung nach dem Energiesprung-Prinzip in Deutschland verbaut. Das Projekt wurde im Frühjahr 2021 in Hameln, Niedersachsen, fertiggestellt.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Lüftungsanlagen im Wohnbereich stoßen in der Bevölkerung noch immer auf Akzeptanzprobleme, obwohl diese seit Langem in Autos und Bürogebäuden eingesetzt werden. Dies hat mit konservativer Bautradition sowie Fehlinformationen über die Funktionsweise und Hygiene solcher Systeme zu tun. Selbst Architekten, Bauingenieure und Lüftungstechniker haben häufig noch wenig Kenntnis über die Notwendigkeit der Priorisierung dieser Anlagen (auch bei der Erstellung von Sanierungsfahrplänen). Darüber hinaus werden Lüftungsanlagen im Kontext der KfW/BAFA-Förderungen für Energieeffizienzmaßnahmen im Vergleich zu Heizungsanlagen weniger gefördert, was ihre Attraktivität für Bauherren weiter reduziert. Zuletzt erfordern die aktuellen Neubauanforderungen im Gebäudeenergiegesetz (GEG) noch nicht explizit den Einbau von Lüftungsanlagen, womit die Voraussetzung selbst für die nachträgliche Installation eines Wärmerückgewinnungssystems fehlt.

... Wärmeenergie kann Schätzungen zufolge mit Lüftungsanlagen zurückgewonnen werden.

95 TWh

02.14

Erneuerbare Fernwärme aus Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie

Selbst in Deutschlands Ballungszentren sind dezentrale Gas- oder Ölheizungen noch immer weitverbreitet, obwohl Fernwärmenetze schon jetzt eine deutlich klimaschonendere Versorgung von Verbrauchern mit Raumwärme sicherstellen können. Perspektivisch kann dieser Vorteil noch einmal potenziert werden, indem die heute zur Fernwärmeerzeugung vornehmlich genutzten Kohle- und Gas-Heizkraftwerke durch innovative Wärmeerzeugungstechnologien wie Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie ersetzt werden. Werden diese mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben, stellen sie effiziente und klimaneutrale Raumwärme aus Erd-, Sonnen- und Gewässerwärme zur Verfügung. Parallel dazu ist es notwendig, die Nutzungsquote von Fernwärme deutlich zu erhöhen.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Viele deutsche Ballungszentren verfügen bereits über ein Fernwärmenetz. Dieses deckt zurzeit etwa 14 % des deutschen Wohngebäudewärmebedarfs ab. Dieser Anteil sollte und kann perspektivisch auf bis zu 30 % gesteigert werden. Bis 2045 sollte der Anteil von Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie an der Fernwärmeerzeugung auf 50 % gesteigert werden, was wiederum 75 TWh thermischer Energie entspräche. Im Vergleich zur Erzeugung dieser Energie mit dem (sich ändernden) Fernwärmemix ergibt sich ein Einsparpotenzial von 12 Mio. t CO₂ in 2045.

Pilotprojekte und Unternehmen

Viele der Fernwärmesysteme in Deutschland arbeiten bereits an Transformationsstrategien. Energie Initiative Halle (Saale) beispielsweise realisiert ein innovatives Konzept zur Bereitstellung klimaneutraler Fernwärme. Dabei wird eine 3,3-MW-Solarthermieanlage mit einer Großwärmepumpe (20 MWth) kombiniert, die das Wasser der Saale zur Erwärmung des Heizwassers nutzt. Zum Ensemble gehören auch noch ein Blockheizkraftwerk, das perspektivisch mit synthetischem Gas betrieben werden soll, und ein thermischer Speicher. Gemeinsam kann die Sommergrundlast von 25–30 MWth klimaschonend zur Verfügung gestellt werden.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Um die notwendigen zunehmenden Anteile erneuerbarer Wärmeerzeugungsanlagen in die bestehenden Infrastrukturen zu integrieren, ist ein grundlegender Aus- und Umbau der Wärmenetze notwendig. Dies betrifft neben der Senkung des Temperaturniveaus, der Dampfnetzumstellung, der weiteren Anpassungen an veränderte Erzeugungsströme auch Maßnahmen der Effizienzsteigerung und Digitalisierung. Dabei ist das Zusammenspiel der lokalen Rahmenbedingungen entscheidend. So können beispielsweise das verfügbare Flächen- bzw. Ressourcenpotenzial (Tiefengeothermie, Umweltwärmequellen für Wärmepumpen, Abwärmequellen), die vorhandene Erzeugungsinfrastruktur und die Endkunden unterschiedliche Transformationspfade bedingen.

Der Transformationsprozess hin zu erneuerbarer Fernwärme kann nur in enger Verzahnung mit den zu versorgenden Gebäuden erfolgen. Das Ziel ist, die Energiebedarfssenkungen im Gebäudebestand durch Sanierungsmaßnahmen voranzubringen. Dies wird zukünftig einen Einfluss auf die Wärmebedarfsdichten der zu versorgenden Gebiete haben. Somit bildet die Kundenseite neben den verschiedenen Technologieoptionen einen Eckpunkt für die Transformation der Fernwärmeversorgung. Gerade für Vermieter gibt es im aktuellen Marktumfeld wenig Anreize, ihre Gebäude auf Fernwärme umzustellen, da sowohl ein hoher CO₂-Preis als auch die Kosten für Brennstoffe direkt auf den Mieter umgelegt werden können. Zusätzlich werden die kostenbedingten Nachteile noch dahingehend verschärft, dass im bestehenden regulatorischen Rahmen bei vermieteten Gebäuden zum Schutz der

Mieter die bestehenden Wärmekosten als Maßstab für neue Vergleichsvarianten dienen. Aufgrund anhaltend niedriger Heizöl- und Erdgaspreise können dadurch jedoch seit Einführung des Mietrechtsänderungsgesetzes (2012) kaum noch Bestandsobjekte an CO₂-arme und langfristig klimaneutrale Wärmeversorgungsvarianten angeschlossen werden. Des Weiteren bestehen wirtschaftliche Investitionsrisiken, welche die Projektumsetzung hemmen können. So können beispielsweise von der Planung bis zur Inbetriebnahme einer Geothermieanlage wegen umfangreicher Vorarbeiten etwa für Standortsuche, Probebohrungen und Genehmigungsverfahren teilweise mehrere Jahre vergehen. Für den (potenziellen) Anlagenbetreiber stellt dieser lange Realisierungszeitraum neben dem Fündigkeitsrisiko ein hohes wirtschaftliches Risiko dar.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Das Gebot der kurzfristigen Kostenneutralität bei der Umstellung der Wärmelieferung sollte angepasst werden, um die Nutzung klimaneutraler Wärmepotenziale auch in Mietwohnungen zu erhöhen. Die Wärmelieferverordnung sollte zeitnah novelliert werden, um das Klima- und Effizienzpotenzial von modernen Heizungs- und Gebäudetechnologien zu heben.
 - Eine geeignete Lastenteilung der Brennstoffkosten zwischen Mietern und Vermietern würde den Umstieg auf Fernwärmebezug inzentivieren
 - Eine Ausnahme von der EEG-Umlage würde die Wettbewerbsfähigkeit von Großwärmepumpen deutlich verbessern und so die Sektorkopplung begünstigen
 - Eine Reform des GEG böte verschiedene Ansatzpunkte, um den Markthochlauf von erneuerbarer Fernwärme effektiv zu unterstützen:
 - Eine Anhebung der Effizienzstandards für Neubauten und Bestandsgebäude ist die Grundlage, um Vorlauftemperaturen zu senken und Solarthermie und Großwärmepumpen einbinden zu können
 - Ein ambitionierter Mindestanteil erneuerbarer Wärme in Nah- und Fernwärmenetzen sollte vorgeschrieben werden, um einen Nachfrageimpuls nach neuen Technologien zu setzen
 - Eine Pflicht zur EE-Nutzung für Neubauten im GEG muss schrittweise aufgebaut werden
 - Eine Anschlusspflicht ans Fernwärmenetz für Neubauten, wie in anderen europäischen Ländern bereits bestehend, ist erstrebenswert,
- setzt allerdings kommunale Wärmebedarfspläne voraus und muss kommunalrechtlich umgesetzt werden
- Geeignete Anforderungen an das Temperaturniveau der Heizverteilung bei grundlegenden Sanierungen müssen gestellt werden
 - Eine Überarbeitung der Berechnungslogik für Primärenergiefaktoren und CO₂, insbesondere für Wärmepumpen, in den technischen Regelwerken
- Die Nutzung von Gewässern zur Wärmegewinnung über Wärmepumpen muss rechtlich geregelt werden. Außerdem ist eine Weiterentwicklung des Genehmigungsverfahrens mit Blick auf die Geothermie erforderlich. Hier wäre es sinnvoll, eine gebündelte Beantragung räumlich naher Geothermieprojekte mit Bezug auf Bergrecht und Umweltverträglichkeit zu ermöglichen.
 - Eine flankierende Bereitstellung aller geologischen Daten (z. B. aus Öl- und Gasbohrungen) für Geothermieprojekte in einem übergeordneten Geothermiestrategieprojekt
 - Das Instrument der „Kommunalen Wärmeplanung“ muss den strategischen Ausbau flankierend unterstützen
 - Vernetzung zur Übertragung von Best-Practice-Beispielen und zum Erfahrungsaustausch zu rechtlichen Rahmenbedingungen, Vertragskonstruktionen, Contracting-Erfahrungen, Fördermitteladministration etc.
 - Sensibilisierung und Beratung, um Akzeptanz in der Bevölkerung für die Fernwärme (mit dem Ziel der Verdichtung und des Ausbaus) zu steigern
 - Weiterbildung von Energieberatern zu Fragen der Wärmenetze. Energieberater, beispielsweise im Rahmen der BAFA-geförderten Vor-Ort-Beratung, sind oft auf dezentrale Versorgungslösungen fokussiert.



Sektor:
Gebäude



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
9

ca. **12** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial



Industrie

Innovationen im Industriesektor

 Energie	01	Elektrolyseure der Megawatt-Klasse	Seite 16
	02	Feststoffbatterien	Seite 18
	03	Hochtemperaturspeicher zu Strom und Wärme (Carnot-Batterie)	Seite 20
	04	Neue Anwendungsfelder für Photovoltaik	Seite 22
	05	Agri-Photovoltaik	Seite 24
 Verkehr	06	E-Kerosin	Seite 28
	07	Wasserstoff als Schiffstreibstoff	Seite 30
	08	Akkumulatorenrecycling	Seite 32
	09	Wasserstoffzüge	Seite 34
	10	Brennstoffzellen-Lkw	Seite 36
	11	Vehicle-to-Grid-Charging	Seite 38
 Gebäude	12	Alternativer Beton	Seite 42
	13	Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung	Seite 44
	14	Erneuerbare Fernwärme aus Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie	Seite 46
 Industrie	15	Wasserstoffreduktion von Eisenerz	Seite 50
	16	CCU/S in der Zementindustrie: das Oxyfuel-Verfahren	Seite 52
	17	Methanol-to-Olefin-Prozess	Seite 54
	18	Elektrischer Steamcracker-Hochofen	Seite 56
	19	CSP zur Gewinnung industrieller Prozesswärme	Seite 58
	20	CO₂-Direktabscheidung und -speicherung (DACCS)	Seite 60

02.15

Wasserstoffreduktion von Eisenerz



Sektor:
Industrie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
4-5

ca. **50** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial¹⁸

Die Herstellung einer Tonne Stahl mit dem etablierten Hochofenprozess stößt durch die Verwendung von (Koks-)Kohle als Energieträger und Reduktionsmittel etwa 1,7 t an CO₂ aus. Die Vermeidung dieser THG-Emissionen ist nur unter Verwendung neuer Technologien und Produktionsprozesse möglich. Die am weitesten fortgeschrittene alternative Technologie in diesem Zusammenhang stellen Direktreduktionsanlagen mit Wasserstoff zur Primärstahlerzeugung dar. Der hierbei entstehende Eisenschwamm (Direct Reduced Iron) kann anschließend in Elektrolichtbogenöfen zu Rohstahl geschmolzen werden. Nutzt man grün hergestellten Wasserstoff, ist dieser Produktionsprozess nahezu CO₂-neutral.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Die maximale CO₂-Reduktion in Deutschland beläuft sich bis zum Jahr 2030 auf 14 Mio. t CO₂/a bei einer Direktreduktion mit Erdgas und einer 7,5-prozentigen Beimischung von grünem Wasserstoff. Für das Jahr 2050 ist dann von einer Minderung von bis zu 50 Mio. t CO₂/a auszugehen. Agora Energiewende geht davon aus, dass der Reinvestitionsbedarf bis 2030 in der Primärstahlproduktion Hochöfen mit einer Jahresproduktion von bis zu 18 Mio. t Roheisen und somit über die Hälfte der Gesamtkapazität betrifft, was eine Chance zur Umstellung auf Direktreduktionsanlagen im Rahmen des ohnehin erforderlichen Erneuerungszyklus bietet.

Pilotprojekte und Unternehmen

ArcelorMittal Germany plant die Errichtung einer Wasserstoff-DRI-Demonstrationsanlage für 2023 mit einer Kapazität von bis zu 100.000 t DRI/a. Hier wird zunächst Wasserstoff aus dem Gichtgas der bestehenden mit Erdgas betriebenen DRI-Anlage genutzt. Die Salzgitter AG in Kooperation mit der Fraunhofer-Gesellschaft plant die Errichtung einer DRI-Anlage, die mit vor Ort produziertem Wasserstoff betrieben wird (35 % H₂ und 65 % Erdgas). Thyssenkrupp Steel, plant die erste großtechnische DRI-Anlage in 2024 in Betrieb zu nehmen.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Die Produktion von grünem Wasserstoff erfordert große Mengen an CO₂-freiem Strom (ca. 3 MWh Strom je t Rohstahl). Da Direktreduktionsanlagen flexibel mit Erdgas oder Wasserstoff betrieben werden können und schon die Verwendung von Erdgas als Reduktionsmittel im Vergleich zur Hochofenroute etwa die Hälfte bis 2/3 an CO₂-Emissionen einspart, kann in einer Übergangszeit auch der Einsatz von Erdgas sinnvoll sein.

Empfehlungen für den Markthochlauf

- CO₂-Mindestpreis mit Grenzausgleichsregime
- Carbon Contract for Difference
- Nachhaltige öffentliche Beschaffung
- Quote für CO₂-arme Materialien
- Quote für grünen Wasserstoff

02.16

CCU/S in der Zementindustrie: das Oxyfuel-Verfahren



Sektor:
Industrie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
6

ca. **12** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial¹⁹

Die Dekarbonisierung der Zementindustrie ist aufgrund der hohen prozessbedingten CO₂-Emissionen eine große Herausforderung. Das Abscheiden von CO₂ aus dem Produktionsprozess sowie dessen Weiterverwendung oder Einlagerung (CCU/S; Carbon Capture and Storage bzw. Utilization) ist hier unvermeidlich. Das Oxyfuel-Combustion-Capture-Verfahren ist eine CO₂-Abscheidemethode, bei dem im Brennprozess statt Luft ein Gemisch aus reinem Sauerstoff und wiederaufbereitetem CO₂ zugeführt wird. Das erleichtert die Abscheidung des CO₂ aus dem Abgasstrom und ermöglicht Abscheidungsraten von bis zu 90 % der gesamten Emissionen (prozess- und brennstoffbedingt). Nach der Verdichtung kann das CO₂ direkt genutzt, gespeichert oder abtransportiert werden.

¹⁹ Theoretisches Potenzial bei stagnierender Produktionsmenge; basierend auf den gesamten Prozessemissionen der Zementindustrie in Deutschland 2019.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland 34 Mio. t Zement hergestellt, wobei bei jeder Tonne allein 400 kg CO₂ an Prozessemissionen anfallen. Daraus ergibt sich ein theoretisches Reduktionspotenzial von 12,2 Mio. t CO₂Äq pro Jahr durch Anwendung von CCU/S in der deutschen Zementindustrie. Aufgrund der sich verändernden thermischen Parameter im Verbrennungsvorgang muss für jede Anlage geprüft werden, ob die Nachrüstung des Oxyfuel Combustion Capture möglich ist.

Pilotprojekte und Unternehmen

Im Rahmen des CEMCAP-Projekts erprobt ein Konsortium aus unter anderem HeidelbergCement und dem Verein Deutscher Zementwerke in Hannover die Anwendung des Oxyfuel-Verfahrens in der Zementherstellung. Dazu gehört auch die Entwicklung einzelner innovativer Baugruppen (beispielsweise Oxyfuel-Brenner und -kalzinator).

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Im Vergleich zur konventionellen Zementherstellung verursacht der Einsatz des Oxyfuel-Verfahrens spezifische Mehrkosten von 78–104 % pro Tonne Zement²⁰. Damit ist der so hergestellte, klimafreundliche Zement preislich nicht konkurrenzfähig. Des Weiteren fehlt die Infrastruktur, um das abgeschiedene CO₂ weiterverwenden, speichern oder abtransportieren zu können. Die gesellschaftliche Akzeptanz für diese Infrastrukturen ist unsicher. Auch der im Vergleich zum konventionellen Verfahren gesteigerte Strombedarf muss durch erneuerbare Energie gedeckt werden, um die Emissionsreduktion nicht zu unterminieren.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- **Infrastrukturen schaffen**
 - Erneuerbarer Strom muss in ausreichender Menge und zu günstigen Preisen zur Verfügung gestellt werden (150 kWh pro Tonne Zement)
 - CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur muss geschaffen werden (für CCS)
- **Förderinstrumente einsetzen**
 - Hoher CO₂-Preis in Verbindung mit Grenzausgleichsmechanismus (CBAM)
 - Carbon Contracts for Difference oder grüne Leitmärkte für „THG-arme Produkte“
 - Nachhaltigere öffentliche Beschaffung, die Nachfrage nach THG-armen Zement schafft
 - Schnelle Einführung von Standards für die Bewertung von CCU/CCS-Technologien
 - Anregung der öffentlichen Diskussion zur Notwendigkeit der Abscheidung von CO₂ und dessen Einlagerung

²⁰ Agora Energiewende & Wuppertal Institut, 2020: Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019, S. 205.

02.17

Methanol-to-Olefin-Prozess



Sektor:
Industrie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
8

ca. **50** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial

Das etablierte Verfahren zur Herstellung von Ethen, Propen und anderen organischen Basischemikalien erfolgt über das Cracken von Rohöl. Diese HVC (High Value Chemicals) können anschließend von der chemischen Industrie zu den benötigten Endprodukten weiterverarbeitet werden. Alternativ können Ethen und Propen auch mittels des Methanol-to-Olefin-Verfahrens (MTO) über das Zwischenprodukt Dimethylether (DME) gewonnen werden. Dabei wird Methanol einem Reaktor zugeführt und mithilfe eines Katalysators bei Temperaturen von 350–600 °C und 1–3 bar Überdruck zu höheren Kohlenwasserstoffen umgesetzt, wodurch hauptsächlich Ethen und Propen gebildet werden. Durch die Verwendung von 100 % erneuerbaren Energien, grünem H₂ oder Biomasse für die Methanolproduktion und einer nicht fossilen Kohlenstoffquelle kann das MTO-Verfahren (nahezu) alle CO₂-Emissionen im Lebenszyklus von Kunststoff (Produktion und thermische Verwertung) vermeiden.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Das Verfahren kann bei erfolgreicher Technologieentwicklung ab 2025 bis 2030 kommerziell eingesetzt werden. Bis zum Jahr 2030 können demnach jährlich 12 Mio. t CO₂/a und ab 2050 bis zu 50 Mio. t CO₂/a (inklusive Scope-3-Emissionen) vermieden werden.

Pilotprojekte und Unternehmen

Das Carbon2Chem-Projekt besteht aus mehreren Firmen und Institutionen, unter anderem Thyssenkrupp, BASF, Covestro, Linde, Siemens, Fraunhofer-Institute, und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit mehr als 60 Mio. € gefördert. Dabei wird eine Pilotanlage zur Methanolherstellung in Duisburg errichtet, welche Methanol aus den Abgasen der Stahlerzeugung herstellen soll.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Methanolbasierte Verfahren benötigen viel Strom aus erneuerbaren Energien, um weitreichende CO₂-Minderungen zu erzielen. Bei einer gesamten Produktion des heutigen Kunststoffbedarfs mittels des MTO-Verfahrens entstünde ein Strombedarf in Höhe von ca. 319 TWh. Darüber hinaus besteht eine weitere Herausforderung in der wirtschaftlichen Bereitstellung von alternativen Kohlenstoffquellen für die THG-neutrale Herstellung von Methanol. Obwohl die MTO-Technologie größtenteils marktreif ist, bedarf es für die Kommerzialisierung weiterer Kostenreduktionen. Die Kosten für eine produzierte Tonne HVC betragen aktuell noch das bis zu 4-Fache der Kosten der konventionellen Technologie.

Empfehlungen für den Markthochlauf

- Carbon Contracts for Difference
- Quote für grünen Wasserstoff
- Weiterer intensiver Ausbau erneuerbarer Erzeugungsanlagen
- CO₂-Preis auf Endprodukte
- CO₂-Mindestpreis mit Grenzausgleichsregime
- Reform des Abgaben- und Umlagensystems

02.18

Elektrischer Steamcracker-Hochofen



Sektor:
Industrie



Entwicklungsstand:
Erforschungsphase



Technologiereifegrad:
1-3

ca. **10** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial²¹

Steamcracker erlauben es der Grundstoffchemie und Raffinerien, langkettige Kohlenwasserstoffe wie Naphtha in kurzkettige Kohlenwasserstoffe wie Olefine und Aromaten zu spalten (cracking), um diese als Grundbausteine für die weitere Verarbeitung zu nutzen. Hierfür sind Temperaturen von etwa 600–900 °C notwendig, die in speziellen Öfen durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen erreicht werden. Der Großteil der CO₂-Emissionen fällt bei der Beheizung an. In elektrischen Steamcrackern kann der Hochtemperaturwärmebedarf durch erneuerbaren Strom bereitgestellt werden. Durch die Elektrifizierung dieses Prozesses können die direkten CO₂-Emissionen am Steamcracker komplett eingespart werden.

²¹ Agora Energiewende & Wuppertal Institut, 2020.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Bis 2030 besteht bei Steamcracker-Anlagen mit einer Kapazität von bis zu 6,9 Mio. t High Value Chemicals (HVC) ein Modernisierungsbedarf, was fast 60% der Gesamtkapazität für diese Produkte entspricht. Da Steamcracker nicht selten eine Anlagenlebensdauer von 50 Jahren erreichen ist es für die Klimaneutralität entscheidend, dass diese Altanlagen elektrifiziert werden.

Maßnahmen für den Markthochlauf

- Forschungsförderung und Finanzierung von Pilotprojekten
- Carbon Contracts for Difference
- Reform des Abgaben- und Umlagensystems, um den direkten Einsatz von Strom zu ermöglichen
- CO₂-Preis auf Endprodukte sowie CO₂-Mindestpreis mit Grenzausgleichsregime

Pilotprojekt

Im Rahmen des Projekts „Cracker of the Future“ führt ein Konsortium aus sechs führenden Unternehmen der Petrochemie aus den Ländern Niederlande, Belgien und Deutschland eine Prüfung der technisch und ökonomischen tragfähigen Möglichkeiten der Technologie durch und erforscht dabei den Betrieb von elektrischen Steamcrackern zur Erzeugung von Basischemikalien wie Ethylen, Propylen, Butadien und Aromaten. BASF, SABIC und Linde planen die Entwicklung und Pilotierung eines elektrisch beheizten Steamcracker-Ofens für 2023 in Ludwigshafen.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Da die großtechnische Anwendung (TRL 9) voraussichtlich ab dem Jahr 2035 zu erwarten ist, sollten einerseits die Forschung und Entwicklung vorangetrieben werden, um möglicherweise eine frühere Marktreife zu erreichen. Andererseits müssen vorhandene Altanlagen technisch so ausgelegt werden, dass eine Nachrüstung auf das elektrische Heizsystem und eine erhöhte Flexibilität des Feedstocks (Pyrolyseöl, Biomasse etc.) berücksichtigt werden können. Parallel gilt es, den Feedstock zu defossilisieren, um Scope-3-Emissionen zu verringern. In Betracht kommen dazu neben kleineren Mengen Biomasse vor allem mit grünem Wasserstoff hergestelltes synthetisches Naphtha und Methanol.

02.19

CSP zur Erzeugung industrieller Prozesswärme



Sektor:
Industrie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
8–9

ca. **7** Mio. t
CO₂Äq/a

THG-Reduktionspotenzial²²

Bei der konzentrierten Solarenergie (Concentrated Solar Power, CSP) werden Spiegel oder Linsen verwendet, um die Sonneneinstrahlung auf ein Wärmeträgerfluid (z. B. Wasser, Öl oder Salz) zu konzentrieren. Die so erzeugte thermische Energie kann dann beispielsweise in Nah- und Fernwärmenetze eingespeist oder für industrielle Prozesse verwendet werden. Je nach Auslegung und verfügbarer Sonneneinstrahlung können Systeme mit Parabolspiegeln (siehe Abbildung) Prozesswärme mit bis zu 400°C erzeugen. Dadurch kann erneuerbare und klimaneutrale Wärme für verschiedenste Anwendungen unter anderem in der Lebensmittel-, Textil- oder Chemieindustrie bereitgestellt werden, die durch Flachkollektoren heute nicht versorgt werden können.

²² Bei einem angenommenen technischen Potenzial von 15,6 TWh und einem durchschnittlichen CO₂-Fußabdruck industrieller Prozesswärme von 0,451 t CO₂/MWh.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Die deutsche Industrie hat einen hohen Bedarf an Prozesswärme; 2019 lag der industrielle Wärmebedarf allein über dem gesamten Bedarf an elektrischer Energie. Aktuell wird nahezu die gesamte Prozesswärme noch durch die Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt. Trotz der vergleichsweise geringen Direktstrahlung können Parabolrinnen- und Fresnel-Kollektoren auch in Deutschland einen Beitrag zur Versorgung mit erneuerbarer Prozesswärme leisten. Mehr als 25 % des industriellen Wärmebedarfs liegen im Temperaturbereich bis 150 °C und sind damit theoretisch geeignet, durch CSP gedeckt zu werden. Darüber hinaus kann CSP mit anderen Wärmeerzeugungstechnologien kombiniert werden, um die Nutzung fossiler Brennstoffe zu reduzieren.

Pilotprojekt

In Oostende (Belgien) wurde in 2019 eine Parabolrinnenanlage zur Erzeugung solaren Prozessdampfes für die chemische Industrie in Betrieb genommen. Die Anlage wurde von der Solarlite CSP Technology GmbH konstruiert und liefert bei zwei Betriebstemperaturen (220 °C/330 °C) Prozessdampf bei 6 bar und 155 °C bzw. 11 bar und 185 °C.

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

Die Anreize in der Industrie, Solarthermie zu beziehen, sind noch nicht ausreichend, da fossile Technologien noch immer einen Kostenvorteil haben. Um eine Kostenreduzierung der CSP durch Skaleneffekte zu ermöglichen, sind größere Stückzahlen oder eine größere Anlagengröße erforderlich. Da CSP-Anlagen hohe CAPEX, jedoch nur geringe OPEX verursachen (kein Brennstoffbedarf), sollen angebotsseitige Impulse geprüft werden. Abgesehen von diesen wirtschaftlichen Hemmnissen sind die konzentrierende Solarthermie und ihre Potenziale in Deutschland noch immer wenig bekannt oder werden unterschätzt.

Empfehlungen für den Markthochlauf

- Ein hoher CO₂-Preis würde die Wettbewerbsfähigkeit von solarthermischen Anlagen im Vergleich zum Einsatz fossiler Brennstoffe für Wärmezwecke verbessern
- Demonstrationsanlagen sollten gefördert werden, um den Bekanntheitsgrad zu erhöhen und die Technologie in Deutschland für verschiedene Anlagen zu erproben
- Die hohen CAPEX sollten durch geeignete Investitionszuschüsse abgefedert werden, dazu ist die bestehende BAFA-Förderung zu erhöhen. Sie sollte auch mit anderen Fördermöglichkeiten (beispielsweise KfW-Krediten) kombinierbar sein.
- Sonderabschreibungen für solarthermische Anlagen sollten geprüft werden

02.20

CO₂-Direktabscheidung und -speicherung (DACCS)



Copyright: Climeworks



Sektor:
Industrie



Entwicklungsstand:
Skalierungsphase



Technologiereifegrad:
7

ca. **70** Mio. t
CO₂Äq/a
THG-Reduktionspotenzial²³

Direct Air Capture (DAC) bezeichnet Prozesse, bei denen CO₂ direkt aus der Atmosphäre entzogen wird. Dabei wird es aus großen Luftmengen mithilfe von Sorptionsmitteln gebunden (Adsorption) oder aufgelöst (Absorption). Anschließend kann das CO₂ mittels thermischer Energie wieder kontrolliert ausgelöst und in Baustoffen, in unterirdischen Speichern oder Einlagerstätten unter dem Meer dauerhaft gelagert werden (Direct Air Capture and Storage – DACCS). So werden Negativemissionen realisiert, die unvermeidliche Emissionen an anderer Stelle ausgleichen.

²³ Bei DAC-Anlagen wird von einem THG-Entfernungspotenzial ausgegangen.

Anwendungspotenzial in Deutschland

Nahezu alle Szenarien zur Erreichung der Klimaneutralität erfordern die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (Negativemissionen). Die natürliche Senkenleistung des Landnutzungs-, Landnutzungsänderungs- und Forstwirtschaftssektors (LULUCF) ist begrenzt und auch Technologiekombinationen aus Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BECCS) sind aufgrund des Flächenverbrauchs und der Flächenkonkurrenz mit der Landwirtschaft limitiert. Dementsprechend besteht auch ein Bedarf an DAC-Anlagen, um die Klimaziele zu erreichen. Gemäß Abschätzungen müssen im Jahr 2045 Restemissionen von 70 Mio. t CO₂ mittels DAC-Systemen aus der Atmosphäre entfernt werden²⁴.

Pilotprojekt

Es gibt derzeit 15 DAC-Projekte weltweit mit einer Gesamtab-scheidekapazität von 13.000 t CO₂/a. Das Start-up Climeworks nahm im September 2021 die größte DAC-Anlage der Welt in Island in Betrieb. Die Anlage soll pro Jahr 4.000 t CO₂ aus der Luft entfernen und in nahe gelegenen Basaltsteinformationen einlagern. Dort mineralisiert das CO₂ zu festen Carbonaten und wird somit permanent gebunden (sogenannte In-situ-Mineralisierung).

Herausforderungen bei der Marktentwicklung

DAC-Anlagen sind heute noch sehr kostenintensiv. Dabei machen die Investitionskosten (CAPEX) den größten Teil aus, was ein großes Potenzial für Kostendegression durch Skalierungseffekte erwarten lässt. Im Vergleich zur Abscheidung an Punktquellen benötigt DAC aufgrund der niedrigen CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft mehr Volumen und folglich auch mehr Energie. Diese muss kostengünstig und erneuerbar erzeugt werden, um die CO₂-Bilanz der Wertschöpfungskette und die Wirtschaftlichkeit nicht zu beeinträchtigen.

Es gibt in Deutschland noch keinen ausreichenden regulatorischen Rahmen für die Technologie. Das bestehende Kohlendioxid-speicherungsgesetz (KSpG) erlaubt aufgrund der sogenannten Länderklausel heute keine neuen CO₂-Lagerstätten an Land. Auch gibt es noch keine Strategie, wie die Kohlenstoffabscheidung mittelfristig in das Emissionshandelssystem integriert werden kann.

²⁴ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021b; Annahme: keine weiteren natürlichen oder technischen Senken kommen zum Einsatz.

Empfehlungen für den Markthochlauf

- **Infrastrukturen schaffen:**
 - Erneuerbarer Strom muss in ausreichender Menge und zu günstigen Preisen zur Verfügung gestellt werden
 - Gezielte Erkundung geeigneter Einlagerungsstätten unter der Nordsee und Entwicklung technischer Anforderungen zu deren Überwachung (Monitoring)
 - CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur muss geschaffen werden (auch grenzüberschreitend)
- **Politische Förderinstrumente einsetzen**
 - Klare Definition von DAC-Quoten für Deutschland als separates Ziel und zusätzlich zur Emissionsreduktion²⁵
 - Gezielte Förderung von Forschung und Entwicklung sowie großmaßstäblichen Demonstrationsprojekten, um Systemkomponenten und Prozesse weiterzuentwickeln und zu optimieren
 - Reform des KSpG, um neue Projekte wieder zu ermöglichen. Das beinhaltet die Erhöhung/Aufhebung des jährlichen maximalen Speichervolumens
 - Beitrag zur Entwicklung eines EU-weiten Zertifizierungsstandards zu technischen Negativemissionen
 - Klärung der Haftbarkeit bei Risiken der CO₂-Sequestrierung
 - Anregung des öffentlichen Diskurses zur Notwendigkeit der Abscheidung von CO₂ zur Erzielung von negativen Emissionen durch Einlagerung
 - Klimaschutzverträge (Carbon Contracts für Differences) für DACS-Projekte müssen als wichtiges Förderinstrument eingeführt werden
 - Anregung der politischen Diskussion zur öffentlichen Beschaffung von DACS-Emissionszertifikaten für den Markthochlauf

²⁵ Durch die getrennte Betrachtung von Minderung und Entnahme wird verhindert, dass Negativemissionen und CO₂-Abscheidung zu einem reduzierten Transformationsdruck der Sektoren und beispielsweise einer Verlängerung fossiler Technologien führen und dies steigert die Akzeptanz der Technologien.

02.21

Zwischenfazit: Entscheidende Instrumente zur Innovationsförderung

Wie aus den Innovation Factsheets ersichtlich, bieten sich verschiedene politische Instrumente zur Förderung von Klimainnovationen an. Diese variieren je nach Marktstadium der Technologie (Diffusions-, Skalierungs- oder Erforschungsphase).

Gute Innovationspolitik fördert Technologien in allen drei Marktstadien bedarfsgerecht, um eine nachhaltige Innovationspipeline aufzubauen²⁶:

Um bereits marktfähige Technologien (**Diffusionsphase**) kommerziell zu verbreiten, ist es notwendig, Marktverzerrungen zu beseitigen. Dazu gehört insbesondere die Internalisierung von Kosten, die auf die Allgemeinheit abgewälzt werden. Ein gutes Beispiel dafür ist der Europäische Emissionshandel, der die Kosten der Emissionen von Treibhausgasen internalisieren soll. Weitere Marktverzerrungen sind explizite wie implizite Subventionen wie beispielsweise die Steuerprivilegien von Flugbenzin oder Dieselmotoren oder auch Abschreibungsprivilegien. Durch Kosteninternalisierung und eine effiziente Subventionspolitik wird ein „Level Playing Field“ geschaffen, auf dem neue Technologien mit etablierten konkurrieren können. Da diese Politiken technologieneutral sind, befördern sie auch die Wettbewerbsfähigkeit von Technologien in früheren Marktphasen.

Technologien in der **Skalierungsphase** haben die Funktionsfähigkeit des Konzepts bereits bewiesen, sind aber häufig nicht verbreitet, da noch nicht wettbewerbsfähig. Diese Wettbewerbsfähigkeit entsteht erst über Skaleneffekte, sprich die Kostendegression, die sich bei der industriellen Herstellung eines Produkts einstellt. An dieser Stelle kann die Politik eine Marktschaffung durch angebots- und/oder nachfrageseitige Anreize unterstützen. Unter nachfrageseitige Impulse fallen beispielsweise Einspeisevergütungen (wie im EEG), verpflichtende Nutzungsquoten, (Carbon-)Contracts-for-Difference-Technologiestandards, die Anpassung öffentlicher Vergabeprozesse (Green Procurement) oder auch technologie-spezifische Ausschreibungen. Angebotsseitige Impulse auf der anderen Seite verbessern die Wirtschaftlichkeit einer

Technologie durch z. B. Steuerprivilegien, Zuschüsse zu Investitionen und einfacheren Zugang zu Wagniskapital.

Frühphasige Technologien (**Erforschungsphase**) durchlaufen noch den „proof of concept“ und sind daher auf weitergehende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten (F&E) angewiesen. Die Politik kann hier durch öffentliche F&E-Ausgaben (direkte Finanzierung, Zuschüsse, Preise), Finanzierung von Demonstrations- oder Pilotprojekten, Steuergutschriften für Investitionen in F&E, aber auch Unterstützung für Bildung und Ausbildung und Schaffung/Bildung von Netzwerken die notwendigen unterstützenden Impulse setzen.

Insgesamt betrachtet lassen sich aus den Innovation Factsheets einige zentrale Instrumente identifizieren, die den Markthochlauf gleich mehrerer der vorgestellten Technologien unterstützen (Abbildung 5). Dazu zählen ein hohes Preisniveau für Emissionszertifikate, eine Abschaffung und Rationalisierung ineffizienter Subventionen von (fossilen) Energieträgern und Carbon Contracts for Difference als Finanzierungsinstrument (siehe zur Erläuterung Abschnitt 3.1.2). Nachfrageseitig sind verpflichtende Anwendungsquoten und öffentliche Ausschreibungen geeignet, die Skalierung gleich mehrerer Technologien zu unterstützen. Neben Infrastrukturell sind insbesondere Preis und Verfügbarkeit von großen Mengen Strom aus erneuerbaren Energien sowie von Wasserstoffverteilnetzen entscheidend für eine ganze Reihe von Klimainnovationen. Diese Instrumente sollten in der kommenden Legislaturperiode gezielt eingesetzt werden, um den Markteintritt der benötigten Technologien parallel zu ermöglichen.

²⁶ Vgl. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, 2013.













		Angebotsseitige Impulse		Nachfrageseitige Impulse			Infrastruktur schaffen		Rechtliche Rahmen
									
		Hoher CO ₂ -Preis	Besteuerung von Energieträgern nach Emissionen	CCfD als Förderinstrument	Verpflichtende Anwendungsquoten	Innovationsausschreibungen	Zugang zu großen Mengen erneuerbaren Stroms	Verfügbarkeit von Wasserstoffinfrastruktur	Klare rechtliche Einordnung
 Energie	01	Elektrolyseure der Megawatt-Klasse							
	02	Feststoffbatterien							
	03	Hochtemperaturwärmespeicher zu Strom und Wärme (Carnot-Batterie)							
	04	Neue Anwendungsfelder für Photovoltaik							
	05	Agri-Photovoltaik							
 Verkehr	06	E-Kerosin							
	07	Wasserstoff als Schiffstreibstoff							
	08	Akkumulatorenrecycling							
	09	Wasserstoffzüge							
	10	Brennstoffzellen-Lkw							
	11	Vehicle-to-Grid-Charging							
 Gebäude	12	Alternativer Beton							
	13	Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung							
	14	Fermwärme aus Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie							
 Industrie	15	Wasserstoffreduktion von Eisenerz							
	16	CCU/S in der Zementindustrie: Oxyfuel-Verfahren							
	17	Methanol-to-Olefin-Prozess							
	18	Elektrischer Steamcracker-Hochofen							
	19	CSP zur Gewinnung industrieller Prozesswärme							
	20	CO ₂ -Direktabscheidung und -speicherung (DACCS)							

Abbildung 6: Policy Impact Heatmap

03

**Eine politische
Roadmap zur Förderung
von Klimainnovationen**



In der bevorstehenden Legislaturperiode muss die Bundesregierung die Rahmenbedingungen für eine Innovationspipeline schaffen, die die Technologien hervorbringt, die für die Klimaneutralität benötigt werden. Die dazu geeigneten Instrumente (Abschnitt 2) müssen keinesfalls neu erdacht werden, sondern können durch konzentrierte Aktivitäten in drei Bereichen implementiert werden:

- Eine Verhandlung des Green Deals und des dazugehörigen Fit-for-55-Pakets der Europäischen Kommission mit einem klaren Fokus auf die Förderung von Innovationen in allen Entwicklungsstadien (Abschnitt 3.3)
- Parallel dazu die Umsetzung einer ambitionierten nationalen Klima- und Energiepolitik, die klare regulatorische Rahmen absteckt und Räume für neue technologische Lösungen schafft (Abschnitt 3.4)
- Eine aktive Innovationspolitik für Climate-Tech-Unternehmen, die Gründerinnen und Gründer in die Lage versetzt, Klimatechnologien zu entwickeln und zu skalieren (Abschnitt 3.5)

03.01

Fit-for-55 mit Fokus auf Innovationsförderung verhandeln

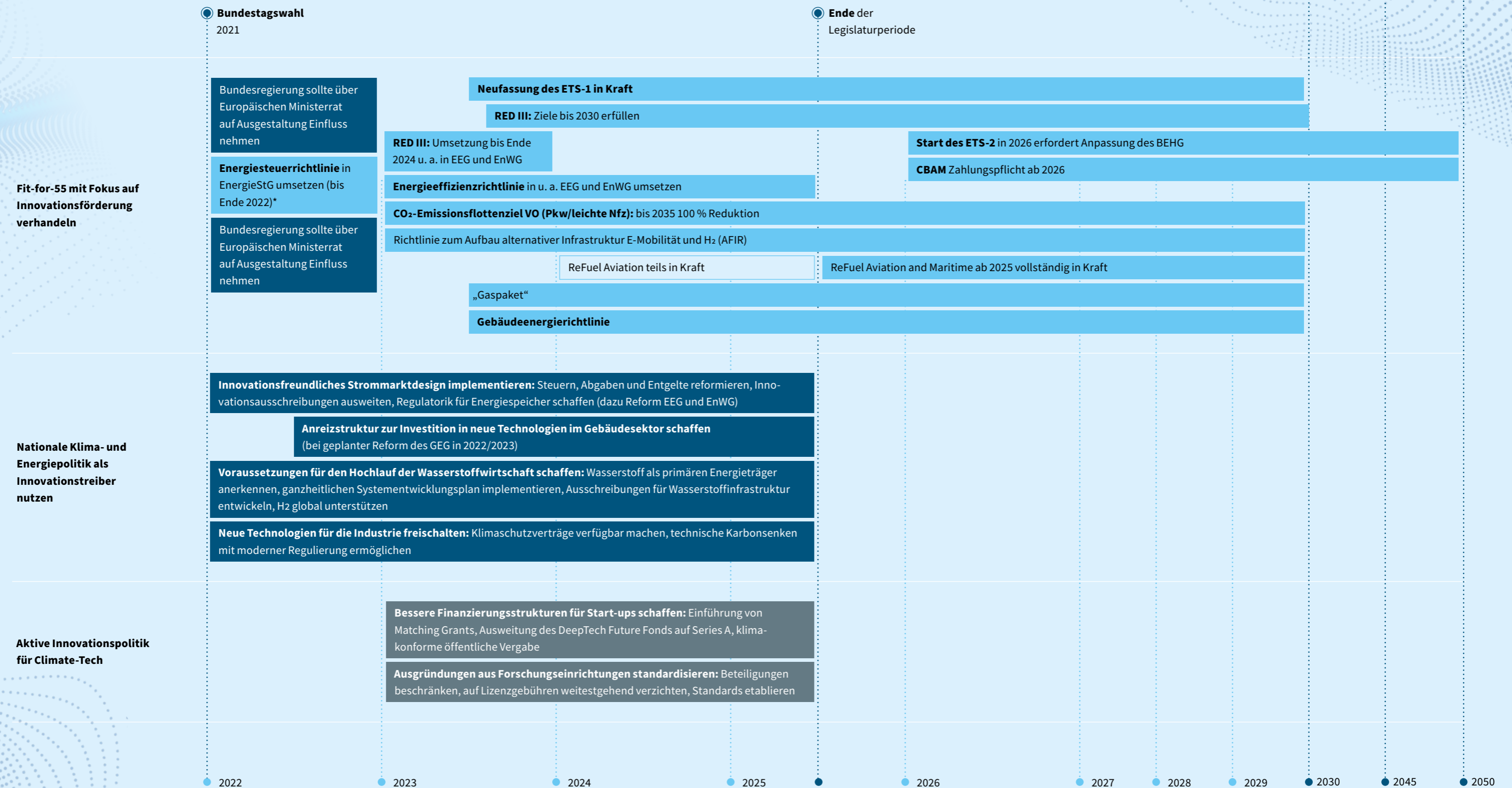
Das im Juli 2021 vorgestellte Fit-for-55-Paket der Europäischen Kommission bildet das Kernelement der europäischen Klimapolitik bis 2030. Es enthält Vorschläge zur Reform und Neuschaffung von verschiedenen Verordnungen und Richtlinien, die die CO₂-Emissionen der Europäischen Union bis 2030 um mindestens 55 % reduzieren sollen. Die Verordnungen des umfangreichen Gesetzespakets haben mit ihrer Verabschiedung direkte Gültigkeit in den Mitgliedsländern und somit auch in Deutschland. Die Ziele der Richtlinien dagegen müssen von den Mitgliedsländern eigenständig durch nationale Gesetzgebung realisiert werden. Weitere Maßnahmen wie die Einführung der EU-Taxonomie und die Reform der Beihilfelinie setzen ebenso wichtige Impulse für die Klimaneutralität, sind aber formell kein Teil des Fit-for-55-Pakets.

Während die Vorschläge der Kommission in vielen Bereichen ambitioniert sind, bleiben sie bei der gezielten Förderung von Klimainnovationen hinter den Möglichkeiten zurück. Für die Bundesregierung ergeben sich daraus zwei Wege, um für eine konsequente Stärkung von innovativen Technologien einzutreten:

- Die Bundesregierung sollte sich als Mitglied im Rat der Europäischen Union im Trilog mit der Europäischen Kommission und dem Europäischen Parlament für die Berücksichtigung innovationspolitischer Belange stark machen. Die folgenden Unterkapitel formulieren Ansatzpunkte für eine dahingehende Anpassung der Kommissionsvorschläge. Sie zeigen außerdem auf, welcher Instrumente zur Innovationsförderung aus Abschnitt 2.5 sich die Reformvorschläge bedienen.
- Bei der Umsetzung der im Fit-for-55-Paket enthaltenen Richtlinien in bundesdeutsches Recht sollte ein deutlicher Fokus auf die Förderung von Klimatechnologien gelegt werden. Hier bietet sich abermals Gelegenheit, die Vorschläge zu akzentuieren und Deutschland so noch stärker als Innovationsstandort in Europa zu positionieren.

Politische Roadmap zur Förderung von Klimainnovationen in Deutschland

Abbildung 7: Politische Roadmap



* falls einstimmig beschlossen



03.01.01 EU-Emissionshandel

Das europäische Emissionshandelssystem (ETS-1) ist das weltweit größte System zur Bepreisung von CO₂. Bisher deckt es nur die Emissionen aus energieintensiven Industrien und der Energieerzeugung ab. Die Europäische Kommission schlägt eine Überarbeitung des bestehenden Systems vor, um den Luft- und Seeverkehr einzubeziehen. Der Zertifikatspreis wird den Vorschlägen der Kommission nach über den derzeitigen Preis von etwa 55 €/tCO₂ hinaus weiter steigen, da die Anzahl der jährlich auf den Markt gebrachten ETS-Zertifikate ab 2026 schneller reduziert werden soll (2,5 statt 1,6 % p. a.).

Darüber hinaus schlägt die EU-Kommission die Schaffung eines zweiten ETS (ETS-2) vor, das Emissionen aus dem Straßenverkehr und Gebäudesektor einbeziehen soll (ab 2026). Der Mechanismus sieht eine faktische Preisobergrenze vor, um sicherzustellen, dass dieser Preis unter dem des ETS-1 bleibt: Die Einnahmen werden auf 10 Mrd. €/Jahr im Zeitraum 2025–2032 veranschlagt, was einen Preis von 40–50 €/tCO₂ erwarten lässt.

Beide Vorschläge stellen wichtige Schritte zur Internalisierung der Kosten von fossilen Technologien dar und schaffen bzw. verstärken einen angebotsseitigen Anreiz zur Verbreitung von neuen, klimafreundlichen Alternativen in allen Sektoren und allen technologischen Entwicklungsstadien. Wie aus den Innovation Factsheets ersichtlich, gilt dies auch für die im Rahmen dieser Studie betrachteten Technologien. Aus Sicht der Innovationsförderung gibt es nichtsdestotrotz Ansatzpunkte, an denen die Vorschläge hinter den Möglichkeiten zurückbleiben:

Energieintensive Industrien in Sektoren, die nicht unter den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM; Abschnitt 3.3.10) fallen würden, erhalten im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems weiterhin bis 2035 kostenlose Emissionszertifikate. Das bedeutet, dass die Lenkungswirkung des ETS-1 hin zu neuen Technologien in diesen Industrien (unter anderem Eisendirektreduktion und Oxyfuel-Verfahren) limitiert bleibt.

Die Bundesregierung sollte sich daher auf europäischer Ebene dafür stark machen, dass die Vergabe kostenloser Emissionszertifikate bereits deutlich früher, 2030, beendet wird und bis dahin ambitioniertere Technologie-Benchmarks für den Erhalt dieser Zertifikate gesetzt werden.

Der neue ETS-2 hat große Überschneidungen mit dem bestehenden deutschen Emissionshandelssystem für den Straßenverkehrs- und Gebäudesektor, der seit 2021 in Kraft ist (Brennstoffemissionshandelsgesetz). Perspektivisch ist es daher folgerichtig, dass der nationale Emissionshandel

im ETS-2 aufgeht. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass der ETS-2-Preis aus politischen Gründen gedeckelt ist, vor allem wohl um die Akzeptanz bei Unternehmen und in der Bevölkerung zu gewährleisten. Dies hat jedoch zur Folge, dass der ETS-2 voraussichtlich nur eine geringere Lenkungswirkung zugunsten neuer, klimafreundlicher Technologien in den Bereichen Gebäude und Straßenverkehr (unter anderem Brennstoffzellen-Lkw, Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie) entwickeln wird als der ETS-1. Um zu verhindern, dass dieser schon limitierte Effekt verloren geht, sollte sich die Bundesregierung kurzfristig (im Trilog und bei einer Revision des Brennstoffemissionshandelsgesetzes) dafür einsetzen, **einen Mindestpreis festzulegen**. Langfristig muss das Ziel aber ein umfassender **Zertifikatehandel sein, in dem ETS-1, ETS-2 und nationaler Emissionshandel vereint sind**. Nur so kann eine klare Steuerungswirkung zugunsten klimafreundlicher Technologien volkswirtschaftlich effizient sichergestellt werden.



03.01.02 EU Innovation Fund und Carbon Contracts for Difference (CCfD)

Aus der Versteigerung von Emissionszertifikaten im ETS-1 werden bis 2030 voraussichtlich Milliardeneinnahmen für die nationalen Haushalte und den EU-Innovationsfonds generiert. Letzterer soll explizit dazu dienen, Innovationen (in erneuerbaren Energien, Energiespeicherung, CO₂-Abscheide- und Speicherungstechnologien, Dekarbonisierung der energieintensiven Industrie) zu unterstützen, und bietet insofern eine weitere Finanzierungsquelle für neue Technologien, die von der Bundesregierung erschlossen werden sollte.

Um die Gelder für die Finanzierung von CO₂-freien Produktionsprozessen in der Grundstoffindustrie (beispielsweise Eisendirektreduktion, Oxyfuel-Verfahren) freizuschalten, bieten sich sogenannte Carbon Contracts for Difference (CCfD) an. In Deutschland sind diese als Klimaschutzverträge bekannt (siehe 3.2.4). Sie werden zwischen der öffentlichen Hand und dem investierenden Unternehmen geschlossen und überbrücken die Kostendifferenz zwischen treibhausgasneutraler Technologie und traditioneller, fossiler Technologie. Dazu wird ein fixer „Strike Price“ pro Tonne CO₂ über einen mehrjährigen Zeitraum vereinbart, der sich an den Mehrkosten für die neue Technologie orientiert. Liegt der Strike Price über dem tagesaktuellen EU-ETS-Zertifikatspreis, zahlt die öffentliche Hand die Differenz an das Unternehmen aus.²⁷ Übersteigt der Zertifikatspreis zu einem Zeitpunkt den Strike Price, dreht sich die Zahlungsverpflichtung um. Perspektivisch

²⁷ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2021a.

sollte die Festlegung des Strike Price über Auktionen erfolgen, um durch Wettbewerb einen Anreiz zu weiteren Kostensenkungen bei den noch neuen Technologien zu schaffen.

Mit diesem Modell wird je nach Ausgestaltung ein angebots- sowie nachfrageseitiger Anreiz zum Investment in Technologien geschaffen, die heute noch nicht wettbewerbsfähig sind. Gleichzeitig verringern sich die Kosten, die den öffentlichen Haushalten bei dieser Form der Technologieförderung entstehen, sukzessive durch einen steigenden Zertifikatspreis.

Im Sinne der Technologieförderung wäre ein Modell ohne Rückzahlungsverpflichtung zu favorisieren, da es einen noch stärkeren wirtschaftlichen Anreiz zur Verbreitung neuer Industriezweige schaffen würde. Falls dies nicht mit den europäischen Beihilferegulungen vereinbar ist²⁸, wäre auch ein Modell mit Rückzahlungsverpflichtung noch förderlich für den Eintritt der klimafreundlichen Technologien in den Markt. Die Bundesregierung sollte dieses Instrument daher in Deutschland zur Anwendung bringen und so unter anderem mit Mitteln des EU Innovation Fund die Dekarbonisierung der deutschen Grundstoffindustrie anregen.



03.01.03 Erneuerbare-Energien-Richtlinie III (RED III)

Die Novellierung und Umsetzung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III) mit ihrem angehobenen Ziel erneuerbarer Energien im Energiemix der EU von nun 40 % setzt einen wichtigen Impuls für die Verbreitung von strombasierten Technologien in allen Verbrauchssektoren. Wie aus den Innovation Factsheets ersichtlich, ist die Verfügbarkeit von Grünstrom essenziell für die Herstellung von grünem Wasserstoff und seiner Derivate. Gleiches gilt für Sektorkopplungstechnologien wie beispielsweise Großwärmepumpen, elektrische Hochöfen sowie technische Karbonsenken.

Auch die vorgeschlagene Verschärfung der Treibhausgasreduktionsziele im Verkehr ist ein wichtiges Bekenntnis zu neuen Technologien. Sie zeigt einen klaren Pfad zur Verbreitung von Elektrifizierungstechnologien, erneuerbaren Kraftstoffen und

dazugehörigen Technologien auf. Darunter fallen auch die in diesem Dokument vorgestellten Wasserstoffschiffe, -züge sowie -Lkw.

Im vorliegenden Entwurf fehlen allerdings Erneuerbaren-Ziele für den Bruttoendenergieverbrauch der einzelnen Mitgliedsstaaten. **Als wichtige europäische Volkswirtschaft sollte Deutschland hier vorgehen und auf nationaler Ebene ein Erneuerbaren-Ziel festlegen, das über das 40 %-Ziel der EU hinausgeht.** Dieses Ziel (und die dahinführenden Maßnahmen) würde einen Impuls für Klimainnovationen schaffen, die auf erneuerbarer Energie beruhen.

Auch bei den sektorspezifischen Zielen gibt es noch Verbesserungsbedarf: Im Entwurf fehlen verpflichtende Subquoten für den Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehrssektor und besonders im Gebäudebereich. Diese sollten noch verhandelt werden, um auch in diesen wichtigen Sektoren klare Ziele zu etablieren. **Im Energiesektor sollten im Sinne der Technologieförderung Subquoten für die Anwendung innovativer erneuerbarer Energien wie beispielsweise Agri-Photovoltaik oder gebäudeintegrierter Photovoltaik ergänzt werden.**²⁹

Im vorliegenden Kommissionsentwurf soll explizit die Nutzung „Erneuerbarer Kraftstoffe nicht-organischen Ursprungs“ (RFNBO) reguliert und angereizt werden. Diese schließen Wasserstoff und dessen Derivate, also z. B. E-Kerosin, ein. Der Vorschlag der Kommission enthält eine Mindestquote im Transportsektor von 2,6 % bis 2030. Außerdem sollen 50 % des grauen Wasserstoffs im Industriebereich bis 2030 durch grünen Wasserstoff ersetzt werden.

Diese Nutzungsquoten sind als erste nachfrageseitige Impulse für grünen Wasserstoff und E-Fuels begrüßenswert, wenn auch zumindest im Verkehrssektor nicht sonderlich ambitioniert. **Die Bundesregierung sollte im anstehenden Trilogverfahren auf höheren Quoten von 4 % bestehen.** Dies würde einen wichtigen Nachfrageimpuls für die Verbreitung von grünem Wasserstoff und damit verbundenen Technologien (beispielsweise Elektrolyseure, E-Kerosin, Wasserstoffzüge, -schiffe und -Lkw) setzen.

Nach Verabschiedung müssen die Inhalte der RED III in deutsches Recht (unter anderem Erneuerbare-Energien-Gesetz und das Gebäudeenergiegesetz) überführt werden.

²⁸ Es ist noch nicht abschließend geprüft, inwiefern CCfD als staatliche Beihilfe gelten.

²⁹ Arrowsmith, 2021.

03.01.04 Energieeffizienzrichtlinie III (EED)

Mit dem Reformvorschlag der Energieeffizienzrichtlinie soll die Reduktion des Primärenergieverbrauchs in den Mitgliedsländern der EU noch einmal verschärft werden.³⁰ Die vorgeschlagenen Zielstellungen auf EU-Ebene entsprechen bereits den im deutschen Klimazielplan enthaltenen Energieeffizienzzielen von 39 bzw. 36 % für den Primär- bzw. den Endenergieverbrauch.³¹

In Einzelfällen kann sich eine Fokussierung auf die Energieeffizienzsteigerung von bestehenden Technologien und Prozessen innovationshemmend auswirken, da sie die Aufnahme gänzlich neuer, klimafreundlicher und noch effizienterer Technologien und Prozesse verzögert (beispielsweise Eisendirektreduktion, CCS in der Zementindustrie). Dieser Umstand und die Effizienzpotenziale, die durch neue Technologien erschlossen werden können, sollten durch die Bundesregierung in den Trilogverhandlungen betont werden. **In Deutschland sollten bestehende Förderprogramme dahingehend überprüft werden, dass Anreize für Investitionen in energieeffiziente Technologien nicht die Anreize zur vollständigen Dekarbonisierung verzögern.**



03.01.05 Energiesteuerrichtlinie (ETD)

In Verbindung mit den Anpassungen der Energieeffizienzrichtlinie (EED) und Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) soll die überarbeitete ETD dazu beitragen, CO₂-neutrale Energieträger zu fördern. Dazu soll in Zukunft der Energiegehalt von Treibstoffen und deren Umweltverträglichkeit³² als Grundlage für die Besteuerung dienen. Dies ist prinzipiell ein wichtiger angebotsseitiger Impuls zur Intensivierung des Einsatzes von klimafreundlichen Energieträgern wie Strom, grünem Wasserstoff oder dem in diesem Papier diskutierten E-Kerosin.

Wie aus den Innovation Factsheets ersichtlich (Abschnitt 2) ist die **Abschaffung marktverzerrender Subventionen für fossile Energieträger eines der effektivsten Instrumente, um den Markteintritt von neuen, klimafreundlichen Technologien zu unterstützen.** Eine höhere Besteuerung von fossilem Flugbenzin im Verbund mit allen EU-Mitgliedsstaaten wäre dabei ein wichtiger erster Schritt. Deutschland, Frankreich, die Niederlande und Österreich kooperieren bereits zu diesem Ziel. Da in den vier Ländern die für Kontinentaleuropa wichtigsten Flughäfen liegen, decken sie auch einen signifikanten Anteil der Betankungsmengen ab. Die Bundesregierung sollte sich dafür einsetzen, dass auch weitere Länder

(z. B. Dänemark, Schweden, Italien, Spanien) dieser Kooperation beitreten.

Die Mitgliedsstaaten müssen der überarbeiteten ETD im Rat der Europäischen Union einstimmig zustimmen. In diesem Fall wäre die ETD bis zum 1. Januar 2023 in nationales Recht umzusetzen. Eine einheitliche Zustimmung im Rat gilt jedoch nicht als gesichert. **Deutschland sollte daher auf europäischer Ebene aktiv für eine Novellierung werben, die klimafreundliche Energieträger befördert und klimaschädliche Subventionen abbaut.**

Davon unabhängig sollte die Bundesregierung auch auf nationaler Ebene Subventionen für fossile Energieträger abbauen. Außerdem muss die überproportionale Abgabenbelastung von Strom abgebaut werden (siehe Abschnitt 3.2.1).

03.01.06 Verordnung zu CO₂-Emissionsnormen für neue Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Die Dekarbonisierung des Transportsektors ist eines der wichtigsten und gleichzeitig eines der medial am stärksten debattierten Elemente aus dem vorliegenden Fit-for-55-Vorschlag der Europäischen Kommission. Mit der Überarbeitung der Verordnung zu CO₂-Minderungszielen für die Automobilindustrie geht die Kommission einen wichtigen Schritt, da auf Fahrten mit Pkw und Lieferwagen (leichte Nutzfahrzeuge) ca. 12,0 % (auf Pkw) bzw. 2,5 % (auf Lieferwagen) der gesamten CO₂-Emissionen der EU entfallen.³³

Die Verordnung setzt EU-weite ambitionierte Flottenziele für CO₂-Emissionen fest, was einen Anreiz für die Einführung emissionsfreier und -armer Fahrzeuge schaffen soll. Dies stärkt zum einen die Elektrifizierung des Verkehrs, gleichzeitig aber auch potenziell neue, innovative Technologien im Verkehrsbereich. Ab 2035 schreibt die Kommission eine 100 %-Reduktion von CO₂-Emissionen im Betrieb der Fahrzeugflotte fest. Dies bedeutet, dass ab dem Jahr 2035 keine neuen Autos mit Verbrennungsmotor mehr zugelassen werden können. Der Vorschlag kann als Vorstoß in Richtung batteriebetriebene Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge gewertet werden.

Dieses Vorgehen ist aus industriepolitischer Sicht unterstützenswert, da es Investitionssicherheit und Anreize zur Flottenelektrifizierung schafft. Da der batterieelektrische Antrieb für Pkw unter Berücksichtigung der Externalitäten in der Nutzungsphase die effizienteste Option darstellt und hier noch große Innovationspotenziale gehoben werden können

³⁰ EU-weit minus mindestens 9 % bis 2030 im Vergleich zu 2020, bisherige Referenz 2009.

³¹ Stiftung Umweltenergie, 2021.

³² Konventionelle fossile Energieträger wie Heizöl oder Benzin fallen dabei in die höchste Steuerklasse, elektrischer Strom und grüner Wasserstoff in die niedrigste.

³³ Europäische Kommission, 2021.

(siehe Factsheets Feststoffbatterie und Akkumulatorenrecycling), ist die De-facto-Beschränkung auf diese Technologie vertretbar.



03.01.07 Alternative Fuels Infrastructure Directive/Regulation (AFIR)

Die AFIR macht neue Vorgaben zur Entwicklung von Infrastruktur für alternative Antriebsformen im Straßenverkehr und soll die Voraussetzungen für die Dekarbonisierung des Mobilitätssektors in Europa schaffen.

Wie auch aus den Innovation Factsheets ersichtlich, ist eine weitreichende Lade- und H₂-Tankinfrastruktur eine Grundvoraussetzung für die Verbreitung neuer, klimafreundlicher Verkehrstechnologien (wie beispielsweise Wasserstoff-Lkw) und vorgelagerter Innovationen (beispielsweise Elektrolyseure, Feststoffbatterien und Akkumulatorenrecycling).

Die klare Formulierung von Anforderungen an diese Infrastruktur ist insofern begrüßenswert, da sie einen angebotsseitigen Impuls für die Verbreitung batterieelektrischer und brennstoffzellenbetriebener Fahrzeuge setzt, und sollte von der Bundespolitik unterstützt werden.



03.01.08 ReFuelEU Aviation

Europäische Kraftstofflieferanten für Flughäfen werden verpflichtet, ab dem Jahr 2025 angebotenem Turbinenkraftstoff schrittweise nachhaltige Flugkraftstoffe (SAF) beizumischen. Dabei wird eine Differenzierung zwischen Biokraftstoffen und strombasierten, d. h. auf grünem Wasserstoff basierenden Kraftstoffen (unter anderem E-Kerosin) vorgenommen. Die Quote umfasst eine Beimischung von mindestens 5 % SAF bis 2030, davon 0,7 Prozentpunkte E-Kerosin. Es gelten die Nachhaltigkeitskriterien, die bereits in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II (RED II) definiert wurden. Die

Verordnung deckt somit aus der EU abgehende Flüge ab und ergänzt die CO₂-Bepreisung durch das ETS-1, die Flüge, die in der EU starten, aber außerhalb der EU landen, nicht betrifft.

Damit setzt die ReFuelEU Aviation einen wichtigen nachfrageseitigen Impuls für die Marktentwicklung von E-Kerosin und Technologien der dazugehörigen Wertschöpfungskette (unter anderem Elektrolyseure) auf europäischer Ebene. Eine durch Quoten gesicherte Nachfragemenge gibt Investoren und Produzenten die notwendige Investitionssicherheit.

Nichtsdestotrotz ist die anvisierte Quote von 0,7 % nicht ambitioniert genug, um den schnellen Markthochlauf von E-Kerosin zu ermöglichen. Selbst führende Fluglinien aus Deutschland und Europa fordern hier unter bestimmten Bedingungen höhere Quoten.³⁴ In Deutschland gilt ebenso bereits das Ziel von 2 % E-Kerosin in 2030. **Vor diesem Hintergrund sollte sich die Bundesregierung für ein Ziel von 2,5 % E-Kerosin am Gesamtbedarf einsetzen.** Gleichzeitig muss sie sich für Änderungen der Besteuerung von Kraftstoffen stark machen, um langfristig tragfähige Anreizstrukturen zugunsten klimaneutraler Treibstoffe zu schaffen (siehe Abschnitt 3.4.5).

03.01.09 Fuel EU Maritime

Mit der Fuel EU Maritime soll die Verwendung von emissionsarmen Schiffskraftstoffen und Technologien gefördert werden. Dazu schlägt die Europäische Kommission eine kontinuierliche Reduktion der Lebenszyklusemissionen von Schiffstreibstoffen vor: minus 2 % bis 2025, minus 6 % bis 2030 und minus 75 % bis 2050 („Well-to-Wake“). Dieser Zielkorridor unterstützt die Dekarbonisierung und Etablierung von CO₂-armen Technologien im Schiffsverkehr.

Zur Stärkung von alternativen Kraftstoffen in der Schifffahrt (siehe Factsheet Wasserstoffschiffe) **sollte fossiles Liquefied Natural Gas (LNG) nicht zur Zielerfüllung auf die Emissionsreduktionsquoten anrechenbar sein.** Denn das würde einen technologischen Lock-in hervorrufen und die vollständige Substitution fossiler Kraftstoffe durch strombasierte und biogene Alternativen verzögern. Die Bundesregierung sollte diese Position aktiv vertreten.

34 Vgl. Global Alliance Powerfuels, 2021.

03.01.10 Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)

Der CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM), der spätestens am 1. Januar 2023 eingeführt werden soll, hat das Ziel, gewisse Industrien, die von hohen CO₂-Preisen im ETS betroffen sind, vor einem Wettbewerbsnachteil gegenüber Importen aus Ländern ohne CO₂-Bepreisung zu schützen. Dafür wird ein Einfuhrzoll auf Konkurrenzprodukte aus Drittmärkten vorgeschlagen. Der CBAM würde zunächst für die Sektoren Aluminium-, Zement-, Stahl-, Düngemittel- und Stromerzeugung gelten und voraussichtlich 9 Mrd. € pro Jahr einbringen, die direkt in den EU-Haushalt fließen.

Der CBAM ist ein potenziell wirkungsvoller Hebel, um der europäischen Schwerindustrie den Freiraum zur schnelleren Implementierung klimaneutraler Produktionsverfahren zu ermöglichen. Der CBAM wird nur direkte Emissionen einbeziehen (Scope 1), also keine indirekten Emissionen, die durch den Bezug von Energie entstehen (Scope 2) oder gar Emissionen in der Lieferkette (Scope 3) beinhalten.

Die resultierenden Einnahmen aus einem CO₂-Ausgleichsmechanismus müssen konform mit den Regelungen der Welthandelsorganisation (WTO) ausgestaltet werden. Hier ist zu beachten, dass die Einnahmen konsequent an den Zweck gebunden werden, klimapolitische Maßnahmen im In- und Ausland zu fördern.³⁵ **Die Bundesregierung sollte sich für die Umsetzung des CBAM stark machen**, da das Instrument sich grundlegend dazu eignet, die Etablierung neuer Produktionsprozesse und -technologien (wie beispielsweise der Eisendirektreduktion) in Europa zu befördern, ohne ein Abwandern von Wertschöpfung und Emissionen ins Ausland zu riskieren (Carbon Leakage).

Der CBAM-Vorschlag sollte darüber hinaus von der Bundesregierung als Ansatzpunkt genutzt werden, um Partnerländer außerhalb der EU bei der Reduktion der Emissionen der Schwerindustrie zu unterstützen. **In diesem Sinne sollte die Bundesregierung zusammen mit der EU ihre Anstrengungen für einen multilateralen, globalen Ansatz intensivieren und an Ideen wie einem internationalen Klimaklub festhalten**, dessen Mitglieder sich auf ambitionierte Klimaziele wie z. B. einen gemeinsamen CO₂-Mindestpreis festlegen. So kann der Markthochlauf gefördert und gleichzeitig die internationale Marktpositionierung von effektiver Klimatechnologie „Made in Germany“ unterstützt werden.

03.01.11 Gebäudeenergie richtlinie (EPBD)

Zusätzlich zu den bereits vorgestellten Reformvorschlägen wird die Europäische Kommission im Dezember 2021 eine

Neufassung der EPBD anbringen. Dabei bietet sich die Gelegenheit, auf europäischer Ebene Impulse zur Förderung von Klimainnovationen im Gebäudesektor einzubringen. Dazu muss zunächst **sichergestellt werden, dass die Definition des „dekarbonisierten“ Gebäudebestands bis 2050 auf eine 100-prozentige Reduzierung der Treibhausgasemissionen abzielt und den verkörperten Kohlenstoff einschließt (Life-Cycle-Emissions)**. Darauf aufbauend ist die Einführung von Monitoring, Berichterstattung und **Reduktionszielen für den Gesamtkohlenstoffgehalt neuer Gebäude** notwendig. So würde ein Nachfrageimpuls für Materialinnovationen (wie kohlenstoffarmen Stahl und Beton) gesetzt, gleichzeitig aber auch für neue Technologien zur Wärme- und Kälteversorgung (unter anderem Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sowie Wärmepumpen, Geo- und Solarthermie).



03.01.12 „Gaspaket“

Als letztes Element des Fit-For-55-Pakets wird im Dezember 2021 das „Hydrogen and decarbonised gas market package“ („Gaspaket“) erwartet. Es umfasst Vorschläge zur Überarbeitung mehrerer Vorschriften für gasförmige Brennstoffe und soll sicherstellen, dass die Gasmarktregulatorik an die neuen Energie- und Klimaziele angepasst ist. Gleichzeitig soll es auch die Energiesicherheit in Europa erhöhen.

In dieser Hinsicht ist es wichtig, dass die Bundesregierung ihre Einflussmöglichkeiten nutzt, um auf eine klare Terminologie und stringente Standards zu drängen: Erneuerbare und kohlenstoffarme Gase müssen auf der Grundlage wissenschaftlicher Merkmale und Lebenszyklus-THG-Emissionen definiert werden. Diese Definitionen müssen konsequent in allen Rechtsvorschlüssen angewandt sowie von robusten Anrechnungsregeln unterstützt werden. Neue Infrastruktur für fossile Gase soll vermieden werden. Auch das Beimischen von grünen Gasen sollte nur in Ausnahmefällen gebilligt werden.

Zu den potenziell für Innovation relevanten Aspekten des Gaspakets gehören: Speicherung (unter anderem Abgleich von intermittierender Stromerzeugung und Wasserstoffabnahme), eventuelle Ziele für grünen Wasserstoff, einheitliche und stringente Zertifizierung (zur Verringerung der Investitionsunsicherheit und Annahme eines stabilen Rechtsrahmens) sowie Lösungen mit Bezug zum offenen Wettbewerb von gasförmigen und nicht gasförmigen Brennstoffen (Orientierung auf die erbrachten Dienstleistungen, z. B. Wärme, nicht den Brennstoff).

³⁵ Vgl. Stiftung Wissenschaft und Politik, 2021.

03.02

Nationale Klima- und Energiepolitik als Innovationstreiber nutzen

Über die Gestaltung und Umsetzung der neuen europäischen Verordnungen und Richtlinien hinaus sollte die Bundesregierung auch durch Reformen nationaler Politiken den Markthochlauf von Klimainnovationen in allen vier Verbrauchssektoren unterstützen. Entsprechend einem holistischen Förderansatz gilt es daher einerseits, Fördermechanismen zur Marktschaffung für neue Technologien in der Erforschungs- und Skalierungsphase zu etablieren. Gleichzeitig muss ein Marktdesign geschaffen werden, das die Integration dieser Technologien ermöglicht, sobald sie die Marktreife erreicht haben. Die folgenden Politikempfehlungen stützen sich auf diese Logik und greifen Maßnahmen aus den Innovation Factsheets auf.

03.02.01 Innovationsfreundliches Strommarktdesign implementieren

Ein künftiges Strommarktdesign sollte Investitionen und Systemintegration technologischer Innovationen anreizen und die sektorübergreifende Energiewende vorantreiben. Das zentrale Instrument ist dabei der Emissionsrechtehandel (bzw. die Bepreisung von Emissionen): er verdrängt Technologien auf fossiler Basis und ermöglicht so den Einsatz emissionsfreier bzw. -armer Technologien (siehe Abschnitt 3.3.1). Gegenwärtig verzerren Steuern, Abgaben und Umlagen die Anreizwirkung eines effizienten CO₂-Preises als zentrales Steuerungsinstrument. Daher ist eine Reform des Steuern- und Abgabensystems für Strom – und darüber hinaus für den Energieeinsatz insgesamt – notwendig.

In seiner Funktion als Instrument zur Einführung von Energieerzeugungstechnologien auf Basis erneuerbarer Energieträger war das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) von Beginn an ein innovationsförderndes Instrument. Die starken Kostensenkungen vor allem im Wind- und Solarbereich und die damit einhergehende Entwicklung neuer Technologien und Produkte sind das Resultat von Innovationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. In den letzten Jahren hat es sich jedoch zunehmend zum Hindernis für neue Konzepte und Technologien im Energiesystem entwickelt. Denn Strom ist im Vergleich zu anderen Energieträgern heute von einer besonders hohen Abgaben- und Umlagenlast betroffen, was neue Technologien (unter anderem Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge und Elektrolyseure) behindert, die auf günstigen und erneuerbaren Strom angewiesen sind (Abschnitt 2).

In diesem Sinne sollte aus Sicht der Förderung von strombasierten Klimatechnologien insbesondere die EEG-Umlage für Stromnachfrager schnellstmöglich auf null abgesenkt werden. Dies würde neue strombasierte Technologien in Verkehr, Wärme und Industrie entlasten und ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossiler Konkurrenz verbessern.

Darüber hinaus besteht auch Reformbedarf beim System der übrigen Abgaben und Umlagen. Analog zur EEG-Umlage sollten auch alle anderen Steuern und Abgaben auf elektrische Energie (außer den Netzentgelten) minimiert werden, soweit es die europäische Energiesteuerrichtlinie (Abschnitt 3.1.5) erlaubt. Dies würde einen weiteren angebotsseitigen Impuls für die Nutzung neuer Sektorkopplungstechnologien setzen.

Verfügbarkeit von grünem Strom und grüner Wärme sicherstellen

Wie die Innovation Factsheets (Abschnitt 2) gezeigt haben, ist die Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Quellen eine Grundvoraussetzung für die Verbreitung von Klimainnovationen. Um das Angebot zu erhöhen, bedarf es eines Mixes aus Instrumenten: Neben der Steigerung des Zubaus über nachfragegetriebene Geschäftsmodelle wie Corporate Green PPAs und Modelle zur Eigenversorgung müssen die Ausbauziele und -pfade angehoben, und die Ausschreibungsvolumina so angepasst werden, dass sie komplementär mit nachfragegetriebenen Instrumenten den Ausbau unterstützen. Parallel dazu müssen deutlich mehr Flächen für Erneuerbare-Energien-Projekte ausgewiesen werden. Eine verbindliche Quote auf Länderebene kann hier unterstützend wirken. Auch sollten die Genehmigungsverfahren für Erneuerbare-Energien- im Allgemeinen und „Repowering“-Projekte im Besonderen beschleunigt werden.

Parallel zum Strommarkt müssen Anreize für die Entwicklung eines grünen Wärmemarkts gesetzt werden. Hierzu zählt insbesondere auch die Integration erneuerbarer Energien in die Nah- und Fernwärmenetze. Dies wird auch bei den in Abschnitt 2 aufgeführten Technologien für den Wärmebereich deutlich.

EEG-Innovationsausschreibungen zum Förderinstrument für neue Technologien ausbauen

Die Innovationsausschreibungen des EEG ermöglichen die Ausschreibung neuer und innovativer Energieerzeugungskonzepte abseits der Regelausschreibungen. Bisher erhielten über dieses Instrument in Deutschland quasi ausschließlich Freiflächen-Photovoltaik-Projekte mit Batteriespeicher den Zuschlag. Am 01. April 2022 ist erstmalig eine Ausschreibung für sogenannte „besondere Solaranlagen“ vorgesehen. Darunter fallen Photovoltaik-Projekte auf Gewässern (Floating Photovoltaik) sowie auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (Agri-Photovoltaik). Während diese Initiative zur Marktentwicklung innovativer Photovoltaik-Konzepte sehr zu begrüßen ist, ist eine ambitioniertere Herangehensweise notwendig, um die notwendigen Skalierungseffekte zu erreichen.

Im Allgemeinen sollten die Innovationsausschreibungen auch für weitere neue Erzeugungstechnologien abseits der „besonderen Solaranlagen“ geöffnet werden (beispielsweise neue Wind-, bauwerkintegrierte Photovoltaik, neue Speicherkonzepte). Diese Projekte sollten dann weiterhin über eine Einspeisevergütung gefördert werden, um das Investitionsrisiko zu reduzieren und einen Markt zu schaffen. Eigene Ausschreibungsziele würden so mittelfristig die Verfügbarkeit von innovativen Lösungen erhöhen. Außerdem würde das EEG auch wieder seinem ursprünglich angedachten innovationsfördernden Charakter gerecht.

Zudem ist das Ausschreibungsvolumen mit 50 MW pro Jahr deutlich zu gering. Auch die zulässige Anlagenkapazität von 2 MW ist zu gering, um die benötigte Anlagengröße am Markt zu etablieren. Die gegenwärtige Gestaltung der Ausschreibungen erfordert außerdem die Kombination mit einem Speicher oder einer anderen Erzeugungsquelle, was die Kosten treibt und zu Kostennachteilen im Vergleich zu Freiflächenanlagen führt.

Funktionierende Regulatorik für Energiespeicher schaffen

In der gegenwärtigen Regulatorik des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) existieren verschiedene Hürden, die Speichertechnologien im Stromsystem systematisch behindern. Grundsätzlich sind Netzspeicher nur dann rentabel zu betreiben, wenn sie verschiedene Systemdienstleistungen gleichzeitig zur Verfügung stellen können (Value Stacking). Genau diese Mehrfachfunktionalität ist regulatorisch heute nicht vorgesehen, insofern der Speicher in eine EE-Erzeugungsanlage integriert ist.³⁶ Da der Förderanspruch verloren geht, sobald Netzstrom ein- und gespeichert wird, gibt es für Betreiber keinen Anreiz, den Speicher zur Erbringung von Systemdienstleistungen freizugeben. Insofern behindert die gegenwärtige Regulatorik die Verbreitung innovativer Speicherkonzepte. Hier besteht in der bevorstehenden Legislaturperiode Handlungsbedarf, um auch in Deutschland die notwendige Verbreitung von Netzspeichern in einem volkswirtschaftlich sinnvollen Maße zu befördern.

Auch die Anreizregulierungsverordnung setzt in ihrer aktuellen Ausgestaltung keine Anreize für die Nutzung von Flexibilitäten und wirkt dadurch innovationshemmend. Aufgrund der geltenden Abschreibungsregeln werden Netzbetreiber angereizt, in Technologien mit hohen Kapitalkosten (CAPEX) zu investieren statt in solche mit höheren Betriebskosten (OPEX). Als Resultat wird der Netzausbau in praktisch allen Fällen Investitionen in Speichertechnologie oder Smart Grid Equipment vorgezogen. Dies benachteiligt nicht nur solche Technologien direkt, sondern auch nachgelagerte innovative Konzepte und Geschäftsmodelle. Die Bundesnetzagentur sollte hier unter Führung des zuständigen Bundesministeriums³⁷ die Regulatorik auf die Erreichung von Leistungszielen des Gesamtenergiesystems abstimmen und dabei sowohl Strom-, und Gas- als perspektivisch auch Wasserstoffinfrastrukturen berücksichtigen (siehe Abschnitt 3.2.2).

Anreizung nachfrageseitiger Flexibilität

Im gegenwärtigen deutschen Strommarktdesign sind verbraucherseitige Flexibilitätsanreize nicht ausreichend, was den Einsatz von dargebotsabhängigem erneuerbarem Strom im Wärme- und Verkehrssektor behindert. Eine Reform von Markt- und Regulierungsrahmen, die nachfrageseitige Flexibilisierung in angemessener Weise vergütet, wäre hier begrüßenswert. Diese würde Flexibilitätstechnologien die Refinanzierung im System ermöglichen. Eine Option für die Umsetzung stellen hierbei zeit- und lastvariable Netzentgelte dar. Darüber hinaus wird gegenwärtig über die Einführung von Flexibilitätsmärkten debattiert, um systemdienliche Nachfragesteuerungen im Verteilnetz zu erhöhen.

³⁶ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2017.

³⁷ Gegenwärtig des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).

03.02.02 Voraussetzungen für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft schaffen

Ganzheitlichen Systementwicklungsplan entwickeln

Mit Blick auf die angestrebte Klimaneutralität 2045 muss schnellstens eine neue Energieinfrastruktur für Wasserstoff aufgebaut werden. Grundsätzliche Fragen zu deren Ausgestaltung müssen gleich zu Beginn der neuen Legislaturperiode beantwortet werden, um die Infrastrukturen noch rechtzeitig fertigstellen zu können. Die neue Bundesregierung sollte die Bundesnetzagentur beauftragen, einen Planungsprozess für ein Wasserstoffstartnetz durchzuführen. Während das Startnetz durch die etablierten Ferngasnetzbetreiber aufgebaut werden sollte, muss der weitere Prozess explizit auch offen für neue Unternehmen sein und deren Lösungen berücksichtigen. Im Rahmen von Ausschreibungsverfahren sollten Erweiterungsinvestitionen über das Startnetz hinaus an Dritte vergeben werden. Der Plan für das Wasserstoffstartnetz muss dann in politisch verbindliche Vorgaben überführt werden, um die Investitionssicherheit zu gewährleisten.

Die neue Wasserstoffinfrastruktur muss dabei konsistent mit der Planung des Stromnetzes sowie dem bestehenden Erdgasnetz sein. Dazu sollte ein **Systementwicklungsplan (SEP)**³⁸ geschaffen werden, der die strategische Ausrichtung des Energiesystems als Ganzes abbildet. So erzeugt der SEP wiederum Investitionssicherheit für Transformationsprozesse zum Beispiel in der Industrie und unterstützt die Aufnahme neuer Technologien und Produktionsprozesse.

Neben der Nachfrageflexibilisierung erfordert auch die **rechtliche Anerkennung von Wasserstoff als primärem Energieträger** eine Reform des EnWG. Die Schaffung eines verlässlichen Rechtsrahmens ist hier dringend notwendig, um die Grundvoraussetzungen für die zukünftige Wasserstoffwirtschaft zu schaffen und Investitionssicherheit für innovative Wasserstofftechnologien sicherzustellen.

Offene Marktstrukturen für Wasserstoff etablieren

Zur Förderung von Innovation ist im Wasserstoffmarkt eine pluralistische Marktstruktur ähnlich der im Strom- und Erdgasmarkt anzustreben. Eine Integration in den bestehenden Regulierungsrahmen für das Gasnetz ist langfristig denkbar; zu Beginn sollten Regulierungskonzepte mit niedrigen Markteintrittshürden einen starken Wettbewerb und innovative Konzepte ermöglichen. Bei der Umsetzung ist entscheidend, kein weiteres Investment in Erdgaspipelines anzureizen, um einen Carbon Lock-in und Zielkonflikte mit der Klimaneutralität zu vermeiden.

Wettbewerb bei Wasserstoffproduktions- infrastruktur anregen

Auf- und Ausbau der Wasserstoffproduktionsinfrastruktur sollte wettbewerblich organisiert werden, um auch neuen Playern die Möglichkeit zur Einbringung ihrer Konzepte und Technologien zu ermöglichen.

Dabei sollten Pilotprojekte weiterhin über einen separaten Mechanismus gesteuert und gefördert werden. Den Nachteilen für die ersten entstehenden Elektrolyseur-Projekte (First Mover Disadvantage) sollte mit Investitionsförderungen begegnet werden.³⁹ Bestehende Förderansätze, wie das IPCEI Hydrogen, sind in dieser Hinsicht zu erweitern. Auf internationaler Ebene ist der H₂Global-Fördermechanismus bereits ein wichtiger Schritt zum Markthochlauf von grünem Wasserstoff und seinen Folgeprodukten, der auch von der kommenden Bundesregierung unterstützt werden sollte.

38 Vorschläge zur genauen Ausgestaltung können den Ausarbeitungen der dena-Netzstudie III entnommen werden.

39 Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021b.

03.02.03 Anreize für den Einsatz innovativer Technologien im Gebäudesektor schaffen

Die heute in Deutschland bestehende Regulatorik für den Gebäudesektor ist noch nicht ausreichend auf die Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2045 abgestimmt. Das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) bzw. perspektivisch der ETS-2 (siehe Abschnitt 3.1.1) wären dafür zentrale Instrumente, entfalten heute sowie im bisher angelegten Preispfad bis 2025 aber noch nicht die notwendige Lenkungswirkung im Gebäudesektor. Damit der CO₂-Preis steuernde Wirkung hat und sinnvolle Investitionsentscheidungen getroffen werden können, ist seine weitere sukzessive Erhöhung auf Basis eines klaren Fahrplans erforderlich.

Aufgrund der heterogenen Eigentümerstruktur im Gebäudesektor kommen Marktanreize jedoch teilweise nicht bei den Entscheidenden – beispielsweise im Mietwohnbereich – an. In der neuen Legislaturperiode sollte eine Regulierung angestrebt werden, die das Mieter-Vermieter-Dilemma auflöst und Mietende und Vermietende in die Zahlung der CO₂-Kosten einbezieht. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) hat einen Vorschlag entwickelt, der auf eine differenzierte Kostenaufteilung zwischen Mieterschaft und Vermietenden setzt. Die Kostenbeteiligung der Vermietenden ist dabei abhängig von der Effizienzklasse des Gebäudes: Je schlechter die Effizienzklasse des Gebäudes, desto stärker wird der Vermietende an den Kosten beteiligt. Auf diese Weise sollen zusätzliche Anreize zur Investition in neue Heizungs- und Effizienztechnologien geschaffen werden (wie beispielsweise, in eine Heizung auf Basis erneuerbarer Energien oder eine energetische Sanierung der Gebäudehülle).

Die sogenannte Innovationsklausel des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) enthält einen Reformansatz, der strukturiert ausgewertet und gegebenenfalls weiterentwickelt werden sollte. Statt den Primärenergiebedarf zu bewerten, sind die Treibhausgasemissionen die zentrale Anforderungsgröße für

die Klassifizierung eines Gebäudes. Mittelfristig kann diese Herangehensweise noch weitergedacht werden. Hierfür können die bei der Herstellung der Baumaterialien, während der Bau- und Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung bzw. zum Recycling von Materialien beim Abriss von Gebäuden eingesparten Emissionen separat ausgewiesen werden. Mögliche Effizienzgewinne in der Lebenszyklusbetrachtung sollten dem Gebäudesektor angerechnet werden, um so einen übergreifenden Anreiz zur Reduktion von Treibhausgasemissionen zu setzen. Die potenzielle Lenkungswirkung eines steigenden CO₂-Preises und der Betrachtung der THG-Emissionen im Lebenszyklus schafft zusätzlichen Gestaltungsspielraum für notwendige Innovationen im Gebäudesektor.

Zusätzlich sollten in der kommenden Legislaturperiode angebots- und nachfrageseitige Impulse für die Integration neuer Technologien besser verzahnt werden. Dazu sollten einerseits bei der anstehenden Novellierung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) die energetischen Standards für Neubau erhöht werden, um ordnungsrechtlich einen marktschaffenden Impuls zu setzen. Außerdem sollte das Referenzgebäude auf hocheffiziente Technologien auf Basis erneuerbarer Energien ausgerichtet werden, um diese als Standard zu etablieren. Flankierend zu ordnungsrechtlichen Maßnahmen sollte die Fördersystematik (BAFA/KfW) weiter auf Klimaneutralität und die Integration neuer, klimafreundlicher Technologien angepasst werden. Dies erfordert eine konsistente Definition, wann ein Gebäude als klimaneutral eingestuft werden kann. Im Ergebnis sollten der Einsatz und die Marktdurchdringung effizienter Heizsysteme mit erneuerbaren Energien (dezentral oder über leitungsgebundene Wärmeversorgung) befördert werden.

Seriell Sanieren nach dem Energiesprung-Prinzip

Für eine Beschleunigung der Emissionsreduktion bei Bestandsimmobilien sollte zusätzlich das serielle Sanieren befördert werden. Bei dieser innovativen Herangehensweise werden (teil-)maschinell gefertigte (Fassaden-, PV-Dach-)Bauteile und vorgefertigte Energiemodule eingesetzt, um eine effektive, einfache und schnelle Sanierung auf NetZero-Niveau zu ermöglichen. Zudem ändert sich der gesamte Bauprozess: Statt Sanierungen als eine Vielzahl von Einzelprojekten zu planen, wird hier ein komplettes, skalierbares Sanierungsprodukt angeboten, bestehend aus einem Baukasten vorgefertigter, integrierter Elemente. Aktuell befindet sich das serielle Sanieren noch in der Pilotphase und es gibt politische Hemmnisse, die bei kommenden Reformen adressiert werden sollten. Dazu gehören unter anderem aufwendige und lange Baugenehmigungs- und Zulassungsprozesse sowie komplizierte und innovationshemmende Regelungen beim Mieterstrom.

03.02.04 Maßnahmen zu Innovationsförderung in der Industrie umsetzen

Klimaschutzverträge (CCfD) als Förderinstrument großflächig verfügbar machen

Wie in Abschnitt 3.1.2 diskutiert, stellen Carbon Contracts for Difference (CCfD) ein essenzielles Instrument zur Einführung neuer klimafreundlicher Technologien in der Industrie dar. Unter dem Namen „Klimaschutzverträge“ werden diese bereits vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit in einem Pilotprojekt erprobt.⁴⁰ Für den Markthochlauf von Klimainnovationen in der Industrie (unter anderem wasserstoffbasierte Eisendirektreduktion, CCS-Anwendungen und elektrische Wärmebereitstellung) ist es notwendig, dass dieses Instrument schnell in der breiten Masse verfügbar gemacht wird. Angesichts der langen Investitionszyklen in der Schwerindustrie können nur so noch rechtzeitig die Impulse für eine klimaneutrale Wirtschaft gesetzt werden.

Technische Karbonsenken mit moderner Regulierung ermöglichen

Parallel zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen in allen Sektoren muss die Bundesregierung den Ausbau technischer CO₂-Entnahmetechnologien forcieren. Das bestehende Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) sollte in diesem Sinne reformiert werden.

Dabei sollten zunächst Fragen der Haftbarkeit bei Risiken der CO₂-Sequestrierung geklärt werden. Weiter muss ein separates CO₂-Einnahmeziel ausgewiesen werden und Anreizsysteme für den Hochlauf von Negativemissionstechnologien mit verifizierbarer Entnahme und Permanenz entwickelt werden. Dies beinhaltet kurzfristig die Unterstützung der Technologieentwicklung durch Pilotprogramme und Innovationsförderung, mittelfristig aber auch eine Vergütung der erreichten negativen Emissionen, beispielsweise über Auktionen mit einer Abnahme- und Preisgarantie. Auch sollte die Bundesregierung eine Strategie zur Integration technischer CO₂-Entnahmetechnologien in das Emissionshandelssystem entwickeln und diese auf europäischer Ebene vertreten. Dies ist besonders relevant, um Planungssicherheit für den grenzüberschreitenden Bau von CO₂-Infrastrukturen zu schaffen.

Darunter fällt einerseits die Erkundung geeigneter Lagerstätten unter der Nordsee, andererseits auch die Planung der dazugehörigen Pipelines. Die Mitgestaltung des Artikels 6 des Übereinkommens von Paris zur internationalen Kooperation im Klimaschutz (London Protocol) ist entscheidend, damit technische Karbonsenken – im Auftrag von Deutschland – da installiert werden können, wo es die besten Voraussetzungen gibt.

40 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2021a.

03.03

Aktive Innovationspolitik für Climate Tech

Neben der Förderung von Klimainnovationen durch eine geeignete Klima- und Energiepolitik bieten sich auch innovationspolitisch einige Ansatzpunkte, um die Skalierung von Climate-Tech „Made in Germany“ aktiv zu unterstützen. Insbesondere der Zugang zu ausreichend Kapital stellt eine Hürde da; Berechnungen beziffern das für die deutsche Klimaneutralität benötigte Wagniskapital auf durchschnittlich 22,7 Mrd. € pro Jahr bis 2030.⁴¹ Auch die Bedingungen bei Ausgründungen aus dem Forschungskontext sind in Deutschland gegenwärtig nicht geeignet, den zeitgerechten Markthochlauf von Innovationen zu ermöglichen. Die folgenden Lösungsvorschläge geben auszugsweise die Forderungen aus den bereits publizierten Thesenpapieren der Tech for Net Zero Allianz wieder.⁴²

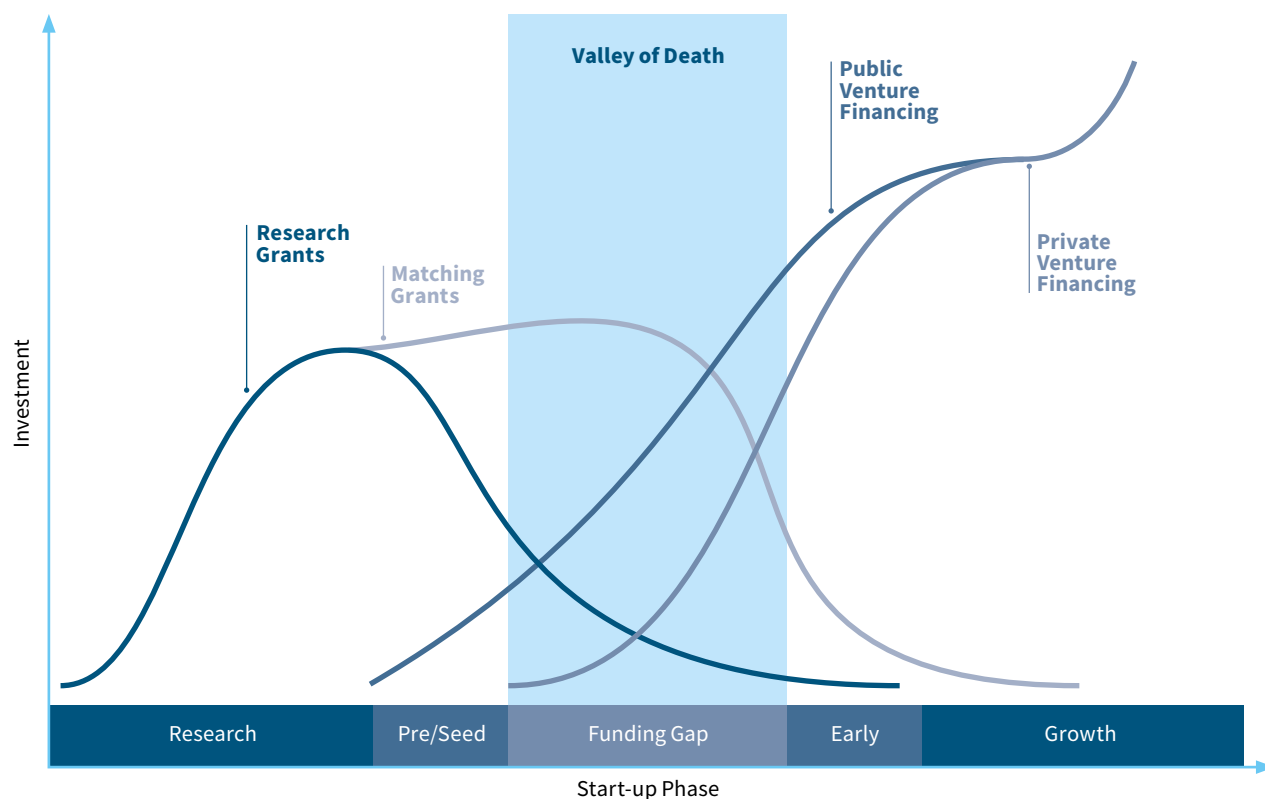


Abbildung 8: Valley of Death bei der Finanzierung von Climate Tech Start-ups

41 Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021c.

42 Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021d und Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021e; beide Thesenpapiere stehen unter www.techfornetzero.de zum Download zur Verfügung. Auf direkte Zitation wird aus Gründen der Lesbarkeit verzichtet.

03.03.01 Besseren Zugang zu Wagniskapital schaffen

Gerade für junge Climate-Tech-Unternehmen ist es schwierig, eine geeignete Finanzierung sicherzustellen. Start-ups, deren Geschäftsmodell auf Hardware-basiert, benötigen bereits in der Frühphase sehr hohe Investitionssummen. Bevor Climate Tech Start-ups in die Wachstumsphase gelangen, müssen zunächst meist teure Anschaffungen getätigt und Anlagen errichtet werden. Durch die hohen Kosten bei sehr niedrigen Einnahmen ist das sogenannte Valley of Death bei Hardware-Start-ups oft besonders tief. Es entsteht eine große Finanzierungslücke, die die maximale Finanzierungshöhe privater Investoren übersteigt.

Es gibt zwar eine Vielzahl an Förderprogrammen und Investitionsprogrammen für frühphasige Finanzierungsrunden, diese sind aber insbesondere für Climate Tech Start-ups aufgrund des sehr hohen Kapitalbedarfs oftmals nicht ausreichend. Für die klassische Venture-Capital-Finanzierung hingegen haben Climate Tech Start-ups in der Frühphase einen zu geringen Marktwert und schwer abschätzbare Risiken (technisches Risiko, Marktrisiko, Funding-Risiko, und später Exit-Risiko). Daher können VC-Investoren zunächst nur einen Bruchteil des Kapitalbedarfs decken. zusätzlich decken sich Forschungs- und Entwicklungszyklen im Climate-Tech-Bereich häufig nicht mit den Investitionszyklen von Investoren. Climate Tech Start-ups haben längere Forschungs- und Entwicklungszyklen sowie längere Vertriebszyklen als beispielsweise Software-Start-ups, was häufig in Diskrepanz zu den Finanzierungszyklen einschlägiger Finanzierer steht. Die Tech for Net Zero Allianz schlägt einen dreigliedrigen Ansatz vor, um diese Umstände signifikant zu verbessern und Klimainnovatoren die Finanzierung bereitzustellen, die sie zur Entwicklung ihrer Produkte benötigen.

Einführung von Matching Grants

Um das Valley of Death für Climate Tech Start-ups zu überbrücken, können durch öffentliche Förderung wesentlich mehr technologische Klimainnovationen schneller in den Markt gebracht und gleichzeitig private Investoren mobilisiert werden. Matching Grants, bei denen öffentliche Zuschüsse private Investitionen doppeln, sind ein bewährtes Instrument für Hardware-Start-ups, um das technische Risiko zu reduzieren, während private Investoren weiterhin das Markt- und Implementierungsrisiko tragen. Öffentliche Gelder könnten so für die Anschaffung teurer Anlagen, Komponenten und Materialien eingesetzt werden, um die Finanzierungslücke bei diesen hohen Kosten zu schließen. Private Investoren können diese

Kosten vor allem in der Frühphase nicht übernehmen, da die Start-ups noch nicht genügend Eigenwert haben, sodass eine Wagniskapitalbeteiligung nicht ausreichend ist. Durch öffentliche Matching Grants hätten die Gründerinnen und Gründer Planungssicherheit und könnten sich auf die Produktentwicklung fokussieren, anstatt unzählige kleinteilige Fördermittel mit teils erheblichen Auflagen einzuwerben. Die Höhe des Zuschusses ließe sich transparent mit dem geplanten Bedarf begründen, und kann ab der Pre-Seed-Phase das bis zu Zweifache der privaten Investitionen ausmachen.

Öffentliche Garantien sind ein weiteres Instrument, das entscheidend zur Risikoreduktion von Climate Tech Start-ups beitragen kann, um den Übergang in die Wachstumsphase zu ermöglichen. Durch den hohen Hardware-Anteil der Produkte ist eine Absicherung gegenüber technischen Risiken in der Industrie notwendig. Eine gezielte Risikoübernahme von öffentlicher Seite kann Start-ups in der Kommerzialisierungsphase entscheidend helfen, um innovative Technologien schneller in den Markt zu bringen. So können beispielsweise Bürgschaften und Garantien unbürokratisch erteilt werden bis zu bestimmten Investitionsvolumina, welche gegenüber potenziellen Kunden von Climate Tech Start-ups ausgesprochen werden. Öffentliche Garantien können somit bei insgesamt geringem Ausfallrisiko erheblich zum Markthochlauf neuer Klimatechnologien beitragen.

Ausweitung des DeepTech Future Funds auf Series A

Um die Klimaziele schneller zu erreichen, ist zusätzliches Wagniskapital für Start-ups in der Frühphase unabdingbar. Bereits ab der Series-A-Finanzierung kann öffentliches Wagniskapital auch hier wieder zur Überbrückung des Valley of Death beitragen. Eine öffentliche Beteiligung kann des Weiteren hilfreich sein, um das Risiko einer Anschlussfinanzierung zu reduzieren. Auch hier gilt, dass öffentliche Finanzierer (wie z. B. High-Tech Gründerfonds, IBB Ventures oder Bayern Kapital) eine starke Rolle spielen bei der notwendigen Risikoreduzierung für private Investoren. Durch eine stärkere öffentliche Finanzierung in allen Phasen – insbesondere aber der Frühfinanzierungsphase, kann der Markthochlauf von Climate Tech Start-ups gezielt gestärkt werden. Insbesondere der neu aufgesetzte DeepTech Future Fonds sollte ab der Series A ansetzen, um die Frühphasenfinanzierung zu unterstützen. Die Erweiterung des DeepTech Future Fonds würde zudem die strategische Standortsicherung und technologische Vorreiterrolle Deutschlands unterstützen.

03.03.02 Öffentliche Bürgschaften und klimakonforme öffentliche Vergabe (Green Procurement)

Um die Dekarbonisierung der Wirtschaft schneller zu erreichen, wäre es wichtig, dass die öffentliche Hand technische Risiken neuer Klimatechnologien und Anlagen in Form von öffentlichen Bürgschaften weitestgehend übernimmt. So könnten Climate Tech Start-ups ihre Technologien leichter in den Markt bringen, da die Bürgschaften wie eine Rückversicherung für potenzielle Geschäftskunden wirken.

Des Weiteren können durch die Aufnahme von Nachhaltigkeitskriterien, Emissionsreduktionszielen und technischen Anforderungen bei öffentlichen Ausschreibungen gezielt klimaneutrale Technologien und deren Skalierung gefördert werden. Durch die Festschreibung klimasensibler, technischer Spezifikationen bei öffentlichen Vergabeverfahren, das sogenannte „Green Procurement“, kann der Markthochlauf beschleunigt werden, sodass Climate Tech Start-ups und KMUs ihre Lösungen schneller zur Anwendung bringen können. Des Weiteren kann die öffentliche Hand durch gezielte klimafreundliche Anforderungen bei öffentlichen Ausschreibungen, wie beispielsweise grünem Zement, direkt die gesetzlichen Verpflichtungen zur Emissionsreduktion in die Tat umsetzen und eine Rolle als treibender Innovationsakteur einnehmen. Weitere Instrumente wie Investitionsfreibeträge, Abschreibungen und andere Steueranrechnungen können zusätzlich dazu beitragen, dass auf Kundenseite die Kosten für Klimatechnologien signifikant reduziert werden und damit eine schnellere Marktreife erreicht wird.

03.03.03 Ausgründungen aus Forschungseinrichtungen standardisieren

Deutsche Forschungseinrichtungen entwickeln seit vielen Jahren relevante Klimatechnologien, die substantielle Beiträge zur Erreichung der Klimaziele leisten können. Jedoch gibt es noch immer zu wenig Ausgründungen und Climate Tech Start-ups – Deutschland bleibt dadurch als innovativer Technologiestandort weit hinter seinem Potenzial zurück. Noch immer gestaltet sich der Wissenstransfer von der Forschung in innovative Technologie-Start-ups schwierig, zahlreiche Patente bleiben ungenutzt. Die deutsche Forschungslandschaft steht angesichts der heutigen politischen Rahmenbedingungen und Regelungen unter Druck, sowohl die Anzahl der Ausgründungen zu erhöhen als auch gleichzeitig die Einnahmen durch Unternehmensanteile und Umsatzbeteiligungen zu maximieren. Angesichts des brach liegenden Potenzials und vor allem aufgrund der akuten Klimakrise und der gesetzlich vereinbarten Zielen zur Dekarbonisierung ist es jedoch dringend erforderlich, dass die Politik den Wissenstransfer verbessert und Ausgründungen deutlich vereinfacht.

Der massive Einsatz neuer Technologien ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Erreichung der Klimaziele. Deswegen dürfen strukturelle Hürden sowie die Gewinnerwartungen der Forschungseinrichtungen nicht die Ausgründungen von Klima- und Umwelttechnologien verhindern. Wissenschaft und Forschung müssen den gesellschaftlichen Erfordernissen Rechnung tragen. Derzeit verlangen einige deutsche Forschungseinrichtungen bei Ausgründungen umfangreiche Beteiligungen. Neben Einstandszahlungen werden Unternehmensanteile (Equity) von teilweise über 15 % verlangt, sowie erhebliche Lizenzgebühren bzw. Umsatzbeteiligungen bis zu über 10 %. Die übermäßige Übertragung von Unternehmensanteilen reduziert jedoch das Investitions- und Wachstumspotenzial. In der kapitalintensiven Wachstumsphase sind junge Start-ups durch die hohen und mit Sonderklauseln geregelten Beteiligungen der Forschungseinrichtungen häufig nicht ausreichend attraktiv, um die notwendigen Investitionen zu mobilisieren, das Wachstumskapital fehlt. Eine Umsatzbeteiligung schneidet hingegen direkt in den Business Case neuer Technologien und kann bereits frühphasig zu erheblichen Cash-Flow-Problemen bis hin zum Konkurs führen. Die Umsatzbeteiligungen an Climate Tech Start-ups verhindern so dringend notwendige Innovationen zur Erreichung der Klimaziele. Insgesamt erhöht sich durch die Gewinnerwartungen der Forschungseinrichtungen das Risiko der Gründer und Investoren und dies verstärkt sowohl die Problematik der Wachstumsfinanzierung als auch des Cash-Flows. Die Erfolgsaussichten der Ausgründungen sinken mangels klarer Rahmenbedingungen, sodass das Potenzial zahlloser, vielversprechender Klima-technologien derzeit nicht ausgeschöpft wird.

Die Gesetzgebung zum Umgang mit Patentrechten bei Ausgründungen ist für Forschungseinrichtungen nicht eindeutig geregelt. Dies führt zu Unklarheit in der Sache und aufwendigem Klärungsbedarf im Einzelfall. Es bringt Forschungseinrichtungen in eine Situation, in der sie sich aus Ungewissheit hinsichtlich der gesetzlichen Rahmenbedingungen dem eigenen Bestreben nach mehr Ausgründungen entgegenstellen. Konkret fordert das Beihilfe- bzw. Vergaberecht die finanzielle Kompensation der Forschungseinrichtungen bei Ausgründungen nach marktüblichen Bedingungen. Es fehlt jedoch eine klare Definition jener „marktüblichen Bedingungen“, zumal es keinen Vergleichsmarkt für Technologieausgründungen gibt. Dies verstärkt die Situation, dass es im internationalen Vergleich nur sehr wenige Ausgründungen aus deutschen Forschungseinrichtungen gibt. Unzählige innovative Klimatechnologien werden an den Forschungsinstituten über viele Jahre als wertlose Patente gehalten, anstatt zur dringend notwendigen, weltweiten Dekarbonisierung beizutragen. Politisches Ziel sollte es daher sein, die Beteiligungen der Forschungseinrichtungen klar zu regeln, sodass sich „Klimatechnologien made in Germany“ voll entfalten und zur Erreichung der Klimaziele national und global beitragen können.

Goldstandard für Ausgründungen schaffen

Da deutsche Forschungseinrichtungen weitestgehend steuerfinanziert sind, trägt der Staat eine ordnungspolitische Verantwortung. Der Bundesregierung wird empfohlen, die verschiedenen Zielstellungen der Beteiligten bei Ausgründungen zu ordnen und in Einklang zu bringen. Die Klimaziele sollten dabei klar übergeordnet sein, sodass verlässliche Rahmenbedingungen mit Fokus auf mehr Ausgründungen und Skalierung im Bereich Climate-Tech vor kurzfristigen Einnahmen stehen.

Beteiligung von Forschungseinrichtungen bei Ausgründungen beschränken

Nur so verfolgen alle Stakeholder eines Technologie-Start-ups dieselben Interessen: die Skalierung und Wachstum am Markt, ermöglicht durch mehrere Finanzierungsrunden. Bei einem erfolgreichen Wachstum können die Unternehmensanteile einen erheblichen Marktwert entwickeln, sodass die Forschungseinrichtungen wie auch die Gründer und Investoren zeitgleich eine Entlohnung für ihren Einsatz erhalten. Die Anteile sollten standardmäßig ohne Sonderklauseln „pari-pari“ gezeichnet werden, um insbesondere in der Frühphase Hochrisikoinvestitionen nicht zu gefährden. Die steuerfinanzierten Patentrechte sind dabei an das ausgegründete Unternehmen zu übertragen, da es sonst keine Investitionssicherheit gibt. Die Anteile der Forschungseinrichtungen sollten von einer qualifizierten und öffentlichen Beteiligungsgesellschaft treuhänderisch für die Forschungseinrichtungen gehalten werden. Einstandszahlungen und Patentmanagementkosten sind mit

der Unternehmensbeteiligung abgedeckt, da sie unabhängig vom Markterfolg einer Erfindung von den Forschungseinrichtungen erbracht werden und bereits steuerfinanziert sind.

Auf Umsatzbeteiligung und Lizenzgebühren sollte verzichtet werden

Dies gilt insbesondere, weil die Forschung oftmals und zum großen Teil aus Steuermitteln finanziert wurde. Durch Lizenzgebühren wird das dringend benötigte Kapital der jungen Unternehmungen empfindlich gekürzt. Dadurch erhöht sich das Risikoprofil von Climate Tech Start-ups erheblich und Fremdfinanzierungen werden blockiert. Die Skalierung von Klimatechnologien wird heute dadurch viel zu oft sogar verhindert. Vor allem bei jungen Technologie-Start-ups ist es zwingend notwendig, freies Kapital zu reinvestieren, um sich am Markt behaupten und bestehen zu können. Bei Klimatechnologien kommt erschwerend hinzu, dass fossile Konkurrenzprodukte häufig sehr günstig verfügbar sind. Da Umsatzbeteiligungen wie zusätzliche Kosten wirken und den Verkaufspreis nach oben treiben, reduzieren sie die Konkurrenzfähigkeit und das Wachstum der eigenen Ausgründungen.

04 Schlussfolgerung



Anhand von 20 vielversprechenden Technologien für Deutschland hat dieser Report gezeigt, dass viele der Lösungen, die wir zur Erreichung der Klimaneutralität benötigen, bereits entwickelt sind oder werden.

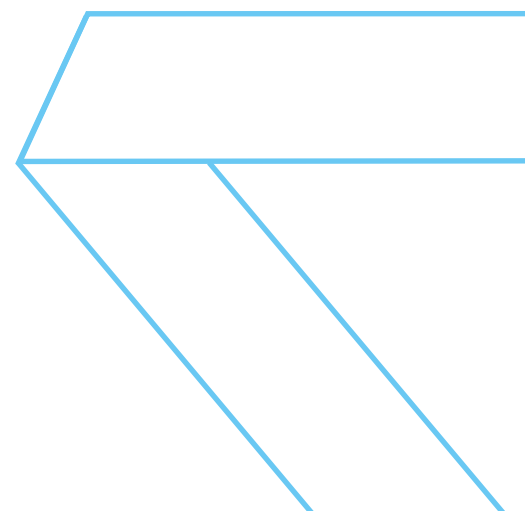
Um diese Technologien rechtzeitig im kommerziellen Maßstab verfügbar zu machen, muss eine Innovationspipeline aufgebaut werden, die Technologien in der Diffusionsphase genauso unterstützt wie solche in der Skalierungs- und Erforschungsphase. Dazu bedarf es einer holistischen Technologiepolitik, die einen geeigneten regulatorischen Rahmen schafft, Förderinstrumente einsetzt und die notwendige Infrastruktur bereitstellt.

Dabei bilden erneuerbare Energien die Grundlage. Sie müssen in der kommenden Legislatur schnell und konsequent in allen Sektoren und Anwendungsbereichen ausgebaut werden.

Eine Reform der Steuern und Abgaben auf Strom und Energieträger, die kurzfristige Senkung der EEG-Umlage auf null, klare Preissignale durch einen hohen CO₂-Preis, Carbon Contracts for Difference, verpflichtende Anwendungsquoten sowie Innovationsausschreibungen sind die Instrumente, die zum Einsatz gebracht werden sollten, um Klimainnovationen in allen vier Verbrauchssektoren zu befördern. Zusätzlich sind der Zugang zu großen Mengen erneuerbaren Stroms und die Schaffung einer Wasserstoffinfrastruktur Voraussetzung für die Verbreitung vieler innovativer Technologien.

Über diese klima- und energiepolitischen Mechanismen hinaus müssen auch im Bereich der Innovationspolitik Anpassungen erfolgen, um aus Klimainnovationen schnellstens tragfähige Geschäftsmodelle entwickeln zu können. Die Verfügbarmachung von Wagniskapital für Hardware-Start-ups gehört dazu genauso wie eine Anpassung öffentlicher Vergabeverfahren an die Klimaziele. Außerdem sollten Ausgründungen aus Forschungseinrichtungen angereizt werden, um im wissenschaftlichen Kontext entwickelte Technologien kommerziell verfügbar zu machen.

Die kommende Bundesregierung hat in der neuen Legislaturperiode die Chance, die Weichen in diesen Bereichen zu stellen. Dazu müssen in vielen Fällen keine neuen Maßnahmen erdacht, sondern bestehende Programme gezielt weiterentwickelt werden. Das von der Europäischen Kommission vorgeschlagene Fit-for-55-Paket beinhaltet eine ganze Reihe Elemente, die aktiv durch die Bundesregierung im Sinne der Förderung von Klimainnovationen gestaltet werden sollten. So kann Deutschland seinen klimapolitischen Verpflichtungen gerecht werden und gleichzeitig seine technologische Vorreiterrolle in Europa und der Welt behaupten.



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1

Ursprung der jährlichen Emissionseinsparung 2030 und 2050 (relativ zu 2020) 7

Abbildung 2

Marktentwicklung zwischen 2021 und 2045, nach Entwicklungsstatus 8

Abbildung 3

Klimatechnologien in der Diffusionsphase 9

Abbildung 4

Auswahlprozess der 20 Innovationen 11

Abbildung 5

Technologie-Reifegrad 13

Abbildung 6

Policy Impact Heatmap 63

Abbildung 7

Politische Roadmap 66–67

Abbildung 8

Valley of Death bei der Finanzierung von Climate Tech Start-ups 78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1

Innovation Round Tables der Tech for Net Zero Allianz 10

Literaturverzeichnis

acatech. (2018). *CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie*.

Agora Energiewende & Guidehouse. (2021). *Making renewable hydrogen cost-competitive*.

Agora Energiewende & Wuppertal Institut. (2020). *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*.

Agora Verkehrswende. (2021). *Batteriestandort auf Klimakurs: Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland*.

Schneller, A., Frank, L. & Kahlenborn, W. (2018). *Strategiepapier: Wärmenetze 4.0 im Kontext der Wärmewende*.

Arrowsmith, G. (2021). Pushing Innovation measures into the EU's support for renewables. *European Energy Innovation*.

Becker Büttner Held. (2021). *BBH Blog: Die EnWG-Reform – Mehr Schatten als Licht für Wasserstoffnetze*.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2017). *Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr: Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr (Antriebe und Kraftstoffe)*.

Breakthrough Energy. (2021). *Climate Policy Playbook*.

Bukold, S. (2020). *Kurzstudie Blauer Wasserstoff: Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades*.

Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2021). *R-Beton | Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation*.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2021a). *Eckpunkte für eine Förderrichtlinie Klimaschutzverträge zur Umsetzung des Pilotprogramms „Carbon Contracts for Difference“*. <https://www.bmu.de/download/eckpunkte-pilotprogramm-fuer-klimaschutz-vertraege>

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

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit & Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2010). *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2020). *Nationales Reformprogramm 2020 – Die Nationale Wasserstoffstrategie*.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2021a). *Batterien made in Germany – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität*.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2021b). *Gesetzeskarte für das Energieversorgungssystem*.

Bundesumweltamt. (2019). *Factsheet: Beton*.

Capgemini invent. (2020). Fit for Net-Zero: 55 Tech Quests to accelerate Europe's recovery and pave the way to climate neutrality.

Climate Change Centre Austria. (2021). *Factsheet #32: Carbon Capture and Utilization*.

Vallentin, D. & Viebahn, P. (2009). *Ökonomische Chancen für die deutsche Industrie resultierend aus einer weltweiten Verbreitung von CSP-Technologien*. Wuppertal Institut.

- DCSP. (2020). *Positionspapier: Grüner Dampf und grüne Prozesswärme – produziert mit solarthermischen Anlagen in Deutschland*.
- DCSP. (2021). *Grüne Wärme mit konzentrierender Solarthermie: CSP-Technologie mit hohem Potenzial für die Wärmewende in Deutschland*.
- DCSP. (2021b). *Concentrated Solar Power CSP – Solare Energie rund um die Uhr*. Berlin.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2017). *Innovationsreport Systemdienstleistungen*.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2019). *Stellungnahme der Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea) zum Entwurf des „Gesetzes zur Vereinheitlichung des Energiesparrechts für Gebäude“*.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2020a). *dena-POSITIONSPAPIER: Begrenzte Umlage der BEHG-Kosten – Investitionsanreize stärken*. Berlin.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2020b). *dena-Stellungnahme – EEG-Novelle 2021: innovationsfördernd, marktnah, europäisch, entbürokratisierend ausgestalten*.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2020c). *Klimaneutralität: Ein Konzept mit weitreichenden Implikationen*. Berlin.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021a). *dena-Gebäudereport 2021: Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudereich*.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021b). *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*. Berlin.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021c). *Investing in Net Zero – Assessing Germany’s venture capital potential in Climate-Tech until 2030*. Berlin. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (dena).
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021d). *Tech for Net Zero Allianz: Impuls 2: Mehr Ausgründungen von Climate Tech Start-ups aus deutschen Forschungseinrichtungen*. Berlin.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2021e). *Tech for Net Zero Allianz: Impuls 1: Finanzierung von Climate Tech Start-ups – Thesenpapier des 1. Roundtables*. Berlin.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) & Navigant. (2020). *Synergien nutzen: Impulse für die weitere Ausgestaltung des Konjunkturprogramms der Bundesregierung*.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. (2013). *Impact of Renewable Energy Policy and Use on Innovation: A Literature Review*. Berlin. DIW Berlin.
- Die Bundesregierung. (2021). *PtL-Roadmap: Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland*.
- Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt. (2021). *Solarthermische Kraftwerke: Wärme, Strom und Brennstoffe aus konzentrierter Sonnenenergie*.
- Dröge, S. & Stiftung Wissenschaft und Politik. (2021). *Ein CO₂-Grenzausgleich für den Green Deal der EU*. <https://doi.org/10.18449/2021S09>
- DSTTP. (2021). *Positionspapier: Solarthermie als Basistechnologie für die zukunftsfähige Energieversorgung Deutschlands*.
- Energieagentur.NRW. (2020). *Handlungsempfehlungen zur Entfaltung des Potenzials von Wärmespeichern zur Umsetzung der Energiewende*.
- Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (2021). *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Zwischenergebnisse DIMENSION*.
- Europäische Kommission. (2021). *CO₂-Emissionsnormen für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge*. Europäische Kommission. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission_de
- Fraunhofer ISE & Fraunhofer ISI. (2019). *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland*.
- Fraunhofer ISE. (2021). *KURZGUTACHTENS ZUM THEMA INNOVATIVE ENERGIETECHNOLOGIEN: Im Rahmen der dena Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*.
- Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML & PTV Transport Consult GmbH. (2017). *Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“*.
- Fraunhofer IWKS. (2021). *Batterierecycling in der Elektromobilität*.
- Freundendahl, D. (2016). *Carbon Capture and Usage*.
- Frontier Economics. (2020). *Ein regulatorischer Rahmen für Power-to-Hydrogen in Deutschland und den Niederlanden*.
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. (2020). *Fuel Cells Hydrogen Trucks: Heavy-Duty’s High Performance Green Solution*.
- Gambhir, A. & Tavoni, M. (2019). Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth*, 1(4), 405–409. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006>
- geea. (2021). *Energiewende und Klimaschutz im Gebäudesektor: Kernthemen für die kommende Legislaturperiode*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (dena).
- Göhler, G., Schmaus, C. & Dr. Klingler, A-L. (2019). *Netzbelastungen und Netzdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge | Meta-studie*. Universität Stuttgart.
- Global Alliance Powerfuels. (2021). *Set ambitious EU targets for synthetic jet fuel while preserving a level playing field for airlines*. <https://www.powerfuels.org/newsroom/news/set-ambitious-eu-targets-for-synthetic-jet-fuel/>
- Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie. (2021). *re-comine*. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). <https://www.recomine.net/de/projekt/startprojekt-transfer.html>
- Institute for Advanced Sustainability Studies. (2015). *CO₂-Recycling – Option für Politik und Gesellschaft?*
- International Energy Agency. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*.
- IEA, International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector*.
- Imperial College London. (2021). *THE DRIVE TOWARDS LOW-CARBON GRID | Unlocking the value of vehicle-to-grid fleets in Great Britain*.
- Intelligent Energy Europe. (2018). *Hindernisse und Herausforderungen für Energiespeicher unter den derzeitigen politischen, marktregulatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen*.
- Krüger, D. (2020). *Konzentrierende Solarthermie für Wärme in Deutschland*. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR).

- Lübbers & Sebastian. (2021). *Technische CO₂-Senken: Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂-Negativemissions-technologien*. Kurzgutachten im Rahmen der dena Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut.
- McKinsey & Company. (2020). *Net Zero Europe: Decarbonization pathways and socioeconomic implications*.
- Maaß, C., Dr. Sandrock, M., Fuß, G., Möhring, P., Dr. Purkus, A. & Dr. Strodel, N. (2020). *Perspektive der Fernwärme: Maßnahmenprogramm 2030*.
- NOW GmbH. (2019). *Strombasierte Kraftstoffe für Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt*.
- Öko Institut & Hamburg Institut. (2021). *Agenda Wärmewende 2021*.
- Viebahn, P., Scholz, A., Zelt, O. (2018). *Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture: Ergebnis einer multidimensionalen Analyse*.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut. (2020). *Studie: Klimaneutrales Deutschland*.
- Seitz, A. & Zunft, S. (2018). *Technologiebericht 3.3b Energiespeicher innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR).
- Stiftung Umweltenergierecht (2021). *Das Fit für 55-Paket: Updates und Neufassung der Energieeffizienz-Richtlinie*.
- Umweltbundesamt. (2010). *Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs*.
- Umweltbundesamt. (2021). *Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren*.
- vdz. (2020). *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien*.
- Viebahn, P., Scholz, A. & Zelt, O. (2019). The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program—Results of a Multi-Dimensional Analysis. *Energies*, 12(18), 3443. <https://doi.org/10.3390/en12183443>
- Wuppertal Institut. *Ökonomische Chancen der deutschen Industrie resultierend aus einer weltweiten Verbreitung von CSP (Concentrated Solar Power) -Technologien* (Nr. 1). <https://doi.org/10.1007/s12398-010-0034-9>
- WWF. (2019). *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie: Hintergrund und Handlungsoptionen*.

Appendix

Treibhausgasneutralität, Klimaneutralität, oder CO₂-Neutralität⁴³?

In der öffentlichen Debatte ist häufig die Unterscheidung zwischen den Begriffen Klima-, Treibhausgas- (THG) und CO₂-Neutralität nicht gegeben.

Klimaneutralität ist die allumfassendste Form, in deren Definition die globale Durchschnittstemperatur unverändert bleibt, da sich hier sämtliche anthropogenen und natürlichen temperaturbeeinflussenden Faktoren ausgleichen. Sie ist klimapolitisch am anspruchsvollsten und im engeren Sinne womöglich unerreichbar. Der Grund dafür ist, dass jede Veränderung der Luftverschmutzung (z. B. durch Ruß, SO₂ oder Feinstaub) und der Wolkenbedeckung (Höhe und Art der Wolken) bzw. der Albedo (Farbe) der Erdoberfläche wärmend oder kühlend auf die Atmosphäre wirkt. Gewisse Effekte können möglicherweise untereinander bzw. durch zusätzliche Negativemissionen ausgeglichen werden⁴⁴, aber eine Feinsteuerung erscheint gegenwärtig nicht realisierbar.

Diese Studie stellt daher Innovationen dar, die einen Beitrag zur Treibhausgasneutralität leisten können. Treibhausgasneutralität beschreibt den Zustand, in dem eine Balance aus Senken und Quellen aller im Kyoto-Protokoll und Doha Amendment definierten Treibhausgasen⁴⁵ vorliegt. Da es bisher für Nicht-CO₂-THG kaum Negativemissionstechnologien⁴⁶ gibt, erfordert das Erreichen der Treibhausgasneutralität ein Übererfüllen in Bezug auf CO₂ (also eine netto-negative CO₂-Emissionsbilanz).

Die CO₂-Neutralität ist dementsprechend dann erreicht, wenn alle verbliebenen CO₂-Quellen durch Senken ausgeglichen sind. Bei Erreichen einer globalen CO₂-Neutralität schreitet die Erwärmung des Klimas allerdings fort (auch wenn deutlich verlangsamt), da ja weiterhin andere Treibhausgase emittiert würden. Daher kann die CO₂-Neutralität höchstens als Übergangsziel auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität betrachtet werden.

Methodik zur Berechnung des THG-Vermeidungspotenzials

Das Ziel des Berichts ist es, die Rolle technologischer Innovationen bei der Erreichung der Treibhausgasneutralität bis 2045 zu illustrieren. Dazu wird in diesem Bericht das jährliche Treibhausgasemissionsminderungspotenzial von 20 Klimainnovationen angegeben. Die angegebenen Zahlen sollten hierbei als Größenordnung und nicht als genaue Prognose verstanden werden. Da der betrachtete Zeitraum bis zum Ziel der Klimaneutralität zum Zeitpunkt des Verfassens 24 Jahre beträgt, unterliegen die Prognosen enormen Unsicherheiten und müssen sich zwangsläufig Schätzungen und Annahmen bedienen.

Die Berechnung der CO₂-Äq-Emissionseinsparungen beruht auf einer Abschätzung der Verbreitung der jeweiligen Innovation und der Kohlenstoffintensität bestimmter Energieformen (Strom, Wärme, Wasserstoff, etc.) und Prozesse. Quellen für diese Eckdaten sind dena-Studien, öffentlich zugängliche Papiere renommierter Institutionen, sowie die Aussagen der Experten im Rahmen der durchgeführten Interviews. Alle verwendeten Quellen sind im Literaturverzeichnis referenziert.

43 Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020c.

44 Der IPCC schätzt die kühlende Wirkung durch Aerosole seit Beginn der Industrialisierung auf rund -0,9 W/m², was dem gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb in Höhe von 2,3 W/m² gegenübersteht (IPCC, 2014, S. 44). Aufgrund der Transformation der Energiesysteme und der Transportinfrastruktur ist zu erwarten, dass die Netto-Kühlungswirkung von Aerosolen in den nächsten Jahrzehnten abnimmt. Auch ein positiver Strahlungsantrieb ist denkbar (z. B. indem sich Schwefelemissionen stark reduzieren und Rußemissionen verbleiben). Eine solche Erwärmung müsste für die Klimaneutralität zusätzlich kompensiert werden.

45 Hierzu zählen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃) (UNFCCC, 2012).

46 Erste Vorschläge für die Entfernung von Methan aus der Umgebungsluft wurden in der Wissenschaft andiskutiert, aber bisher nur marginal beachtet.

TECH FOR NET ZERO ALLIANZ

ROLLEN DER PROJEKTPARTNER

Breakthrough Energy finanziert das Projekt Tech for Net Zero vollständig und unterstützt durch sein Netzwerk die Ansprache von Experten und Expertinnen und bei der Kommunikation rund um das Projekt über seine eigenen Kommunikationskanäle. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) ist Projektpartner von Breakthrough Energy in Deutschland und übernimmt Konzeption und Umsetzung des Projekts. So ist die Deutsche Energie-Agentur (dena) für Ansprache und Auswahl der Mitglieder der Tech for Net Zero Allianz, die Organisation der Innovation Round Tables und die redaktionelle Arbeit an Publikationen zuständig.

Die Mitglieder der Tech for Net Zero Allianz vernetzen sich im Rahmen des Projekts untereinander. Sie bringen inhaltliche Impulse für die Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen für Innovationen in der Energiewende ein. Dazu haben sie die Möglichkeit, an den Innovation Round Tables teilzunehmen, in thematischen Arbeitsgruppen mitzuarbeiten und im Review-Prozess von Publikationen ihren fachlichen Input anzubringen.

1.5° VENTURES
Climate Tech Venture Builder

Breakthrough Energy

CAPHENIA
Turning CO₂ into fuel

minus CO₂
by carbonauten

climeworks

dena
Deutsche Energie-Agentur

epico
KlimaInnovation

extantia
The Net-Zero Circle

FCA
Future
Cleantech
Architects

hydrogenious
LOHC TECHNOLOGIES

IBB Ventures

IKEM

IC
INERATEC

eit InnoEnergy
Funded by the
European Union

KRAFT
BLOCK

MOLABO

MVP

planet
VENTURES

Strategic Business
Innovator

solytic

SPRIN-D
BUNDESAGENTUR
FÜR SPRUNGINNOVATIONEN

sunfire®

THE MOBILITY HOUSE

WORLD FUND

UVC UNTERNEHMERTUM
VENTURE CAPITAL

WAM
Wermuth Asset Management

powercloud

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699
E-Mail: info@dena.de
www.techfornetzero.de
www.dena.de

Autoren:

Tibor Fischer
Joscha Müller
Antonia Munz
Moritz Robers

Bildnachweis:

Titel, S. 3, S. 5, S. 6, S. 8, S. 10, S. 12, S. 13, S. 14, S. 16, S. 17, S. 18, S. 19, S. 20, S. 21, S. 22, S. 24, S. 25, S. 26, S. 28, S. 29, S. 30, S. 31, S. 32, S. 33, S. 34, S. 35, S. 36, S. 37, S. 38, S. 39, S. 40, S. 41, S. 42, S. 43, S. 44, S. 45, S. 46, S. 48, S. 50, S. 51, S. 52, S. 53, S. 54, S. 55, S. 56, S. 57, S. 58, S. 59, S. 60, S. 61, S. 64, S. 65, S. 66, S. 67, S. 69, S. 70, S. 72, S. 73, S. 75, S. 76, S. 81, S. 82, 89 – shutterstock/StarLine; S. 4 – deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)/photothek; S. 6, 82 – shutterstock/Mark Nazh, S. 6, 14, 82 – shutterstock/Soonthorn Wongsaita; S. 6, 52, 82 – shutterstock/Kobets Dmitry; S. 9 – shutterstock/Roman Babakin, shutterstock/asharkyu, shutterstock/ zhu difeng; S. 16 – AdobeStock/malp; S. 18 – shutterstock/Sergii Chernov; S. 20 – GettyImages/IP Galanternik D.U.; S. 22 – GettyImages/Westend 61; S. 24 – BayWa r.e.; S. 26 – shutterstock/ssuaphotos, shutterstock/William Perugini; S. 28 – GettyImages/Jaromir Chalabala EyeEm; S. 30 – shutterstock/Scharfsinn; S. 32 – shutterstock/MZeta; S. 34 – iLint A Alstom; S. 36 – shutterstock/Audio und Werbung; S. 38 – The Mobility House; S. 40 – shutterstock/Elnur, shutterstock/ABCDstock, S. 42 – shutterstock/Bannafarsai Stock; S. 44 – shutterstock/Studio Harmony; S. 48 – shutterstock/GE_4530, shutterstock/Phonlamai Photo; S. 50 – GettyImages/sdlgzps; S. 54 – shutterstock/Vladimir Nenezic; S. 56 – shutterstock/manine99; S. 58 – GettyImages/prognone; S. 60 – Climeworks; S. 64 – shutterstock/Lukas Uher

Stand:

10/2021

Bitte zitieren als:

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2021)
„Tech for Net Zero Allianz: Klimaneutralität 2045 – Neue Technologien für Deutschland“

Alle Rechte sind vorbehalten. Dieses Papier gibt die mehrheitliche Meinung der an Tech for Net Zero beteiligten Unternehmen wieder. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der Deutsche Energie-Agentur (dena). Sämtliche Inhalte wurden mit größtmöglicher Sorgfalt und nach bestem Wissen erstellt. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) übernimmt keine Gewähr für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit der bereitgestellten Informationen. Für Schäden materieller oder immaterieller Art, die durch Nutzung oder Nichtnutzung der dargebotenen Informationen unmittelbar oder mittelbar verursacht werden, haftet die Deutsche Energie-Agentur (dena) nicht, sofern ihr nicht nachweislich vorsätzliches oder grob fahrlässiges Verschulden zur Last gelegt werden kann.

