



Technologietlas Nachhaltigkeit

Familienunternehmen als Entwickler und Anwender
von Umwelttechnologien

2. Auflage



Impressum

Herausgeber:



Stiftung Familienunternehmen

Prinzregentenstraße 50

80538 München

Telefon: +49 (0) 89 / 12 76 400 02

Telefax: +49 (0) 89 / 12 76 400 09

E-Mail: info@familienunternehmen.de

www.familienunternehmen.de

Erstellt von:



Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Osterfelder Straße 3

46047 Oberhausen

Dr.-Ing. Markus Hiebel

Dr.-Ing. Ilka Gehrke

Lina Sommer

Annette Somborn

Ankur Gaikwad

Luca Weber

Prof. Dr.-Ing. Görge Deerberg

© Stiftung Familienunternehmen, München 2023

Titelbild: Chones | shutterstock (Retusche webmakers)

Abdruck und Auszug mit Quellenangabe

ISBN: 978-3-948850-33-3

Zitat (Vollbeleg):

Zitat (Vollbeleg): Stiftung Familienunternehmen (Hrsg.): Technologieatlas Nachhaltigkeit – Familienunternehmen als Entwickler und Anwender von Umwelttechnologien, 2. Auflage, erstellt vom Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, München, 2023, www.familienunternehmen.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.....	V
I. Übergreifende Ergebnisse.....	V
II. Ergebnisse zu einzelnen Umwelttechnologien.....	V
A. Motivation, Ziel und Vorgehensweise der Studie.....	1
I. Motivation.....	1
II. Zielstellung.....	2
III. Vorgehensweise.....	2
B. Definitionen Umwelttechnik und Familienunternehmen.....	5
I. Definitionen Umwelttechnik.....	5
II. Definition Umwelttechnik für diese Studie.....	6
III. Definition Familienunternehmen.....	8
IV. Recherche nach Umwelttechnologien.....	9
V. Methodik zur Auswahl der Umwelttechnologien.....	9
VI. Ausgewählte Technologien.....	11
VII. Methodik zur Erstellung der Karten für die ausgewählten Umwelttechnologien.....	13
C. Interviews mit Expert*innen aus Familienunternehmen.....	15
I. Vorgehen.....	15
II. Interviewleitfaden.....	15
D. Technologiesteckbriefe.....	17
I. Photovoltaik.....	23
II. Windkraft.....	35
III. Bioenergie (Biogas).....	45
IV. Tiefengeothermie.....	57
V. Batterien.....	67
VI. Wasserstofftechnologie.....	79
VII. E-Fuels.....	95
VIII. Biokunststoffe.....	105

IX. Recycling	113
X. Wärmedämmung.....	125
XI. Wärmepumpen	137
XII. Luftreinhaltung	147
XIII. Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung	157
XIV. Biotechnologie	167
XV. Digitalisierung	175
E. Diskussion und Fazit.....	187
I. Vergleich mit der Vorgängerstudie	187
II. Technologiesteckbriefe	187
III. Nachhaltigkeit.....	192
Tabellenverzeichnis	195
Abbildungsverzeichnis	197
Literaturverzeichnis	199

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

I. Übergreifende Ergebnisse

- Familienunternehmen übernehmen in der Entwicklung und Anwendung der wichtigsten Umwelttechnologien eine bedeutende Rolle. Das gilt für die untersuchten Bereiche Photovoltaik, Windkraft, Bioenergie (Biogas), Tiefengeothermie, Batterien, Wasserstofftechnologien, E-Fuels, Biokunststoffe, Recycling, Wärmedämmung, Wärmepumpen, Luftreinhaltung, Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, Biotechnologie und Digitalisierung.
- In den untersuchten Umwelttechnologien sind fast 47.000 Familienunternehmen tätig.
- Die sichere Energieversorgung, -speicherung und -verteilung mit (erneuerbaren) Energien ist entscheidend für die Anwendung und Entwicklung von Umwelttechnologien und damit für die Zukunftsfähigkeit der deutschen Industrie.
- Die Wärmewende, die Mobilitätswende und die Defossilierung der Industrie rücken neben dem Stromsektor zunehmend in den Fokus.
- Der Digitalisierung kommt eine Schlüsselrolle bei den Umwelttechnologien zu. Der Schutz von Daten und Netzwerken vor unerwünschten Zugriffen von außen muss aktiv verbessert werden.
- Recycling wird zunehmend als nur eines von vielen Themen der Circular Economy betrachtet. Geschäftsmodelle der Kreislaufwirtschaft bieten neue Chancen.
- Der Fachkräftemangel bremst die Entwicklung und Anwendung von Umwelttechnologien.

II. Ergebnisse zu einzelnen Umwelttechnologien

Die Autor*innen der vorliegenden Studie präsentieren in diesem Kapitel einige Schlaglichter zu wichtigen Fakten, Herausforderungen oder innovativen Forschungsideen und Trends.

Zukunftsweisende Photovoltaik-Anlagen

Die Anwendungsgebiete für Photovoltaik-Anlagen nehmen rasant zu. Lärmschutzwände, Bahnschwellen, Äcker oder künstliche Gewässer – all das kann in Zukunft als Freifläche für die erweiterte Nutzung von Solarenergie eingesetzt werden. Aufgrund der oftmals aufwendigeren Installation weist die integrierte Photovoltaik beispielsweise in Form von Fassaden- oder In-Dach-Modulen heute noch höhere Kosten auf als die konventionelle wie zum Beispiel auf Dachflächen. Es besteht hier ein weiterhin hoher Handlungsbedarf seitens der Forschungsförderung, die in 2021 bereits 487 laufende Vorhaben in der Photovoltaik-Forschung mit 88,39 Millionen Euro unterstützte.¹

1 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022f, 11 ff.

Windenergie ist Spitzenreiter

Zum zweiten Mal in Folge lieferte die Windenergie 2022 in Deutschland mit rund 120 Terawattstunden Ökostrom den größten Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Deutschland hat im europäischen Vergleich die größte Windenergieleistung installiert – und das trotz der noch immer langwierigen Genehmigungsverfahren, die durch das Wind-an-Land-Gesetz ab Februar 2023 aber verkürzt werden sollen.²

Biogas besitzt großes Ausbaupotenzial

Ein Blick nach Dänemark zeigt, dass Biogas und Biomethan wesentliche Bausteine für die Energiewende sein können. In seiner weltweiten Vorreiterrolle möchte Dänemark bis Anfang 2030 den kompletten Gasbedarf über Biogas abdecken. Möglich machen das unter anderem die infrastrukturellen Voraussetzungen mit dem Schwerpunkt auf Großanlagen – anders als in Deutschland, wo vor allem auf kleinere, dezentrale Biogasreaktoren gesetzt wird, die zumeist von Familienunternehmen betrieben werden.

Erdwärme – eine schlummernde Ressource mit riesigem Potenzial

Laut Helmholtz-Gemeinschaft könnten bis 2045 25 Prozent des deutschen Wärmebedarfs allein mit der Technologie der Tiefengeothermie gedeckt werden.^{3,4} Generell zählen Technologien, die auf Erdwärme setzen, also auch die Wärmepumpen, zu den Schlüsseltechnologien für die Wärmewende und bieten Familienunternehmen dieser Branche enorme Wachstumspotenziale, sofern der Fachkräftemangel überwunden werden kann.

Verlässliches Marktwachstum bei Lithium-Ionen-Batterien

Die zunehmende Akzeptanz von Elektrofahrzeugen, die Verbreitung von IKT-Anwendungen und der ansteigende Bedarf an Speichertechnologien für die Stromversorgung sind die wichtigsten Wachstumstreiber auf dem Batteriemarkt. Durch den Fokus auf eine *nachhaltige* Batteriezellfertigung können Deutschland und die Europäische Union (EU) im internationalen Vergleich Wettbewerbsvorteile generieren. Dazu zählt auch die Etablierung einer Batteriekreislaufwirtschaft, für die ein verbindlicher Rechtsrahmen grundlegend ist, der aber noch nicht existiert.

10 Gigawatt Elektrolysekapazität 2030 in Deutschland

Die Bundesregierung strebt eine führende Rolle in der Wasserstofftechnologie in Europa an und hat ehrgeizige Pläne: Ausbau der Infrastruktur, europäische und internationale Klima- und

2 Die Bundesregierung 2023b.

3 Dürfeld 2022.

4 Wermke 2022.

Energiepartnerschaften für klimaneutralen Wasserstoff und Quoten für grünen Wasserstoff in der öffentlichen Beschaffung. Mehr als 10 Milliarden Euro Förderung sollen in grundlegende und angewandte Forschung, Reallabore, Investitionen in Technologien und Markthochlauf fließen.

Wasserstoff direkt von der Nord- und Ostsee – Vision oder Wirklichkeit?

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) investiert 100 Millionen Euro in ein Forschungsprojekt (H₂Mare)⁵ zur Offshore-Erzeugung von grünem Wasserstoff und anderen Power-to-X-Produkten.

Das emissionsfreie Auto der Zukunft ...

... scheint dank Elektrifizierung und Wasserstoffnutzung Realität zu werden. Was bleibt, sind aber die Emissionen durch Reifen- und Bremsabrieb (Nichtabgasemissionen). Unternehmen der Luftreinhaltung forschen an Filtersystemen, die Reifen- und Bremsabrieb direkt am Fahrzeug abfangen. Die Rolle von E-Fuels in der Mobilitätswende wird auf europäischer und nationaler Ebene heiß diskutiert. Das Aus für Verbrennungsmotoren ab 2035 scheint aktuell erst mal nicht vollumfänglich durchgesetzt worden zu sein. Doch die politischen Weichen sind Richtung batteriebetriebener Fahrzeuge gestellt, sodass Familienunternehmen, die im Bereich E-Fuels tätig sind, in eine eher ungewisse Zukunft blicken.

Massenbilanzertifizierung als Enabler für Biokunststoffe und Rezyklate

Massenbilanzierung ist eine Methode, bei der zertifizierte und nicht zertifizierte Rohstoffe bei Transport und Herstellungsprozess vermischt werden dürfen. Recycelte oder biobasierte Rohstoffe werden am Anfang in die chemische Produktion gegeben und rechnerisch den Endprodukten zugeordnet, ohne dass ein zertifiziertes Produkt ausschließlich aus diesen Materialien besteht. Fossile Rohstoffe werden eingespart, während Produktqualität und -eigenschaften gleich bleiben. Da die Beschaffung der Rohstoffe, Verarbeitung und Formulierungen der Produkte zum Teil unverändert bleiben können, erhöht der Massenbilanzansatz die Attraktivität von Biokunststoffen bei potenziellen Anwendern erheblich.

Kreislaufwirtschaft als Schlüssel zur Rohstoffversorgung

Lieferkettenprobleme und die Umweltbelastungen durch die Auswirkungen der weltweiten Rohstoffförderung können durch eine Kreislaufführung von Ressourcen reduziert werden. Damit das gelingt, müssen Produkte entsprechend gestaltet werden (langlebig, modular, reparierbar, updatefähig und so weiter).

5 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2021a.

Recycling und Wiederverwertung von Dämmmaterialien stärken

Der hohe Sanierungsbedarf von Gebäuden fordert umweltfreundliche Dämm Lösungen. Gleichzeitig fallen in Zukunft große Mengen an zurückgebauten Dämmstoffen an, die als Recyclingmaterial wiederverwendet werden sollen. Verfahren für stoffliches Recycling liegen derzeit jedoch nur in Demonstrationsanlagen in kleinerem Maßstab vor. Auch bei der Nutzung von beispielsweise mineralischen Abfällen als Ersatzbaustoffe fehlen rechtliche Regularien, was deren Einsatz in der Praxis erschwert.

Wärmepumpen ersetzen immer mehr herkömmliche Heizungsanlagen

Derzeit nutzen bereits mehr als 1,2 Million Kunden in Deutschland Wärmepumpen. Pro Jahr werden rund 230.000 neue Anlagen installiert. Die Branche fordert spürbare Anreize zum Beispiel über günstige Strompreise. Steuerentlastungen für Erdgas und das Aussetzen des CO₂-Preises hält sie für kontraproduktiv.⁶

Sanierungsraten von Gebäuden weiter zu niedrig

Zur Senkung des Energiebedarfs von Gebäuden muss die Sanierungsrate von derzeit einem Prozent pro Jahr deutlich erhöht werden. Hier müssen entsprechende Anreize geschaffen werden. Zum Gelingen der Wärmewende und im Hinblick auf die aktuelle Gaskrise ist ein Wechsel von fossilen Heizsystemen zum Beispiel zu Wärmepumpen und besseren Wärmedämmsystemen notwendig.⁷

Paradigmenwechsel in der Luftqualitätsregulierung

Die Gesetzgebung ist nach wie vor der zentrale Treiber für den Markt der Luftreinhaltung. Allerdings fehlt der Anreiz, den einmal erreichten Emissionsgrenzwert durch zusätzliche Luftreinhaltemaßnahmen noch weiter zu unterschreiten, obwohl es aus gesundheitlicher Sicht möglicherweise wünschenswert wäre, wie zum Beispiel beim Feinstaub. Die Weltgesundheitsorganisation schlägt stattdessen eine Kombination fester Grenzwerte mit einer kontinuierlichen Senkung der immer noch zu hohen durchschnittlichen Belastung vor.

Die Wasserwirtschaft wird digital

Der Klimakrise mit anhaltenden Dürreperioden und Starkregenereignissen setzt die Ab- und Wasserwirtschaft umfassende Digitalisierungskonzepte entgegen. Mit deren Hilfe können Daten über den Zustand von Gewässern zeitnah ausgewertet werden. Innovative Ansätze zum Regenwassermanagement nutzen Vorhersagemodelle für das Wetter, hydraulische Modelle

6 Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp) 2023.

7 Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) 2023.

und Echtzeitsensorik. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Verbraucherschutz und nukleare Sicherheit (BMUV) plant mit der Umsetzung der Nationalen Wasserstrategie von März 2023 daran zu arbeiten, einen naturnahen Wasserhaushalt wiederherzustellen und die Wasserwirtschaft klimaresilient zu machen.⁸

Bioinformatik als Schlüssel zum Erbgut

Mithilfe der Genomsequenzierung können multiresistente Keime besser eingedämmt werden. Die Bioinformatik vereinfacht die Datenverarbeitung und vertieft das Verständnis von Biomolekülen. Ob die Akzeptanz in der Bevölkerung für biotechnologisch hergestellte Produkte durch die Erfolge in der Corona-Krise dauerhaft steigt und wie sich in dem internationalen Wettbewerbsumfeld die Gesetzeslage entwickelt, ist noch nicht absehbar, aber maßgeblich für die Attraktivität dieser Umwelttechnologie für deutsche Familienunternehmen.

Digitalisierung als Schlüssel bei den Umwelttechnologien

Die Digitalisierung spielt eine immer größere Rolle, um Umwelttechnologien voranzubringen. Messen, Steuern und Regeln von immer komplexeren Energiesystemen sind zentral für den Erfolg der Energiewende. Gleichzeitig sind neue Geschäftsmodelle der Circular Economy ohne Digitalisierung nicht denkbar; hier kann der geplante digitale Produktpass eine wichtige Rolle spielen. Die Sicherheit von Daten und Netzwerken muss gewährleistet sein.

8 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2023.

A. Motivation, Ziel und Vorgehensweise der Studie

I. Motivation

Weltweite zentrale ökologische Herausforderungen sind der steigende Ressourcenbedarf und die Überschreitung der Absorptionskapazität der Erde zum Beispiel für Treibhausgase. Planetare Grenzen werden erreicht und sogar überschritten, zum Beispiel bei den Phosphor- und Stickstoffströmen.⁹

Am 20. März 2023 präsentierte der Weltklimarat IPCC den neuen Synthesebericht.¹⁰ Nur durch einen schnellen Ausstieg aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas lässt sich die Erderhitzung möglicherweise noch auf zumindest 2 Grad Celsius begrenzen; das 1,5-Grad-Celsius-Ziel erscheint unerreichbar. Zum Teil setzen die Nationen auch auf Netto-Null-Strategien und auf Technologien, die der Atmosphäre wieder Kohlenstoffdioxid entziehen. Beim Verfehlen der Klimaziele werden allein für Deutschland Folgekosten von bis zu 900 Milliarden Euro bis zum Jahr 2050 erwartet.¹¹

Die Weltgemeinschaft stellt sich den Problemen: Es gibt neben den Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen, dem Green Deal der EU¹² und dem Klimaabkommen von Paris internationale Fortschritte, wie das Abkommen der Vereinten Nationen zum Schutz der Hochsee¹³ und das Übereinkommen zur biologischen Vielfalt.¹⁴

Zur Erreichung der nachhaltigen Entwicklung sind Suffizienz-, Effizienz- und Konsistenzstrategien wichtig. Bei den Effizienz- und Konsistenzstrategien spielen Umwelttechnologien eine zentrale Rolle. Effizienzsteigerungen sind zum Beispiel durch Wärmedämmungen zu erreichen. Konsistenzstrategien setzen auf erneuerbare Energien und Rohstoffe sowie auf die Kreislaufwirtschaft. Insgesamt ist eine deutliche Änderung bestehender Wirtschaftsmodelle nötig, um klimafreundlich zu leben und entsprechende Geschäftschancen aufzubauen.

Aber welche Umwelttechnologien sind zentral und wie können diese stärker in die Umsetzung kommen? Und welche Rolle spielen Familienunternehmen in diesem Kontext?

9 Universität Stockholm o.J.

10 The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2023.

11 Der Spiegel 2023.

12 Europäische Kommission 2019.

13 Tagesschau 2023.

14 WWF 2022.

II. Zielstellung

Im dem vorliegenden Technologieatlas werden

- der Stand ausgewählter Umwelttechnologien in Deutschland beschrieben,
- der Beitrag von Familienunternehmen zur Entwicklung und Anwendung dieser Technologien herausgearbeitet,
- Chancen und Herausforderungen identifiziert und
- Perspektiven für nachhaltige Entwicklungen vorgestellt.

III. Vorgehensweise

Die Autor*innen erarbeiteten zunächst ein Update der Definitionen von Umwelttechnologien als Basis für alle Aspekte in dieser Studie. In einer umfangreichen Recherche, die auf Unternehmensdatenbanken, Literatur und eigener Expertise basiert, wurden fünfzehn Umwelttechnologien ausgewählt. Für diese Technologien wurde die Anzahl der in dem Bereich tätigen Familienunternehmen abgeschätzt.

Folgende Technologiebereiche wurden untersucht: Photovoltaik, Windkraft, Bioenergie (Biogas), Tiefengeothermie, Batterien, Wasserstofftechnologien, E-Fuels, Biokunststoffe, Recycling, Wärmedämmung, Wärmepumpen, Luftreinhaltung, Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, Biotechnologie und Digitalisierung. Dabei wurden zum Teil Technologien aus der Vorgängerstudie¹⁵ fortgeschrieben, aber auch neue Technologien aufgenommen. Die Technologien Bioenergie (Biogas) und Tiefengeothermie ersetzen Smart Home und Leichtbau.

Zu diesen Technologien wurden Steckbriefe mit folgenden Inhalten erstellt:

- Technologiebezeichnung
- Wirkungsprinzip und/oder Definition
- Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung
- Märkte und Arbeitsplätze
- Beitrag von Familienunternehmen inklusive räumlicher Verortung in einer Karte
- Herausforderungen und Hemmnisse

15 Stiftung Familienunternehmen 2021b.

- Innovation und Zukunftsperspektiven sowie Exkurse zu aktuellen Themen
- Zusammenfassung

Die Studie und die Steckbriefe basieren auf einer intensiven Literaturrecherche und fünfzehn Interviews mit Expert*innen in den Familienunternehmen. Im Vergleich zur Vorgängerstudie wurden ausgewählte Steckbriefe um Exkurse und Karten zur räumlichen Darstellung der Anzahl der Familienunternehmen in größeren Postleitzahlengebieten erweitert.

B. Definitionen Umwelttechnik und Familienunternehmen

Um in der Studie ein einheitliches Begriffsverständnis zu gewährleisten, wurden die Definitionen von Umwelttechnik und Umwelttechnologie in der Literatur sowie in Online-Quellen recherchiert. Die Autor*innen verwenden für diese Studie den Begriff der Umwelttechnik synonym zum Begriff der Umwelttechnologie. Das folgende Kapitel enthält zunächst einzelne Verweise auf unterschiedliche Definitionen, um im Anschluss daran die dieser Studie zugrundeliegende Definition für Umwelttechnik abzuleiten.

I. Definitionen Umwelttechnik

Die verwendeten Definitionen zum Begriff der Umwelttechnik richten sich nach der Vorgängerstudie.¹⁶ Als Vorgabe dienen Definitionen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), des Umweltbundesamts (UBA), aus wissenschaftlicher Literatur und aus öffentlich zugänglichen Online-Quellen.

Aktualisierungen ergeben sich durch die Neuauflage der Studie „GreenTech made in Germany 2021 – Umwelttechnikatlas für Deutschland bei den Leitmärkten“. Innerhalb des aktuellen Umwelttechnik-Atlas sind sieben anstatt der vormals sechs GreenTech-Leitmärkte und ihre Markt volumina für das Jahr 2020 in Deutschland aufgeführt. Sie wurden um den Leitmarkt „Nachhaltige Agrar- und Forstwirtschaft“ ergänzt:

- Umweltfreundliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie: 40 Milliarden Euro
- Energieeffizienz: 117 Milliarden Euro
- Rohstoff- und Materialeffizienz: 78 Milliarden Euro
- Nachhaltige Mobilität: 91 Milliarden Euro
- Kreislaufwirtschaft: 24 Milliarden Euro
- Nachhaltige Wasserwirtschaft: 39 Milliarden Euro
- Nachhaltige Agrar- und Forstwirtschaft: 3 Milliarden Euro

Den Leitmärkten sind jeweils verschiedene Marktsegmente zugeordnet (siehe Tabelle 1). Den Marktsegmenten werden wiederum konkrete Technologielinien (Umwelttechniken) zugeordnet.¹⁷

¹⁶ Stiftung Familienunternehmen 2021b, S. 3 ff.

¹⁷ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021.

Tabelle 1: Die sieben Leitmärkte der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz sowie deren Marktsegmente¹⁸

Umweltfreundliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie	Energieeffizienz
<ul style="list-style-type: none"> ■ Erneuerbare Energien ■ Umweltschonende Nutzung fossiler Brennstoffe ■ Speichertechnologien ■ Effiziente Netze 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Energieeffiziente Produktionsverfahren ■ Energieeffizienz von Gebäuden ■ Energieeffizienz von Geräten ■ Branchenübergreifende Komponenten
Rohstoff- und Materialeffizienz	Nachhaltige Mobilität
<ul style="list-style-type: none"> ■ Materialeffiziente Produktionsverfahren ■ Branchenübergreifende Querschnittstechnologien ■ Nachwachsende Rohstoffe ■ Schutz von Umweltgütern ■ Klimaangepasste Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alternative Antriebstechnologien ■ Erneuerbare Kraftstoffe ■ Technologien zur Effizienzsteigerung ■ Verkehrsinfrastruktur und Verkehrssteuerung
Kreislaufwirtschaft	Nachhaltige Wasserwirtschaft
<ul style="list-style-type: none"> ■ Abfallsammlung, -transport und -trennung ■ Stoffliche Verwertung ■ Energetische Verwertung ■ Abfalldeponierung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wassergewinnung und -aufbereitung ■ Wassernetz ■ Abwasserreinigung ■ Abwasserverfahren ■ Effizienzsteigerung bei der Wassernutzung
Nachhaltige Agrar- und Forstwirtschaft	
<ul style="list-style-type: none"> ■ Smarte Agrar- und Forsttechnologien ■ Innovative Formen der Land- und Forstwirtschaft ■ Nachhaltiger Einsatz von Düngemitteln, Pflanzenschutz- und Futtermitteln 	

II. Definition Umwelttechnik für diese Studie

Aus den recherchierten Definitionen der Vorgängerstudie ging hervor, dass die Definitionen teils sehr allgemein formuliert sind und nicht auf spezifische Umwelttechniken eingehen. Im

¹⁸ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021.

Umwelttechnik-Atlas¹⁹ des BMUV und im Portal Cleaner Production Germany des UBA²⁰ werden hingegen viele konkrete Umwelttechnologien genannt.

Aus den verschiedenen Begriffsbestimmungen wird eine studienspezifische Definition erarbeitet, die sich an den wichtigsten Umweltthemen orientiert.

„Unter [...] **Umwelttechnik** [...] versteht man die technischen und technologischen Verfahren zum Schutz der Umwelt sowie zur Wiederherstellung bereits geschädigter Ökosysteme. [...]”²¹

Unter Umwelttechnik werden für diese Studie verstanden:

- Umweltfreundliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie (z. B. Photovoltaik, Solarthermie, Biogas, Windkraft, Erdwärme [Geothermie], Wasserstoff, Batterien)
- Energieeffizienz (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmedämmung)
- Nachhaltige Mobilität (z. B. Biogas, Wasserstoff, E-Fuels, Batterien)
- Rohstoff- und Materialeffizienz und Substitution (z. B. Biokunststoffe, Biotechnologie)
- Kreislaufwirtschaft (z. B. Abfallvermeidung, Sortierung, Recycling, Müllverbrennung, Deponietechnik)
- Verfahren zur Verminderung der Luftverschmutzung (Luftreinhaltung, z. B. Rauchgasentschwefelung, Feinstaub- und Virenfilter)
- Nachhaltige Wasserwirtschaft (z. B. Wasseraufbereitung, Abwasserbehandlung)
- Klimaanpassung (z. B. Hochwasserschutz, neue Anbausysteme)
- Biotechnologie (z. B. Bioinformatik, Tissue Engineering, Antikörpertechnologien, Stammzellentherapie)
- Nachhaltige Agrar- und Forstwirtschaft (z. B. Precision Farming, Gentechnik, Bewässerung, Bioraffinerie)

19 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021.

20 Umweltbundesamt (UBA) 2020e.

21 Wikipedia 2020.

Als umwelttechnikübergreifende Technologien werden verstanden:

- Digitalisierung (z. B. die messtechnische Erfassung und Überwachung von Schadstoffen und Umweltschäden, Smart Meter, Track and Trace, Prozessoptimierungen/Simulationen, Industrial Internet of Things [IIoT], Informations- und Kommunikationstechnologie [IKT], Plattformtechnologien [z. B. Blockchain], Predictive Maintenance, digitaler Zwilling, Künstliche Intelligenz [KI], Green IT und Smart Home)
- Sektorenkopplung: Viele Industrien haben mittlerweile ein Optimum bei Ressourceneinsatz und Emissionen erreicht. Eine Möglichkeit, weitere Verbesserungen zu erreichen, ist die Kooperation über Branchengrenzen hinweg.

III. Definition Familienunternehmen

In der vorliegenden Studie werden Familienunternehmen wie folgt definiert:²²

„Familienunternehmen sind nicht an eine bestimmte Größe hinsichtlich der Beschäftigten oder des Umsatzes gebunden, sie sind in fast allen Wirtschaftszweigen anzutreffen und müssen auch keine bestimmte Rechtsform besitzen. Was also ist ein Familienunternehmen? In der wissenschaftlichen Forschung und in der breiten Öffentlichkeit gibt es hierzu keine verbindliche Antwort in Form einer einheitlichen Definition. [...]

Ein Unternehmen beliebiger Größe ist ein Familienunternehmen, wenn:

- (1) sich die Mehrheit der Entscheidungsrechte im Besitz der natürlichen Person(en), die das Unternehmen gegründet hat/haben, der natürlichen Person(en), die das Gesellschaftskapital des Unternehmens erworben hat/haben oder im Besitz ihrer Ehepartner, Eltern, ihres Kindes oder der direkten Erben ihres Kindes befindet, und
- (2) die Mehrheit der Entscheidungsrechte direkt oder indirekt besteht, und/oder
- (3) mindestens ein Vertreter der Familie oder der Angehörigen offiziell an der Leitung beziehungsweise Kontrolle des Unternehmens beteiligt ist.

22 Stiftung Familienunternehmen (o.J.).

Börsennotierte Unternehmen entsprechen der Definition eines Familienunternehmens, wenn die Person, die das Unternehmen gegründet oder das Gesellschaftskapital erworben hat oder deren Familien oder Nachfahren aufgrund ihres Anteils am Gesellschaftskapital 25 Prozent der Entscheidungsrechte halten.

Diese Definition umfasst auch Familienunternehmen, die die erste Generationsübertragung noch nicht vollzogen haben. Sie umfasst weiterhin Einzelunternehmer und Selbstständige (sofern eine rechtliche Einheit besteht, die übertragen werden kann).“

Laut einer von der Stiftung Familienunternehmen beauftragten Studie zur „Volkswirtschaftlichen Bedeutung der Familienunternehmen“ sind über 90 Prozent aller Unternehmen im privaten Wirtschaftssektor innerhalb Deutschlands familienkontrolliert. 86 Prozent der privatwirtschaftlichen Unternehmen sind eigentümergeführte Familienunternehmen.²³

IV. Recherche nach Umwelttechnologien

Der Beitrag von Umwelttechnologien für den Klimaschutz bildet den Ausgangspunkt für die Recherche der insgesamt fünfzehn Technologiesteckbriefe der vorliegenden Studie. In Anlehnung an die Reihe „GreenTech made in Germany“ des BMUV und auf Basis einer Unternehmensdatenbankrecherche wurden bereits in der Vorgängerstudie insgesamt fünfzehn relevante Umwelttechnologien identifiziert. Von diesen wurden in der vorliegenden Neuauflage dreizehn Steckbriefe in Bezug auf die jüngsten politischen, technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungen aktualisiert. Mit Tiefengeothermie und Bioenergie (Biogas) sind zwei neue hinzugenommen.

Die der Recherche zugrundeliegende Hypothese ist, dass die Anzahl der Unternehmen, die einer Umwelttechnologie in einer Unternehmensdatenbank zugeordnet wird, ihre Bedeutung relativ zu anderen Umwelttechniken widerspiegelt. Um sicherzustellen, dass Familienunternehmen und nicht börsennotierte Großkonzerne, die höchstwahrscheinlich nicht dazugehören, den Großteil der Unternehmen in der jeweils betrachteten Umwelttechnik ausmachen, erfolgte eine Analyse der Rechtsformen.

V. Methodik zur Auswahl der Umwelttechnologien

Auf Basis der in dieser Studie verwendeten Definition wurde die Anzahl der Unternehmen in einer Unternehmensdatenbank erfasst und miteinander verglichen. Bei der Unternehmensdatenbankrecherche wurde eine Stichwortsuche sowie Segmentierung nach Rechtsform, teils

23 ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung und Institut für Mittelstandsforschung (IfM) 2019.

auch Besitzverhältnissen, Anzahl und Umsatz von Familienunternehmen in einer Unternehmensdatenbank durchgeführt.

Die Autor*innen haben sich für die MARKUS-Unternehmensdatenbank von Creditreform entschieden, die Firmen- und Beteiligungsdaten von mehr als 2,2 Millionen im Handelsregister geführten, wirtschaftsaktiven Firmen aus Deutschland, Österreich und Luxemburg nachweist. Es können einzelne Unternehmen analysiert, nach Unternehmen mit bestimmten Charakteristika gesucht und unterschiedlichste Auswertungen vorgenommen werden. Allerdings werden nur Unternehmen gefunden, deren Firmennamen oder Tätigkeitsbeschreibungen die jeweiligen Stichwörter enthalten. Firmen, die in den relevanten Technologien tätig sind, dies aber nicht im Handelsregister veröffentlichen, lassen sich nicht erfassen.

Methodisch wurden Platzhalter (Trunkierung) eingesetzt, um Unternehmen mit Bezug zu der jeweiligen Umwelttechnologie zu finden, auch wenn sie stärker spezialisiert sind. Dazu wurde ein Asterisk (*) am Ende des Suchbegriffs gesetzt, um die Suchanfrage zu verallgemeinern. Zum Beispiel werden bei der Sucheingabe „Photovoltaik*“ auch Unternehmen gefunden, die beispielsweise in der Unternehmensdatenbank unter dem Begriff „Photovoltaik*anlagen“ geführt werden. Unter der Annahme, dass die Branche beziehungsweise die entsprechende Umwelttechnologie umso relevanter ist, je mehr Unternehmen dort tätig sind, erlaubt diese Auswertung eine erste Priorisierung der Branchen für die Steckbriefe.

Mit den Aktiengesellschaften, Gesellschaften mit beschränkter Haftung, voll- und teilhaftenden Personengesellschaften und den Einzelunternehmen wurden nur Firmen ausgewählt, die – abgesehen von den Aktiengesellschaften – mit hoher Wahrscheinlichkeit Familienunternehmen sind, da circa 90 Prozent aller privatwirtschaftlichen Unternehmen hierzu zählen.²⁴ Zur Ermittlung des Anteils börsennotierter Familienunternehmen ergeben sich laut Berechnung des Center for Entrepreneurial and Financial Studies (CEFS) und der Technischen Universität München (TUM) (2019) zwei unterschiedliche Werte, je nach Abhängigkeit der zugrundeliegenden Definition von Familienunternehmen.²⁵ Auf Basis der Founding-Family-Definition, an der sich auch die in dieser Studie verwendete Definition orientiert, waren zwischen 2007 und 2020 rund 20 Prozent der börsennotierten Unternehmen Familienunternehmen.²⁶ Allerdings sind Familienunternehmen als Aktiengesellschaften in vielen Fällen die umsatzstärksten Unternehmen der jeweiligen Branche und dürfen deshalb zur Einschätzung der Relevanz einer Umwelttechnik nicht vernachlässigt werden. Bei den Technologien, die für die Steckbriefe ausgewählt wurden, haben die Autor*innen deshalb die Eigentümerrechte der

24 ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung und Institut für Mittelstandsforschung (IfM) 2019, S. 5.

25 Center for Entrepreneurial and Financial Studies (CEFS) und Technische Universität München (TUM) 2019, S. 1.

26 Stiftung Familienunternehmen 2022.

Aktiengesellschaften gemäß Definition (siehe Kapitel B.III) geprüft und bei den Technologien mit einer eher geringen Trefferanzahl, aber relativ hohem Anteil an Aktiengesellschaften im Einzelfall entschieden, ob das Unternehmen Familienunternehmen zugeordnet werden kann.

VI. Ausgewählte Technologien

Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Unternehmensdatenbankrecherche MARKUS wurden fünfzehn Technologien aufgrund der hohen Firmenpräsenz von Familienunternehmen ausgewählt. Abbildung 1 zeigt die Trefferanzahl in der Unternehmensdatenbank zu den jeweiligen Technologien. Leichtbau und Smart Home besitzen eine hohe Relevanz, werden aber im gegenwärtigen wirtschaftlichen und politischen Umfeld weniger priorisiert und daher im aktuellen Technologieatlas nicht berücksichtigt.

Vor dem Hintergrund der politisch angespannten Lage, die zu einer Verknappung der Energieträger und zu drastischen Preissteigerungen auf dem Energiemarkt geführt hat, wurden stattdessen im Vergleich zur Vorgängerstudie (Stiftung Familienunternehmen 2021b) die Themen Biogas und Tiefengeothermie zusätzlich aufgenommen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) will bis 2030 mindestens 100 zusätzliche Geothermie-Projekte anstoßen.²⁷ Im Bereich Bioenergie berichtet das Eckpunktepapier für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS)²⁸ des Ministeriums von Maßnahmen zur „konsequenten Anpassung bestehender Politikinstrumente (z. B. Förderprogramme, Ordnungsrecht, Abbau klima- und biodiversitätsschädlicher Subventionen) an die genannten Leitprinzipien“ sowie der „Einführung neuer Maßnahmen zur Lenkung von Biomasseströmen (z. B. Ordnungsrecht beziehungsweise neue ökonomische Anreizinstrumente)“. Die NABIS soll im Laufe des Jahres 2023 verabschiedet und veröffentlicht werden.

Zwar konnten unter dem Suchbegriff „Tiefengeothermie*“ zum Stichtag (3.11.2022) nur neun Unternehmen identifiziert werden. Allerdings führen viele Unternehmen, die nach den Recherchen unter dem Oberbegriff „Geothermie“ firmieren, auch Tiefenbohrungen durch, weisen dies aber nicht gesondert aus. Aus diesem Grund wurden die Suchen zu beiden Begriffen zusammengeführt. So ergibt sich für Tiefengeothermie eine Trefferzahl von insgesamt 398 Unternehmen. Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung wurden in einem Technologiesteckbrief zusammengefasst und in Abbildung 1 als (Ab-)Wasserbehandlung bezeichnet. Digitalisierung als Querschnittstechnologie ist nicht in Abbildung 1 enthalten. Da die Unternehmen im Bereich Digitalisierung neben der Umwelttechnik weitere Anwendungsfelder bedienen,

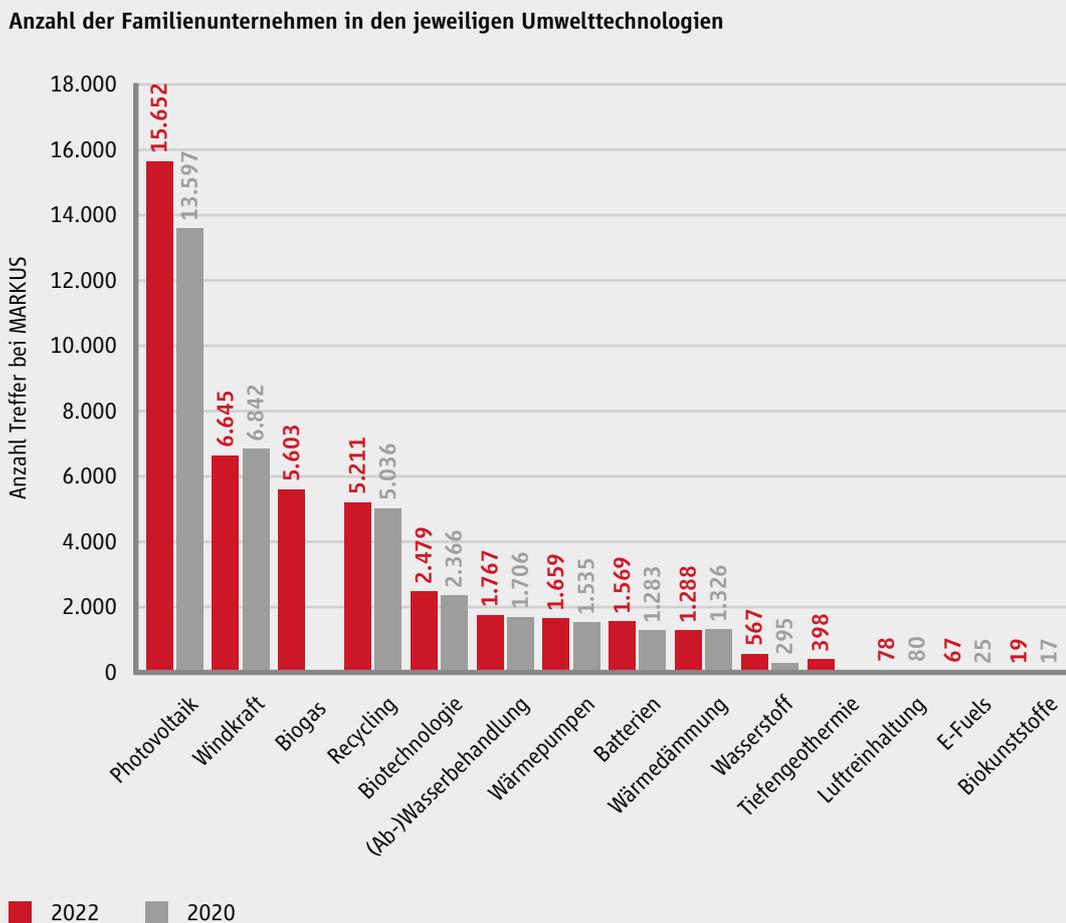
27 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022b.

28 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2022b.

kann keine explizite Anzahl an Unternehmen diesem Thema zugeordnet werden. Die Anzahl der Unternehmen im Bereich Digitalisierung wird aber im entsprechenden Steckbrief genannt.

Bei einem Vergleich der Technologien, die sowohl in der Vorgängerstudie²⁹ als auch im Bericht 2023 betrachtet werden, entsteht eine Differenz von plus 2.569 Firmen. Diese Differenz erklärt sich durch eine Zunahme der Anzahl an Unternehmen in den Technologien Photovoltaik (plus 15 Prozent), Biotechnologie (plus 5 Prozent), Recycling (plus 3 Prozent), Wärmepumpen (plus 8 Prozent), Wärmedämmung (plus 3 Prozent), (Ab-)Wasserbehandlung (plus 4 Prozent), Batterien (plus 22 Prozent), Biokunststoffe (plus 12 Prozent), Wasserstoff (plus 92 Prozent) sowie E-Fuels (plus 236 Prozent).

Abbildung 1: Anzahl der Familienunternehmen in den jeweiligen Umwelttechnologien (Quelle: MARKUS-Unternehmensdatenbank)



Quelle: MARKUS-Unternehmensdatenbank.

29 Stiftung Familienunternehmen 2021b.

In Summe konnten fast 47.000 Familienunternehmen (inklusive der Digitalisierung) identifiziert werden. Ein direkter Vergleich mit der Vorgängerstudie mit 37.000 Familienunternehmen ist nicht möglich, da zwei Technologiesteckriefe ausgewechselt wurden.

VII. Methodik zur Erstellung der Karten für die ausgewählten Umwelttechnologien

Um die regionale räumliche Verteilung der Unternehmen in den jeweils den Umwelttechnologien zugeordneten Branchen darzustellen, wurden Deutschlandkarten erstellt. Die Erstellung der Karten erfolgte mit dem Programm „Arc Gis Pro“, Version 3.0.0. Zwecks einer besseren Visualisierung werden die Unternehmensstandorte nicht als einzelne Punkte, sondern farblich gemäß dem Postleitzahlengebiet, in dem das Unternehmen ansässig ist, abgestuft abgebildet. Um die Anonymität der Unternehmen zu wahren, werden nur Karten im Bericht dargestellt, die keine Nachverfolgung der einzelnen Unternehmen erlauben. Mit Ausnahme der Themen E-Fuels, Biokunststoffe und Luftreinhaltung ist dies möglich. Das Thema Tiefengeothermie wird als Karte mit Wärmepumpen zusammengelegt, um eine ausreichende Anzahl an Unternehmen zur anonymisierten Visualisierung zu erhalten.

Für die Deutschlandkarten wurde das Koordinatensystem „WGS 1984 Web Mercator (auxiliary sphere)“ festgelegt. Anschließend wurden die Postleitzahlengrenzen als Shapefile-Format eingeladen. Für eine anschauliche Darstellung wurden die Postleitzahlen in Tausenderschritten (das heißt die ersten zwei Postleitzahlen) mittels des Werkzeugs Merge zusammengelegt. So wurden 95 Gebiete identifiziert. Die Anzahl der Familienunternehmen in den einzelnen Postleitzahlengebieten wurden der MARKUS-Datenbank entnommen und in die Attributtabelle eingetragen. Jedes Postleitzahlengebiet weist folglich die genaue Anzahl der Familienunternehmen auf, die sich innerhalb dieser Gebietsgrenze befinden. Für die vorliegenden Karten wurden sieben Intervalle für eine optimale Darstellung festgelegt. Der Maßstab der Grundkarte wurde auf 1:7.000.000 festgelegt.

C. Interviews mit Expert*innen aus Familienunternehmen

I. Vorgehen

Um die familienunternehmerische Perspektive innerhalb des Technologieatlas adäquat zu berücksichtigen, wurden ausgewählte Unternehmensvertreter*innen um ihre Einschätzung zu Marktgeschehen und Zukunftsaussichten der jeweiligen Umwelttechnologien gebeten. Die Interviews dauerten zwischen 30 und 60 Minuten. Die Befragung erfolgte spezifisch zu der jeweils angewandten beziehungsweise entwickelten Technologie des Familienunternehmens.

Jeweils zwei Autor*innen der Studie führten das Interview durch, das aufgezeichnet und zusammengefasst wurde. Nach der Freigabe durch die Interviewpartner*innen wurden besonders prägnante Aussagen – teils in komprimierter Form – in die Technologiesteckbriefe eingefügt und Zitate hervorgehoben.

Die Auswahl der befragten Familienunternehmen basierte auf der Expertise innerhalb der jeweiligen Umwelttechnologie. Hierzu wurden die Firmennetzwerke von Fraunhofer UMSICHT und der Stiftung Familienunternehmen sowie die MARKUS-Unternehmensdatenbank genutzt und Fachverbände kontaktiert. So konnte eine passgenaue Auswahl eines Unternehmens pro Umwelttechnologie erfolgen.

II. Interviewleitfaden

Die Interviews wurden entlang von sieben Leitfragen in zwei Blöcken strukturiert. Dies diente einer thematischen Vorstrukturierung, von der je nach Gesprächsverlauf situativ abgewichen werden konnte. So konnte einerseits sichergestellt werden, dass die im Vorfeld ausgewählten Fragen berücksichtigt wurden, andererseits konnten ergänzende Informationen der Interviewpartner*innen aufgenommen werden.

Block I: Technikangebot und Einordnung

- Können Sie Ihre Technologie/die Besonderheiten Ihrer Technologie in wenigen Worten zusammenfassen?
- Welche Ziele wollen Sie mit Ihrer Technologie erreichen?
- Wie wichtig ist Ihre Technologie für eine nachhaltige Entwicklung?

Block II: Markt- und Unternehmenssicht

- Wie schwierig ist es, ganz allgemein und besonders als Familienunternehmer*in, gesellschaftlich technischen Fortschritt umzusetzen?
- Welche Hemmnisse mussten Sie konkret überwinden, um erfolgreich zu werden (politisch, gesellschaftlich, Akzeptanz, technologische Probleme)? Welche Hemmnisse bestehen noch?
- Was war/ist hilfreich bei Ihrem Geschäft? Was und welche Instrumente empfinden Sie als hilfreich (Förderung, Standardisierung, Regulierung, gesellschaftliche Lage, technologische Entwicklungen)?
- Welche weiteren Änderungen erwarten Sie durch die Digitalisierung?

Die Interviews, die innerhalb der Steckbriefe dargestellt werden, orientieren sich stark am Wortlaut der Interviewten, um deren authentisches Meinungsbild einzufangen. Direkte Zitate sind gekennzeichnet und wurden von den befragten Personen beziehungsweise den Unternehmen freigegeben.

D. Technologiesteckbriefe

Die Steckbriefe vermitteln in komprimierter Weise die Grundlagen der ausgewählten Umwelttechnologien, ordnen die Umwelttechniken entsprechend der internationalen Nachhaltigkeitsziele (SDGs) ein, beschreiben die Marktsituation aus Sicht der Familienunternehmen, zeigen, welche Faktoren fördern beziehungsweise hemmen und was die Zukunft erwarten lässt.

Halbseitige Exkurse zu aktuell in Politik und Wissenschaft diskutierten Themen an der Schwelle zum Markteintritt beziehungsweise mit ersten Marktaktivitäten und hohem Innovationspotenzial öffnen die Perspektive für zukünftige Entwicklungschancen. Sie werden nachfolgend im Einzelnen aufgelistet. In Klammern steht der Name des Technologiesteckbriefs, der den jeweiligen Exkurs enthält:

- Gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV) (Photovoltaik)
- Lithiumrückgewinnung aus Thermalwasser (Tiefengeothermie)
- Mikrobielle Brennstoffzelle (Batterien)
- Methan-Pyrolyse (Wasserstofftechnologie)
- Direct Air Capture (E-Fuels)
- Lithium Recycling (Recycling)
- Chemisches Recycling (Recycling)
- Virenlfilter (Luftreinigung)
- Zero Liquid Discharge (ZLD) (Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung)
- Digitalisierung in der Wasserwirtschaft (Digitalisierung)
- Digitaler Produktpass (Digitalisierung)

Die Technologiesteckbriefe sind in acht Abschnitte unterteilt:

1. Technologiebezeichnung
2. Wirkungsprinzip und/oder Definition
3. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung
4. Märkte und Arbeitsplätze
5. Beitrag von Familienunternehmen inklusive räumliche Verortung in einer Karte
6. Herausforderungen und Hemmnisse

7. Innovation und Zukunftsperspektiven sowie Exkurse zu aktuellen Themen
8. Zusammenfassung

Ergänzend werden wesentliche Aspekte aus den Experteninterviews innerhalb eines Abschnitts vorgestellt.

Nachfolgend werden die Abschnitte sachlogisch und nicht in der numerischen Reihenfolge beschrieben.

Die **Technologiebezeichnung (1)** beschreibt, sofern möglich, eine eindeutige Umwelttechnologie, wie zum Beispiel Luftreinhaltung. Teilweise werden aber auch Geschäftsfelder beschrieben, wie zum Beispiel Digitalisierung, denen verschiedene Branchen und Technologien zugeordnet werden können.

Wirkungsprinzip und/oder Definition (2) beschreibt das physikalisch-chemische Grundprinzip der Umwelttechnologie, zum Beispiel Umwandlung von Licht in elektrische Energie bei der Photovoltaik. Bei komplexeren Technologien wie der Biotechnologie werden darüber hinaus auch Unterkategorien, wie zum Beispiel grüne, rote, graue und blaue Biotechnologie definiert.³⁰

Der **Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung (3)** wird anhand der 17 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen vorrangig im Hinblick auf den Umweltschutz bewertet (siehe Abbildung 2).

Märkte und Arbeitsplätze (4), Herausforderungen und Hemmnisse (6) sowie **Innovationen und Zukunftsperspektiven (7)** wurden in aktuellen Marktstudien, Fachartikeln, Fachbüchern, bei Vereinen, Verbänden und Gremien recherchiert und mit den Einschätzungen der Autor*innen und Interviewpartner*innen abgeglichen. Während bei den **Herausforderungen und Hemmnissen (6)** eher nachteilige Aspekte betrachtet wurden, sind es bei **Innovationen und Zukunftsperspektiven (7)** fördernde Gesichtspunkte. In diesem Abschnitt wurden bei ausgewählten Steckbriefen Exkurse mit neuen Technologietrends eingefügt.

Der **Beitrag von Familienunternehmen (5)** zur Technologieentwicklung ergibt sich im Wesentlichen aus der Zusammenfassung der Ergebnisse aus der MARKUS-Unternehmensdatenbank und einer Recherche von Umweltpreisen.

³⁰ Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (o. J.).

Die den Technologiesteckbriefen zugeordneten Unternehmen werden – sofern eine anonyme Darstellung gesichert ist – jeweils in **Karten** räumlich verortet (siehe Kapitel B.VII).

Technologiesteckbriefe zu Themen mit einer hohen Dynamik in Wissenschaft, Politik, Gesellschaft und Wirtschaft wie zum Beispiel die Wasserstofftechnologie, Digitalisierung und Recycling (Circular Economy) werden aufgrund der vielfältigen Entwicklungstendenzen detailreicher als die anderen Technologien beschrieben.

Nach Fertigstellung der Technologiesteckbriefe erfolgte eine **Evaluation** durch Fraunhofer-UMSICHT-Fachpersonen als ergänzende Qualitätssicherungsmaßnahme.

Abbildung 2: Die 17 SDGs (Nachhaltigkeitsziele) der Vereinten Nationen³¹



31 Vereinte Nationen 2020.

Die Ziele für nachhaltige Entwicklung der Agenda 2030 richten sich an Politik und Zivilgesellschaft sowie an Privatwirtschaft und Wissenschaft. Sie umfassen ökologische, ökonomische und soziale Ziele, die für die gesamte Weltgesellschaft sichergestellt werden sollen:³²

- Ziel 1: Beendigung von Armut
- Ziel 2: Beendigung von Hunger, Förderung von Ernährungssicherheit und einer nachhaltigen Landwirtschaft
- Ziel 3: Gewährleistung eines gesunden Lebens
- Ziel 4: Förderung einer inklusiven, gleichberechtigten und hochwertigen Bildung sowie von lebenslangem Lernen
- Ziel 5: Geschlechtergleichstellung und Befähigung zur Selbstbestimmung von Frauen und Mädchen
- Ziel 6: Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung
- Ziel 7: Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie
- Ziel 8: Dauerhaftes, inklusives und nachhaltiges Wirtschaftswachstum mit produktiver Vollbeschäftigung und menschenwürdiger Arbeit
- Ziel 9: Aufbau einer widerstandsfähigen Infrastruktur und Unterstützung einer inklusiven, nachhaltigen und innovativen Industrialisierung
- Ziel 10: Verringerung der globalen Ungleichheit
- Ziel 11: Gestaltung inklusiver, widerstandsfähiger und nachhaltiger Städte und Siedlungen
- Ziel 12: Sicherstellung nachhaltiger Produktions- und Konsummuster
- Ziel 13: Ergreifung von Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und dessen Auswirkungen
- Ziel 14: Nachhaltige Nutzung und Erhaltung der Ozeane, Meere und Meeresressourcen
- Ziel 15: Schutz und Wiederherstellung der Landökosysteme und der biologischen Artenvielfalt
- Ziel 16: Zugang für alle Menschen zu Justiz und Aufbau rechenschaftspflichtiger, inklusiver Institutionen auf allen Ebenen
- Ziel 17: Stärkung der globalen Partnerschaften und deren Umsetzungsmittel

32 United Nations 2020.





I. Photovoltaik

1. Wirkungsprinzip und Definition

Photovoltaik bezeichnet ein technisches Verfahren zur direkten Umwandlung von solarer Strahlungsenergie in elektrische Energie. Wesentlicher Bestandteil von Photovoltaik-Anlagen sind Solarmodule, welche die für dieses Verfahren notwendigen Solarzellen enthalten. Die physikalische Grundlage bildet der sogenannte photoelektrische Effekt. Infolge der Bestrahlung mit Photonen und Übertragung der Energie an die Elektronen, die sich durch das elektrische Feld im Übergang der Solarzelle zwischen positiver p-Schicht und negativer n-Schicht bewegen, wird elektrische Spannung erzeugt. Der daraus entstehende Gleichstrom kann über einen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt und ins Netz eingespeist oder für den direkten Eigenverbrauch verwendet werden.³³

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Photovoltaik erzeugt Strom aus erneuerbaren Energien, ohne dabei CO₂ freizusetzen. Durch die vorwiegend ortsunabhängige Verfügbarkeit der Sonneneinstrahlung ist die Energieerzeugung mittels Photovoltaik weitestgehend politisch und/oder wirtschaftlich unabhängig von Importen aus Ländern, die über fossile Ressourcen wie Erdöl oder Erdgas verfügen. Photovoltaik liefert damit einen direkten Beitrag zum SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“. Die Nutzung von Solarstrom wirkt sich auch auf die Umweltbilanz anderer nachhaltiger Technologien aus, beispielsweise bei der Verwendung von CO₂-neutralem Solarstrom im Bereich der Elektromobilität. Bei den erneuerbaren Energien belief sich die Stromerzeugung aus Photovoltaik im Jahr 2021 auf 21,4 Prozent im Vergleich zu 19,7 Prozent im Vorjahr, womit Photovoltaik anteilig an der Gesamtstromerzeugung aus erneuerbaren Energien an zweiter Stelle hinter der Windenergie mit 48,7 Prozent, zusammengenommen für Land und See, folgt.³⁴ Unter Berücksichtigung der Emissionen aus der Produktion von Photovoltaik-Modulen wurden im Jahr 2022 durch die Nutzung von Photovoltaik netto 41,7 Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen vermieden.³⁵ Photovoltaik adressiert damit direkt das übergreifende SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Ende 2022 sind in Deutschland über 2,65 Millionen Photovoltaik-Anlagen mit einer Nennleistung von rund 60 Gigawatt installiert.³⁶

33 Umweltbundesamt (UBA) 2020c.

34 Umweltbundesamt (UBA) 2022f.

35 Umweltbundesamt (UBA) 2023a.

36 Bundesverband Solarwirtschaft e.V. 2023.

Laut der Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Sommer 2022 soll die Geschwindigkeit beim Ausbau erneuerbarer Energien weiter beschleunigt werden. Die Bundesregierung strebt eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch ausgehend von etwa 49 Prozent im ersten Halbjahr 2022 (gegenüber 41 Prozent im Vorjahr)³⁷ auf mindestens 80 Prozent bis zum Jahr 2030 an.³⁸ Im Jahr 2021 erreichte die Stromerzeugung in Deutschland aus erneuerbaren Energien einen Wert von rund 234 Terawattstunden.³⁹

Erreicht werden soll das unter anderem mit einer Beschleunigung der Planungs- und Genehmigungsverfahren und der Absenkung der im Jahr 2000 eingeführten Erneuerbare-Energien-Umlage über den Strompreis von bisher 3,72 Cent pro Kilowattstunde auf null Cent pro Kilowattstunde ab Juli 2022. Daraus resultierende Einnahmeausfälle für die Übertragungsnetzbetreiber werden aus dem Klima- und Transformationsfonds (KTF) beglichen.⁴⁰

Im Jahr 2010 betrug die Anzahl der Beschäftigten in der Photovoltaik-Branche in Deutschland noch 133.400 Personen und ging bis zum Jahr 2017 über 70 Prozent zurück.⁴¹ Ursächlich für die gesunkene Beschäftigung ist neben der Kürzung der Solarstromförderung auch der Preisdruck durch die Konkurrenz vor allem aus dem asiatischen Raum, wobei wegen des allgemein großen Automatisierungsgrades in der Photovoltaik-Produktion weniger geringere Löhne ins Gewicht fallen, sondern eher die günstigen Investitions- und Kreditbedingungen Chinas und anderer asiatischen Staaten.⁴² Seit 2017 ist in Deutschland jedoch wieder ein Aufwärtstrend an Beschäftigtenzahlen zu verzeichnen. Im Jahr 2021 waren nach vorläufigen Angaben 58.500 Personen im Bereich der Solarenergie beschäftigt.⁴³ Durch fortschrittliche Entwicklungen in den Bereichen Netzausbau und Speicherfähigkeit könnte sich im Jahr 2030 laut Schätzungen die Anzahl der Beschäftigten gegenüber dem Jahr 2010 mit 133.400 Personen um 18 Prozent erhöhen.⁴⁴ Auch ansteigende Frachtkosten sowie lange Frachtzeiten in Kombination mit allgemein sinkenden Herstellungskosten könnten in Zukunft zur einer Stärkung der Wettbewerbsposition auf dem deutschen Markt führen.⁴⁵

Im Jahr 2020 erwirtschaftete die deutsche Photovoltaik-Branche einen Umsatz von rund 3,5 Milliarden Euro im In- und Ausland (gegenüber rund 2,9 Milliarden Euro im Jahr 2018).⁴⁶

37 Umweltbundesamt (UBA) 2022h.

38 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022g, S. 3.

39 Umweltbundesamt (UBA) 2022f, S. 7.

40 Die Bundesregierung 2022d.

41 Roland Berger Strategy Consultants und Prognos AG 2020, S. 47.

42 Wirth 2022, S. 27.

43 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022h.

44 Roland Berger Strategy Consultants und Prognos AG 2020, S. 47.

45 Wirth 2022, S. 27.

46 Statistisches Bundesamt 2022e.

Vor allem durch die zunehmende Elektrifizierung wie am Beispiel des Ausbaus der Elektromobilität und Power-to-X-Anwendungen⁴⁷ könnte der Branchenumsatz auf geschätzte 11,1 Milliarden Euro im Jahr 2025 anwachsen.⁴⁸

Im Jahr 2021 war Bayern in Folge das Bundesland mit der meisten installierten Leistung mit rund 16,2 Gigawatt⁴⁹ gegenüber 13,5 Gigawatt im Jahr 2019⁵⁰. Mit größerem Abstand dazu befindet sich Baden-Württemberg weiterhin auf dem zweiten Platz mit rund 7,5 Gigawatt, gefolgt von Nordrhein-Westfalen mit rund 6,7 Gigawatt.⁵¹

Die Kosten für die Produktion von Strom aus Photovoltaik sind in den letzten Jahren rapide gesunken. Der anhaltende Trend führt dazu, dass die Kosten immer häufiger unter denen für die Produktion von Strom aus fossilen Kraftwerken liegen. Insgesamt sind die Kosten für die Errichtung von Photovoltaik-Kraftwerken seit dem Jahr 2006 um 75 Prozent gesunken.⁵²

Hinsichtlich der globalen Marktentwicklung waren laut einer Meta-Studie des Netzwerks „Renewable Energy Policy Network for the 21st Century“ (REN21) im weltweiten Vergleich Ende 2021 bereits sieben Länder dazu in der Lage, mindestens 10 Prozent ihres Gesamtstromverbrauchs über Photovoltaik zu decken; mit Australien an der Spitze (15,5 Prozent), gefolgt von Spanien (14,2 Prozent) und Griechenland (13,6 Prozent).⁵³ Deutschland belegt mit 10,9 Prozent den siebten Platz. Damit lag der Anteil der weltweiten Stromproduktion aus Photovoltaik im Jahr 2021 bei rund 5 Prozent, im Vergleich zu 3,7 Prozent im Jahr 2020 (ebd.). In Bezug auf die neu installierte Leistung im Jahr 2021 führt Asien die Rangliste mit 52 Prozent das neunte Jahr in Folge an. Dahinter folgen Amerika mit 21 Prozent und Europa mit 17 Prozent (ebd.).

47 Power-to-X: alle Verfahren, die Ökostrom/Grünen Strom in chemische Energieträger zur Stromspeicherung, in strombasierte Kraftstoffe zur Mobilität oder Rohstoffe für die Chemieindustrie umwandeln.

48 EuPD Research Sustainable Management GmbH 2019.

49 Bundesnetzagentur 2022.

50 Bundesnetzagentur 2019, S. 25.

51 Bundesnetzagentur 2022.

52 Wirth 2022, S. 8.

53 REN21 2022, S. 128.

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind in der MARKUS-Unternehmensdatenbank 15.652 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Photovoltaik*“ zu finden (Stand: 3.11.2022):

- 91 AGs
- 7.184 GmbHs
- 482 vollhaftende Personengesellschaften
- 7.445 teilhaftende Personengesellschaften
- 450 Einzelunternehmen

Die Verteilung der Familienunternehmen in der Photovoltaikbranche (siehe Abbildung 3) lässt eine erhöhte Dichte in Süddeutschland feststellen. Da die süddeutschen Bundesländer, die meiste Sonneneinstrahlung im Jahr aufweisen⁵⁴, siedeln sich in diesen Regionen die meisten Unternehmen an.

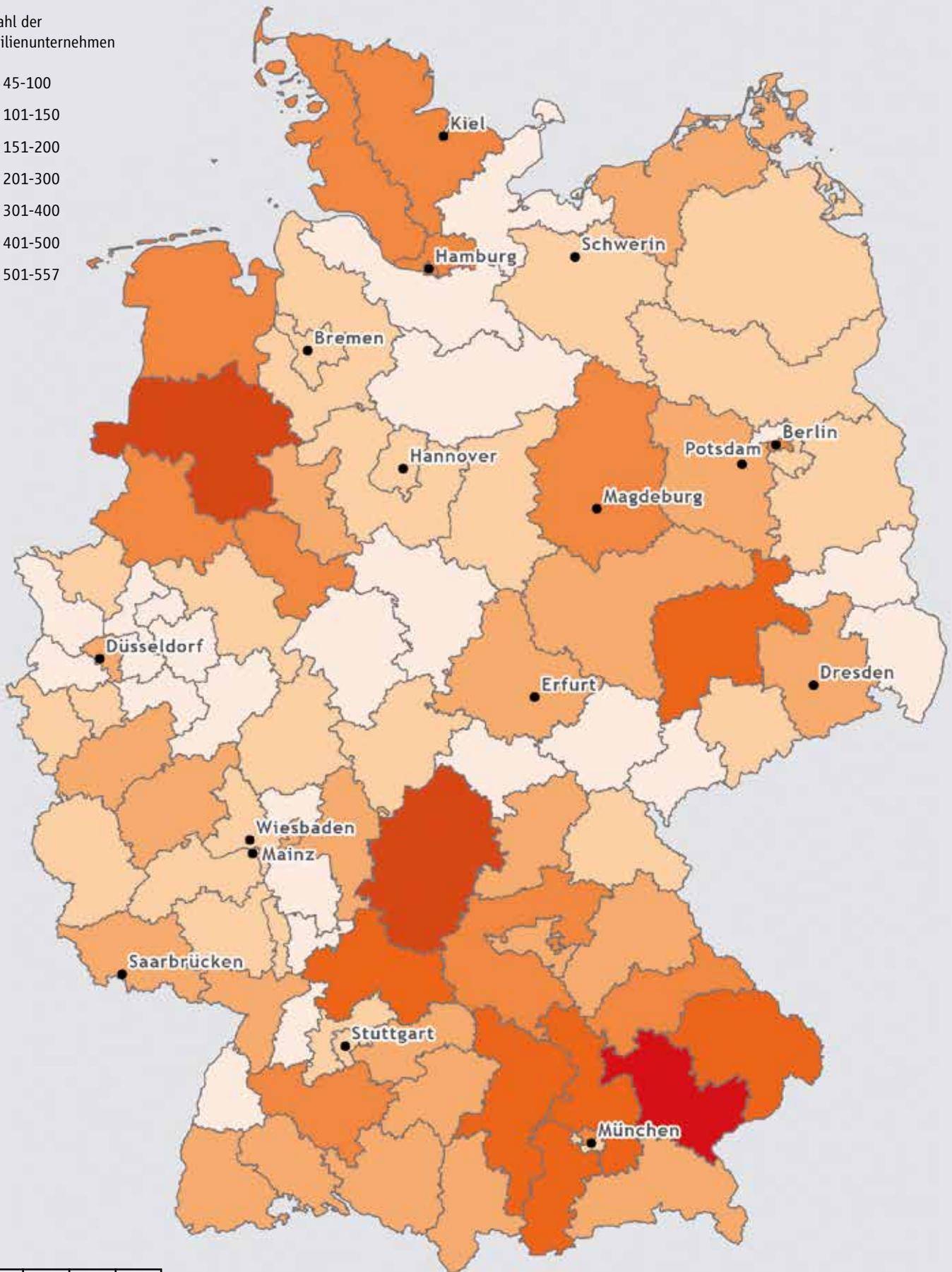
Das Familienunternehmen Solmotion Project GmbH mit Sitz in Ravensburg ist eines von ihnen und spezialisiert auf die Konzeptionierung und Überwachung von Solaranlagen und wurde im Jahr 2009 gegründet. Gestartet mit sechs Personen, zählt das Familienunternehmen heute über 45 Mitarbeitende.

54 Solarwatt 2022.

Abbildung 3: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Photovoltaikbranche (nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 45-100
- 101-150
- 151-200
- 201-300
- 301-400
- 401-500
- 501-557



0 100 200 Kilometer

Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Solmotion Project GmbH, Anna Volz-Staudacher (Geschäftsführerin):

„Unter den verschiedenen Konzepten für die Umsetzung der Energiewende nimmt die Photovoltaik einen extrem hohen Stellenwert ein. Das zeigt sich vor allem auch an ihrer Vielseitigkeit wie am Beispiel von Hybridanlagen, die überschüssigen Strom durch Elektrolyse zu Wasserstoff umwandeln und damit eine unabhängige Energieversorgung fördern.“

Neben der Weiterentwicklung von Speichertechnologien ist für Frau Volz-Staudacher, seit 2016 Mitglied der Geschäftsführung, das Recycling von Photovoltaik-Anlagen unverzichtbarer Bestandteil zukunftsweisender Innovationen: „Ich bin der Meinung, dass wir in zehn, fünfzehn Jahren eigentlich dazu kommen *müssen*, dass wir mindestens 50 Prozent der PV-Anlagen recyceln. Ich glaube, dass wir auch argumentativ kaum um das Recycling herumkommen, um die gesellschaftliche Akzeptanz für Photovoltaik weiterhin zu steigern. Ob das jedoch tatsächlich passieren wird, hängt vordergründig von finanziellen Aspekten ab.“

In Bezug auf mögliche Hemmnisse seien sowohl die politischen als auch die gesellschaftlichen Voraussetzungen wohl selten besser als heute. Die jüngste Novelle des EEG sei ein weiterer Schritt in die richtige Richtung. Langfristigkeit und Konstanz von regulatorischen Rahmenbedingungen seien in Anbetracht von Regierungswechseln und strukturellen Veränderungen jedoch weiterhin notwendig: „Man merkt schon, dass wir im Bereich der Photovoltaik immer ein Stück weit vorsichtiger sind als beispielweise die Industrie. Vielleicht macht aber eben gerade das auch unsere Branche aus, da wir uns nicht auf alten Erfolgen ausruhen, sondern immer den Fortschritt im Blick haben. Ich denke, langfristig gesehen ist es für uns wichtig, dass wir von den Förderungen wegkommen und eine Branche werden, die sich selbst trägt.“

Im Vergleich zu anderen Wirtschaftszweigen, die vom Fachkräftemangel betroffen sind, sieht die Familienunternehmerin im Bereich Photovoltaik einen entscheidenden Vorteil in dem ansteigenden Umweltbewusstsein der nachwachsenden Generation, welches auch bei der Berufswahl eine immer bedeutendere Rolle spiele. Bei der Personalgewinnung werde zudem immer wieder deutlich, dass Berufseinsteiger*innen familiengeführte Unternehmen wegen des guten Arbeitsklimas und der „kurzen Wege“ in der Kommunikation anderen eher vorziehen.

Voranschreitende Digitalisierungsprozesse wie der Einsatz von Drohnen für die Flächenvermessung oder die Implementierung digitaler Tools, mit denen sich interessierte Kund*innen vorab eigenständig ein indikatives Angebot erstellen lassen können, würde nicht nur zu einer Erleichterung im Arbeitsalltag führen, sondern wirke sich auch zugunsten der Investitionen der Kund*innen aus, was eine perspektivisch anhaltende Entwicklung darstelle.

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Der derzeitige Ausbau von Photovoltaik-Anlagen ist laut Meinung einiger Expert*innen unzureichend, um die angestrebten Klimaziele zu erreichen. Die Internationale Energieagentur (IEA) bemängelt zu geringe staatliche wie auch privatwirtschaftliche Investitionen, um den künftigen Energiebedarf zu decken.⁵⁵

Solarmodule und Stromspeichertechnologien können von Preisanstiegen bei Industrie- und Spezialmetallen wie Silizium oder Cadmium betroffen sein, was wiederum erforderliche Investitionen in die Höhe treibt. Steigende Rohstoffpreise können damit ein mögliches Hindernis bei der Umstellung auf ein elektrifiziertes Energiesystem auf Basis grünen Stroms darstellen. Wie so oft ist eine von der Politik ausgehende Planungssicherheit für die Investition in die Photovoltaik-Technologie von entscheidender Bedeutung. Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) verweist jedoch darauf, dass eine höhere Bepreisung von Rohstoffen auch insofern Effekte auf die Nachfrage ausüben könne, als sie einen weiteren Anreiz zur stärkeren Nutzung von alternativen Materialien geben könnten.⁵⁶

Auch geopolitische Erwägungen spielen eine entscheidende Rolle beim Photovoltaik-Ausbau, da sich das Vorkommen der für die Energiewende nötigen kritischen Metalle auf nur wenige Länder konzentriert. Das DIW hält es für ratsam, in europäischer Verantwortung über Initiativen wie beispielsweise die Extractive Industries Transparency Initiative (EITI) auf exportierende Länder einzuwirken, sodass wohlstandssteigernde Effekte auch für die dort ansässige breite Bevölkerung gefördert werden.⁵⁷

Bis zum Jahr 2030 wird eine Abfallmenge an Photovoltaik-Modulen von bis zu 87.000 Tonnen pro Jahr erwartet.⁵⁸ Schadstoffe, die in Photovoltaik-Modulen enthalten sind, bestehen hauptsächlich aus Blei und Cadmium. Die Gefahr der Emission von Schadstoffen erhöht sich erheblich bei beschädigten Photovoltaik-Modulen. Laut der Deutschen Umwelthilfe (DUH) seien derzeit bestehende Sammel- und Entsorgungssysteme nur unzureichend in der Lage, die erwartete Abfallmenge angemessen klimaschonend und ressourceneffizient zu behandeln.⁵⁹

Allgemein altern waferbasierte Photovoltaik-Module jedoch nur sehr langsam. Laut einer Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE an 44 größeren Aufdach-Anlagen in Deutschland liegt die durchschnittliche jährliche Degradation der Nennleistung bei

55 International Energy Agency 2021, S. 9.

56 Boer 2022, S. 51.

57 Boer 2022, S. 52.

58 Kummer et al. 2020, S. 116.

59 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021a, S. 3.

circa 0,15 Prozent.⁶⁰ Ausfälle der Wechselrichter oder Verschmutzung haben einen deutlich höheren Effekt auf den Leistungsverlust. Abfallvermeidung durch regelmäßige und sorgfältige Wartungen besitzt folglich eine hohe Priorität. In puncto Wiederverwertung bestehen in der Theorie zwar Verfahren zur verbesserten Rückgewinnung von Materialien. In der Praxis fehlt es jedoch an gesetzlichen Vorgaben für Betreiber, die Investitionen in innovative Recyclingverfahren attraktiv werden lassen. Die DUH fordert daher unter anderem die Festlegung von ambitionierten Recyclingquoten für Metalle wie Silizium.⁶¹

Eine bleibende Herausforderung ist die schwankende Verfügbarkeit der Solarenergie und, damit verbunden, die Weiterentwicklung von Speichertechnologien. Solange keine nennenswerten Speicherkapazitäten verfügbar sind, werden Photovoltaik-Anlagen keine fossilen und nuklearen Kraftwerke ersetzen können.⁶² Dies gilt besonders für trübe Wintertage. Dennoch führen Photovoltaik-Anlagen zu einer beachtlichen Reduzierung des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen. Derzeit noch unzureichende Speichermöglichkeiten stehen einem Photovoltaik-Ausbau nicht entgegen.⁶³

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Anwendungen für die Integration von Photovoltaik gelten als die Innovationsträger der Zukunft. Integrierte Photovoltaik meint eine doppelte Flächennutzung beispielsweise auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, als schwimmende Photovoltaik auf Wasserflächen (Floating-PV) oder von Gebäude- und Verkehrsflächen. Die sogenannte Agri-Photovoltaik (Agri-PV) bietet auf den weiten landwirtschaftlichen Nutzflächen in Deutschland große Potenziale. Für viele Nutzpflanzen gut verträglich ergibt sich laut Berechnungen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE ein rein technisches Potenzial von 1,7 Terawattstunden durch hoch aufgeständerte Module auf Flächen für Ackerbau und Dauerkulturen wie Obst oder Wein.⁶⁴ Der Bruttostromverbrauch in Deutschland im Jahr 2022 lag bei 547 Terawattstunden.⁶⁵ In einem Eckpunktepapier zum sogenannten Osterpaket 2022 verständigten sich die Ressorts Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Umwelt (BMUV) und Landwirtschaft (BMEL) darauf, dass Agri-Photovoltaik-Anlagen grundsätzlich auf allen Ackerflächen über das EEG 2022 gefördert werden sollen; ausgenommen davon sind Naturschutzgebiete.⁶⁶ Das bisher größte Agri-Photovoltaik-Projekt mit einer installierten Leistung von 1 Gigawatt wurde im Jahr 2021 in China realisiert.⁶⁷

60 Kiefer et al. 2018, S. 4.

61 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021a, S. 11.

62 Wirth 2022, S. 53.

63 Wirth 2022, S. 34.

64 Wirth 2022, 36 f.

65 BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2022, S. 23.

66 Die Bundesregierung 2022a.

67 REN21 2022, S. 132.

Auch im urbanen Raum kann integrierte Photovoltaik auf Parkflächen, an Tunnelanlagen oder Lärmschutzwänden Synergien schaffen und so Nutzungskonflikte vermeiden.

Exkurs: Gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV)

Auch Gebäudehüllen bieten die Möglichkeit zur Anbringung von Photovoltaik-Modulen, die damit selbst zum Bestandteil von Gebäuden werden. Im Gegensatz zu klassischen Aufdach-Anlagen wird die GIPV als Fassaden- oder In-Dach-Module in die Gebäudehülle integriert oder anstelle eines Daches zum Beispiel in Form von Solar-Carports eingesetzt. In-Dach-Solarmodule weisen den Vorteil auf, dass sie keine Unterkonstruktion benötigen und somit Dachziegel eingespart werden. Wegen ihrer erhöhten Sichtbarkeit im Gegensatz zu Aufdach- oder Freilandanlagen werden an die GIPV zumeist auch höhere ästhetische Anforderungen gestellt. GIPV-Module können zudem weitere Funktionen erfüllen wie Sonnen-, Schall- oder Wärmeschutz. Als Sonnenschutz bieten sich beispielsweise Isolierverglasungen mit einlamierten Dünnschichtmodulen an. Senkrecht montierte Photovoltaik-Module auf der Südseite können in schneereichen Gebieten auch bei Sonneneinstrahlung im Winter gute Wirkungsgrade erreichen. Das Anbringen der GIPV-Module erfordert andere Montagesysteme als bei den Standard-Modulen, welche vor allem bei sogenannten Überkopfverglasungen besonderen Sicherheitsvorgaben unterliegen. Eine weitere Form der GIPV sind Solardachziegel, die statt der herkömmlichen Dachziegel verwendet werden. Das Verlegen der Solarziegel ist jedoch mit einem hohen Aufwand und damit auch hohen Kosten verbunden, da alle Solardachziegel einzeln elektrisch miteinander verbunden werden müssen. Der GIPV in Deutschland wird ein technisches Potenzial von 1 Terrawatt zugesprochen.⁶⁸

Anwendungen der fahrzeugintegrierten Photovoltaik (VIPV) gehen bis dato zwar nicht in Serienproduktion. Sie setzen jedoch einen Trend als Forschungs- und Entwicklungsfeld. Neben technischen Anforderungen geht es dabei vor allem im Automobilbereich auch um optische Details.⁶⁹ Bislang sind bereits vereinzelt Prototypen von Lastkraftwagen und Kleinlastern mit Photovoltaik-Modulen auf Glasbasis oder folienbasierten Verkleidungen auf Deutschlands Straßen in Erprobung. Die wirtschaftlichen Vorteile sind zumindest bisher überschaubar. Schätzungen zur Abdeckung der jährlichen Gesamtfahrleistungen schwanken in Abhängigkeit vom jeweiligen Nutzfahrzeug und liegen laut verschiedener Aussagen zwischen 5 und 25 Prozent.^{70, 71}

68 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2022.

69 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022e, S. 5.

70 Bellini 2021.

71 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022e.

Als voraussichtlich einer der zukünftigen Hauptlastträger der Stromversorgung in Deutschland stellt Photovoltaik einen zentralen Baustein im Energieforschungsprogramm der Bundesregierung dar. Insbesondere von thematischer Relevanz ist dabei ein steigender Wirkungsgrad der Zellen und Module. Da das Potenzial bei der reinen Silizium-Photovoltaik bereits weitgehend ausgeschöpft ist, wurde sich in den vergangenen Jahren auch anderen Materialklassen wie Metallhalogenid-Perowskiten zugewandt. Bei solchen Materialkombinationen, den sogenannten Stapelzellen, werden zwei oder mehr Solarzellen aus verschiedenen Materialien übereinandergeschichtet, wobei kristallines Silizium oftmals als Basisschicht dient. Der Vorteil solcher Kombinationen liegt darin, dass die Solarzellen ein breiteres Spektrum an Wellenlängen des Lichts absorbieren können und damit der Wirkungsgrad erhöht wird. Im Jahr 2021 erreichte eine Forschungsgruppe einen neuen Wirkungsgrad-Rekord von 29,8 Prozent.⁷² Derzeit liegt der Mittelwert des nominellen Wirkungsgrades bei etwa 20 Prozent. Zuletzt wuchs dieser Wert um circa 0,3 bis 0,5 Prozentpunkte pro Jahr. Das entspricht einer Nennleistung von etwa 200 Watt pro Quadratmeter.⁷³

Neben der Erhöhung des Wirkungsgrades liegen weitere Forschungsinteressen auf der Entwicklung von Demonstratoren für die direkte solare Wasserstofferzeugung, auf in Kraftwerke integrierte Batteriespeicher oder optimierte Systemkonzepte, um zukünftig alle netzdienlichen Aufgaben von Photovoltaik-Kraftwerken ausführen zu können. Auch der Bereich der integrierten Photovoltaik nimmt einen immer größer werdenden Stellenwert innerhalb der Forschungsförderung ein. Im Jahr 2021 förderten das BMWK und das BMBF 487 laufende Vorhaben in der Photovoltaik-Forschung mit 88,39 Millionen Euro von insgesamt 1,3 Milliarden Gesamtfördermitteln für 2021.⁷⁴

Die Akzeptanz von Photovoltaik-Anlagen in der Bevölkerung ist weiterhin als sehr hoch einzuschätzen. Fast die Hälfte der in Deutschland installierten Leistung ist im Besitz von Privatpersonen und Landwirtschaftsbetrieben.⁷⁵ Im Jahr 2022 beabsichtigen 25 Prozent der deutschen Hauseigentümer*innen laut einer Umfrage des Hamburger Marktforschungsinstituts Appino, in eine Photovoltaik-Anlage zu investieren, was einem Markt von 3,5 Millionen Anlagen entspräche im Vergleich zu 2,2 Millionen Anlagen Anfang 2022.⁷⁶ Die Zivilbevölkerung stellt damit einen entscheidenden Akteur in der Energiewende dar. Rund zwei Drittel der Bevölkerung in Deutschland begrüßen den Ausbau von Solarenergie, wobei Solarparks gegenüber allen anderen Kraftwerken die meiste Zustimmung bei Anwohnenden erhalten.⁷⁷

72 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022f, S. 33.

73 Wirth 2022, S. 40.

74 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022f, 11 ff.

75 Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) 2021b.

76 Heinhaus 2022.

77 Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) 2021a.

8. Zusammenfassung

Durch das Zusammenspiel von Politik und dem Fortschritt technologischer Innovationen wird die Photovoltaik in den kommenden Jahren einen immensen Bedeutungszuwachs hinsichtlich Investitionen und Beschäftigung erlangen können. Die deutsche Politik nimmt bisher eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von Instrumenten zur Förderung von erneuerbaren Energien ein. Dennoch bedarf es seitens politischer Entscheidungsträger weiterhin klarer Richtvorgaben, um Investitionssicherheit, wie etwa durch langfristige Abnahmevereinbarungen, aufrechtzuerhalten.

Als innovatives Anwendungsgebiet gilt der Bereich der sogenannten integrierten Photovoltaik. Dazu gehören zum Beispiel die Agri-Photovoltaik (Agri-PV) auf landwirtschaftlichen Nutzflächen, schwimmende Photovoltaik auf Gewässern (Floating-PV) oder die gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV). Um deren Markteintritt zu beschleunigen, gelten Anschubförderungen als zweckdienlich.⁷⁸

Die Photovoltaik-Technologie ist mittlerweile in Deutschland etabliert. Verglichen mit anderen Umwelttechniken ist sie führend, was die Anzahl der in dieser Branche tätigen Familienunternehmen betrifft. Der deutsche Photovoltaik-Sektor nimmt hinsichtlich der Materialherstellung, des Maschinenbaus, der Komponentenherstellung, der Einrichtungen der Forschung und Entwicklung sowie der Lehre eine Führungsposition im internationalen Vergleich ein.⁷⁹ Ein weiterer Anstieg ist aufgrund der wachsenden Elektrifizierung durch die zunehmende Sektorenkopplung zu erwarten. Es sind weitere Verbesserungen hinsichtlich des Wirkungsgrades notwendig.⁸⁰

Speichertechnologien ermöglichen einen erhöhten Photovoltaik-Zubau. Die Speicherung von elektrischer Energie in großen, stationären Batterien steht jedoch noch am Anfang ihrer technologischen Entwicklung und bedarf weiterer gezielter Förderungen.

78 Wirth 2022, S. 79.

79 Wirth 2022, S. 78.

80 Fraunhofer-Institut ISE 2020, S. 84.



II. Windkraft

1. Wirkungsprinzip

Der Wind versetzt den Rotor einer Windkraftanlage in Bewegung, wodurch die im Wind mitgeführte kinetische Energie genutzt wird. Dazu wird wie bei der Flugzeugtragfläche – also gemäß dem Prinzip des aerodynamischen Auftriebs – die Luft ober- und unterhalb des Rotorblattes entlanggeführt. Aufgrund der Wölbung des Blattes hat die Luft oberhalb des Blattes einen längeren Weg als unterhalb des Blattes und muss daher schneller fließen. So entsteht oberhalb des Blattes ein Unterdruck und unterhalb des Blattes ein Überdruck. Die Druckdifferenz führt zu einer Auftriebskraft, die das Rotorblatt antreibt und den Rotor in Drehung versetzt. Diese (Dreh-)Bewegungsenergie wird dann mithilfe eines Generators in Strom umgewandelt. Von dem Windrad aus fließt die elektrische Energie in das Stromnetz.⁸¹ Zum Einsatz kommen heute fast ausschließlich Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse.⁸²

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Windkraft erzeugt Strom aus erneuerbaren Energien und trägt damit wesentlich zum SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“ bei. Durch Windenergie (Land und See) wurden 2021 insgesamt in Deutschland – je nach Quelle – 113,8⁸³ beziehungsweise 122⁸⁴ und 2022 123,4⁸⁵ Terawattstunden Strom erzeugt. Somit lieferte die Windenergie mit rund 120 Terawattstunden Ökostrom zum zweiten Mal in Folge auch 2022 den größten Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und adressiert übergeordnet das SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Der Beginn des Ukraine-Krieges im Februar 2022 führte zu einer einschneidenden Änderung in der europäischen Energieversorgung, was sich allerdings nicht sofort in einer Steigerung im Bereich Windenergie widerspiegelt. Im Jahr 2022 wurden insgesamt 551 Windenergieanlagen mit einer Leistung von 2.403 Megawatt installiert. Der Bruttozubau 2022 liegt damit 25 Prozent über dem Vorjahreszubau.⁸⁶

Am 1. Februar 2023 trat das Wind-an-Land-Gesetz zur Erhöhung und Beschleunigung des Ausbaus von Windenergieanlagen an Land und zur Änderung des Bundesnaturschutzgesetzes in Kraft. Laut Koalitionsvertrag sollen für die Windkraft bis Ende 2032 etwa zwei Prozent der

81 Bundesverband WindEnergie (BWE) 2020.

82 Schneider 2022.

83 Umweltbundesamt (UBA) 2021f.

84 Strom-Report 2022.

85 Fraunhofer ISE 2023.

86 Bundesverband WindEnergie (BWE) 2023.

Bundesfläche – im Vergleich zu derzeit 0,8 Prozent – zur Verfügung stehen (Zwischenziel: 1,4 Prozent bis 2026). Auch die Mindestabstandsregelung soll geändert werden: Es gelten zunächst die landesgesetzlichen Abstandsregeln. Können die Bundesländer die Flächenziele jedoch nicht erreichen, dürfen jene nicht weiter angewandt werden. Auch Landschaftsschutzgebiete können als Flächen für den Windenergieausbau herangezogen werden, wenn Schutzzonen für bedrohte Arten definiert und hohe ökologische Standards garantiert werden.^{87, 88}

Abbildung 4: Verteilung der Windenergieanlagen in Deutschland 2021 (mit freundlicher Genehmigung von BWE⁸⁹)



Deutschland hat mit 63.924 Megawatt die meiste Windenergieleistung in Europa installiert. Abbildung 4 zeigt die ungleichmäßige Verteilung der Anlagen in Deutschland im Jahr 2021 – im Süden sind deutlich weniger Anlagen zur Stromerzeugung aus Windenergie zu finden. Bis zum Inkrafttreten des neuen Gesetzes mussten beispielsweise in Bayern Windenergieanlagen wegen der „10H-Regel“ das Zehnfache ihrer Höhe an Abstand zur nächsten Siedlung einhalten. Dies bedeutete in der Regel über zwei Kilometer, was wegen der dort herrschenden Zersiedlung den Ausbau von Windkraft nahezu zum Erliegen gebracht hat. Mit dem neuen Gesetz ist jetzt

87 Die Bundesregierung 2023.

88 Deutscher Bundestag 2022c.

89 Bundesverband WindEnergie (BWE) 2022.

nur noch ein Mindestabstand von einem Kilometer in Wäldern, in Industriegebieten sowie an Autobahnen und Bahnstrecken einzuhalten.⁹⁰

Mit Windkraftanlagen konnten 2022 123,4 Terawattstunden Strom erzeugt werden – von insgesamt 491,8 Terawattstunden (Gesamtstromerzeugung in Deutschland 2022), wovon etwa die Hälfte (48,3 Prozent) aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden konnten.⁹¹

Das Arbeitsplatzhoch aus dem Jahr 2016 mit knapp 168.000 Beschäftigten konnte bislang noch nicht wieder erreicht werden. Zwar steigen die Zahlen seit 2020 wieder verhalten an, aber die als vorläufig veröffentlichte Zahl für 2021 liegt erst bei gut 130.000 Arbeitsplätzen.⁹²

Rund 85 Prozent des globalen Marktes für Windkraftanlagen teilen sich derzeit 10 Firmen – die fünf größten Unternehmen sind Vestas AG, Siemens-Gamesa GmbH, GE-Wind GmbH sowie die chinesischen Firmen Goldwind AG und die Minyang Gruppe. In Deutschland war Enercon GmbH 2018 Marktführer, gefolgt von Vestas AG und Nordex SE. Es wird von einer weiteren Konsolidierung der Branche ausgegangen und erwartet, dass die drei größten Hersteller Vestas AG, Siemens-Gamesa GmbH sowie GE-Wind GmbH bis 2029 ihren Marktanteil von heute 43 auf 60 Prozent ausbauen werden.⁹³ Dies stellt Familienunternehmen vor neue Herausforderungen, gerade im Hinblick auf den aktuellen Fachkräftemangel.⁹⁴

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 6.645 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Windkraft*“ zu finden (Stand: 4.11.2022):

- 37 AGs
- 2.252 GmbHs
- 142 vollhaftende Personengesellschaften
- 4.165 teilhaftende Personengesellschaften
- 49 Einzelunternehmen

90 BR24 2022.

91 Fraunhofer ISE 2023.

92 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2022.

93 Mercure 2020.

94 Richter und Herms 2023.

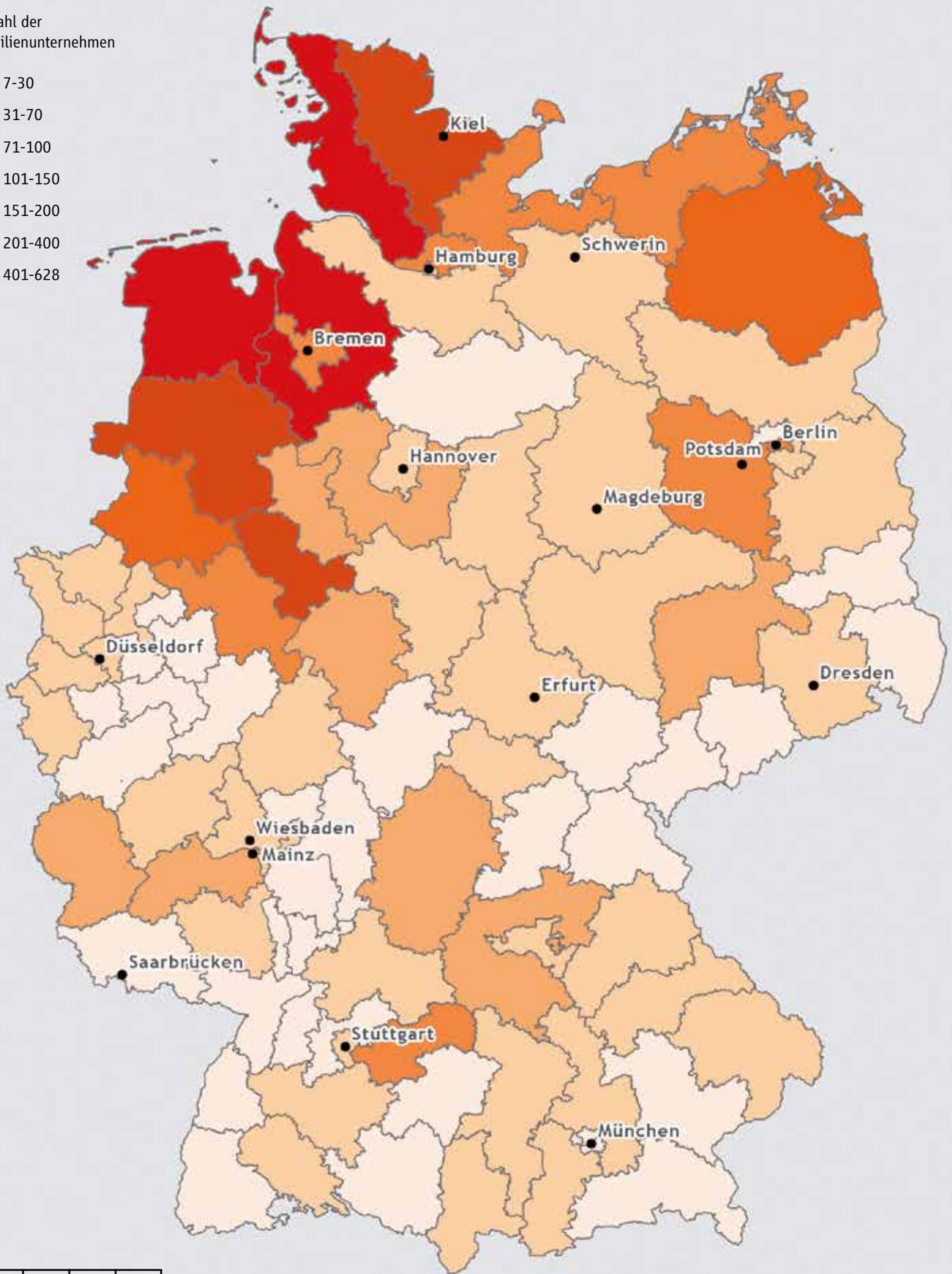
Eines der Familienunternehmen ist die SoWiTec group GmbH, die seit 1993 im Bereich Solar- und Windtechnik aktiv ist. Ihre Windkraftanlagen sind mittlerweile weltweit zu finden. Im Jahr 2016 hatte SoWiTec 1.000 MW und im Jahr 2018 bereits 2.500 MW in Betrieb. Ein weiteres großes Familienunternehmen ist die Max Bögl Wind AG aus der Oberpfalz, die die Innovationsfähigkeit deutscher Familienunternehmen auch durch eine Vielzahl angemeldeter Patente in diesem Sektor demonstriert. Beispielsweise weist Depatisnet allein für die Max Bögl Wind AG 83 Patente aus (Stand 23.09.2022). Die Max Bögl Wind AG wurde 2010 als Tochterunternehmen der Max Bögl Firmengruppe gegründet. Das Familienunternehmen existiert seit 1929.

Abbildung 5 zeigt eine verhältnismäßig hohe Anzahl an in der Windbranche tätigen Familienunternehmen im Norden Deutschlands, wo sie hervorragende Standortbedingungen in Bezug auf Platzverfügbarkeit und Windverhältnisse vorfinden.

Abbildung 5: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Windkraftbranche (nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 7-30
- 31-70
- 71-100
- 101-150
- 151-200
- 201-400
- 401-628



0 100 200 Kilometer

Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Max Bögl Wind AG, Jürgen Joos (CFO Erneuerbare Energien) und Nancy Fürst (Strategie und Nachhaltigkeit):

Im Jahr 2010 hat das 1929 gegründete Familienunternehmen Max Bögl auf Basis langjähriger Know-hows im Bereich Tunnelbau, Feste Fahrbahn und in der Betontechnologie den ersten serienreifen Hybridturm für Windkraftanlagen realisiert und aufgebaut. Daraus entwickelte sich mit der Max Bögl Wind AG ein neuer Geschäftsbereich. Heute ist das Unternehmen ein Systemlösungsanbieter, der im gesamten Wirkungsbereich der erneuerbaren Energien tätig ist. Mit dem Hybridturm wurde ein neuartiges Turmkonzept entwickelt, das durch die Kombination aus Beton und Stahl die technologischen Voraussetzungen für höhere Nabenhöhen hatte. Viel des bis dahin verwendeten Stahls wurde durch Beton ersetzt. Nachhaltigkeit spielte von Anfang an eine große Rolle und die Rückführung in den Kreislauf hat großes Gewicht: So werden bei der Produktion der Betone für Hybridtürme heute bis zu 70 Prozent Zementsubstitute wie Hüttensande (aufgemahlene Abfallprodukte aus der Stahlindustrie) eingesetzt. Zudem wird sehr viel in Forschung und Entwicklung investiert, was sich unter anderem in einer hohen Aktivität bei Patenten niederschlägt. Außerdem ist nach Meinung von Herrn Joos der hohe Standardisierungsgrad eine Schlüsselkomponente für den Erfolg des Produkts. Eines der Ziele sei, dass beim Abbau alter Anlagen keine Abfälle entstehen, da alles recycelbar ist.

Gleichzeitig optimierte Max Bögl auch die Transportierbarkeit der Türme, sodass diese mit Standard-LKW oder auch mit der Bahn zu ihren Einsatzorten gebracht werden können. Die Max Bögl Wind AG ist eigenen Aussagen nach heute Marktführer in Deutschland und bedient mittlerweile circa 50 Prozent des Marktes Windkrafttürme und baut Anlagen mit Nabenhöhen ab 159 Meter. Im Hinblick auf den wachsenden Bedarf an hohen und leistungsfähigen Windkraftanlagen wird im nächsten Jahr die Produktionskapazität um weitere 50 Prozent erhöht. Dies alles sei in einem Familienunternehmen einfacher als in DAX-Unternehmen, da hier auf eine langfristige Investitionsstrategie sowohl hinsichtlich Equipment als auch Personal gesetzt werde. Darüber hinaus haben die Mitarbeitenden wegen der flachen Hierarchien einen höheren Einflussgrad und die Überzeugung der Eigentümerfamilie von der Technologie werde authentisch transportiert.

2018 musste die Branche einen Umsatzeinbruch von 80 Prozent hinnehmen. Max Bögl konnte fast alle Mitarbeitende in anderen Geschäftsbereichen einsetzen und dadurch Kündigungen verhindern. Diese Sicherheit für das Team ist ein wichtiges Anliegen für das Familienunternehmen, ebenso, wie einen Beitrag zur Verringerung der Klimakrise zu leisten. Hilfreich wären perspektivisch mehr Stabilität und Planungssicherheit vonseiten der Politik, um die Investitionsbereitschaft von Unternehmen zu fördern. Ein erster Schritt in diese Richtung wäre mit dem „Osterpaket“, das den Ausbau der erneuerbaren Energien behandelt, bereits gemacht.

Auch gäbe es Verbesserungspotenzial bei den Rahmenbedingungen für die Etablierung von Windkraftanlagen: Genehmigungsverfahren müssen schneller ablaufen, die Akzeptanz seitens der Politik müsse größer werden, da dies eine Voraussetzung für die Akzeptanz in der Gesellschaft ist. Natur- und Artenschutz dürfe nicht gegen Klimaschutz eingesetzt werden, da das eine das andere bedingt. Auch hier fehlen nach Meinung von Herrn Joos klare Richtlinien bei der Genehmigung, die Entscheidungen vereinfachen.

Die Digitalisierung war und sei sehr wichtig für eine serielle Fertigung. Die kundenspezifisch entwickelten Türme setzen sich aus standardisierten Betonsegmenten zusammen. Durch die Automatisierung könne die Planungszeit von sechs Monaten auf vier Wochen reduziert und die Fehlerquote deutlich verringert werden. Selbstfahrende Staplersysteme, Liftersysteme und Magnetheber unterstützen und entlasten die Mitarbeitenden. Ein vermehrter Einsatz von Robotern ist für die nächsten Jahre vorgesehen, da so auch dem Fachkräftemangel entgegen gewirkt werden könne.

Zitat: „Die Aufgabe unseres Familienunternehmens ist es, die Energiewende massiv zu unterstützen und einen Beitrag zum notwendigen gesellschaftlichen Transformationsprozess zu leisten.“

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Bislang dauern Genehmigungsverfahren für Windkraftanlagen bedingt durch strenge Umweltauflagen rund vier bis sechs Jahre. Es ist allerdings vorgesehen, diesen Zeitraum nach Verabschiedung des Wind-an-Land-Gesetzes (Inkrafttreten am 1. Februar 2023) deutlich zu verkürzen. Die für Windkraftanlagen freizugebende Fläche wurde zudem mehr als verdoppelt. Ob und inwieweit diese Änderungen tatsächlich kurzfristig umgesetzt werden, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschätzbar. Werden die Anlagen genehmigt, stellt der Bau der Windkraftanlagen die nächste Herausforderung dar. Einige in diesem Sektor tätige Firmen sind durch Insolvenzen bereits vom Markt verschwunden, andere mussten wegen der schlechten Auftragslage ihre Belegschaft verkleinern.

In einer von der Fachagentur „Windenergie an Land“ beauftragten bundesweit durchgeführten, repräsentativen Umfrage unter 1007 Menschen im Oktober 2021 wurde ermittelt, dass die Nutzung und der Ausbau der Windenergie an Land von einem starken gesellschaftlichen Konsens getragen wird – 80 Prozent der Bevölkerung befürworteten Windenergie, 78 Prozent der Menschen sind mit den Anlagen in ihrer Wohnumgebung einverstanden und der Großteil der Befragten hätte keine großen Bedenken, falls in ihrer Wohnumgebung erstmals Windenergieanlagen errichtet würden. Zudem fordern 61 Prozent der Befragten, dass sich die Bundesregierung stärker für den Ausbau der Windenergie einsetzt als bisher. 79 Prozent der

*Von dem am
1. Februar 2023
inkraftgetretenen
Wind-an-Land-
Gesetz wird eine
deutliche Verkürzung
der Genehmigungs-
verfahren erwartet.*

Befragten fordern finanzielle Partizipation der umliegenden Kommunen.⁹⁵ Das BfN-Skript 551, herausgegeben vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) im Jahr 2020, betrachtet „Akzeptanzfördernde Faktoren erneuerbarer Energien“, wobei die Windkraft eine von insgesamt drei hier angeführten Energieformen (Solarenergie, Windenergie, Biogasanlagen) darstellt. Als besonders hilfreich wird eine Möglichkeit zur finanziellen Partizipation der Menschen an den Anlagen empfunden.⁹⁶ Aber auch die Möglichkeit, am Planungsprozess mitzuwirken, wirkt sich positiv auf die Akzeptanz aus, ebenso wie eine weitgehende Vermeidung oder zumindest Minderung negativer Wirkungen auf Natur und Mensch.⁹⁷

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Der theoretisch erreichbare Wirkungsgrad einer Windkraftanlage liegt bei 59,3 Prozent. Der in der Praxis mittlerweile erreichbare Wert ist mit circa 45 bis 50 Prozent schon sehr gut.⁹⁸ Durch die vorgesehene Änderung des Wind-an-Land-Gesetzes ist eine Steigerung des Zubaus von Windkraftanlagen zu erwarten. Aber auch Repowering (Ersatz von alten und kleineren Anlagen durch leistungsstärkere Anlagen) wird zunehmend erwartet. Die EnBW Energie Baden-Württemberg AG sagt dazu: „Eine Faustformel für Repowering-Projekte lautet: Bei einer Halbierung der Anlagenzahl lässt sich eine Verdrei- oder sogar Vervierfachung des Stromertrags erzielen.“⁹⁹ (Abbildung 6)

Ein Problem konnte bislang noch nicht gelöst werden: Die Rotorblätter der Windkraftanlagen werden zu einem großen Teil aus Verbundmaterialien wie glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), Balsaholz und Metall sowie in zunehmendem Maße auch aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) hergestellt. Bis heute ist noch nicht final geklärt, wie diese nach dem Rückbau verwertet oder recycelt werden können. Speziell zu diesem Thema hat sich der Verbund RDRWind e.V. gegründet, der sich dieser Aufgaben annimmt: So wurde im Oktober 2020 eine entsprechende DIN SPEC¹⁰⁰ erarbeitet, die sich mit dem nachhaltigen Rückbau, der Demontage, dem Recycling und der Verwertung von Windenergieanlagen befasst.¹⁰¹ Ebenso beschäftigen sich die Industrie und die Forschung mit dieser Aufgabe.^{102, 103, 104, 105}

95 Sonderhaus 2021.

96 Hübner et al. 2020 S. 28.

97 Hübner et al. 2020, S. 12.

98 EWE 2022.

99 EnBW 2021.

100 DIN SPEC: Eine DIN SPEC (SPEC = specification) ist ein Standarddokument, das unter Leitung von DIN, nach dem PAS-Verfahren (Publicly Available Specification) erarbeitet wird.

101 ICS 27.180; 91.200.

102 Roth International o.J.

103 Veolia 2021.

104 Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) 01.11.2020 – 31.10.2023.

105 Henningsen und Ruckdäschel 2021, S. 419.

Abbildung 6: Repowering (mit freundlicher Genehmigung von EnBW¹⁰⁶)



Die Bundesnetzagentur reagierte Ende 2022 auf die gestiegenen Kosten für Errichtung und Betrieb von Windkraftanlagen sowie auf gestiegene Zinsen, indem sie die Höchstwerte für Gebote von 5,88 Cent auf 7,34 Cent hochstufte. Zuvor waren die Gebote sehr stark zurückgegangen. Mit dem neuen Höchstwert soll dieser Rückgang umgekehrt und die Anlagen wieder auskömmlich werden.¹⁰⁷

8. Zusammenfassung

Für den Windenergie-Anlagenbau ergibt sich eine positive Perspektive. Der Zubau ist beschlossen, die Akzeptanz in der Bevölkerung ist gestiegen, mit der Verabschiedung des Windanland-Gesetzes sind die gesetzlichen Voraussetzungen verbessert worden, Windkraft gilt als politisch gewollt, wenn auch die Umsetzung der schnelleren Genehmigungsverfahren noch läuft. Die Branche hofft darauf, dass die im genannten Gesetz geforderten Änderungen nun auch zeitnah umgesetzt werden. Dazu zählen auch Genehmigungsverfahren für den Transport von Rotorblättern zu den jeweiligen Standorten. Alles in allem stehen die Chancen hervorragend für die Branche, die zudem zukunftsfähig aufgestellt ist.

106 EnBW 2021.

107 Richter und Herms 2023.



III. Bioenergie (Biogas)

1. Wirkungsprinzip

Der Bioenergiesektor beinhaltet verschiedene Anwendungsbereiche, Rohstoffe und Technikpfade. Energieträger der Bioenergie können Biogas und das daraus gewonnene Biomethan sein, auf die im vorliegenden Technologiesteckbrief eingegangen wird. Die für ihre Herstellung benötigten Rohstoffe können landwirtschaftlich angebaut werden, zum Beispiel in Form von Mais, Raps, Sonnenblumen oder Ölpalmen. Aber auch Holz aus der Forstwirtschaft oder biogener Abfall und Reststoffe aus verschiedenen Sektoren, wie der Industrie oder Haushalten, können zur Herstellung von Biogasen genutzt werden.¹⁰⁸

Damit Biogas erzeugt werden kann, werden zum Beispiel Gülle, Bioabfälle oder Energiepflanzen (z. B. Mais, Gras oder Zuckerrüben) einem Fermentationsprozess unterzogen. Dazu werden die Substrate in Gärbehältern eingebracht und durch Mikroorganismen zu Biogas transformiert. Das erzeugte Biogas besteht, in Abhängigkeit von den eingesetzten Substraten, zu 50 bis 65 Prozent aus Methan und zu 35 bis 50 Prozent aus Kohlendioxid. Weitere Inhaltsstoffe sind Sauerstoff, Stickstoff, Schwefelwasserstoff und Wasser. Biogas kann durch Verbrennung zu elektrischem Strom und Wärme umgesetzt werden oder nach Aufbereitung als Treibstoff für Motoren genutzt werden. Als Nebenprodukt des Fermentationsprozesses entsteht ein stoffliches Gärprodukt, welches sich aufgrund des hohen Anteils von Nähr- und Huminstoffen als Dünger nutzen lässt.¹⁰⁹

Für die Stromerzeugung können zwei verschiedene Konversionsketten identifiziert werden. Beim ersten Konversionspfad wird Biogas in ein Blockheizkraftwerk (BHKW) geleitet und durch Verbrennung in Strom und Wärme umgewandelt. Beim zweiten Konversionspfad wird das Biogas erzeugt und danach einer Gastrennung und Aufreinigung auf Erdgasqualität unterzogen. Darauf folgt eine Verdichtung mit anschließender Einspeisung in das Gasnetz. Das erzeugte Biomethan kann anschließend an anderer Stelle in BHKWs geleitet und für die Stromerzeugung und vor allem zur Kraft-Wärme-Kopplung genutzt werden.¹¹⁰

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Ein Fahrzeug, welches mit Biomethan betrieben wird, weist einen CO₂-Verbrauch auf, der bis zu 90 Prozent geringer ist als der eines Benziners. Im Jahr 2019 konnte an einem Drittel der 900 „Compressed Natural Gas“ (CNG)-Tankstellen Biogas als Pkw-Kraftstoff erworben werden. Voraussetzung zur Nutzung von Biogas als Fahrzeugkraftstoff ist, dass der Methangehalt auf

108 Umweltbundesamt (UBA) 2022b.

109 Fachverband Biogas e.V. 2019, S. 6-8.

110 Dotzauer et al. 2022 S. 13.

98 Prozent erhöht wird. Dazu ist eine Entfernung des CO₂ nötig. Das Endprodukt wird auch als Biomethan bezeichnet.¹¹¹

Im Jahr 2021 erzeugte die Bioenergie 171,5 Terawattstunden für die Wärmeerzeugung und 50,4 Terawattstunden für die Stromerzeugung. Die Bioenergie macht damit einen Anteil von 86 Prozent an den erneuerbaren Energien aus, die für die Wärmeerzeugung genutzt werden, und stellte 22 Prozent des erneuerbaren Stroms zur Verfügung. Durch den Einsatz von Biogas konnten etwa 79 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente vermieden werden, was 35,8 Prozent der gesamt durch erneuerbare Energien eingesparten Treibhausgasemissionen entspricht. Bei der Stromproduktion konnten 30,3 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente eingespart werden und bei der Wärmeproduktion 39,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Bei der Wärmeproduktion spart die Bioenergie den mit Abstand größten Anteil ein. Auch im Verkehrssektor kann die Bioenergie CO₂-Einsparungen verzeichnen und zwar in einer Höhe von 9,8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten.

Durch den Ausbau moderner Bioenergiequellen und -technologien kann eine bezahlbare Versorgungssicherheit gewährleistet werden, was sich positiv auf das SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“ auswirkt. Der vermehrte Einsatz von Bioenergie führt zu einer Substitution von fossilen Energieträgern und damit auch zu einer Minderung von Treibhausgasemissionen. Daraus resultiert ein wichtiger Beitrag zu dem SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“.¹¹²

3. Märkte und Arbeitsplätze

Die Biogasbranche in Deutschland erzielte im Jahr 2021 einen Umsatz in Höhe von rund 9,9 Milliarden Euro.¹¹³ Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2021 13,4 Milliarden Euro in erneuerbare Energien investiert. Davon wurden 2,4 Milliarden Euro (18 Prozent) in die Wärmeerzeugung durch Biomasse investiert und 268 Millionen Euro (2 Prozent) in die Stromerzeugung durch Biomasse. Die wirtschaftlichen Impulse für erneuerbare Energien in Deutschland beliefen sich im Jahr 2021 auf 20,2 Milliarden Euro. Biokraftstoffe hatten dabei einen Anteil von 25 Prozent (5,05 Milliarden Euro), die Stromproduktion durch Biomasse 22 Prozent (4,4 Milliarden Euro) und die Wärmeerzeugung durch Biomasse 19 Prozent (3,8 Milliarden Euro).¹¹⁴

111 Fachverband Biogas e.V. 2019, S. 20-21.

112 Thrän und Moesenfechtel 2020, S. 364 ff.

113 Fachverband Biogas e.V. 2022a.

114 Umweltbundesamt (UBA) 2022c, S. 17.

Laut Fachverband Biogas e.V. waren im Jahr 2019 47.000 Mitarbeitende in kleinen und mittelständischen Wirtschafts- und Landwirtschaftsbetrieben aus der Biogasbranche angestellt. An den 9.500 Biogasanlagen sind 14.000 Personen beschäftigt.¹¹⁵

Im ländlichen Raum sind Biogas und Biomethan ein wichtiger Faktor für die Bereitstellung von Arbeitsplätzen und für die wirtschaftliche Entwicklung. Zusätzlich zu Wind- und Solaranlagen wird Biogas als dezentrale Strom- und Wärmeproduktion in landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt und durch das EEG gefördert.¹¹⁶

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 5.603 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Biogas*“ zu finden (Stand: 3.11.2022):

- 36 AGs
- 2.653 GmbHs
- 201 vollhaftende Personengesellschaften
- 2.672 teilhaftende Personengesellschaften
- 41 Einzelunternehmen

Die Verteilung der Familienunternehmen in der Biogasbranche (siehe Abbildung 7) lässt eine erhöhte Dichte in Nordwestdeutschland feststellen. Zum einen lässt sich dies auf den erhöhten Anbau von Energiepflanzen, wie Mais, in dieser Region zurückführen¹¹⁷, zum anderen auf die Gesamtviehichte, die in Norddeutschland am höchsten ist.¹¹⁸ Dadurch liegt eine ausreichende Menge an Gülle vor, welche einen wichtigen Faktor als Substrat bei der Produktion von Biogas bildet.

115 Fachverband Biogas e.V. 2019, S. 22 ff.

116 Reinholz et al. 2021, S. 4 ff.

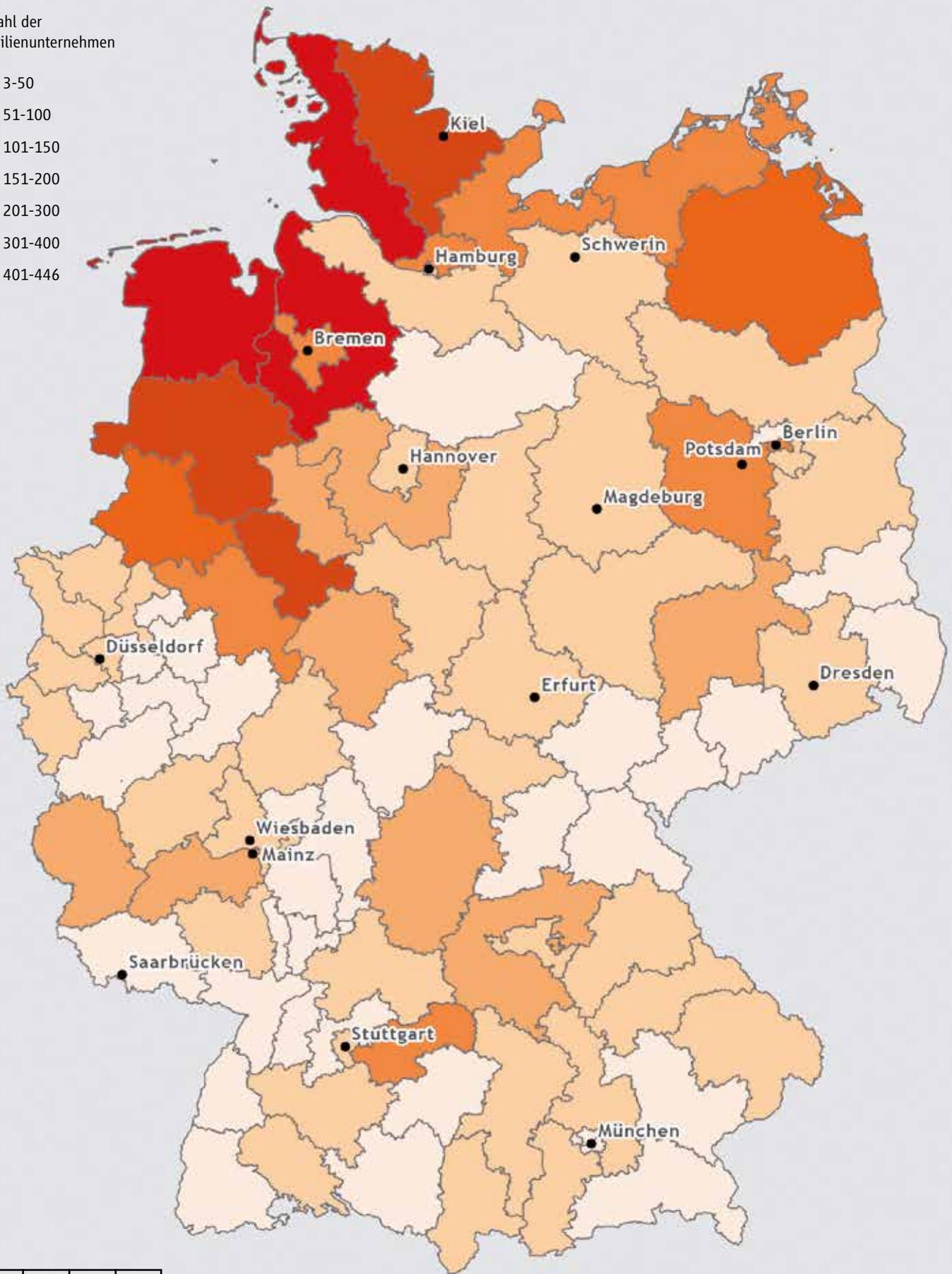
117 Deutsches Maiskomitee (DMK) 2020b.

118 Deutsches Maiskomitee (DMK) 2020a.

Abbildung 7: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Biogasbranche (nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 3-50
- 51-100
- 101-150
- 151-200
- 201-300
- 301-400
- 401-446



0 100 200 Kilometer

Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Loick AG, Hubert Loick (Vorstandsvorsitzender Loick AG):

Als Hubert Loick 1994 die Loick AG gründete, setzte er den Fokus auf die Nutzung und Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen, mit dem Schwerpunkt auf Herstellung von Biowertstoffen¹¹⁹ und Erzeugung von Bioenergie¹²⁰. Heute hat die Loick AG rund 130 Mitarbeitende und 4 Tochterunternehmen, die in unterschiedlichen Bereichen tätig sind.

Der Wunsch nach Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit waren zwei Ziele, die Herrn Loick zur Firmengründung veranlassten. Auslöser war die damals herrschende Überproduktion in der Landwirtschaft. Der Gedanke, die überschüssigen Produkte umweltfreundlich und auch gewinnbringend zu nutzen, führte dazu, dass heute bundesweit 35 Biogasanlagen von Loick betrieben werden. Eine Biogasanlage stellt, so Herr Loick, mit der gesamten Wertstoffkette an dem jeweiligen Standort einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar.

Dabei beginne Nachhaltigkeit schon auf dem Acker: Die Biomasseproduktion müsse umweltschonend mit möglichst wenig Eingriffen in den Boden, energiesparend und grundwasserschonend ablaufen. In Dorsten werden 350 Hektar Land autark – also ohne Düngemittelzukauf oder ähnliches – mit Mais, Hirse und Getreide-GPS (Ganzpflanzensilage) bestellt. Zugesetzt werden noch Mist und Gülle von benachbarten landwirtschaftlichen Betrieben. Über Rückgabeverträge erhalten die Landwirte im Gegenzug erzeugte Nährstoffe zurück. Als Familienunternehmer hat Herr Loick ein großes Interesse, seine Landwirtschaft nachhaltig zu betreiben, um so die Zukunft des Unternehmens zu sichern; Familienunternehmer zu sein, bringe eine enorme Verantwortung gegenüber dem Unternehmen und natürlich auch gegenüber den Mitarbeitenden mit sich.

Als hilfreich bezeichnet Herr Loick die Fördergelder für Forschung im Mittelstand, da hier die meisten Innovationen geschaffen werden. Darüber hinaus brauche man den Zugang zu den Menschen, um eine breite Masse zu erreichen und dann die nachfolgenden Ideen umsetzen zu können. Gute Kontakte zur Politik, ein gutes Verständnis des Marktes (was gleichzusetzen ist mit den Menschen, die Veränderung wollen) und der Wille, Probleme als Chance zu verstehen, ermögliche das Wachstum der Loick AG. Es gebe aber auch Hemmnisse, wie zum Beispiel technische Probleme, Widerstand aus der Industrie gegenüber neuen, innovativen Produkten, oft gepaart mit Lobbyismus, was den „Neuen“ am Markt das Leben schwer mache und oft zur Schließung oder zum Verkauf neuer Unternehmen führe, oder auch die mangelnde

119 <https://www.loick-ag.de/loick-biowertstoffe/>.

120 <https://www.loick-ag.de/loick-bioenergie/>.

Verlässlichkeit der Politik. Diese solle nach Möglichkeit klare Ziele vorgeben, die dann auch Bestand haben und nicht mehr modifiziert werden. „Politik soll die Welt nachhaltiger machen“, statt unnötig in das Marktgeschehen einzugreifen, so die Meinung von Herrn Loick.

Die Digitalisierung sei eine große Hilfe. Nicht nur die Etablierung des „papierlosen Büros“, sondern vor allem die Datenerfassung gekoppelt mit der Nutzung der Daten für die Steuerung der Anlagen eröffnet viele Möglichkeiten. Die ständige Verfügbarkeit von Biogas-Speichermengen sei ebenso eine Arbeitserleichterung wie die Kontrolle der Nutzfahrzeuge oder der Anlagen.

Zitat: „Die Neugier steht immer an erster Stelle eines Problems, das gelöst werden will.“

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Es muss entschieden werden, wofür landwirtschaftliche Flächen sinnvoll genutzt werden können (Nahrungsmittel, Futtermittel, Naturschutz, Energiepflanzen oder Weideland). Seit den 1990er-Jahren hat die Aufforstungsfläche in der Europäischen Union um etwa 10 Prozent zugenommen – Fläche, die nicht mehr zum Anbau von anderen Pflanzen inklusive Bioenergiepflanzen zur Verfügung steht.¹²¹

Die Stromerzeugung aus energetischer Biomasse deckt Grundlast und Ausgleichslast. Üblicherweise decken Biomasse-basierte Kraftwerke (ohne Biogas) die Grundlast, die mit Biogas decken die Ausgleichslast.¹²² Wenn der Anteil der erneuerbaren Energien im Netz künftig steigt, steigt auch der Bedarf an Kraftwerken, die auf die Schwankungen im Netz flexibel reagieren können. Die Deckung dieser Ausgleichslast erfordert den Ausbau von Biogasspeicherkapazitäten für die mit Bioenergie betriebenen Kraftwerke.¹²³

Die Anerkennung/Kennzeichnung von Bioenergie ist aus rechtlicher Sicht umstritten. So hat die europäische „Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2018/2001“ (RED-II) strengere Kriterien für die Anerkennung von Biokraftstoffen als „nachhaltig“ festgelegt. Nach Artikel 26(1) der RED-II soll der Anteil von Biokraftstoffen aus Nahrungspflanzen unter 7 Prozent des Energieverbrauchs im Verkehrssektor liegen. Liegt dieser Anteil im Jahr 2020 jedoch unter 1 Prozent, darf er auf maximal 2 Prozent ansteigen.¹²⁴

121 Santeramo et al. 2022.

122 Lauer und Thrän 2017.

123 Next Kraftwerke o.J.

124 Europäische Kommission 2018a.

Der Biogassektor bewegt sich künftig auf ein anderes Modell zu, bei dem (a) organische Abfälle, landwirtschaftliche Nebenprodukte und Folgekulturen hauptsächlich als Ausgangsstoffe verwendet werden, Biogas zu Biomethan für verschiedene Anwendungen (Transport, chemische Produktion, Wärme und so weiter) aufbereitet wird, und (b) die Subventionsregelungen schrittweise abgebaut werden. Insgesamt drängt die derzeitige europäische Politik den Sektor dazu, seine Nachhaltigkeit zu verbessern und die Kosten der Biogasproduktion zu senken.¹²⁵ Hierfür muss der Biogassektor seine Innovationsfähigkeit unter Beweis stellen.

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Im Jahr 2019 machte russisches Gas 55 Prozent des gesamten Erdgasimports Deutschlands aus. Aufgrund des Ukraine-Kriegs reduzierte sich der Import von russischem Erdgas in Deutschland im Jahr 2022 drastisch. Das liegt zum einen an Sanktionen gegen Russland¹²⁶ und zum anderen an einer noch ungeklärten Sabotage, welche am 22. September 2022 zu einer Explosion der Pipeline Nordstream 2 führte.^{127, 128} Diese Entwicklungen lassen das öffentliche Interesse an der nationalen Biogasversorgung als zukunftsfähige Alternative ansteigen.

Biogas ist ein wichtiger Energieträger für erneuerbare Energien und kann im Stromsektor einen relevanten Ausgleich bei Residuallastschwankungen durch Windkraftanlagen und Photovoltaik leisten – vorausgesetzt, der heutige Anlagenbestand bleibt erhalten und wird weiterentwickelt.¹²⁹ Laut einer Kurzstudie des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) besaß zu Biomethan aufbereitetes Biogas im Jahr 2022 einen Anteil von einem Prozent am deutschen Erdgasmarkt.¹³⁰ Dieser Anteil ließe sich bei einer Forcierung der Biomethanaufbereitung mittelfristig auf drei Prozent erhöhen.¹³¹ Rein chemisch betrachtet ist Biomethan identisch mit Erdgas. Das bestehende Erdgasnetz stellt somit eine bereits gut ausgebaute Infrastruktur zur Gasverteilung und Speicherung zur Verfügung.

Der Fachverband Biogas e.V. verweist auf eine stark gestiegene Nachfrage nach Wärme aus Biogas.¹³² Um die Potenziale von Biogas in Zukunft weiter auszuschöpfen und die Investitionsbereitschaft in der Branche anzuheben, müssten jedoch politische Unsicherheiten beseitigt werden. Denn die Förderrahmenbedingungen des EEG 2021 erscheinen vor allem für die Errichtung neuer Biogasanlagen als wenig attraktiv. In Verbindung mit den politischen

Mit politischem Willen kann Biogas die Gaskrise abmildern.

125 Brémond et al. 2021.

126 Deutschlandfunk 2022.

127 Tagesschau 2022a.

128 BP 2020.

129 Dotzauer et al. 2022, S. 9.

130 Dotzauer et al. 2022, S. 40.

131 Dotzauer et al. 2022, S. 40.

132 Fachverband Biogas e.V. 2022b.

Entwicklungen (Ukraine-Krieg) kündigte Bundeswirtschaftsminister Robert Habeck (Bündnis 90/Die Grünen) an, die Biogasproduktion kurzfristig auszuweiten.¹³³ Erreicht werden solle dies unter anderem durch eine Sonderregelung für die EEG-Förderung von Biogasanlagen. Das EEG 2023 konzentriert die Förderung stärker auf hochflexible Spitzenlastkraftwerke.¹³⁴

Ein Großteil der Energiepflanzen, die für die Biogasproduktion eingesetzt werden, ist Mais. Im Jahr 2020 besaß Mais einen Gesamtanteil an der Biogaserzeugung von 48 Prozent.¹³⁵ Grund dafür ist vor allem dessen Effizienz im Anbau. Bis zum Jahr 2030 soll die Nutzung von Mais für Biogasanlagen auf 35 Prozent begrenzt¹³⁶ und stattdessen der Einsatz von überjährigem Klee gras gefördert werden.¹³⁷ Neben derartiger Anbaubiomasse, welche aufgrund möglicher Verdrängungseffekte bei der Landnutzung als kritisch angesehen wird, gibt es noch weitere Biomassequellen, die laut UBA teilweise ökologisch günstigere Effekte besitzen,¹³⁸ denn für die Entstehung von Biogas können auch Pflanzen, die in der Lebens- und Futtermittelproduktion keine Verwendung finden, oder auch Grünschnitt eingesetzt werden. Darunter fallen zum Beispiel auch insektenfreundliche Blühstreifen mit Wildpflanzenmischungen, die bisher in der Landwirtschaft kaum zu finden sind.¹³⁹ Laut Prognose des DBFZ wird sich der Einsatz von Rest- und Abfallstoffen in Zukunft erhöhen.¹⁴⁰ Im Jahr 2020 lag der Substrateinsatz von Rest- und Abfallstoffen bei 16 Prozent.¹⁴¹ Auch wenn in der Industrie Energiepflanzen in Zukunft stärker nachgefragt würden, sei von einer abnehmenden Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion auszugehen.¹⁴²

Das Energienetz in Dänemark hielt im Jahr 2022 mit 30 Prozent Biogas am nationalen Gasmarkt den weltweit größten Anteil.¹⁴³ Seit 2012 hat sich die Biogasproduktion in Dänemark damit mehr als verdreifacht. Bis 2032 soll über Biogas sogar der komplette Gasbedarf gedeckt werden. Grund für den Erfolg des Biogases in Dänemark sei laut dem Pressesprecher des größten dänischen Biogasproduzenten vor allem die nationale Strategie.¹⁴⁴ Während sich Dänemark in den letzten zehn Jahren vorrangig auf Großanlagen und Großlieferanten fokussierte, hat Deutschland sich strategisch eher auf kleinere und dezentrale Biogasreaktoren konzentriert.

133 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022j.

134 Die Bundesregierung 2022c.

135 Dotzauer et al. 2022, S. 23.

136 Die Bundesregierung 2022c, S. 223.

137 Die Bundesregierung 2022c, S. 160.

138 Umweltbundesamt (UBA) 2022b.

139 Fachverband Biogas e.V. o.J.b.

140 Dotzauer et al. 2022, S. 9.

141 Dotzauer et al. 2022, S. 21.

142 Dotzauer et al. 2022, S. 41.

143 Frantzen 2022.

144 Frantzen 2022.

Dies hatte wiederum eine Verlagerung auf den Anbau von energiereichen Pflanzen wie Mais zur Folge, da der Hofdünger für die Anlagen oftmals nicht ausreicht. Dänemark hingegen bezieht den Großteil seines Ausgangsmaterials aus Gülle und anderem organischem Abfall.¹⁴⁵

Die Lagerung von Wirtschaftsdünger (Festmist oder Gülle) erzeugte im Jahr 2021 rund 250.000 Tonnen Methanemissionen.¹⁴⁶ Methan ist rund 25-mal klimaschädlicher als CO₂. Gemessen an den gesamten Methanemissionen in der Landwirtschaft stammen 20 Prozent aus dem Wirtschaftsdüngermanagement.¹⁴⁷ Die Biogaserzeugung bietet ein sowohl technisches als auch wirtschaftlich großes Potenzial, diese Methanemissionen zu reduzieren. Derzeit wird etwa ein Drittel des vorhandenen Wirtschaftsdüngers energetisch in Biogasanlagen genutzt.¹⁴⁸ Fachleute gehen jedoch von einer Verdopplung der eingesetzten Wirtschaftsdüngermengen bis zum Jahr 2030 aus. Wird aktuell hauptsächlich Rindergülle in Biogasanlagen genutzt, konzentrieren sich Forschungsvorhaben auf die ökonomische und technische Optimierung des Einsatzes von Schweinegülle, welche einen höheren Wassergehalt als die von Rindern aufweist.¹⁴⁹

Die Optimierung der sich während der Vergärung abspielenden mikrobiellen Prozesse erfordert einen hohen Forschungsbedarf. Laut des Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) ist gerade einmal von ein bis zwei Prozent der rund 2.000 unterschiedlichen Mikroorganismen, die sich in den Fermentern befinden, die genaue Funktion bekannt.¹⁵⁰ Von besonderem Interesse sind dabei vor allem sogenannte Zeigearten der Mikroorganismen, die Aufschluss über den Gärprozess geben oder bereits im Vorfeld auf Probleme hinweisen können. Daran angepasst könnten Sensoren – auch Biosensoren (siehe Exkurs zur mikrobiellen Brennstoffzelle, Abschnitt D.V) –, die die chemischen Parameter in den Fermentern überwachen, in Zukunft über Temperaturregelungen oder das Eingreifen in die Zusammensetzung von Einsatzstoffen automatische Korrekturen auslösen.¹⁵¹ Ein weiteres Forschungsfeld ist der Einsatz von mobilen Biogasanlagen, in denen bereits vor Ort beispielsweise auf Großveranstaltungen die organischen Abfälle für die weitere Verarbeitung aufbereitet werden.

Innerhalb Europas gelten Schweden und die Schweiz als Vorreiter bei dem Einsatz von Erdgasfahrzeugen mit Biomethan. In Deutschland betrug der Anteil von Biomethan im Jahr 2021

145 Deutsch-Dänische Handelskammer 2021, S. 9.

146 Umweltbundesamt (UBA) 2022g.

147 Umweltbundesamt (UBA) 2022g.

148 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) o.J.c.

149 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2022.

150 Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2019, S. 22.

151 Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2019, S. 23.

beim Endenergieverbrauch aus erneuerbaren Energien im Verkehrssektor 2,5 Prozent.¹⁵² Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) bemängelt, dass die Potenziale trotz ein-satzbereiter Technik nicht ausgeschöpft werden.¹⁵³ Der Kraftstoffmarkt in Deutschland zeigt jedoch eine wachsende Nachfrage nach Biomethan von circa 389 Gigawattstunden im Jahr 2018 auf 884 Gigawattstunden im Jahr 2020.¹⁵⁴ Damit ist der Kraftstoffmarkt der zweitgrößte Absatzmarkt für Biomethan mit 10 Prozent.¹⁵⁵

8. Zusammenfassung

Biogas leistet einen wichtigen Beitrag, um die Sektoren Strom, Wärme und Kraftstoffe mit erneuerbaren Energien zu versorgen. Dabei kann der Einsatz von Biogas vor allem als Ausgleich bei Schwankungen der Restlast durch Windkraftanlagen und Photovoltaik genutzt werden. Um dieses Potenzial in Zukunft auszuschöpfen, bedarf es jedoch einer Weiterentwicklung des Anlagenbestandes. Der Krieg in der Ukraine hat zu einer Verstärkung der Diskussion über die Entwicklungsperspektiven von Biogas geführt. Zukünftig kann die schrittweise Reduktion der Nutzung des fossilen Energieträgers Erdgas Märkte für Biogas öffnen.¹⁵⁶

Die Umweltfreundlichkeit der Produktion von Biogas wird kontrovers diskutiert und muss je nach Einzelfall in Bezug auf die genutzten Rohstoffe und Anwendungsbereiche betrachtet werden. Verbindliche Nachhaltigkeitsforderungen in Bezug auf die Flächennutzungskonkurrenz von Pflanzen zur Ernährung beziehungsweise zur Energiegewinnung fördern die Umweltverträglichkeit.

152 Umweltbundesamt (UBA) 2022c, S. 14.

153 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) o.J.b.

154 Dotzauer et al. 2022, S. 22.

155 Dotzauer et al. 2022, S. 22.

156 Dotzauer et al. 2022, S. 41.



IV. Tiefengeothermie

1. Wirkungsprinzip

Geothermische Energie ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde. Synonyme sind Erdwärme oder auch Geothermie.¹⁵⁷ Die geothermische Energie strömt über Wärmeleitungen vom heißen Erdkern zur kalten Erdoberfläche und erzeugt in Abhängigkeit von den geologischen Strukturen einen ortsabhängigen Temperaturgradienten. In Deutschland wird bis zu einer Tiefe von zehn Kilometern ein durchschnittlicher Wert von 3 Grad Celsius pro 100 Meter angenommen. Bei der Nutzung der geothermischen Energie wird üblicherweise in Abhängigkeit von der Tiefe zwischen der oberflächennahen (bis circa 400 Meter) und der tiefen Geothermie (Tiefen größer als 400 Meter) unterschieden. Wie in Abbildung 8 veranschaulicht, existieren zur Nutzung der Erdwärme verschiedene Techniken: Die meisten der für die Gebäudeheizung vorgenommenen Bohrungen reichen in eine Tiefe von 50 bis 200 Metern, wo eine Temperatur zwischen 8 und rund 15 Grad Celsius herrscht. Dass man nicht in größere und damit wärmere Tiefen vordringt, ist meist die Folge einer Kosten-Nutzen-Abschätzung. Alternativ können auch Erdwärmekollektoren zum Einsatz kommen. Diese breiten sich auf einer ausgedehnten Fläche in circa 80 bis 160 Zentimeter Tiefe (frostfreier Bereich) horizontal in der Erde aus. Auf diese Weise wird die Temperatur der zirkulierenden Wärmeträgerflüssigkeit auf ganzjährig rund 10 Grad Celsius erwärmt. Erdwärmekollektoren benötigen eine große Fläche, sind jedoch auch preiswerter als Erdbohrungen.

Bei Tiefen von mehr als 400 Metern beginnt die Tiefengeothermie, die sich bis in eine Tiefe von 5.000 Metern erstreckt. Es wird zwischen der hydrothermalen (Nutzung von Heißwasser-Aquiferen) und der petrothermalen Energiegewinnung (überwiegend Nutzung der im Gestein gespeicherten Energie) unterschieden. Hydrothermale Systeme nutzen natürlich vorkommendes Thermalwasser, welches standardmäßig über eine Förder- und Injektionsbohrung (hydrothermale Dublette) erschlossen wird.¹⁵⁸ In Abhängigkeit von der Reservoirtiefe können Temperaturen von circa 40 bis über 100 Grad Celsius bereitgestellt werden.¹⁵⁹ Petrothermale Systeme arbeiten hingegen unabhängig von wasserführenden Gesteinsschichten. Stattdessen werden warme, hydraulisch leitfähige Klüftstrukturen im Untergrund genutzt, welche das nachträglich eingebrachte Oberflächenwasser erwärmen. Zur Erhöhung der Durchlässigkeit können nachträgliche Stimulationsmaßnahmen eingesetzt werden.¹⁶⁰

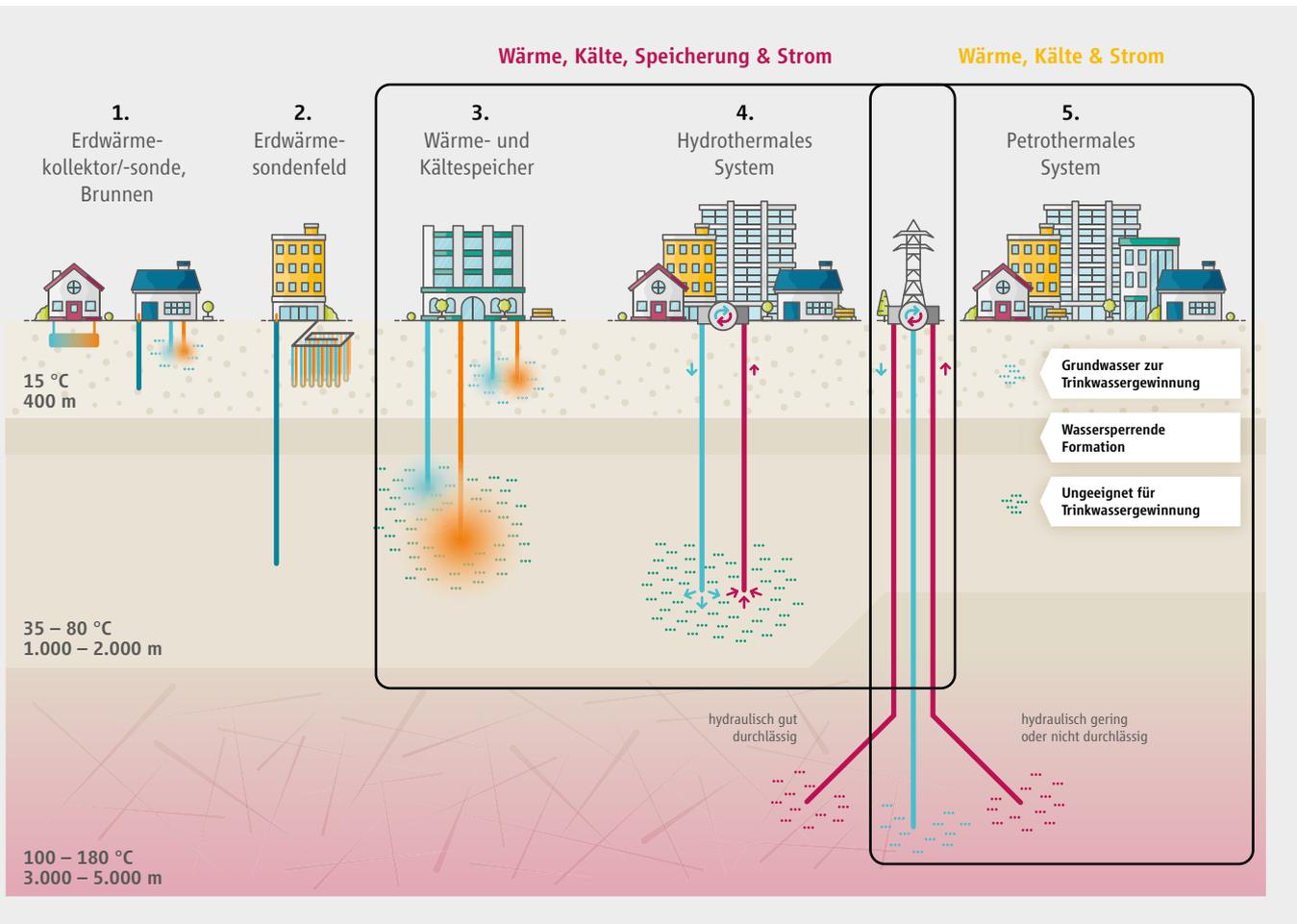
157 Stober et al. 2016.

158 Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik 2022.

159 Erdwerk GmbH 2022.

160 Bayerisches Landesamt für Umwelt (lfu) 2021.

Abbildung 8: Geothermische Systeme zur Speicherung und Bereitstellung von Wärme sowie Kälte und Strom. Oberflächennahe Technologien (links) sind flächendeckend marktverfügbar (mit freundlicher Genehmigung Fraunhofer IEG¹⁶¹).



Mit der Tiefengeothermie könnten in Deutschland theoretisch etwa 25 Prozent des Gesamtwärmebedarfs gedeckt werden. Diese Form der erneuerbaren Energie ist grundlastfähig und bietet dadurch Vorteile gegenüber Wind- und Solarenergie. Ab einer Temperatur von 120 Grad Celsius ist zudem der wirtschaftliche Betrieb von geothermalen Kraftwerken zur Stromerzeugung möglich. Aufgrund der moderaten Temperaturen sind diese Systeme allerdings auf Binärkreisläufe (z. B. Organic-Rankine-Cycle) angewiesen. Zur Einordnung: Die Tiefengeothermie führte im Jahr 2020 zu einer Stromerzeugung von 231 Gigawattstunden (zum Vergleich: Das Marktpotenzial liegt bei über 300 Terawattstunden Jahresleistung, bei einem Endenergiebedarf von circa 1.400 Terawattstunden pro Jahr in Deutschland¹⁶²). So

161 Bracke und Huenges 2021.

162 Bracke und Huenges 2021.

wurden durch die geothermische Stromerzeugung Treibhausgasemissionen in Höhe von circa 155.000 Tonnen CO₂-Äquivalent vermieden.¹⁶³

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Der Wärmesektor (dazu zählt jegliche Erzeugung von Wärme wie Raumwärme, Warmwasser sowie Kälte und Prozesswärme/-kälte in Gewerbe und Industrie) ist für 56 Prozent des nationalen Endenergiebedarfs verantwortlich. Bislang werden 85 Prozent dieser Wärme durch fossile Energieträger erzeugt, also durch Kohle, Öl und Gas. Die (Tiefen-)Geothermie könnte einen großen Teil der benötigten Wärmeenergie bis zu einem Temperaturniveau von 200 Grad Celsius liefern und leistet einen direkten Beitrag zu SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“ und SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Im Jahr 2021 waren in dieser Branche 35.900 Personen beschäftigt. Zehn Jahre zuvor waren es nur 18.100. Dies entspricht einer Steigerung um fast 100 Prozent.¹⁶⁴

Innerhalb des Eckpunktepapiers für eine Erdwärmekampagne des BMWK wird der Ausbau der Tiefengeothermie klar unterstützt und Unternehmen und Verbände werden darin aufgefordert, der „unzureichenden Verfügbarkeit von Fachkräften“ entgegenzuwirken.¹⁶⁵ Dieses politische Zeichen soll laut einer Pressemitteilung zusätzlich durch Maßnahmen zur Fachkräftesicherung flankiert werden.¹⁶⁶

Um den Markt zu stärken, werden Marktanreize notwendig sein. Geothermische Projekte tragen ein hohes finanzielles Risiko, das durch geeignete Maßnahmen (Entwicklungsfonds, Versicherung zum Ausgleich von Fündigkeitsrisiken) minimiert werden sollte. Bracke et al. gehen von notwendigen langfristigen Investitionskosten von rund 170 Milliarden Euro aus und davon, dass bereits bis 2025 eine Umstellung in der Wohnungswirtschaft von zehn Prozent der Bestandgebäude auf Tiefengeothermie möglich und im Neubaubereich eine Quote von 30 Prozent realistisch sei.¹⁶⁷

4. Beitrag von Familienunternehmen

Da viele Unternehmen in diesem Bereich sowohl oberflächennahe als auch tiefe Bohrungen durchführen, sind sie oft unter dem Begriff „Geothermie*“ in der Datenbank gelistet. Daher

163 Lauf et al. 2021.

164 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2022.

165 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022b.

166 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022k.

167 Bracke und Huenges 2021.

wurde hier nach beiden Begriffen gesucht. Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 398 Familienunternehmen unter den Stichwörtern „Tiefengeothermie*“ (9) und „Geothermie*“ (389) zu finden (Stand: 17.11.2022):

- 12 AGs
- 304 GmbHs
- 3 vollhaftende Personengesellschaften
- 75 teilhaftende Personengesellschaften
- 4 Einzelunternehmen

Das Familienunternehmen Kabel Premium Pulp & Paper GmbH untersucht zum Beispiel zusammen mit der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG aus Bochum und dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Energie- und Sicherheitstechnik UMSICHT aus Oberhausen in einem von der EU und dem Land Nordrhein-Westfalen geförderten Projekt die Möglichkeiten der Erdwärmenutzung aus Tiefen von bis zu 4000 Metern am Standort Hagen für eine Papierfabrik.¹⁶⁸

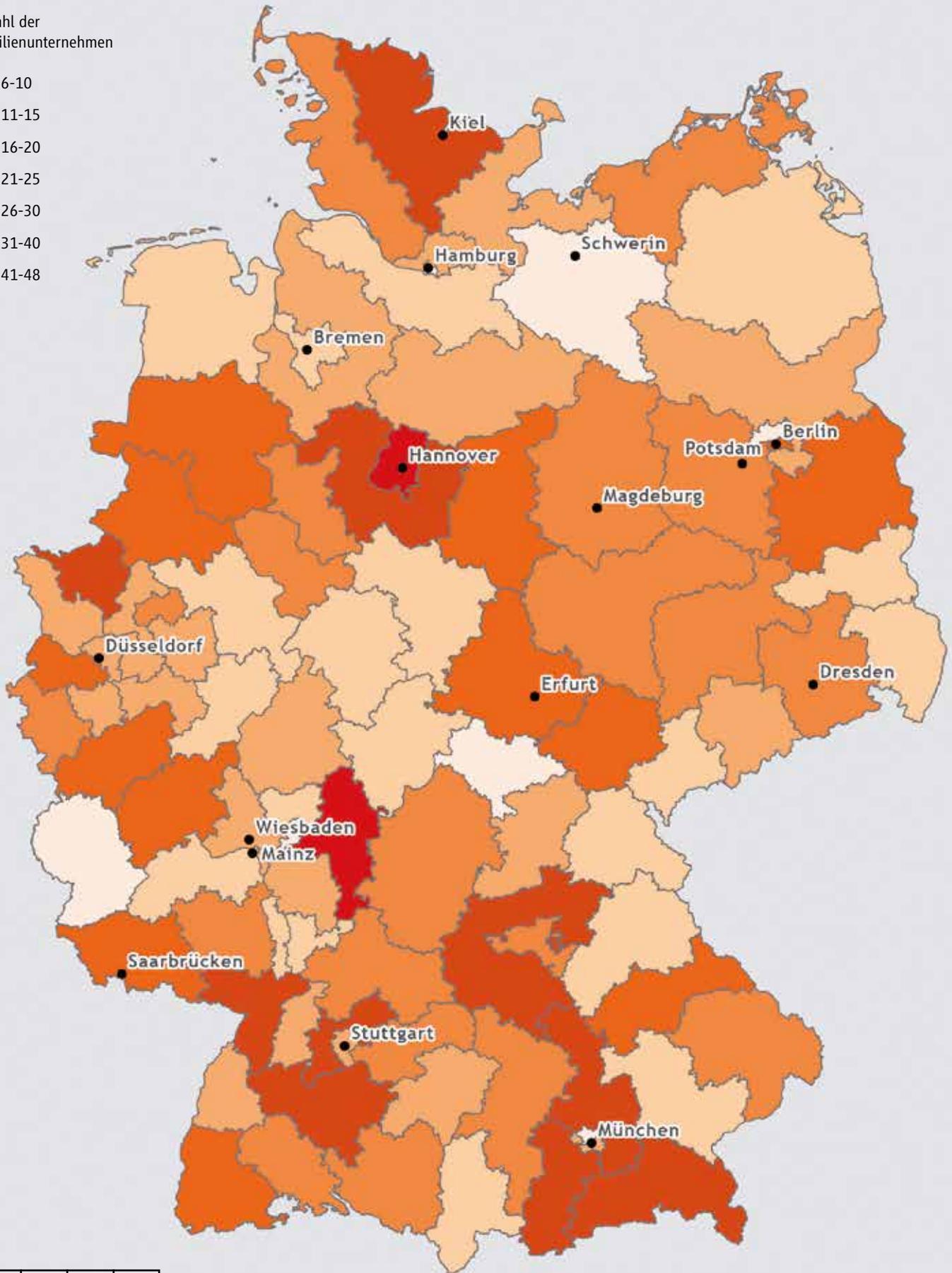
Abbildung 9 zeigt, dass die in dieser Branche tätigen Familienunternehmen weitgehend über ganz Deutschland verteilt liegen. Für die Karte wurden alle identifizierten Unternehmen zur Tiefengeothermie, Geothermie und Wärmepumpen addiert. Diese Zusammenlegung war nötig, um eine ausreichende Anzahl an Unternehmen zur anonymisierten Visualisierung zu erhalten.

168 Fraunhofer UMSICHT 2021.

Abbildung 9: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Tiefengeothermie-, Geothermie- und Wärmepumpenbranche (nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 6-10
- 11-15
- 16-20
- 21-25
- 26-30
- 31-40
- 41-48



0 100 200 Kilometer

Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbau GmbH, Uwe Schindler (Geschäftsführer):

Die H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbau GmbH hat sich seit der Gründung im Jahr 1863 durch Heinrich Anger zu einem der führenden mittelständischen Unternehmen der deutschen Bohrbranche entwickelt. Zum Tätigkeitsbereich des Familienunternehmens gehören Bohrungen nach Wasser (Brunnenanlagen), Bergbau, Flach- und Tiefbohrungen für Geothermie sowie Serviceleistungen.

Die Geothermie nutzt eine einheimische Ressource, die Erdwärme. Für die Oberflächen- oder mitteltiefe Geothermie wird eine Wärmepumpe benötigt. Die Tiefengeothermie liefert Wasser mit Temperaturen von circa 80 bis 100 Grad Celsius oder mehr, das direkt eingespeist werden kann. Mithilfe der Geothermie, so Herr Schindler, könne Deutschland zum wesentlichen Anteil mit Wärme versorgt werden und dies, ohne Kohlendioxid zu emittieren. Bedingung dafür wäre aber der flächendeckende, gemeinschaftliche Aufbau eines Wärmenetzes seitens der Kommunen mit Unterstützung des Bundes, vergleichbar zum Beispiel mit der Wasserversorgung, dem Abwassernetz oder den Stromnetzen. Das Ziel sollten nach Ansicht von Herrn Schindler dezentrale, kommunale Netze sein, wie es beispielsweise das Regionalwerk Chiemgau Ruper-tiwinkel und die Stadtwerke München planen.

Dafür sei seiner Meinung nach kaum staatliche Förderung notwendig, sondern ganz wichtig wäre ein zu zahlender Preis für CO₂-Emissionen: Wer CO₂ erzeugt oder freisetzt, müsse auch dafür aufkommen. Das wäre ein enormer Vorteil für die geothermische und regenerative Wärmeerzeugung.

Für Projekte zu Geothermiebohrungen sei die Akzeptanz besonders wichtig. Diese könne mithilfe von Bürgerbeteiligung und sorgfältiger Aufklärung gesteigert werden. Als problematischer nimmt Herr Schindler eher organisatorische und Managementaspekte wahr: Die Erschließung eines potenziellen Geothermiestandorts erfolge in bewährter Weise nach Bergrecht. Fachkräftemangel bei den Behörden und Institutionen sei ein Grund für drei- bis sechsjährige Wartezeiten auf Genehmigungen.

Standardisierung mit vorgefertigten Checklisten (Digitalisierung des Behördenverkehrs) und Ähnlichem könnte hier Abhilfe leisten. Vor allem, da die Nachfrage vor dem Hintergrund der Energiekrise steige. Die Wartezeit bis zum Start von Projekten zur oberflächennahen Geothermie beträgt mittlerweile schon gut sechs bis zwölf Monate – auch wegen eines deutlichen Fachkräftemangels entlang der gesamten Wertschöpfungskette, nicht nur bei den Genehmigungsbehörden, sondern auch bei den Unternehmen im Bohr- und Brunnenbau. Sehr wichtig

für die Zukunft sei Planungssicherheit für die Unternehmen – bei einer Investition von rund 30 Millionen Euro in eine Tiefbohranlage müsse die Sicherheit da sein, dass die Anlage auch für viele Jahre kontinuierlich genutzt werden kann. Planungssicherheit sei auch notwendig für eine nachhaltige Beschäftigung der Mitarbeitenden, die nicht zuletzt wegen ihrer Erfahrungen enorm wichtig wären. In einem Familienunternehmen mit meist flachen Hierarchien sei es möglich – so die Meinung von Herrn Schindler –, schnelle Entscheidungen zu treffen. Das Interesse, gut ausgebildete und geschulte Mitarbeitende zu halten, sei zudem besonders ausgeprägt.

Nachhaltigkeit sei gerade auch für marktabhängige Dienstleister sehr wichtig. Bei Maschinen liege es nicht immer in der Hand des Unternehmers, aber bei den Aufgaben (CO₂-Abdruck einer Bohrung und Ähnliches) nimmt H. Anger's Söhne dieses Thema sehr wichtig.

Die Digitalisierung habe einen hohen Stellenwert, besonders im Hinblick auf vorausseilenden Erkenntnisgewinn: die Prognose- und Leistungsfähigkeit würde verbessert, wodurch die Kosten sinken können.

Zitat: „Der Schlüssel für Nachhaltigkeit ist der CO₂-Preis: Wer verursacht, muss auch dafür zahlen.“

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Für die Nutzung der Tiefengeothermie sind geologische Informationen zum vorliegenden Untergrund unabdingbar. Nach Gesteinsbeprobungen und seismischen Messkampagnen sind Erkundungs-/Aufsuchungsbohrungen erforderlich. Einige dieser Methoden sind mit Genehmigungsverfahren verbunden, sodass im Vorfeld solcher Projekte mit einem zusätzlichen Zeitaufwand gerechnet werden muss. Vergleichbar mit der Aufsuchung von Erdgas und Erdöl verbleibt auch bei der Tiefengeothermie selbst bei idealer Datenlage bis zur Niederbringung der Förder- und Injektionsbohrungen ein Fündigkeitsrisiko, welches nur zu einem gewissen Maß eingegrenzt werden kann.¹⁶⁹

Die Anzahl der Unternehmen, die sich mit dem Bau von (Tiefen-)Geothermie-Anlagen befassen, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch überschaubar. Die Verfasser der Roadmap Tiefengeothermie für Deutschland gehen von notwendigen Investitionen in den nächsten 10 Jahren in Höhe von 60 und langfristig von 170 Milliarden Euro aus.¹⁷⁰

169 Grotelüsch 2022.

170 Bracke und Huenges 2021.

In Gebieten mit natürlicher Seismizität kann es für petrothermale Systeme im Zusammenhang mit der Stimulation von Bohrungen unter Umständen zu leichten Erschütterungen oberhalb der Wahrnehmbarkeitsschwelle kommen. Besonders in diesen Regionen werden solche Maßnahmen durch ein seismologisches Monitoring begleitet, um im Bedarfsfall die Stimulationsparameter anzupassen und im weiteren Verlauf zu vermeiden.¹⁷¹

Geothermie wird manchmal auch als Gefahr wahrgenommen, zum Beispiel beim Auftreten von Erschütterungen in Basel und Landau (Pfalz) im Zusammenhang mit geothermischen Bohrungen, ebenso bei Hebungen des Erdreichs in Staufen (Breisgau), was zu Akzeptanzeinbußen der anwohnenden Bevölkerung führte. Vor allem aufgrund von Widerständen in der Bevölkerung können Vorhaben verlangsamt oder gar unterbunden werden. Um dem zuvorzukommen, ist eine umfassende Aufklärung über die tatsächlichen Risiken und deren Wahrscheinlichkeit empfehlenswert.¹⁷²

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Aufgrund der Grundlastfähigkeit dieser Technologie wird ihr für die Zukunft eine große Chance eingeräumt. Durch noch tiefere Bohrungen auf mehr als zehn Kilometer mit einer Technologie zum Schmelzen von Gestein mittels Millimeterwellen, wie sie derzeit in Nordamerika von dem Startup-Unternehmen Quaise Energy gemeinsam mit dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt wird, soll das Potenzial sogar noch weiter gesteigert werden.¹⁷³

Im Jahr 2021 belief sich der Anteil der Geothermie innerhalb des Primärenergieverbrauchs erneuerbarer Energien in Deutschland auf unter einen Prozent.^{174, 175} Hier scheint eine Steigerung wahrscheinlich zu sein. Dies wird auch durch den im November 2022 gestarteten Konsultationsprozess zur besseren Nutzung von Erdwärme unterstrichen.¹⁷⁶ In einem sechseitigen Eckpunktepapier wird die Geothermie als Schlüsseltechnologie für die Wärmewende bezeichnet. Mittels beschleunigter Genehmigungsverfahren sollen in der Mitteltiefen- und Tiefengeothermie bis zum Jahr 2030 10 Terrawattstunden erschlossen werden. Um dies zu erreichen, sollen bis 2030 mindestens 100 zusätzliche geothermische Projekte angestoßen und an Wärmenetze angeschlossen werden. Bereits ab 2023 sollen erfolgversprechende Gebiete untersucht werden. Diese Untersuchungen wie auch die Installation geothermischer Anlagen sollen mit 40 Prozent der Investitionskosten vom Bund gefördert werden.¹⁷⁷

171 Stober et al. 2010.

172 Bundesverband Geothermie 2022b, Weber et al. 2019.

173 Frost & Sullivan 2022f.

174 Statista 2022.

175 Hermann 2022.

176 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022d.

177 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022b.

Exkurs: Lithiumrückgewinnung aus Thermalwasser

Damit die Abhängigkeit vom Weltmarkt verringert und das Problem langfristiger Lieferverträge umgangen werden kann, wird in Deutschland aktuell an verschiedenen Standorten geforscht, um eine Lithium-Extraktion aus Thermalwasser wirtschaftlich umzusetzen. Im Forschungsprojekt „Li+Fluids“ wird eine umfassende Potenzialstudie für ganz Deutschland zur Gewinnung von Lithium aus hydrothermalen Fluiden als Entscheidungshilfe bei der Standortauswahl erstellt.¹⁷⁸ Das Potenzial der Geothermie als Lithiumlieferant in Deutschland und Frankreich wird nach heutigem Ausbaustand auf circa 1.353 Tonnen Lithium geschätzt.¹⁷⁹

Die Lithium-Gewinnung kann im Anschluss an eine energetische Nutzung betrieben werden und erlaubt eine energie- und treibhausgasneutrale Produktion von Lithium. Bei der sogenannten direkten Lithium-Extraktion werden Verfahren eingesetzt, die eine Abscheidung von Lithium aus Thermalwasser mit Flüssig-Flüssig-Extraktions-, Membran-, Elektrolyse-, Ausfällungs-, Adsorptions- oder Molekularsieb-Systemen ermöglichen. Am vielversprechendsten sind die Sorptionsverfahren, mit denen eine Bindung von Lithium-Ionen mit Hilfe von Adsorption, Ionenaustausch oder Molekularsieben erreicht wird, sowie elektrochemische Verfahren.¹⁸⁰ Vor allem die Anwendung von Mangan- oder Aluminiumhydroxid-Oxiden bietet eine hohe Selektivität gegenüber anderen positiv geladenen Ionen und wird unter anderem im Forschungsprojekt „Unlimited“ untersucht.¹⁸¹

8. Zusammenfassung

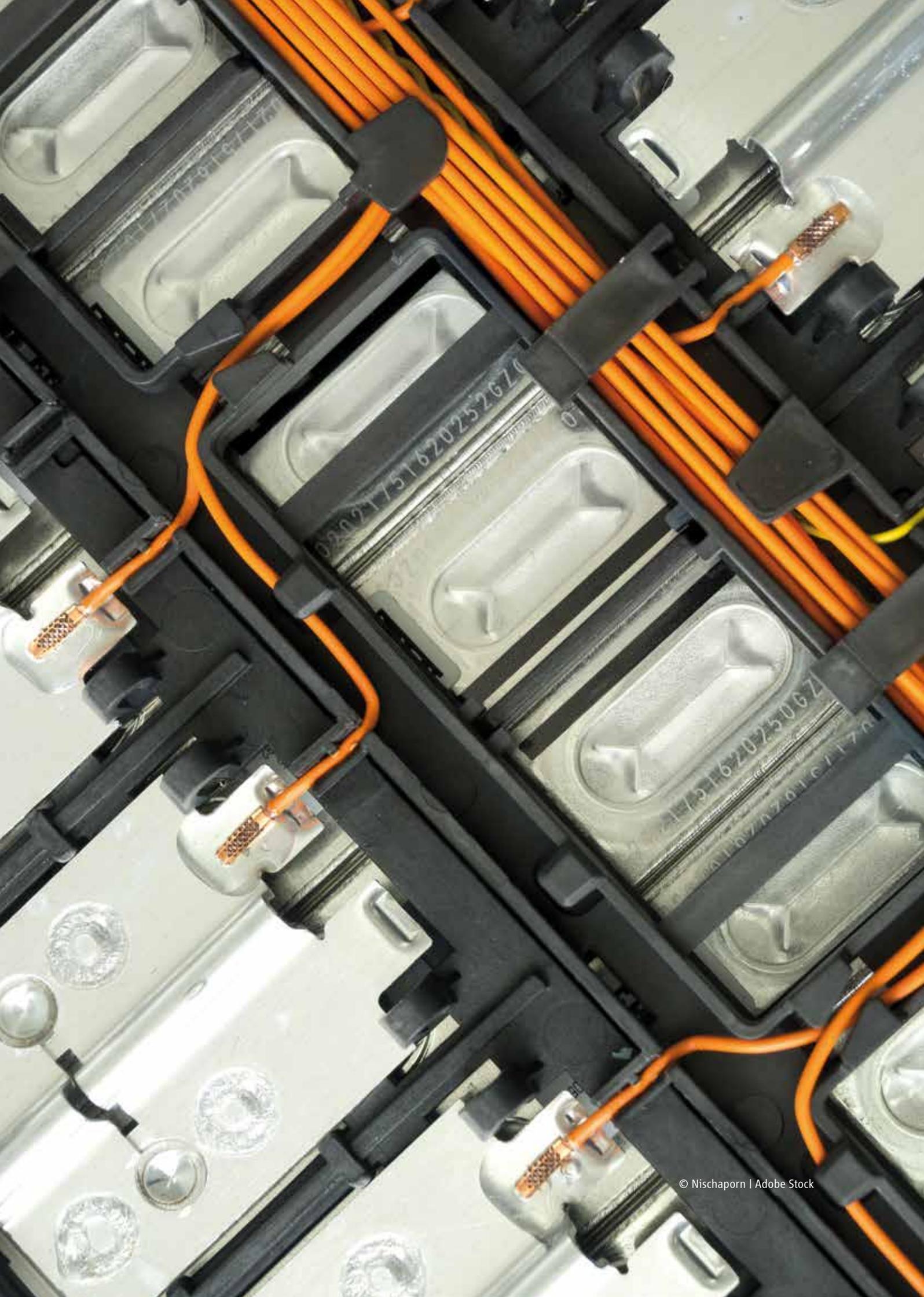
Die Tiefengeothermie bietet sowohl für die Strom- als auch für die Wärmebereitstellung ein großes Potenzial. Die derzeitige Nutzung ist jedoch aufgrund der politischen Rahmenbedingungen und der regional sehr unterschiedlich ausgeprägten Datengrundlage zum tiefen Untergrund noch überschaubar. Derzeit rückt diese Energieform jedoch weiter in den politischen Fokus. Sie wird ab November 2022 staatlich gefördert, sodass von einem Zuwachs in diesem Bereich ausgegangen werden kann. Dem Fachkräftemangel im Bereich der Bohrbranche und dem Heizungs- und Klimahandwerk soll mit Ausbildungs- und Qualifizierungsprogrammen begegnet werden, was zu guten Berufschancen führt. Zudem beginnen viele Firmen aus dem Bereich der Öl- und Gasexploration verstärkt damit, den Teilbereich der Geothermie auszuweiten.

178 Alms et al. 2022.

179 Goldberg et al. 2022.

180 Goldberg et al. 2022.

181 Reich et al. 2022.



V. Batterien

1. Definition

Batterien sind elektrochemische Energiespeicher und weisen eine große Bandbreite auf, von Kleinstanwendungen in Smartphones über große stationäre Systeme bis hin zur Stabilisierung des Stromnetzes. Der vorliegende Technologiesteckbrief fokussiert Lithium-Ionen-Batterien beziehungsweise Akkumulatoren, die vor allem in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden, und liefert einen Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen. Lithium-Ionen-Batterien gehören zur Gruppe der Sekundärzellen, welche durch die Wiederaufladbarkeit der elektrochemischen Energiespeicher gekennzeichnet ist.¹⁸² Die Lebensdauer eines Batteriespeichers wird in Ladezyklen gemessen, welche zwischen einhundert und mehrere Tausend Zyklen zählen können. Im Vergleich zu anderen wiederaufladbaren Batteriesystemen wie beispielsweise Blei-Säure-Batterien weisen Lithium-Ionen-Batterien eine höhere Energiedichte auf; das heißt, sie besitzen eine höhere Kapazität zur Speicherung von Energiemengen.¹⁸³ Die Energiedichte beeinflusst wiederum das Eigengewicht und das Gehäusevolumen. Je größer die Energiedichte, desto leichter beziehungsweise kleiner fällt der Akkumulator aus. Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen werden bevorzugt Lithium-Ionen-Akkumulatoren eingesetzt, um eine größtmögliche Reichweite zu erzielen.

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Batteriespeicher sind eine Schlüsselkomponente auf dem Weg zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem. Eine besondere Rolle nimmt dabei der Verkehrssektor mit der wachsenden Anzahl von Elektrofahrzeugen ein, für die Lithium-Ionen-Batterien ein wichtiger Bestandteil sind. Elektrofahrzeuge, die mit Lithium-Ionen-Akkumulatoren betrieben werden, verursachen während ihrer Nutzung keinen direkten Ausstoß von CO₂ oder anderer Luftschadstoffe wie Feinstaub oder Stickoxide (siehe Kapitel D.XII). Dabei sind batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu solchen mit Verbrennungsmotoren vor allem dann umweltschonender, wenn der Strom aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird.¹⁸⁴ Weitere wichtige Absatzmärkte für Lithium-Ionen-Batterien sind beispielsweise mobile Elektronikanwendungen und Fahrzeuge für die Nahmobilität wie E-Bikes und E-Tretroller, die vor allem in Form von Sharing-Angeboten die Mobilität in urbanen Räumen transformieren. Lithium-Ionen-Batterien besitzen somit eine Schlüsselfunktion zur Erreichung des SDG 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“. Speichern die Lithium-Ionen-Batterien Strom aus erneuerbaren Energien, werden SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“ und SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“ unterstützt. Der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien trägt maßgeblich zur Sektorenkopplung zwischen dem Stromsektor und der Mobilität bei.

182 VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2015, S. 2.

183 Manthiram 2020, S. 1.

184 Buberger et al. 2022, S. 10.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Klimaschutzprogramme wie jüngst das „Fit for 55“-Programm der Europäischen Kommission sowie die Bekanntmachungen namhafter Autohersteller zur Reduzierung von CO₂-Emissionen ihrer Fahrzeugflotten dürften in den kommenden Jahren eine anhaltend hohe Nachfrage nach Fahrzeugbatterien auslösen.

Im Oktober 2022 waren laut Kraftfahrtbundesamt 840.600 Pkw mit ausschließlich elektrischer Energiequelle in Deutschland zugelassen.¹⁸⁵ Zwei Jahre zuvor waren es noch 136.617 Elektrofahrzeuge.¹⁸⁶ Im weltweiten Vergleich dazu waren im Jahr 2021 rund 17,5 Millionen Elektrofahrzeuge zugelassen.¹⁸⁷ Dieser Wert könnte laut Prognose von BloombergNEF bis zum Jahr 2030 mit 116 Millionen Elektrofahrzeugen auf mehr als die sechsfache Anzahl ansteigen.¹⁸⁸

Der weltweite Verkaufsanteil von Elektroautos lag im Jahr 2021 bei etwa 10 Prozent und damit viermal höher als noch in 2019.¹⁸⁹ Die Hälfte des Wachstums des Elektrofahrzeugmarktes im Jahr 2021 entfällt auf China. China ist zudem Produzent von drei Vierteln aller Lithium-Ionen-Batterien weltweit. Laut Schätzungen der Internationalen Energieagentur (IEA) könnte der Bedarf an Fahrzeugbatterien von weltweit 340 Gigawattstunden im Jahr 2022 auf 3.500 Gigawattstunden im Jahr 2030 ansteigen.¹⁹⁰

Europa nimmt im Vergleich zum asiatischen Raum eine derzeit verhaltene Rolle ein, was sich in den kommenden Jahren jedoch ändern könnte. Dabei wird Deutschland laut der Meinung von Fachleuten in der kommenden Dekade europaweit für einen der wichtigsten Standorte für die Batteriezellproduktion gehalten. Nach Hettesheimer et al. (2021) könnte Deutschland im Jahr 2030 eine jährliche Produktionskapazität von etwa 280 Gigawattstunden¹⁹¹ und gemäß dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2022a) von 400 Gigawattstunden erreichen.¹⁹²

Die Anzahl der Beschäftigten in der Batteriebranche in Deutschland wuchs von 9.053 Personen im Jahr 2019 auf 11.516 Personen im Jahr 2021.¹⁹³ Im gleichen Zeitraum steigerte sich der

185 Kraftfahrt-Bundesamt 2022.

186 Kraftfahrt-Bundesamt 2022.

187 Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 2022.

188 BloombergNEF 2020.

189 International Energy Agency (IEA) 2022b, S. 2.

190 International Energy Agency (IEA) 2022b, S. 3.

191 Hettesheimer et al. 2021, S. 5.

192 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2022a.

193 Statistisches Bundesamt 2022b.

Umsatz der deutschen Batteriebranche für die Herstellung von Batterien und Akkumulatoren um rund 40 Prozent.¹⁹⁴

Auch für die Recyclingindustrie von Batterien wird in den kommenden Jahren ein hohes Wachstumspotenzial erwartet (siehe Kapitel D.IX). In einem Szenario des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI ergibt sich für das Jahr 2040 in Deutschland innerhalb des Maschinen- und Anlagebaus für Recyclinganlagen ein Arbeitskräftebedarf von etwa 1.500 bis 5.300 Personen.¹⁹⁵ Die europäische Marktgröße würde sich in diesem Szenario für das Jahr 2040 auf etwa 810 Millionen Euro belaufen.¹⁹⁶

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 1.569 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Batterie*“ zu finden (Stand: 4.11.2022):

- 29 AGs
- 1.213 GmbHs
- 19 vollhaftende Personengesellschaften
- 228 teilhaftende Personengesellschaften
- 80 Einzelunternehmen

Das Familienunternehmen Allgäu Batterie GmbH & Co. KG ist seit 1994 im Bereich Industriebatterien für Traktionsanwendungen, Notstromversorgung und Energiespeichersysteme tätig.

Allgemein zeigt sich bei dem Sitz von Familienunternehmen in der Batteriebranche eine relativ ausgeglichene Verteilung in Deutschland.

194 Statistisches Bundesamt 2022c.

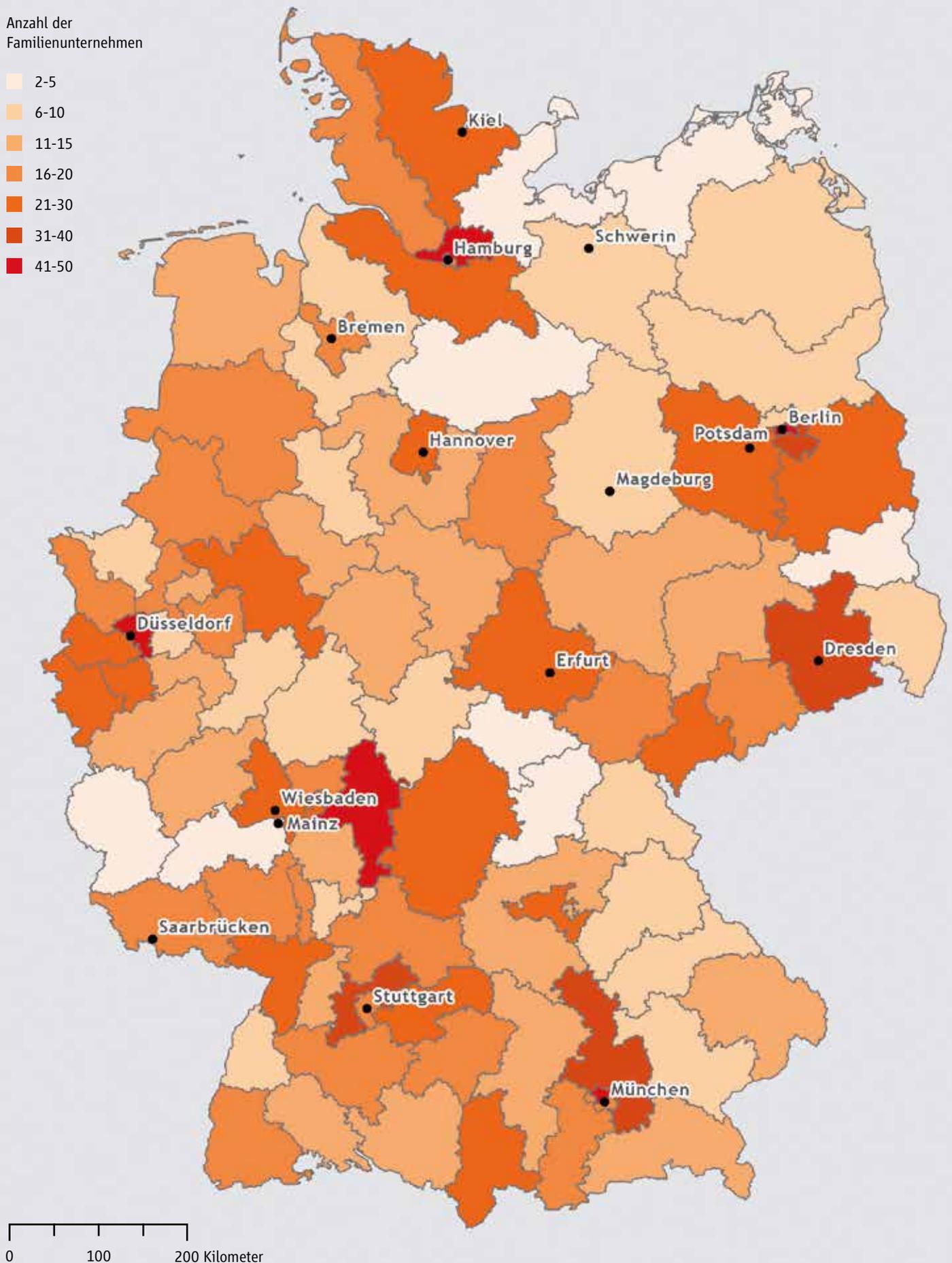
195 Neef et al. 2021, S. 41.

196 Neef et al. 2021, S. 48.

Abbildung 10: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Batteriebranche (nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 2-5
- 6-10
- 11-15
- 16-20
- 21-30
- 31-40
- 41-50



Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Allgäu Batterie GmbH & Co. KG, Manuel Diepolder (Geschäftsführer):

Alleinstellungsmerkmal des Familienunternehmens ist laut Herrn Diepolder die bewusst breite Aufstellung bei den verschiedenen Batterietechnologien, um der eigenen Kundschaft energetisch bestmögliche Lösungsansätze zu bieten. Die Diversifizierung der Batterietechnologien hält der Familienunternehmer für einen lang anhaltenden Trend auf dem Batteriemarkt.

„Die Batterie, oder allgemein Energiespeicher, besitzen einen wichtigen, wenn nicht sogar *den* wichtigsten Stellenwert für die Energiewende. Wenn wir uns weiterhin auf staatliche Akteure beim Ausbau des Stromnetzes verlassen, werden wir die Energiewende nicht schaffen. Vor allem die letzten Monate haben uns mit aller Brutalität gezeigt, wie sehr wir dieses Ziel bisher verfehlen.“

Das Familienunternehmen identifiziert sich bereits seit vielen Jahren mit dem Gedanken des ökologisch, sozial und ökonomisch nachhaltigen Wirtschaftens und hat sich im Jahr 2022 erstmalig nach den Kriterien der sogenannten Gemeinwohlökonomie zertifizieren lassen. Die eigene Berufsausübung als mehr als nur Gelderwerb anzusehen, sinngebend tätig und aktiv in der Mitgestaltung zu sein, ist laut Herrn Diepolder auch ein von den Mitarbeitenden hoch geschätztes kulturelles Leitbild, das sich nicht zuletzt durch eine verschwindend geringe Fluktuation äußert.

Als zunehmendes Hemmnis und allgemein gesellschaftliches Problem sieht Herr Diepolder den Fachkräftemangel an, der derzeit von der Politik immer noch nicht die nötige Aufmerksamkeit erfahren würde, die es bräuchte: „Auch die tollsten Konzepte werden nicht funktionieren, wenn es keine Leute gibt, die sie umsetzen können. Und ich bin der Meinung, dass dieser Umstand in der Politik immer noch nicht ganz angekommen ist.“ Allgäu Batterie bewältigt dieses Hemmnis proaktiv, indem es bereits Kooperationen mit Hochschulen etabliert hat. Denn nicht nur für den Fachkräftemangel, sondern allgemein in Bezug auf die Energiewende sei „die Zeit des Wartens vorbei“.

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Für das Ziel eines nachhaltigen Wirtschaftssystems durch Umwelttechnologien wie Lithium-Ionen-Batterien ist immer auch eine Betrachtung der gesamten Lieferkette notwendig. Der Abbau und die Weiterverarbeitung der Batterierohstoffe Lithium, Aluminium, Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel, Kupfer, Graphit und vermehrt auch Silizium bergen einige Konflikte mit Umwelt- und Sozialbelangen. Laut Recherchen des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI beläuft sich etwa die Hälfte der mit der Batterieproduktion verbundenen

*Ohne die nötigen
Fachkräfte nützt
der Wirtschaft auch
kein technologischer
Fortschritt*

CO₂-Emissionen auf den Abbau von Rohstoffen und die Materialherstellung.¹⁹⁷ Durch eine längere Nutzung und die Nutzung der Batterien in anderen Anwendungen sowie das Recyclen von Lithiumbatterien können Umweltauswirkungen reduziert werden (siehe Kapitel D.IX und Exkurs Lithium-Recycling). Die Erstellung von Umweltbilanzen, die die Rohstoffförderung zielgenau betrachten, erhält für Unternehmen einen zunehmend wichtigen Stellenwert. Derweil fördert das BMWK die Entwicklung eines digitalen Batteriepasses als ersten digitalen Produktpass auf europäischer Ebene.¹⁹⁸

Lithium wird entweder aus Salzsee-Solen in Südamerika oder aus Festgestein vor allem in Australien gewonnen. Die Extraktion von Lithium aus Salzseen führt zu einer regionalen Wasserknappheit mit verheerenden Folgen für die Umwelt und sozialen Konflikten. Negative Umweltauswirkungen eines Bergwerks umschließen beispielsweise giftige Produktionsrückstände, die bei fehlerhafter Lagerung das Grundwasser und die angrenzende Umgebung verunreinigen können, oder Beeinträchtigungen der Biodiversität, die durch die Bergbauinfrastruktur hervorgerufen werden.¹⁹⁹

Neben Lithium werden in Zukunft auch die Bedarfe für Kobalt und Nickel ansteigen. Besonders Kobalt, welches als Kathodenmaterial in Lithiumbatterien eingesetzt wird, ist als sozial- und geopolitisch risikoreicher Rohstoff bekannt. Dessen mit Abstand bedeutendstes Förderland ist die Demokratische Republik Kongo. Vor allem im sogenannten artisanalen Kleinbergbau (das heißt, bei der Gewinnung von Rohstoffen mit sehr einfachen und nicht industriellen Methoden) fallen jedes Jahr viele Menschen unzureichend abgesicherten Stollen zum Opfer. Fehlende Arbeitssicherheit und gesundheitliche Folgen spielen jedoch auch in der industriellen Förderung nach wie vor eine Rolle.²⁰⁰

Mit etwa 30 bis 40 Prozent Anteil an den Gesamtkosten eines Elektroautos stellt die Batterie derzeit noch einen großen Kostenfaktor dar.²⁰¹ Ziel der Industrie ist es, diese Kosten in den kommenden Jahren zu senken und das bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Batterieleistung. Insgesamt sind die Produktionskosten für Lithium-Ionen-Batterien in den letzten Jahren jedoch bereits deutlich bei einer stetigen Verbesserung der Batterieleistung gesunken.²⁰² Beispiele namhafter Automobilhersteller zeigen, dass sogenannte Gigafactories (wie im US-Bundesstaat Nevada) durch ein erhöhtes Produktionsvolumen zu positiven Kosteneffekten führen.

197 Neef et al. 2021, S. 11.

198 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022i.

199 Dolega et al. 2020, S. 13 ff.

200 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2021, S. 15.

201 International Energy Agency (IEA) 2022b, S. 2.

202 Vekic 2020, S. 21.

Im Patentbereich liegt Deutschland im Jahr 2021 zwar in allen durch das Deutsche Patent- und Markenamt (DPMA) untersuchten Technikbereichen zur Mobilität auf Platz eins. Im Hersteller-Ranking von Batterietechnologien findet sich jedoch nur ein deutsches Unternehmen auf Rang vier unter den Top-Fünf-Herstellern. Im Bereich der veröffentlichten Patentanmeldungen für Batterien für das Jahr 2021 sticht China innerhalb des Länder-Rankings mit einer Zunahme von 59,3 Prozent im Vergleich zum Vorjahr heraus.²⁰³

Die Nachfrage nach sogenannten kritischen Rohstoffen, die auch für die Herstellung von Batterien benötigt werden, steigt stetig an. Das Angebot unterlag zuletzt starken Preisschwankungen. Die Primärförderung von Lithium stellt derzeit ein Oligopol (angeführt von Australien und Chile) dar.²⁰⁴ Im Mai 2022 war der Preis für Lithium siebenmal höher als noch Anfang 2021.²⁰⁵ Laut einer Rohstoffrisikobewertung der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) ist die europäische Zellfertigung stark auf den Import von Rohstoffen und Vorprodukten angewiesen. In einem aufgeworfenen Szenario könnte Europa im Jahr 2030 lediglich etwa 27 bis 34 Prozent seines Eigenbedarfs aus der Selbstversorgung decken.²⁰⁶ Die EU-Kommission legte Mitte 2022 erste Eckpunkte eines Gesetzesvorschlags zu kritischen Rohstoffen vor.²⁰⁷ Das Gesetz soll unter anderem die Methode zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen, Nachhaltigkeitskriterien, Finanzierungsangelegenheiten und einheitliche Wettbewerbsbedingungen für die europäische Rohstoffversorgungssicherheit beinhalten.

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Die starken Preisschwankungen kritischer Rohstoffe können jedoch auch positive Effekte auslösen, zum Beispiel, wenn infolgedessen in weniger mineralienintensive Alternativen wie Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren (LFP) investiert wird, die ohne Nickel und Kobalt auskommen. Der Anteil der LFP-Batterien hat sich seit dem Jahr 2020 mehr als verdoppelt, wofür die IEA einen wichtigen Grund auch in den hohen Mineralpreisen (neben den technologischen Innovationen) sieht.²⁰⁸ Mit der Markteinführung der Natrium-Ionen-Batterie, deren Kosten sich nach Schätzungen auf nur 40 Prozent der heutigen Lithium-Ionen-Batterien belaufen, rechnen Fachleute jedoch nicht vor 2030.²⁰⁹ In Sachsen fördert das BMWK derzeit mit 24,1 Millionen Euro ein Forschungsvorhaben für 3-D-gedruckte Batterien auf Natrium-Basis, die weitgehend auf importierte Rohstoffe verzichten.²¹⁰

203 Deutsches Patent- und Markenamt 22.08.2022.

204 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2022.

205 International Energy Agency (IEA) 2022b, S. 3.

206 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2022.

207 Osusky 2022.

208 International Energy Agency (IEA) 2022b, S. 3.

209 Fichtner 2021.

210 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022c.

Unter den alternativen Batterietechnologien könnten laut der Meinung von Fachleuten auch Feststoffbatterien in den kommenden Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnen.²¹¹ Autohersteller erhoffen sich durch die festen Elektrolyte höhere Reichweiten bei kürzeren Ladezeiten, da die Feststoffbatterien potenziell höhere Energiedichten aufweisen. Feststoffbatterien besitzen außerdem einen Sicherheitsvorteil, da sie fast nicht in Brand zu setzen sind, was vor allem im Hinblick auf Verkehrsunfälle ein wichtiges Merkmal darstellt. Die unterschiedliche Beschaffenheit durch das Fehlen eines Flüssigelektrolyten stellt zwangsläufig auch andere Anforderungen an die Wiederverwertung. Ob für Lithium-Ionen-Batterien und Feststoffzellkonzepte die gleichen Anlagen genutzt werden können, ist derzeit noch nicht abschließend zu beurteilen.²¹² Erste Pilotprojekte namhafter Autohersteller mit in Fahrzeugen verbauten Feststoffbatterien sind ab 2025 zu erwarten.²¹³

Laut Überzeugung einiger Batterie-Start-ups komme es in Zukunft jedoch weniger darauf an, welche Reichweite ein Fahrzeug für die ohnehin in der Regel eher kürzeren Alltagswege benötige. Dafür sei umso entscheidender, ob die Batterien preisgünstig und damit für eine breite Masse erschwinglich würden und in kürzester Dauer, in etwa zehn bis fünfzehn Minuten, wieder aufzuladen seien.²¹⁴ Die Batterien würden dann kleiner ausfallen, was zumeist auch der Rohstoffknappheit zugutekäme. Voraussetzung für das Schnellladen sei zwangsläufig jedoch eine gute Ladeinfrastruktur.

Deutschland, bisher vorwiegend in der Position des Absatzmarktes, könnte gemäß den Ankündigungen der derzeit in Europa angesiedelten Hersteller jedoch in den nächsten Jahren eine zentrale Rolle zuteilwerden.²¹⁵ Das BMWK fördert im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms Arbeiten zu einer nachhaltigen batterieelektrischen Elektromobilität. Der Schwerpunkt „Schnittstelle Energieforschung Mobilität und Verkehr“, in dem auch andere Antriebsarten wie wasserstoffbasierte Brennstoffzellen betrachtet werden, wurde im Jahr 2021 mit 40,85 Millionen Euro vom BMBF gefördert.²¹⁶ Um die komplette Batterie-Wertschöpfungskette stärker in Deutschland und Europa zu verankern, wurden seit 2019 zwei sogenannte IPCEI (Important Projects of Common European Interest) zur Batteriezellfertigung von der Europäischen Kommission beihilferechtlich genehmigt. Allein Deutschland fördert die Projektvorhaben mit knapp drei Milliarden Euro.²¹⁷ Insgesamt nehmen über 50 Unternehmen aus 12 Mitgliedsstaaten an beiden Projekten teil, 13 davon aus Deutschland. Für die Erweiterung des zweiten

211 Neef et al. 2021, S. 33.

212 Neef et al. 2021, S. 34.

213 Holzer und Rudschies 2022.

214 Reuters 2022b.

215 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2022b.

216 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022f, S. 29.

217 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2021a, S. 1.

Batterie-IPCEIs auf großskalige und strategische Projekte ab 2023 stehen in Deutschland Haushaltsmittel von rund 1 Milliarde Euro zur Verfügung.²¹⁸

Derzeit gelten jedoch Hersteller aus China, Japan, Südkorea und den USA als Vorreiter bei der Batteriezellfertigung. Bei dem Aufbau einer flächendeckenden Batteriezellfertigung in Europa wird es darauf ankommen, dass die Maschinenlieferanten auch aus dem europäischen Raum stammen und die aktuell noch aus dem asiatischen Raum dominierenden Hersteller mit einem Marktanteil von etwa 70 Prozent überholen. Jedoch müsse dafür der Fokus auf die Lieferung von ganzheitlichen Produktionsstraßen verschärft werden.²¹⁹ Ebenso würde, so die Nationale Plattform Mobilität (NPM), zwischen 2021 und 2030 ein jährlicher Gesamtpersonalbedarf von bis zu 65.000 Fachkräften entstehen.²²⁰ Laut Prognose des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI erreichen die Produktionskapazitäten in Europa bis Ende 2022 gemäß der Ankündigungen der Hersteller 124 Gigawattstunden.²²¹ Für den Aufbau höherer Fertigungskapazitäten benötigt die Industrie jedoch weitere Rechts- und Planungssicherheit sowie Subventionsmaßnahmen.

Um zukünftig die Importabhängigkeit zu reduzieren und gleichzeitig die negativen sozialen wie auch ökologischen Folgen des Rohstoffbedarfs zu senken, gilt das Recycling von Batterien und deren Bestandteilen als Hoffnungsträger, wenn auch nur in einem gewissen Rahmen. Erwartet wird eine anwachsende Marktposition der Recyclingindustrie vor allem ab den 2030er-Jahren.²²² Derzeit befindet sich die Recyclingindustrie noch in einer Lern- und Anfangsphase und scheint damit besonders offen für neue technologische Ansätze. Zwar existieren bereits verschiedene Verfahren zum Recycling, sie finden jedoch zu einem Großteil noch keine Anwendung im industriellen Gigawatt-Bereich. Bisher im Fokus steht vor allem die Rückgewinnung der im Verhältnis teureren Rohstoffe Aluminium, Nickel und Kobalt, aber weniger von Lithium oder Graphit.²²³ Im Jahr 2022 befinden sich laut Europäischem Wirtschaftsdienst sechs Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland in Betrieb; vier weitere sind in Planung.²²⁴

Der Aufbau einer europäischen Batteriekreislaufwirtschaft wird durch verschiedene politische Regularien forciert. Laut dem vorgeschlagenen Regulierungsrahmen der Europäischen Kommission Ende 2020 sollen sich die Rezyklatanteile in einer ersten Stufe ab dem Jahr 2030 mit

218 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2023a.

219 Frese 2022.

220 Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 4 „Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und recycling, Bildung und Qualifizierung“ 2021, S. 4.

221 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2022a.

222 International Energy Agency (IEA) 2022b, S. 3.

223 Vekic 2020, S. 24.

224 Hartmann 2022.

12 Prozent auf Kobalt, 4 Prozent auf Lithium und 4 Prozent auf Nickel verteilen.²²⁵ Ab dem Jahr 2035 soll eine Erhöhung erfolgen (20 Prozent Kobalt, 10 Prozent Lithium und 12 Prozent Nickel), wobei zu erwarten ist, dass es aufgrund der höheren Marktdurchdringung weitere Anhebungen der vorgeschriebenen Anteile geben wird.

Auf Basis einer Modellberechnung des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI zur Abschätzung einer möglichen Entwicklung der Recyclingindustrie könnten dem europäischen Recycling bis zum Jahr 2040 im Durchschnitt jährlich etwa 1.500 Kilotonnen gebrauchte Lithium-Ionen-Batterien zugeführt werden.²²⁶ Nach weiteren Schätzungen könnten gemessen an dem Bedarf der europäischen Zellproduktion bis 2040 über 40 Prozent des Bedarfs an Kobalt und über 15 Prozent des Bedarfs an Lithium, Nickel und Kupfer für neue Batteriezellen durch Recycling gedeckt werden.²²⁷

Noch ehe die Lithium-Ionen-Batterien in den Recycling-Prozess gelangen, weisen sogenannte Second-Life-Konzepte ein weiteres ökologisches Potenzial hinsichtlich der Wiedervermarktung auf. Mit diesem Konzept ist eine Zweitanwendung der Lithium-Ionen-Batterien zum Beispiel in Form von stationären Batterien zur Speicherung von erneuerbaren Energien gemeint, nachdem ihr Leistungspotenzial in der ursprünglichen Anwendung ausgeschöpft wurde. Allerdings gehen die Annahmen über das wirtschaftliche Potenzial für Second-Life-Anwendungen derzeit noch weit auseinander.²²⁸ Fraglich dabei scheint auch, ob es sinnvoll ist, beispielsweise eine hoch kobalthaltige Batterie der ersten Generation für einen weiteren Zeitraum in einer stationären Anwendung zu nutzen, statt sie zu recyceln und die daraus erhaltenen Rohstoffe für neuere Batterien zu verwenden.

Exkurs: Mikrobielle Brennstoffzelle

Brennstoffzellen zählen ebenso wie Batterien zu den galvanischen Zellen, sind aber Energiewandler statt Energiespeicher. Sie wandeln die chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie um. Nach diesem Prinzip mit Anode und Kathode arbeitet die technisch etablierte Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle genauso wie die mikrobielle Brennstoffzelle, allerdings ist bei Letzterer die Anode mit einem dichten Biofilm aus Mikroorganismen bewachsen. Der Stromkreislauf in mikrobiellen Brennstoffzellen wird durch den Stoffwechsel dieser Mikroorganismen in Gang gehalten. Sie ernähren sich

225 Neef et al. 2021, S. 12.

226 Neef et al. 2021, S. 23.

227 Neef et al. 2021, S. 26.

228 Köllner 2019.

von organischen Verbindungen und setzen dabei Elektronen frei, die auf eine Elektrode übertragen werden, sodass Energie erzeugt wird. Bei Verwendung von Abwasser werden als positiver Nebeneffekt organische Verunreinigungen abgebaut.²²⁹

Der maximale Strom in einer mikrobiellen Brennstoffzelle ist gering, korreliert aber mit den Eigenschaften des enthaltenen Mediums, zum Beispiel Abwasser, und kann als Biosensor für dessen Zusammensetzung wirken. Forschenden der Universität Bayreuth gelang es, mit einer mikrobiellen Brennstoffzelle zuverlässig Strommengen zu erzeugen, die für den Betrieb von Umweltüberwachungssensoren in entlegenen Regionen nutzbar sind und sogar ölverseuchte Böden bei gleichzeitiger Produktion von elektrischem Strom entgiften können.²³⁰

8. Zusammenfassung

Eine zukünftig anhaltende Orientierung der Märkte und Leitsysteme auf elektrifizierte Fahrzeuge ist anzunehmen. Im Bereich der Zellproduktion und des Recyclings von Batterien verfügt Deutschland über wertvolles technisches Know-how und wird sich laut der überwiegenden Meinung von Fachleuten zu einem der wichtigsten Standorte in Europa entwickeln.

Deutschland und Europa könnten sich von den übrigen Wettbewerbern vor allem in Bezug auf Sozial- und Umweltstandards durch eine saubere Elektrifizierung, die nicht auf Kosten vermeidbarer Umweltauswirkungen verläuft, positiv von derzeitigen Marktführern unterscheiden.

Die in Zukunft weiterhin ansteigende Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien kann zu einer Verknappung bedeutender Batterierohstoffe führen und lässt damit sowohl die Weiterentwicklung von Recyclingverfahren als auch Innovationen in der Batterieherstellung, die kleinerer Mengen an kritischen Rohstoffen als bisher bedürfen, als unverzichtbar erscheinen.

Politische Regulierungsvorgaben sind ein wichtiger Bestandteil, um großindustrielle Recyclingkapazitäten in Deutschland und Europa aufzubauen. Einheitliche Sammel- und Recyclingquoten können zu einer Kreislaufwirtschaft im Batterierecycling beitragen.

229 Mukimin und Vistanty 2023, Technische Universität Clausthal 2020.

230 Simeon et al. 2022.



VI. Wasserstofftechnologie

1. Definition

Wasserstoff ist das häufigste Element im Universum und kommt auf der Erde als Wasser, in Säuren oder Laugen vor. Reiner Wasserstoff (H_2) ist ein farbloses, geruch- und geschmackloses, ungiftiges und brennfähiges Gas. Wasserstoff ist ein vielseitiger Energieträger und Einsatzstoff für industrielle Prozesse, der bis zur Verwendung gut gespeichert werden kann.²³¹ Bei einer idealen Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff entstehen lediglich Wasser und Wärme.²³²

Durch den Einsatz von erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonne kann Wasserstoff als CO_2 -freier Energieträger und Rohstoff aus Wasser produziert werden, beispielsweise für defossilierte Industrieprozesse, als Treibstoff, als Brennstoff oder als Speichermedium für regenerativen Strom. Dies gilt insbesondere für Anwendungen, die nicht direkt elektrifizierbar sind.

Im Jahr 2021 wurden insgesamt weltweit 93,6 Millionen Tonnen Wasserstoff produziert. Der weitaus größte Teil, 71,1 Millionen Tonnen, wurde dabei aus fossilen Quellen und überwiegend über die Dampfreformierung von Erdgas hergestellt. 16,5 Millionen Tonnen entstanden als Nebenprodukt bei chemischen Prozessen. Die Erzeugung von Wasserstoff über die Elektrolyse von Wasser spielt bislang eine untergeordnete Rolle. Der mit 39,8 Millionen Tonnen größte Abnehmer von Wasserstoff sind Raffinerien, gefolgt von der Ammoniakherstellung mit 33,8 Millionen Tonnen. Weitere bedeutende Einsatzgebiete sind die Methanolherstellung (14,6 Millionen Tonnen) und die Eisenerzreduktion (5,2 Millionen Tonnen).²³³ In Deutschland werden aktuell circa 1,65 Millionen Tonnen Wasserstoff jährlich eingesetzt.²³⁴

Je nach Herstellungsart besitzt Wasserstoff einen spezifischen CO_2 -Fußabdruck. Zur besseren Unterscheidung der Herkunft und des CO_2 -Fußabdrucks wird Wasserstoff unterschiedlichen Farben zugeordnet:

- Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt, wobei für die Elektrolyse ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird.²³⁵
- Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Rohstoffen, insbesondere aus Erdgas, gewonnen. Bei der Produktion einer Tonne Wasserstoff entstehen rund zehn Tonnen CO_2 .²³⁶

231 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020.

232 Geldsetzer 2007.

233 International Energy Agency (IEA) 2022a.

234 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020.

235 Thomann et al. 2022.

236 Thomann et al. 2022.

- Blauer Wasserstoff ist grauer Wasserstoff, bei dessen Gewinnung CO₂ abgeschieden und gespeichert wird (Englisch: Carbon Capture and Storage, CCS).²³⁷
- Türkiser Wasserstoff wird über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse, siehe Exkurs) hergestellt. Anstelle von CO₂ entsteht dabei fester Kohlenstoff.²³⁸
- Oranger Wasserstoff wird aus Biomasse und Abfällen hergestellt²³⁹. Allerdings ist diese Definition unter Experten noch umstritten.
- Gelber Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt, wobei für die Elektrolyse der Strommix aus dem Netz eingesetzt wird.

Die Schlüsseltechnologie zur Herstellung von grünem Wasserstoff ist die Elektrolyse, die mittels Strom Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff spaltet und zu den Power-to-Gas-Technologien zählt. Es werden folgende Elektrolyseverfahren unterschieden:²⁴⁰

- Alkalische Elektrolyse: Nutzung einer Kaliumhydroxid-Lösung (KOH) mit einer Konzentration von 20 bis 40 Prozent als Elektrolyt.
- PEM-Elektrolyse: Anstelle eines flüssigen Elektrolyts wird ein Festpolymer-Elektrolyt eingesetzt (= Proton Exchange Membrane).
- Hochtemperatur-Elektrolyseur: Arbeitstemperaturen von mehr als 100 bis 200 Grad Celsius; Wärme eingekoppelt senkt Strombedarf.

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Wasserstoff ist, CO₂-neutral hergestellt, ein wichtiger Baustein in der Energie- und Rohstoffwende. Manche Industrieprozesse lassen sich nicht allein mit Strom defossilieren, wie beispielsweise die Stahlherstellung. Auch die chemische Industrie benötigt grünen Wasserstoff zur Senkung des CO₂-Fußabdrucks. Darüber hinaus ist er perspektivisch ein wichtiger Energiespeicher und Transportmedium. In Solaranlagen und Windparks fällt die Energie fluktuierend je nach Wetterlage an. Daher entstehen Lastspitzen, während derer die Energie gespeichert werden muss, da das Stromnetz sie nicht vollständig abzunehmen vermag.^{241, 242}

Die Bundesregierung hat am 10. Juni 2020 die „Nationale Wasserstoffstrategie“ vorgestellt. Sie enthält einen Aktionsplan mit Maßnahmen für den Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft

237 Thomann et al. 2022.

238 Thomann et al. 2022.

239 Thomann et al. 2022.

240 chemie.de 2023., TÜV Nord o.J.

241 Ausfelder et al. 2015.

242 Neugebauer 2022.

mit direktem Bezug zu SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“. Der Auf- und Ausbau der Wasserstoffwirtschaft ermöglicht der produzierenden Industrie, sich gemäß SDG 9 „Industrie, Innovation und Infrastruktur“ auf eine ressourceneffiziente und klimafreundliche Produktion umzustellen. Thyssenkrupp-Steel will bis spätestens 2045 eine klimaneutrale Stahlproduktion mit neuen Technologien auf Wasserstoffbasis erreichen.²⁴³ Wasserstofftechnologien können in solchen klimaneutralen Produktionsprozessen einen direkten Beitrag zu SDG 9 leisten.

Im Verkehrssektor sind Brennstoffzellenfahrzeuge neben vollelektrischen Fahrzeugen nahezu „emissionsfrei“, das heißt, es werden keine Luftschadstoffe am Auspuff freigesetzt.²⁴⁴ Daher trägt Wasserstoff als Treibstoff im Verkehr direkt zu SDG 3 „Gewährleistung eines gesunden Lebens“ bei. Eine besondere Rolle werden schwere Nutzfahrzeuge spielen, die im Gegensatz zu Personenkraftwagen bislang nicht effektiv elektrisch betrieben werden können. Auch der Schiffs-, Zug- und Fugverkehr können von diesem Treibstoff profitieren.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Gemäß dem Koalitionsvertrag von 2021 soll grüner Wasserstoff vorrangig in den Wirtschaftssektoren genutzt werden, in denen es nicht möglich ist, Verfahren und Prozesse vollständig durch eine direkte Elektrifizierung auf Treibhausgasneutralität umzustellen.²⁴⁵ Zu diesen Bereichen zählen Mobilität und Verkehr, industrielle Rohstoffe und Energie, Gebäudewärme und Strom sowie Stromerzeugung.

Das Beratungsunternehmen Frost & Sullivan schätzt in einer Studie vom Dezember 2022 den globalen Marktwert von Wasserstoff im Jahr 2030 auf 89,45 Milliarden US-Dollar bei einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate ab 2021 von 51,4 Prozent.²⁴⁶ Für das Jahr 2030 wird das Marktvolumen einer Wasserstoffindustrie (Wasserstoffproduktion inklusive Zulieferindustrie) in Europa auf rund 85 Milliarden Euro geschätzt, insofern die EU ein ambitioniertes Ziel²⁴⁷ für den Ausbau der Technologie verfolgt (siehe Abbildung 11). Der europäische Wasserstoffmarkt, der von der heimischen Industrie beliefert wird, kann davon etwa drei Viertel oder absolut 65 Milliarden Euro auf sich vereinen. In diesem Szenario werden im Jahr 2030 in Europa 600.000 Menschen in der Wasserstoffindustrie arbeiten.

243 Thyssenkrupp Steel 2023.

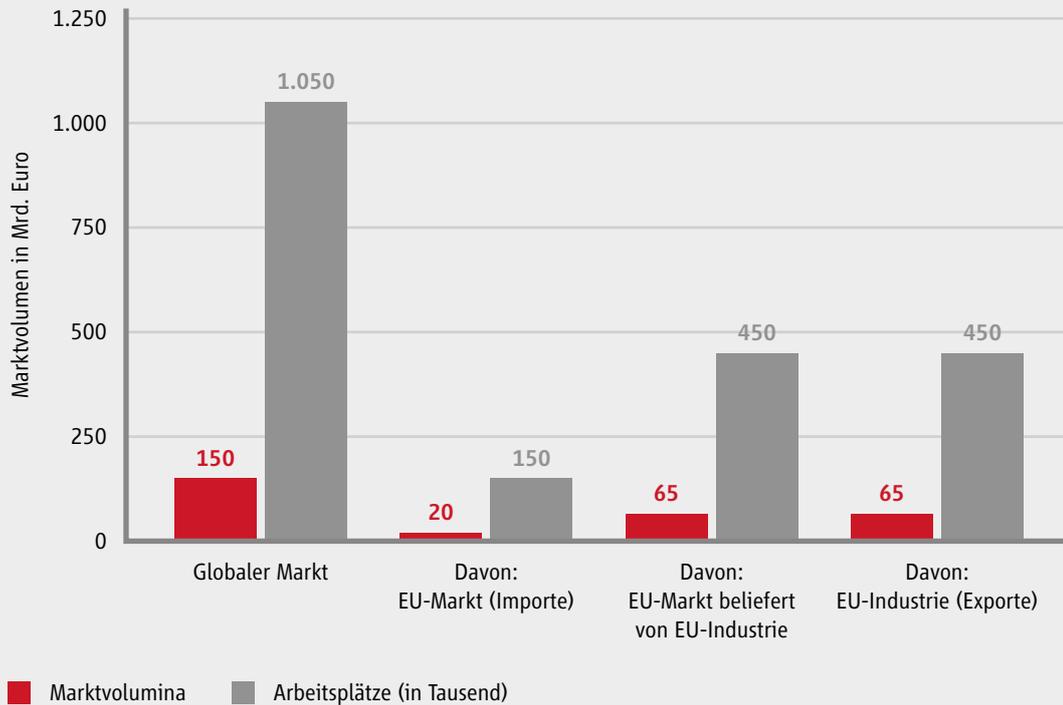
244 Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen 2020.

245 SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021.

246 Frost & Sullivan 2022a.

247 Das ambitionierte Modell geht von einer Einhaltung der 2-Grad-Grenze für Europa aus. Weiterhin fordert das Modell 60 bis 90 Prozent Anteil für europäische Marktteilnehmer am europäischen Markt und zehn bis 25 Prozent Anteil europäischer Marktteilnehmer an außereuropäischen Märkten.

Abbildung 11: Prognose zu Marktvolumen und Beschäftigung in einer Wasserstoffindustrie in der Europäischen Union im Jahr 2030



Quelle: Daten der Fuel Cell & Hydrogen Association FCHEA von 2019.

Basierend auf einem Wirtschaftsmodell schätzt die EU in einer Studie von 2021 die Anzahl an Arbeitsplätzen in Europa, die pro jeder Milliarde Euro, die in die Wasserstoffwertschöpfungskette investiert wird, geschaffen werden, auf 10.200 im Jahr 2030 und 10.600 im Jahr 2050.²⁴⁸

Sie teilen sich wie folgt auf:

- 2030: 600 Transport und Speicherung | 3.000 Wasserstoffproduktion | 6.600 Stromproduktion
- 2050: 900 Transport und Speicherung | 3.800 Wasserstoffproduktion | 5.900 Stromproduktion

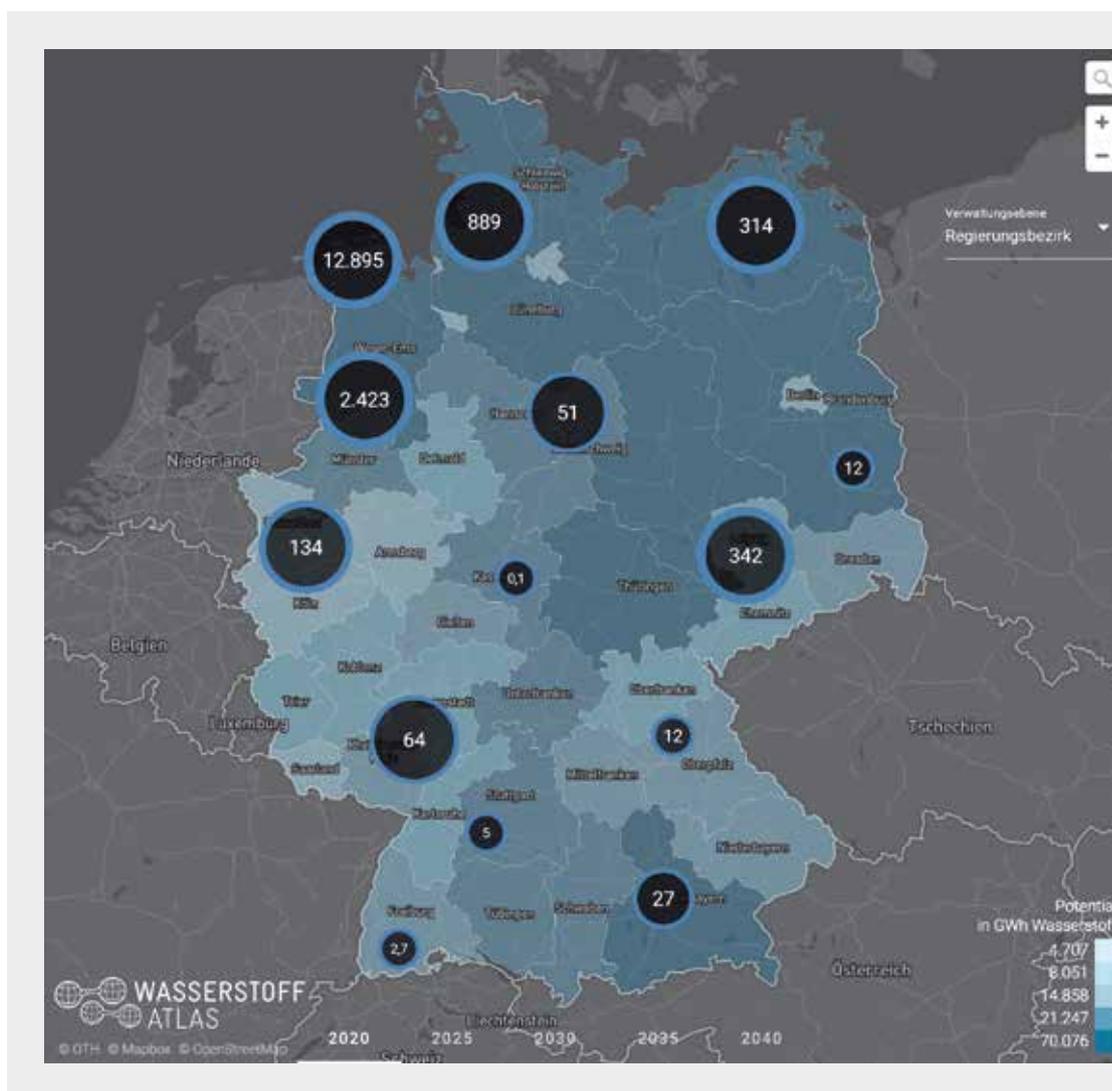
Ein Vergleich mit den Zahlen aus Abbildung 11 ist nicht möglich, da das Marktvolumen nicht gleich der Investition ist.

Derzeit befinden sich 74 Elektrolyseur-Projekte in der Planung, 55 im Betrieb und 11 im Bau. Daraus folgt eine Elektrolyseleistung von 4,3 Gigawatt bis 2030. Bezieht man undatierte

248 Europäische Union 2021.

Projekte mit ein, so lassen sich 7,6 Gigawatt prognostizieren.²⁴⁹ Einen Überblick über die Standorte von Wasserstoff und Power-to-X-Anlagen²⁵⁰ in Deutschland zeigt Abbildung 12. Die meisten Anlagen befinden sich in Übereinstimmung mit der im nächsten Abschnitt dargestellten Karte zur Verortung der Unternehmen im Norden Deutschlands, wo die meiste Windenergie erzeugt wird.

Abbildung 12: Standorte von Wasserstoff/PtX-Anlagen zur Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Kraft-, Brenn- und Rohstoffe in Deutschland in Gigawattstunden (Wasserstoffatlas des Bundesministeriums für Bildung und Forschung).²⁵¹



249 Lübecke et al. 2022a.

250 Power-to-X: alle Verfahren, die Ökostrom/Grünen Strom in chemische Energieträger zur Stromspeicherung, in strombasierte Kraftstoffe zur Mobilität oder Rohstoffe für die Chemieindustrie umwandeln.

251 Wasserstoff.de 2023.

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 567 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Wasserstoff*“ zu finden (Stand: 3.11.2022):

- 26 AGs
- 418 GmbHs
- 2 vollhaftende Personengesellschaften
- 118 teilhaftende Personengesellschaften
- 3 Einzelunternehmen

Deutsche Familienunternehmen sind sehr aktiv im Bereich Wasserstoff: Bosch Mobility Solutions zum Beispiel investiert im Bereich Wasserstoff in den Jahren 2021 bis 2024 gut 600 Millionen Euro in mobile Anwendungen und 400 Millionen Euro in Anwendungen für stationäre Strom- und Wärmeerzeugung.²⁵² Die drei in der Wasserstoffbranche tätigen Familienunternehmen Viessmann Group GmbH & Co. KG, Schmidt, Kranz & Co./SK-Group (siehe Interview) und die Graforce GmbH werben gemeinsam bei der Politik für mehr Technologieoffenheit.²⁵³

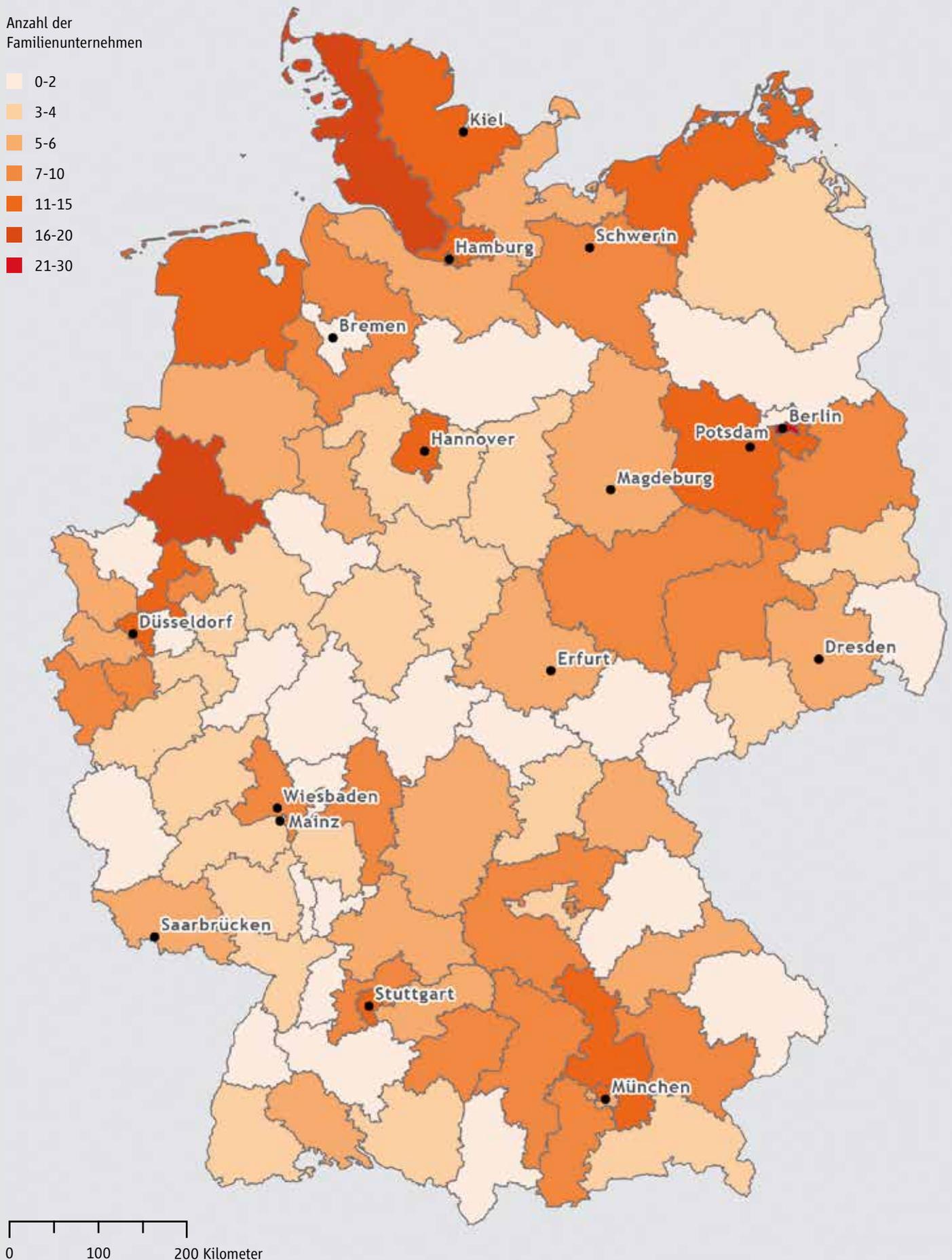
252 Bosch 2022.

253 Müller 2021.

Abbildung 13: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Wasserstoffbranche (nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 0-2
- 3-4
- 5-6
- 7-10
- 11-15
- 16-20
- 21-30



Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Schmidt, Kranz & Co./SK-Group, Mortimer Glinz (geschäftsführender Gesellschafter):

Die ursprünglich aus dem Bergbau kommende Schmidt Kranz Group ist sehr divers aufgestellt. Durch frühzeitige Investitionen und Kooperationen im Bereich Wasserstoff kann das Unternehmen heute einen wesentlichen Teil der entsprechenden Wertschöpfungskette abbilden. Schwerpunkt bildet die wasserstoffbasierte Mobilität.

Allerdings sei gemäß Herrn Glinz derzeit die Infrastruktur für die Wasserstoffmobilität aufgrund fehlender Tankstellen noch nicht gut genug ausgebaut. Der Beschluss der Europäischen Union, dass zukünftig in bestimmten Abständen eine Wasserstofftankstelle vorhanden sein muss, werde jedoch zu einer positiven Veränderung führen.²⁵⁴

Um dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken, bietet die SK Group komplette Online-Kurse und gemeinsam mit dem TÜV einen Blended Learning-Kurs zur Ausbildung als Wasserstofftechniker*in an. Aber nicht nur fehlendes Personal gälte es zu akquirieren, sondern auch bürokratische und politische Hürden seien zu überwinden.

Herr Glinz wünscht sich einen strukturierten Aufbau der Wasserstoffwirtschaft mit pragmatischer und zielorientierter staatlicher Förderung und Regulierung. Ergebnisorientierte Subventionen für grünen Wasserstoff können als gezieltes Steuerungselement eine positive Auswirkung für die Gesamtentwicklung der Wasserstoffwirtschaft entfalten. Da für die Wasserstoffherzeugung grüner Strom benötigt werde, sei eine Vereinfachung der bürokratischen Abwicklung für Wind- und Solarenergie unabdingbar.

Herr Glinz befürwortet langfristige Strategien für die Wasserstoffwirtschaft und einen produktiven Diskurs zwischen Unternehmer*innen, Politikern*innen und Wissenschaftler*innen. Generell müsse es eine größere Offenheit gegenüber Technologien geben. Herr Glinz spricht sich für einen Mix aus wasserstoffbasierter und elektrifizierter Mobilität aus.

In der SK Group besitzt Nachhaltigkeit verschiedene Facetten. Aus Sicht von Herrn Glinz als Familienunternehmer ist es sowohl wichtig, einen gewissen finanziellen Rückhalt für nachkommende Unternehmergenerationen zu sichern als auch langfristige gesamtgesellschaftliche Ziele wie die Bekämpfung des Klimawandels anzugehen. Die SK Group hat bereits ihren CO₂-Fußabdruck bestimmt und für 2023 kompensiert. Nachhaltigkeit sei zudem profitabel, wie zum Beispiel Investitionen in den Ausbau von Tankstellen.

²⁵⁴ Europäische Kommission 2021c.

Die SK Group setzt im Bereich Wasserstoff vor allem bei der Erzeugung und bei der Abfüllung auf Digitalisierung, weiteres Potenzial liege in der Transparenz beim Trading. Zum Teil auch durch den Fachkräftemangel motiviert, gewinnen das Datenmanagement und die Automatisierung bei der Instandhaltung zunehmend an Bedeutung.

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Die EU hat sich das 40-Gigawatt-Ausbauziel für die Elektrolysekapazität bis zum Jahr 2030 gesetzt. Von 2030 bis 2050 sollen die Technologien für erneuerbaren Wasserstoff in großem industriellem Maßstab umgesetzt werden. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, müssen sowohl technische Innovationen gefördert werden als auch der regulatorische Rahmen, zum Beispiel zum Transport und Handel von Wasserstoff, und eine einheitliche Zertifizierung geschaffen werden. Die EU plant dafür Ausgaben von bis zu 470 Milliarden Euro bis 2050 für die Produktion von 10 Millionen Tonnen Wasserstoff jährlich ab 2030.²⁵⁵ Der Vorschlag zum REPowerEU-Plan (18.05.2022) zur Beendigung der Abhängigkeit der Europäischen Union von Einfuhren fossiler Brennstoffe aus Russland sieht sogar noch eine Erhöhung der Wasserstoffproduktionsmenge um 10 Millionen Tonnen jährlich und einem jährlichen Import von zusätzlich 10 Millionen Tonnen grünen Wasserstoffs vor.

Vor diesem Hintergrund ist die „Nationale Wasserstoffstrategie“ der Bundesregierung zu verstehen, die helfen soll, die Treibhausgasreduzierungsziele der Europäischen Union auf nationaler Ebene zu erreichen, und die wesentlicher Markttreiber für die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ist. Ihre Ziele wurden im Koalitionsvertrag sogar noch verschärft: „Neben dem Ausbau der Infrastruktur werden wir die Ziele zur Elektrolyseleistung deutlich erhöhen, europäische und internationale Klima- und Energiepartnerschaften für klimaneutralen Wasserstoff und seine Derivate auf Augenhöhe vorantreiben und Quoten für grünen Wasserstoff in der öffentlichen Beschaffung einführen, um Leitmärkte zu schaffen.“²⁵⁶ Der Bund strebt eine führende Rolle in grünen Wasserstofftechnologien in Europa an. Dazu verfolgt er einen ambitionierten Ausbauplan für Elektrolysekapazitäten (Koalitionsvertrag: 10 Gigawatt Elektrolysekapazität in 2030 geplant).²⁵⁷ Die Nationale Wasserstoffstrategie wird aktuell fortgeschrieben und soll in Kürze veröffentlicht werden. Damit reagiert die Bundesregierung unter anderem auf aktuelle Marktentwicklungen, Erfahrungen aus Förderprojekten sowie auf die ambitioniertere Klimaschutzzielsetzung.^{258, 259}

255 Europäische Kommission 2020b.

256 SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021.

257 SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021.

258 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2023b.

259 Delhaes und Sratmann 2023.

Trotz dieser politischen Anstrengungen erwarten Ueckerdt et al., dass im Jahr 2030 nur etwa ein Prozent der Energienachfrage der Europäischen Union mit heimischem grünem Wasserstoff gedeckt werden kann, falls das europäische 40-GW-Ausbauziel für Elektrolysekapazität erreicht wird. Voraussetzung dafür ist ein rasanter Wasserstoff-Markthochlauf, der doppelt so schnell wie bei Windkraft und ähnlich schnell wie bei Photovoltaik erfolgen muss, obwohl grundsätzliche Unsicherheiten bei der kurzfristig realisierbaren Dynamik und dem langfristigen Potenzial von Technologien bestehen. Blauer Wasserstoff kann als Brückentechnologie das Angebot klimafreundlichen Wasserstoffs erhöhen und die Transformation in Richtung einer grünen Wasserstoffwirtschaft beschleunigen. Die Nationale Wasserstoffstrategie lässt den Import von blauem Wasserstoff als Übergangslösung zu.²⁶⁰ Trotz fördernder politischer Rahmenbedingungen bleiben techno-ökonomische Unsicherheiten bestehen, die auch den mittel- und langfristigen Import von Wasserstoff betreffen.²⁶¹

Im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie will Deutschland im Jahr 2030 circa zwölf Millionen Tonnen Wasserstoff aus Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung (zum Beispiel Marokko) zukaufen, im Jahr 2050 sogar 40 Millionen Tonnen.²⁶² Mindestens 0,6 bis 1,2 Millionen Tonnen des importierten Wasserstoffs sollen aus grünem Wasserstoff bestehen.²⁶³ Allerdings entstehen in diesen Exportländern oft hohe Finanzierungskosten, fehlen Infrastrukturen und mangelt es an entsprechend ausgebildeten Fachkräften. Der Schiffstransport von Wasserstoff erfordert Technologien, die noch nicht industriell ausgereift sind (z. B. „Liquid Organic Hydrogen Carriers“ oder Ammoniak-Cracker).²⁶⁴ Abnehmerseitig wird sich in Deutschland noch zeigen, ob die neuen LNG- (Liquid Natural Gas) Terminals, die nach und nach ihren Betrieb aufnehmen, auch für Wasserstoff geeignet sind, wie es der Bund im Gesetz für fossiles LNG (LNG-Beschleunigungsgesetz) vorsieht.²⁶⁵

Ein weiteres Hemmnis bei der Produktion von grünem Wasserstoff kann möglicherweise die Ressource Wasser werden. Seit dem Frühjahr 2022 leidet Deutschland erneut unter ausgehnter Trockenheit, die lokal zu signifikantem Absinken der Wasserstände führt.²⁶⁶ Diese Herausforderung trifft zunehmend viele Regionen weltweit. Obwohl bei der Produktion von einem Kilogramm Wasserstoff circa 22,5 Kilogramm Rohwasser benötigt werden²⁶⁷, gibt es

260 Wiedemann 2022.

261 Ueckerdt et al. 2021b.

262 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2020.

263 Thomann et al. 2022.

264 Ueckerdt et al. 2021b.

265 Die Bundesregierung 2022e.

266 Becker 2022a.

267 Bei Verwendung von Entsalzungsanlagen.

bisher keine Technikfolgenabschätzung in Bezug auf die lokale Wasserkonkurrenzsituation für eine flächendeckende Produktion von Wasserstoff.²⁶⁸

Auch der Ukraine-Krieg kann den Auf- und Ausbau der grünen Wasserstoffwirtschaft negativ beeinflussen. Da die Kosten für grünen Wasserstoff im Wesentlichen von den Stromkosten dominiert werden, waren sie infolge der im Jahr 2022 kurzfristig enorm gewachsenen Energiekosten zeitweise deutlich angestiegen.²⁶⁹ Zudem können Sanktionen gegen Russland bei schnell wachsender Nachfrage zu Lieferengpässen von Rohstoffen führen, die für die Herstellung von Elektrolyseuren benötigt werden (z. B. Nickel, Titan, Iridium, Palladium, Platin und Scandium).²⁷⁰

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Die Bundesregierung fördert bis zum Jahr 2023 grundlagenorientierte, anwendungsnahe Forschung sowie Reallabore mit 1,11 Milliarden Euro, zusätzlich zu der bereits im Rahmen des „Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP) vorgesehenen Förderung von 1,4 Milliarden Euro im Zeitraum von 2016 bis 2026. Innovationen in Technologien werden mit einer Milliarde Euro und der Markthochlauf mit sieben Milliarden Euro sowie Investitionen in internationale Partnerschaften mit zwei Milliarden Euro unterstützt.^{271, 272} Neben Anwendungen in der Mobilität und Großindustrie werden auch Innovationen im Wärmemarkt – wie die Brennstoffzellenheizung – durch die KfW-Bank gefördert.²⁷³

Ein Jahr nach dem Inkrafttreten der Nationalen Wasserstoffstrategie wurden 62 IPCEI-Projekte vorausgewählt, die Investitionen in Höhe von 33 Milliarden Euro auslösen und eine Leistung von zwei Gigawatt ermöglichen können. Sie sollen sowohl zum Ausbau der Erzeugungskapazitäten von grünem Wasserstoff als auch zur Infrastruktur von Wasserstoff-Wertschöpfungsketten beitragen.²⁷⁴ Zudem plant die Bundesregierung weitere Förderprogramme, die insbesondere den Mittelstand bei der Umstellung betrieblicher Prozesse auf Wasserstoff unterstützen sollen. Durch den Start von sechs Reallaboren kann Deutschland sich als Leitanbieter im Bereich grüner Wasserstofferzeugungs- und -anwendungstechnologien positionieren. Die wesentlichen Leuchtturmprojekte sind:

268 TGA 2021.

269 Energate messenger 2023.

270 Lübecke et al. 2022b.

271 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020.

272 Deutscher Bundestag 2022a.

273 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2021b.

274 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2021b.

- H₂Giga Project zur Finanzierung der Hochskalierung der Produktion von Elektrolyseuren²⁷⁵
- H₂Mare Project zur Finanzierung der Erforschung effizienter Wege zur Offshore-Produktion von Wasserstoff mittels Windturbinen²⁷⁶
- TransHyDE Project zur Finanzierung der Entwicklung, Evaluation und Demonstration von Wasserstofftransporttechnologien²⁷⁷

Förderprogramme wie „H2Global“ unterstützen die Wasserstoffproduktion sowohl innerhalb als auch außerhalb der EU. Die deutsche Bundesregierung hat dafür bereits im Jahr 2021 900 Millionen Euro bereitgestellt, damit internationale Kooperationen im Hinblick auf Wasserstoffimport und Technologieexport gefördert werden können.²⁷⁸ Auf europäischer Ebene können sich Unternehmen in der „European Clean Hydrogen Alliance“ beteiligen, einem Zusammenschluss aus EU-Mitgliedsstaaten, Unternehmen, Zivilgesellschaft, Verbänden und Wissenschaft, mit dem Ziel, Investitionsprojekte entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette zu identifizieren.²⁷⁹

Um die prognostizierten Bedarfe von heimischem grünem Wasserstoff abzudecken, wird auch der Aus- und Aufbau von Windparks auf dem Meer (offshore) gefördert. Sogar die Errichtung von Wasserstoffelektrolyseuren auf dem Meer wird erwogen. Die Anrainerstaaten in der Nord- und Ostsee planen einen Regulierungsrahmen für Offshore-Windenergie, der die Wasserstoffproduktion vorantreiben soll.²⁸⁰ Die Bundesregierung will mit dem am 22. März 2023 novellierten Windenergie-auf-See-Gesetz für Deutschland²⁸¹ eine Leistung von 30 Gigawatt bis 2030, 40 Gigawatt bis 2035 und 70 Gigawatt bis 2045 in der Nord- und Ostsee installieren.²⁸² Das vom BMBF mit über 100 Millionen Euro geförderte Leitprojekt „H₂Mare“ befasst sich bis 2025 damit, die Offshore-Erzeugung von grünem Wasserstoff und anderen Power-to-X-Produkten zu erforschen.²⁸³

Die EEG-Umlagebefreiung wurde als regulatorische Rahmenbedingung für den Markthochlauf von Wasserstoff geschaffen. Über sogenannte „Carbon Contracts for Difference“ (Klimaschutzdifferenzverträge) zwischen Staat und Unternehmen der energieintensiven Industrie (vor allem

*Carbon Contracts for
Difference steigern
die Attraktivität
klimafreundlicher
Produktionsverfahren.*

275 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2021b.

276 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2021a.

277 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2021c.

278 Die Bundesregierung 2022b.

279 Europäische Kommission 2021b.

280 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020.

281 Die Bundesregierung 2023a.

282 Bundesministerium der Justiz 2023.

283 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2021d.

Stahl- und Chemieindustrie) sollen die Mehrkosten klimafreundlicher Produktionsverfahren gegenüber herkömmlichen Verfahren ausgeglichen werden.²⁸⁴

Das Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungsquote soll unter anderem Anreize schaffen, Wasserstoff in nicht elektrifizierbaren Bereichen (z. B. Schiffs-, Flug-, Schienenverkehr) einzusetzen. Förderlich für die Umsetzung wasserstoffbasierter Mobilitätskonzepte kann die Einführung von Incentives für Fahrzeughalter nach dem nordamerikanischen Modell sein: Die dortige Regierung fördert den Kauf von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen durch eine Steuervergünstigung in Höhe von 8.000 US-Dollar.²⁸⁵

Die Projektgesellschaft aus HH2E und der MET Group plant, bis 2025 eine der größten Anlagen für die Produktion von grünem Wasserstoff mit einer Eingangsleistung von 100 Megawatt und einem Investitionsvolumen von circa 200 Millionen Euro in Lubmin zu errichten. Bis 2030 soll die Leistung sogar auf ein Gigawatt ausgebaut werden. Die Anlage wird durch erneuerbare Energien wie Off- und Onshore-Windparks und Solarparks gespeist und soll in der ersten Ausbauphase 6.000 Tonnen grünen Wasserstoff pro Jahr erzeugen.²⁸⁶

Die direkte Gewinnung von Wasserstoff aus Abfällen oder Abwasser zum Beispiel mittels Vergasung ist ebenfalls ein innovativer Ansatz, der aktuell erprobt wird.²⁸⁷ Im Müllheizkraftwerk Darmstadt sollen ab 2024 im Rahmen des Forschungsprojekt DELTA-Reallabor beispielsweise 1.200 Kilogramm Wasserstoff pro Tag direkt und mittels des Stroms aus den Verbrennungsprozessen für den Betrieb von Fahrzeugen der Stadtreinigung, der Müllabfuhr und des öffentlichen Personennahverkehrs produziert werden.²⁸⁸

Entwicklungsfelder sind gemäß dem Impulspapier der Industrie- und Handelskammer beispielsweise auch Komponenten für die dezentrale Erzeugung von Wasserstoff und für den Auf- und Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur.

284 Die Bundesregierung 2023c.

285 Frost & Sullivan 2022a.

286 HH2E 2022.

287 Schlegl 2022.

288 Darmstädter Energie-Labor für Technologien in der Anwendung (DELTA) 2023.

Exkurs: Methanpyrolyse

Der Begriff Methanpyrolyse impliziert die thermische Spaltung von Methan, bei der es zu einem Ausschluss von oxidierenden Reaktionspartnern kommt. Diese Reaktionspartner sind zum Beispiel Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid oder Sauerstoff. Bei der endothermen Hauptreaktion bildet sich fester Kohlenstoff als Nebenprodukt und gasförmiger Wasserstoff als Hauptprodukt. Die thermische Spaltung läuft bei einer Wärmeamplitude von 500 °C ab, wenn Nickel als Katalysator genutzt wird, und erreicht sogar 2000 °C bei einer Verwendung von Plasmaflammen.²⁸⁹ Ursprüngliche Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff wandelten Methan in CO₂ um, welches anschließend in die Atmosphäre abgegeben wurde. Bei der Methanpyrolyse entsteht dagegen Kohlenstoff, welcher anschließend kommerziell genutzt werden kann, zum Beispiel für die Herstellung von Kunststoffen oder Leichtbaustoffen.²⁹⁰ Für die Methanpyrolyse wird in den meisten Fällen Erdgas genutzt. Dennoch ist auch die Nutzung von Methan aus Biogas möglich, woraus sogar negative CO₂-Emissionen resultieren würden.²⁹¹

8. Zusammenfassung

Die Bundesregierung fördert in vielfältiger Weise entlang der gesamten Wertschöpfungskette den Auf- und Ausbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft und strebt eine Vorreiterrolle innerhalb von Europa an. Allerdings erfordert die Erreichung der Ausbauziele einen rasanten Markthochlauf, der mit großen technischen und regulatorischen Unsicherheiten verbunden ist. Zum Übergang bis zur Erreichung einer vollständigen grünen Wasserstoffproduktion wird deshalb die Herstellung blauen Wasserstoffs akzeptiert.²⁹²

Neben den positiven Auswirkungen auf die Entwicklung des Klimas ergibt sich auch ein erheblicher Zuwachs an neuen Arbeitsplätzen, die allerdings zum Teil aufgrund des Fachkräftemangels schwer zu besetzen sind. Dennoch eröffnen sich bei zweistelligen Wachstumsprognosen für die Wasserstoffwirtschaft erhebliche Marktchancen für Familienunternehmen vorrangig in den Bereichen Transport, Speicherung, Wasserstoff- und Stromproduktion.

Als innovative technologische Ansätze sind die Gewinnung von Wasserstoff offshore und die Entwicklung von Komponenten für die dezentrale Erzeugung von Wasserstoff und für den Auf- und Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur hervorzuheben.

289 Schneider et al. 2020.

290 Jendrischik 2021.

291 Zukunft Gas e.v 2023.

292 Wiedemann 2022.



Fuel

synthetic fuel



e-Fuel

synthetic fuel



VII. E-Fuels

1. Definition

E-Fuels sind synthetische Kraftstoffe, die mittels Strom aus Wasser und CO₂ synthetisiert werden. Ein Elektrolyseverfahren, das erneuerbare Energien nutzt, produziert aus Wasser und Luft Wasserstoff (siehe Kapitel D.VI). Das CO₂ wird durch fossile oder biogene Quellen (z. B. aus der Verbrennung in Industrieanlagen) und aus der Atmosphäre gewonnen.²⁹³ Im Vergleich zur direkten Elektrifizierung wird der Einsatz von Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren als indirekte Elektrifizierung bezeichnet.²⁹⁴

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Laut einer Studie von Gaikwad et al. aus dem Jahr 2022 wird der fossile Energieverbrauch bei der Kraftstoffherstellung durch die E-Fuel-basierte Herstellung gegenüber Benzin-, Diesel- und Kerosinprodukte vermindert, indem industrielles Abgas oder atmosphärisches/biogenes CO₂ die üblichen fossilbasierten Ausgangsstoffe ersetzt (CCU Carbon Capture and Utilization).²⁹⁵ Somit wird ein Beitrag zum SDG 9 „Industrie, Innovation und Infrastruktur“ geleistet. Die einhergehende Reduktion von Treibhausgasen führt zu einem positiven Beitrag zum SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“.²⁹⁶ Betreiber von Kraftfahrzeugen, die klimafreundlichere E-Fuels tanken, unterstützen SDG 12 „Nachhaltiger Konsum und Produktion“. E-Fuels reduzieren in der Regel zudem die NOx-Emissionen und den Rußanteil bei der Verbrennung, sodass auch die Ansprüche des SDG 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“ auf Verringerung der Luftverschmutzung in Städten erfüllt werden.²⁹⁷ Allerdings wird zur Herstellung der E-Fuels sehr viel Wasserstoff benötigt, weshalb eine Anwendung zunächst in den Bereichen Flugtreibstoffe, Schiffs- und Schwerlastverkehr zu erwarten ist.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Wichtige Industriebranchen in Deutschland wie zum Beispiel die rohölverarbeitende Industrie investieren bereits in die Lieferkette der E-Fuels.²⁹⁸ Andere Sektoren, wie See- und Luftfahrt, sehen Bedarf für E-Fuels, da sie an ihre Grenzen stoßen, wenn es um die vollständige Elektrifizierbarkeit geht. In diesen Bereichen sind flüssige beziehungsweise gasförmige Brennstoffe unerlässlich.²⁹⁹ Dies bietet einen Marktvorteil für E-Fuels.

293 Ueckerdt et al. 2021a.

294 Kopernikus-Projekt Ariadne 2021.

295 Gaikwad et al. 2022.

296 Cames et al. 2021.

297 Cames et al. 2021.

298 OMV 2022.

299 Umweltbundesamt (UBA) 2021b, S. 24.

In Bezug auf den Verkehrssektor hat die Firma Audi AG bereits im Jahr 2013 eine Pilotanlage entworfen. Auf der Basis von Wasser, Strom und Kohlendioxid wird in dieser Anlage Methan produziert. Der daraus entstandene Kraftstoff kann für bestehende Fahrzeuge und Infrastrukturen genutzt werden.³⁰⁰

Laut dem ADAC e.V. ist derzeit ein Preis von circa zwei Euro pro Liter synthetischen Kraftstoffs machbar. Zwei Hauptgründe dafür sind: (a) sinkende Produktionskosten für ‚regenerativen Strom‘, und (b) Massenherstellung, die E-Fuels günstiger werden lässt.³⁰¹ Laut einer Studie des „Virtuellen Instituts Strom zu Gas und Wärme NRW“ dominieren die Wasserstoffkosten die Gesamtkosten für die E-Fuel-Herstellung.³⁰²

4. Beitrag von Familienunternehmen

Die Herstellung und Nutzung von E-Fuels gehören zu den sogenannten „emerging technologies“. Dies zeigt sich durch die (noch) geringe Anzahl der Recherchetreffer von Familienunternehmen (67 Nennungen) in der MARKUS-Unternehmensdatenbank. Die Ergebnisliste bezieht sich auf nachfolgende Suchergebnisse (Stand: 3.11.2022)

- E-Fuels/eFuels: 5 Treffer
- Power-to-Fuel: 0 Treffer
- E-Diesel: 0 Treffer
- Electrofuel: 0 Treffer
- Power-to-Liquid: 2 Treffer
- E-Sprit: 48 Treffer
- Synthetische Kraftstoffe: 2 Treffer
- Carbon Capture: 4 Treffer
- CCU: 6 Treffer

Das Unternehmen Sunfire GmbH beschäftigt sich beispielsweise mit der Produktion von E-Fuels und nutzt dazu den Power-to-Liquid-Prozess. Kern der Technologie ist der „Sunfire-SynLink Solid Oxide Electrolytic Cell (SOEC)“-Elektrolyseur.³⁰³

300 Kasten 2020.

301 Rudschies 2022.

302 Virtuelles Institut NRW 2022.

303 Sunfire 2020.

5. Interview

GMA Gesellschaft für Mineralöl-Analytik und Qualitätsmanagement mbH + Co. KG, Dr. Uta Weiß (Geschäftsführerin):

E-Fuels können nachhaltig dort produziert werden, wo erneuerbare Energien, wie Wind und Sonne, im Überfluss vorhanden sind. So gäbe es zum Beispiel in Patagonien sehr viel Wind und Sonne, woraus erneuerbarer Strom erzeugt werden könne, der dann wiederum für die Erzeugung flüssiger Energieträger genutzt werde. Diese können dann auf den etablierten Wegen nach Deutschland gebracht werden. Dazu gäbe es weltweit bereits eine komplette Logistik, die sofort nutzbar wäre. Betrachtet man die Ziele, die von Deutschland und auch von der EU für die grüne Wasserstofftechnologie vorgesehen wären, wird man feststellen, dass der Bedarf für alle Sektoren nicht in Deutschland oder Europa erzeugt werden könne. Wir, so Frau Dr. Weiß, können also den Energiesektor mit nachhaltig produzierten Wasserstoffderivaten, unter anderem E-Fuels, entlasten, die als Kraft- und als Brennstoff eingesetzt werden können.

Was Frau Dr. Weiß erreichen will, ist eine vernünftige und gesicherte Energieversorgung. Die Corona-Krise und auch der Ukraine-Krieg haben gezeigt, wie wichtig es sei, Produkte auch im eigenen Land zu fertigen, um Abhängigkeiten zu verringern. Dazu gehöre auch die Raffinerielandschaft in Deutschland, sowohl die Kraft- und Brennstoffraffinerien als auch die Raffinerien der chemischen Industrie. Deutschland habe eine Vorbildfunktion für andere Staaten, daher wäre es noch wichtiger, sinnvolle Strategien und entsprechende Entscheidungen zu treffen und zu verfolgen.

Die durch den Ukraine-Krieg ausgelöste Energiekrise habe offenbart, dass es besser ist, auf mehrere Technologien zu setzen. Aus Sicht von Frau Dr. Weiß kann es sich Deutschland eigentlich gar nicht leisten, auf flüssige Energieträger zu verzichten, alle Optionen sollten technologieoffen gewahrt bleiben.

Familienunternehmen haben es schon etwas schwerer, in einer Branche wie E-Fuels erfolgreich zu sein, weil bei derart investitionsintensiven und umfangreichen Themen eine große Konzernstruktur mit der damit eventuell auch verbundenen größeren finanziellen Sicherheit im Hintergrund schon Vorteile bieten könne. Gefühlt legen Familienunternehmen mehr Wert auf Nachhaltigkeit, da nicht nur die Gewinne im Vordergrund ständen, sondern auch mehr darauf geachtet würde, dass die Firma langfristig bestehen bleibe. Zumeist sei die Risikobereitschaft aus diesem Grund auch geringer.

Die Erfahrung hat Frau Dr. Weiß gezeigt, dass wir darauf angewiesen sind, Energieträger auch in anderen Ländern zu erzeugen. Dort haben wir nach Meinung von Frau Dr. Weiß wegen der

in größeren Mengen vorhandenen erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne die Möglichkeit, viel günstiger und effizienter zu produzieren als in Deutschland. Solche Themen sollten ideologieoffener betrachtet werden, nur so könne man zum besten Ergebnis gelangen. Auch sei es sehr schwierig, Quellen für Fördermittel zu entdecken, dabei sei man definitiv auf Beratung angewiesen.

Nicht eine Technologie an sich stelle in der Regel das Problem dar, sondern mehr das, was daraus oder damit gemacht würde. So wäre es sehr hilfreich, wenn die Politik klarer in ihren Entscheidungen sowie technologieoffener wäre und nicht nur situationsbedingt entscheiden würde. Gesetzliche Hürden bei der Zulassung sollten reduziert werden. Der Verbrennungsmotor beispielsweise sei nicht pauschal als schlecht zu bezeichnen, er könne auch mit nachhaltigen Biokraftstoffen und E-Fuels betrieben werden. Über den Verband MEW versucht Frau Dr. Weiß daher auch, den Endkunden zu informieren, damit er sich ein besseres Bild von der Situation machen kann. Große Projekte wie das Methanol-to-gasoline-Projekt in Chile oder die kleineren Pilotprojekte „Next Gate“³⁰⁴ sowie „Nacomplex“³⁰⁵ sind sichtbarer und ebnet auch den Weg für die Technologie.

Die Digitalisierung sei sehr wichtig; Docusign [Anmerkung der Autor*innen: elektronische Unterschrift] zum Beispiel vereinfache vieles, die ganze Welt sei viel enger zusammengedrückt. Durch die Digitalisierung würden die operativen Prozesse vereinfacht, vieles wäre anders kaum noch vorstellbar. Es gäbe allerdings auch eine Abhängigkeit von Systemen, die nicht unterschätzt werden dürfe, aber die Vorteile überwiegen aus Sicht von Frau Dr. Weiß auf jeden Fall.

Zitat: „Die EU-Klimaziele werden ohne E-Fuels nicht erreichbar sein.“

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Die Quantität und die Preise von E-Fuels hängen von der Menge an CO₂ ab, die wirtschaftlich aus den CO₂-Quellen abgeschieden werden kann.³⁰⁶ Es gibt bereits E-Fuels-Anlagen, die mit der „Direct Air Capture“ (DAC)-Technologie arbeiten (siehe Exkurs). Anfang Oktober 2021 hat die atmosfair gGmbH die weltweit erste E-Kerosin-Anlage weltweit in Betrieb genommen. Die Anlage nutzt aus der Luft abgeschiedenes CO₂, um E-Kerosin herzustellen.³⁰⁷ Lufthansa AG ist einer der ersten Abnehmer. Aufgrund der hohen Kosten und der geringen Anzahl von Projekten und Unternehmen ist die DAC-Technologie jedoch einer der Engpässe bei der Realisierung von E-Fuels-Anlagen.

304 Mabanft 2022.

305 Mabanft 2021.

306 Ueckerdt et al. 2021b.

307 FlugRevue 2021.

Ein Nachteil von E-Fuels ist die Wirkungskette: Für die strombasierten Flüssigkraftstoffe lässt sich ein Wirkungsgrad von 45 Prozent feststellen.³⁰⁸ Laut einer Studie von Kasten aus dem Jahre 2020 ist die Elektrifizierung sinnvoller für die Energieeffizienzsteigerung gegenüber der Verbrennungsmotoren, denn Elektromotoren sind um den Faktor 2,5 bis 3 effizienter.³⁰⁹ In Verbrennerfahrzeugen mit E-Fuels sei die Energieeffizienz (Basis: pro Kilowattstunde eingesetzter erneuerbarer Strom) etwa fünfmal geringer als in Elektrofahrzeugen (inklusive Netzintegration).³¹⁰

Andere Herausforderungen existieren bei der Power-to-Gas/Power-to-Liquid-Synthese und den erneuerbaren Stromkapazitäten. Die E-Fuels-Anlagen sollten die bestehenden und prognostizierten Engpässe für das Stromnetz nicht verstärken. Wissenschaftliche Veröffentlichungen zeigen, dass Deutschland einen wesentlichen Teil der benötigten Kraftstoffe aus Regionen mit hohem Angebot an Sonnen- und/oder Windenergie importieren müsste, um einen Preis von circa zwei Euro pro Liter Dieseläquivalent zu erreichen.³¹¹ Wenn Wasserstoff für die E-Fuel-Herstellung importiert wird, spielt die Wasserverfügbarkeit eine Rolle bei der Auslandsstandortanalyse. Einige Regionen, die über viel Solarenergiepotenzial verfügen (bspw. Nordafrika, Südspanien, Süditalien), haben eine geringe Wasserverfügbarkeit und sind daher vom „Wasser-Stress“ betroffen.³¹²

Die Definition von gängigen Spezifikationen und die Aktualisierung von Normen sind auf regulatorischer Ebene erforderlich, da die Normen derzeit noch eine höhere Beimischung von E-Fuels zu üblichen Treibstoffen blockieren. Zum Beispiel wird durch die „fuel quality directive“ die Beimischung des Ethanol auf nur 10 Prozent limitiert.³¹³ In solchen Fällen könnte von der Europäischen Union ein „Delegated Act“ erlassen werden, der den Mitgliedsstaaten erlaubt, die Einsatzquote von E-Fuels selbst festzulegen. In diesem Rechtsakt werden die Ziele, Anwendungsbereiche sowie der Inhalt und die Länge der Befugnisübertragung festgelegt.³¹⁴

In der Abstimmung vom 14.02.2023 hat sich das EU-Parlament allerdings erst einmal gegen die breite Anwendung von E-Fuels und stattdessen dafür ausgesprochen, dass In der EU ab 2035 nur noch solche Neuwagen zugelassen werden, die beim Fahren keine Treibhausgase ausstoßen, was faktisch das Aus für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bedeutet.³¹⁵ Bisher

308 Alt 2020.

309 Kasten 2020.

310 Ueckerdt et al. 2021a.

311 Alt 2020.

312 European Environment Agency (EAA) 2021.

313 Europäische Kommission 2020e.

314 Europäische Kommission 2018b.

315 Europäisches Parlament 2022.

betrifft dieses Verbot nur Pkw und Kleintransporter, aber auch der Schwerlastverkehr soll nach dem Willen des EU-Parlaments bis 2040 90 Prozent weniger CO₂ ausstoßen. Allerdings ist diese Entscheidung noch nicht abschließend gefällt, denn die Bundesregierung hat erwirkt, dass Verbrenner-Fahrzeuge auch nach 2035 noch neu zugelassen werden dürfen, sofern sie ausschließlich CO₂-neutrale Kraftstoffe tanken. Die Europäische Kommission wird im ersten Halbjahr 2023 einen entsprechenden Vorschlag erarbeiten.

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

E-Fuels sind eine Möglichkeit, die EU-Klimaschutzziele des Verkehrssektors zu erreichen, wenn der genutzte Strom mit einer niedrigen Kohlenstoffintensität produziert wird.³¹⁶

Ein Grund dafür ist ihre hohe Energiedichte, weswegen sich E-Fuels über lange Distanzen kostengünstig transportieren und in sehr großem Maßstab stationär speichern lassen. Sie können jahreszeitliche Schwankungen des Angebots erneuerbaren Stroms kompensieren und so zur Stabilität der Energieversorgung beitragen.³¹⁷

Ein weiterer großer Vorteil ist, dass die gesamte bestehende Öl- und Kraftstoffinfrastruktur (LKW, Schiffe, Pipelines, Tankstellen, worüber Ölprodukte weltweit derzeit geliefert werden) weiter genutzt werden kann. Dies gilt auch für die Erdgasinfrastruktur. Außerdem kann der heutige Bestand an Pkw und Nutzfahrzeugen ohne Umrüstung mit E-Fuels betrieben werden.³¹⁸

Brenn- und Kraftstoffe werden im Jahre 2050 für verschiedene Anwendungen genutzt, jedoch vorrangig für die Luft- und Seefahrt. Laut einer Berechnung der RESCUE-Studie reduziert sich der Endenergieverbrauch in Schwertransport-Sektor bis dahin um 30 bis 65 Prozent respektive im Vergleich zu 2010.³¹⁹

Unter der Führung des Unternehmens HIF Global (Highly Innovative Fuels) soll in Patagonien die weltweit erste kommerzielle Großanlage zur Herstellung von klimaneutralen E-Fuels entstehen. Im Haru-Oni-Projekt werden die starken Windverhältnisse in Südchile genutzt, um unter niedrigen Stromkostenverhältnissen synthetische Kraftstoffe zu produzieren. In der ersten Phase (bis 2023) soll die jährliche Produktion von E-Fuels bereits 130.000 Liter betragen. Bis 2025 soll die Produktion auf 55 Millionen Liter E-Fuels steigen und im Jahr 2027 sogar auf 550 Millionen Liter.³²⁰

316 Ueckerdt et al. 2021a.

317 Ueckerdt et al. 2021a.

318 E-Fuels | Einfach.Genial.Klimaneutral 2022.

319 Umweltbundesamt (UBA) 2021b.

320 Siemens Energy 2022.

Das Projekt „C³-Mobility“ des BMWK soll eine Schnittstelle zwischen dem Energie- und Verkehrssektor schaffen. Der Fokus liegt unter anderem auf synthetischen Kraftstoffen, die für den Langstreckentransport genutzt werden sollen.³²¹

Auch das Projekt „Green Fuels Hamburg“ beschäftigt sich mit der kommerziellen Nutzung von synthetischen Kraftstoffen. Unter der Leitung von Uniper SE, Siemens Energy AG, Airbus S.A.S und Sasol EcoFT soll in Hamburg ein Standort entstehen, der nachhaltige Kraftstoffe für die Luftfahrt entwickelt. Nach der geplanten Inbetriebnahme im Jahr 2026 sollen jährlich 10.000 Tonnen E-Kerosin hergestellt werden.³²² Der Standort verfügt über eine gute Anbindung zu erneuerbaren Energien und gilt bereits jetzt als führender Innovations- und Luftfahrtstandort. Durch eine Elektrolyse-Großanlage soll grüner Wasserstoff erzeugt werden. Daran wird eine Produktionsanlage für PtL-Kraftstoffe gekoppelt, welche mittels Fischer-Tropsch-Synthese PtL-Kerosin herstellt.³²³

Auf europäischer Ebene wurden Kriterien zur Bewertung der Treibhausgasemissionen von E-Fuels im Rahmen eines „Delegated Act“ der Erneuerbare-Energien-Richtlinie im Februar 2023 festgelegt. Die Bewertungsmethodik erleichtert Investitionen im E-Fuels-Bereich.³²⁴ Dies entspricht den Interessen Italiens, Portugals, Spaniens und Kroatiens, die im Rahmen ihrer Wasserstoffstrategien die Rolle von E-Fuels als wichtig bewerten. Länder wie Deutschland und Niederlande gehen sogar einen Schritt weiter und quantifizieren ihre Ziele. Deutschland will den Anteil der E-Fuels im nationalen Flugkraftstoffmix um zwei Prozent bis zum Jahr 2030 erhöhen. Die Niederlande möchten die Beimischung von E-Kerosin für Flugzeuge um 14 Prozent bis zum Jahr 2030 erhöhen und bis 2050 100 Prozent erreichen.

Exkurs: Direct Air Capture

DAC ist ein chemischer und technischer Prozess, welcher es ermöglicht, CO₂ direkt aus der Umgebungsluft abzuscheiden. Kohlenstoffdioxid wird entweder durch feste Sorptionsmittel oder flüssige Lösungsmittel gebunden.³²⁵ Frühere Emissionen können dadurch entfernt werden, was dabei hilft, die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf ein sicheres Niveau zu bringen. Dazu werden allerdings sehr große Anlagen und sehr große Mengen an erneuerbarer Energie benötigt, um Kohlenstoffdioxid in Konzentrationen von 0,04 Prozent aus der Luft zu separieren. Wirtschaftssektoren wie die

321 C3-Mobility o.J.

322 Reuters 2022a.

323 Behörde für Wirtschaft und Innovation Hamburg 2022.

324 Europäische Kommission 2023.

325 McQueen et al. 2021.

Schifffahrt, die Stahl- und Zementindustrie und der Langstreckentransport mit weiterhin unvermeidbaren, dezentralen Emissionen könnten durch DAC indirekt defossiliert werden. Die gespeicherten CO₂-Ströme hohen Reinheitsgrads können anschließend für die Produktion unterschiedlicher Produkte wie Chemikalien und E-Fuels genutzt werden. Wenn das entfernte Kohlenstoffdioxid langfristig gebunden oder gespeichert wird, zählt DAC zu den „negative emissions technologies“ (NETs), auf die einige Länder setzen, um nach dem voraussichtlichen Verfehlen des 1,5-Grad-Celsius-Ziels nachträglich durch den Entzug von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre die globale Erwärmung noch zu mindern.^{326, 327}

8. Einordnung/Zusammenfassung

Der Ukraine-Krieg hat die Frage der Energiesouveränität stark in den Vordergrund gebracht. E-Fuels können dazu beitragen, nicht nur die Klimaziele zu erreichen, sondern auch die Energiesicherheit für Deutschland und generell Europa zu gewährleisten. Die derzeit steigenden Preise der fossilen Energieträger machen die Investitionen in E-Fuels-Anlagen attraktiver als bisher. Dies zeigt sich in der zunehmenden Anzahl von Projekten und Konsortien, die in E-Fuels investieren.³²⁸

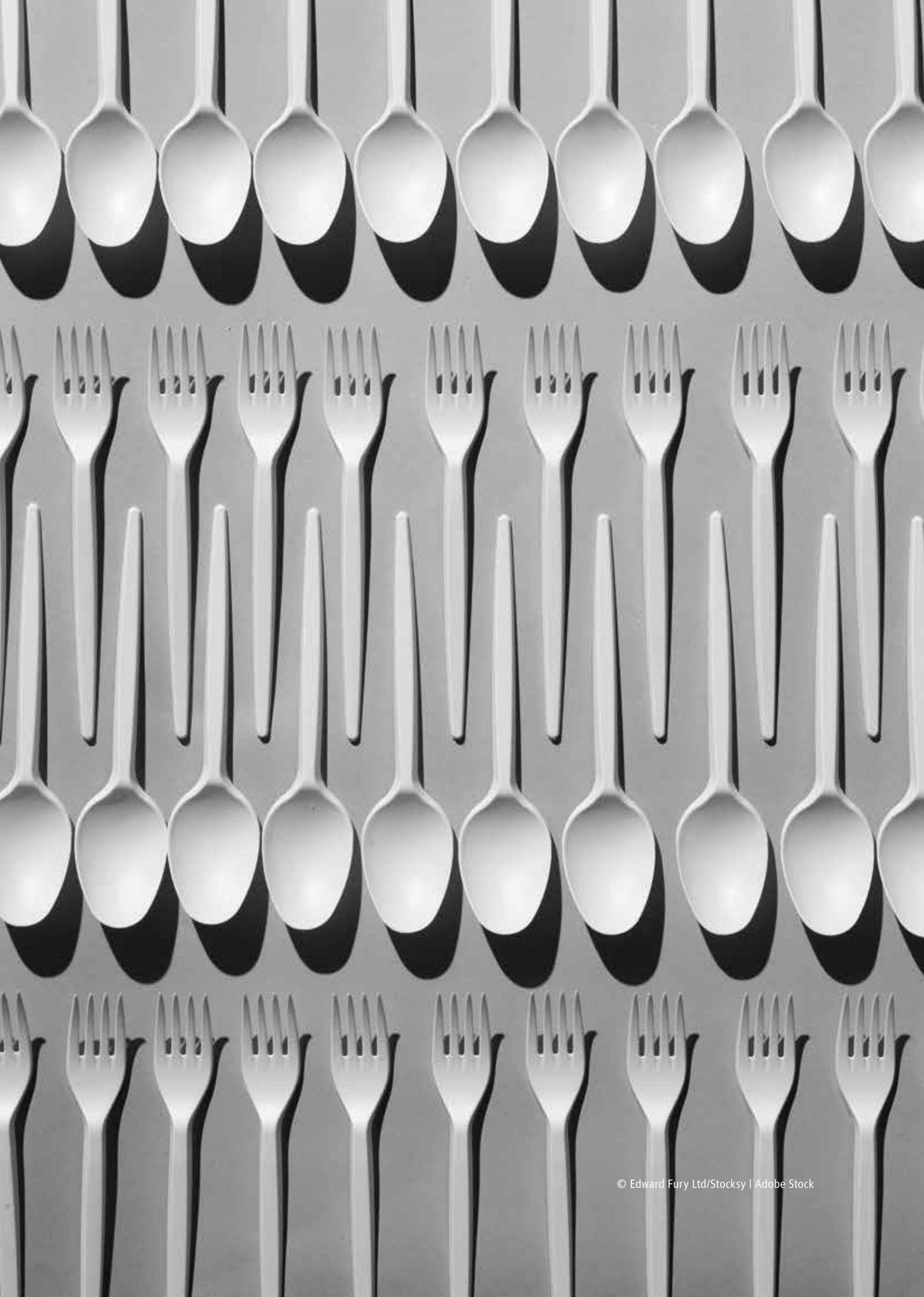
Einen Rückschlag bedeutet allerdings, dass sich das Europäische Parlament gegen Verbrennungsmotoren für Pkw und Kleintransporter entschieden hat, auch wenn dieses Verbot auf Wirken der Bundesregierung wieder abgeschwächt wurde. Als Folge werden sich Forschung und Markt im Bereich E-Fuels vor allem auf Sektoren des Schwerlasttransports sowie der Flug- und Seefahrt konzentrieren.

Die großtechnische Erzeugung von E-Fuels erfordert sehr große Investitionen, die tendenziell eher von Großunternehmen oder Konsortien gestemmt werden können. Allerdings bietet diese „emerging technology“ gerade Familienunternehmen ein hohes Marktpotenzial, weil sie notwendige technische Innovationen – wie zum Beispiel DAC – auch unter der hohen Dynamik der Regulatorik und des Marktes dank ihrer oftmals guten Anpassungsfähigkeit flexibel entwickeln und umsetzen können. Auch die E-Fuels-Lieferketten bieten den Familienunternehmen gute Marktchancen.

326 Custelcean 2021.

327 The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2023.

328 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2016.

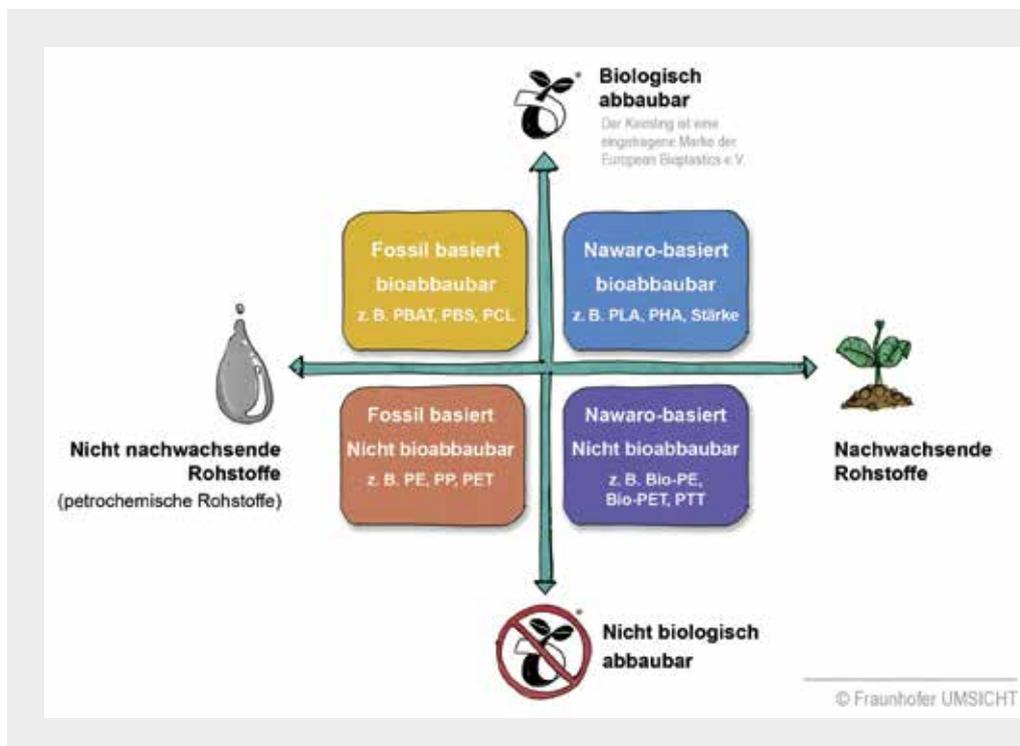


VIII. Biokunststoffe

1. Definition und Wirkungsprinzip

„Biokunststoffe“ umfassen Materialien, die entweder biologisch abbaubar, biobasiert oder beides sind. European Bioplastics (EUBP) sowie das Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IfBB) erklären: „Es handelt sich um einen Biokunststoff, sobald ein Kunststoff zum Teil oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen besteht (biogener/biobasierter Kunststoff), aber auch, [...] wenn eine biologische Abbaubarkeit (biologisch abbaubarer Kunststoff) gegeben ist.“^{329, 330} Man darf also nicht davon ausgehen, dass Biokunststoffe grundsätzlich auch biologisch abbaubar sind (siehe Abbildung 14).

Abbildung 14: Kunststofftypen



Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, sollten die Eigenschaften des jeweiligen Kunststoffmaterials – biobasiert und/oder bioabbaubar – genau angegeben werden. Für biobasierte Kunststoffe dienen meist stärke- oder zuckerreiche Pflanzen (z. B. Mais oder Zuckerrohr) als Rohstoffe, in sehr seltenen Fällen auch tierische Produkte. Die DIN EN 17228 legt die Merkmale von biobasierten Kunststoffen fest. So muss der biobasierte Kohlenstoffanteil bei mindestens 20 Prozent liegen.³³¹ Biologisch abbaubare Kunststoffe basieren meist auf thermoplastischer

329 European Bioplastics (o.J.).

330 Institute for Bioplastics and Biocomposites (IfBB) 2017.

331 Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) 2022b.

Stärke, Cellulose, Polylactid oder abbaubaren Polyestern, die zum Teil auch aus Erdöl hergestellt werden. Das Abbauverhalten kann nur in praktischen Versuchen überprüft und festgestellt werden.³³² Dennoch wird laut Aussage des UBA bei der Herstellung und Entsorgung von Kunststoff aus Pflanzen weniger CO₂ freigesetzt als bei herkömmlichem Plastik auf Erdölbasis.³³³

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Biokunststoffe sind Teil des Aktionsplans der Kreislaufwirtschaft für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, mit dem die Abfallvermeidung und das Kreislaufprinzip für eine schadstofffreie Umwelt gefördert werden sollen. Dieser Aktionsplan unterstreicht die Notwendigkeit, erdölbasierte Kunststoffe zu ersetzen, nicht zuletzt, um den Ressourcenverbrauch und damit auch den CO₂-Fußabdruck zu verringern und die Kreislaufwirtschaft zu stärken.³³⁴ Biokunststoffe leisten durch den Ersatz von fossilen Kunststoffen direkt einen Beitrag zu SDG 12 „Nachhaltige Konsum- und Produktionsweisen“ und SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“.

Der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) warnt jedoch davor, Biokunststoffe als einfache Lösung für die Plastikkrise zu betrachten. Ein kompletter Ersatz der momentan genutzten Mengen an (Einweg-) Kunststoffen auf fossiler Basis durch „Bio“-Kunststoffe sei zurzeit nicht möglich. Dringend notwendig sei vor allem eine Verbrauchssenkung³³⁵, auch, weil die Rohstoffe für „Bio“-Kunststoffe überwiegend aus der industriellen Landwirtschaft kämen. Um sie anzubauen, werden viel Wasser, Dünger und Pestizide verwendet. Darüber hinaus werden für biobasierte Kunststoffe Landflächen belegt, die ansonsten für die Nahrungsmittelproduktion nutzbar wären.³³⁶

3. Märkte und Arbeitsplätze

Die Kunststoffindustrie, bestehend aus der Kunststoffherzeugung, -verarbeitung und dem Kunststoffmaschinenbau, ist eine Schlüsselindustrie in Deutschland. Sie liefert innovative Produkte und Lösungen für wichtige Industriezweige wie die Verpackungsindustrie, die rund 34 Prozent des Produktionsvolumens verarbeitet, das Baugewerbe (22 Prozent), die Automobilproduktion (12 Prozent), die Elektroindustrie (7 Prozent) sowie Maschinenbau, Landwirtschaft, Chemieindustrie und andere (insgesamt 25 Prozent). Rund 407.000 Menschen in Deutschland waren im Jahr 2020 in etwa 3.500 Unternehmen beschäftigt; das Umsatzvolumen betrug rund 92 Milliarden Euro. Von diesen sind 322.000 in der Kunststoffverarbeitung, 53.000 in der Kunststoffherzeugung und 32.000 im Bereich Kernmaschinenbau (Kunststoff- und

332 Umweltbundesamt (UBA) 2020a.

333 Voss 2022.

334 Europäische Kommission 2020c.

335 Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) 2022a.

336 Voss 2022.

Gummimaschinen) tätig.³³⁷ Der Biokunststoffmarkt hatte im Jahr 2020 nur einen Anteil von rund einem Prozent am Gesamtkunststoffmarkt.³³⁸

Der Kunststoffmarkt wird aktuell von global tätigen Unternehmen dominiert. Frost & Sullivan führen in einer Studie internationale Namen wie Arkema SA, BASF, Braskem SA, TotalEnergies Corbion, DSM, DuPont Corp., NatureWorks LLC und Novamont GmbH als die acht größten Vertreter an. Diese globalen Player verfügen über eigene Forschungs- und Entwicklungsabteilungen für Biokunststoffe und weisen daher ein hohes Innovationspotenzial auf. Frost & Sullivan sehen für 2024 einen Umsatz von 20,48 Milliarden Dollar für den weltweiten Biokunststoffmarkt.³³⁹

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 19 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Biokunststoff*“ zu finden (Stand: 3.11.2022):

- 0 AGs
- 18 GmbHs
- 0 vollhaftende Personengesellschaften
- 1 teilhaftende Personengesellschaften
- 0 Einzelunternehmen

Seit 2020 hat sich der Markt nur wenig verändert. Nach wie vor ist der Beitrag von deutschen Familienunternehmen im Bereich Biokunststoffe ausbaufähig. Von den 19 Unternehmen befasst sich ein Großteil ausschließlich mit Vertrieb oder Handel und nicht mit Entwicklung und/oder Produktion. Allerdings werden gerade bei dem Schlagwort „Biokunststoffe*“ nicht alle Unternehmen in der Firmendatenbank gefunden, da sich die betreffenden Firmen oftmals anderen Branchen zuordnen und Biokunststoffe nur als Einsatzstoffe verstehen. Das gilt auch für das Familienunternehmen Jowat SE.

Das Familienunternehmen Jowat SE stellt zusätzlich zu seinem normalen Portfolio an Industrieklebstoffen auch sogenannte Green Adhesives her und wurde mit dem „Best Managed Companies Award 2022“ ausgezeichnet.

337 PlasticsEurope Deutschland e.V. 2021.

338 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2020.

339 Frost & Sullivan 2019.

5. Interview

Jowat SE, Dr. Hartmut Henneken (Leiter Forschungsdienste):

Als die Firma 1919 gegründet wurde, war die Klebstofftechnologie bei Jowat noch grundlegend biobasiert. Das änderte sich dann im Laufe der Zeit mit der weitergehenden Entwicklung der Synthesechemie, für zum Beispiel die PVAc-basierten „Weißleime“. Jetzt erfolge gemäß Herr Dr. Henneken wieder eine Wende hin zu biobasierten Klebstoffen, die nicht zuletzt auch durch eine Bewusstseinsänderung in der Gesellschaft möglich wäre: In den letzten 10 bis 15 Jahren gäbe es bereits kontinuierlich zunehmende Entwicklungen im Bereich „Nachwachsende Rohstoffe“, aber erst jetzt lassen sich diese Ergebnisse auch tatsächlich größerflächig vermarkten, obwohl diese Produkte noch teurer als die auf fossilen Rohstoffen basierenden wären.

Das Familienunternehmen Jowat, das 2022 das Gütesiegel „Best Managed Company“ zum dritten Mal in Folge erhielt, hat für 2020 erstmalig auch einen Nachhaltigkeitsbericht mit klar definierten Nachhaltigkeitszielen veröffentlicht. So sei zum Beispiel das Ziel, das Absatzvolumen der Green Adhesives bis 2025 zu verdoppeln, durchaus realistisch. Ebenfalls bis 2025 sollten 80 Prozent der Neuentwicklungen definierte Nachhaltigkeitskriterien erfüllen. Solche Anforderungen gehörten mittlerweile zur grundlegenden Firmenstrategie. In diesem Bereich hänge neben der Abnahmebereitschaft der Kunden auch vieles an der Verfügbarkeit der Biorohstoffe. Teils vollständig neu entwickelte Alternativen, die manchmal grundlegend andere Klebstoffrezepturen erforderten und ermöglichten, ständen im Wettbewerb mit etablierten fossilen Rohstoffen, deren Preise und Qualität durch Skaleneffekte und jahrzehntelange Prozessoptimierungen bestimmt wären. Hier helfe die kürzlich erfolgte Einführung der Massenbilanzertifizierung: Ein Rohstoffhersteller ersetzt ganz zu Beginn des Prozesses Teile des fossilen Feedstocks (Einsatzmaterials) durch Bionaphta oder Recyclatmaterial und kann (zertifiziert) diese Biomaterialien zu 100 Prozent bestimmten Kundenchargen zuordnen – unabhängig davon, in welcher Produktionscharge das nachhaltige Material tatsächlich verwendet wurde. Dadurch blieben die Produkte identisch und die Herstellkosten werden nur durch die Kosten der Zertifizierung (und gegebenenfalls Preisunterschiede beim Feedstock) beeinflusst. Dieses Verfahren könne ein Gamechanger bei der Transformation der chemischen Industrie werden. Jowat verwendet bereits erste auf diese Weise massenbilanzierte Rohstoffe in der eigenen Produktion.

Jowat ist hervorragend in der Forschungslandschaft vernetzt und arbeitet nach eigenen Angaben mit unzähligen Anwendern, Maschinenherstellern, Rohstofflieferanten, Instituten und Universitäten an der Weiterentwicklung der Klebtechnologie. Durch das große Forschungsengagement könne Jowat auch von staatlicher Förderung der Forschung und Entwicklung profitieren und so auch höher risikobehaftete und grundlagenorientiertere Forschungsvorhaben durchführen. Als Nebeneffekt sei Jowat damit auch im relevanten wissenschaftlichen

Nachwuchsbereich gut bekannt und könne seinen Bedarf an hochqualifizierten Mitarbeitenden im Bereich Forschung und Entwicklung allein durch Initiativbewerbungen decken, was in Zeiten zunehmenden Fachkräftemangels bedeutsam sei – zumal die Firma nicht in Metropolregionen, sondern im ländlichen Umfeld beheimatet sei. Die Tatsache, dass die Mitarbeitenden sich stark mit ihrem Arbeitgeber identifizieren, sei ein großer Vorteil für das Familienunternehmen und auch mit ein Grund für die starke Verankerung in der Region. Trotz stetigen dynamischen Wachstums auf mittlerweile weit über 1.200 Mitarbeitende würden schlanke Strukturen bewahrt. Ein hohes Maß an Flexibilität biete die Möglichkeit, auch im kleineren Rahmen auf Kundenwünsche einzugehen.

Ganz allgemein handelt es sich bei Klebstoffen um einen Werkstoff, der im Gesamtprodukt in der Regel einen mengenmäßig nur sehr geringen Anteil habe, aber dort eine sehr wichtige Aufgabe übernehme (z. B. in der Automobil-, der Bau- und der Möbelbranche). Jowat beschreibt daher die Klebstofftechnologie gern als „enabling technology“, da durch die Klebtechnik bestimmte Produkteigenschaften sowie nachhaltigere Prozesse oder Anwendungen ermöglicht würden. Hindernisse sieht Herr Henneken bei bestimmten Anforderungen zum Beispiel im Bereich der Begriffe „Kompostierbarkeit“ und „Rezyklierbarkeit“, die für die grünen Klebstoffe nicht wirklich anwendbar seien. Deren genaue Definition und Bedeutung sei häufig nicht klar und die Sinnhaftigkeit für konkrete Klebstoffentwicklungen sei diskutabel. Technisch gute Lösungen würden sich langfristig auch durchsetzen, aber unnötige Standards verlängerten die Entwicklungszeit von Produkten. Die Einhaltung geltender Regeln sei unumgebar, aber es sei notwendig, sich rechtzeitig mit Regulierungsstellen auseinanderzusetzen und Argumente auszutauschen, bevor es zu Auflagen käme. Zum Beispiel könne sich eine Regulierung über CO₂-Preise als positiv und hilfreich erweisen, um nachhaltigere Produkte in den Markt einzuführen. Allerdings müsse man die globale Situation im Blick haben: Es wäre auch im Sinne der Ziele einer solchen Bepreisung nichts gewonnen, wenn dadurch ein verbesserungswürdiges Verfahren in Deutschland durch ein noch schlechteres Verfahren woanders ersetzt würde.

Die Digitalisierung inklusive der Möglichkeit, KI-Anwendungen zu entwickeln und zu nutzen, biete viele Optionen. Neben mehr Automatisierung von Produktionsprozessen, einem besseren Informationsfluss, der viele Prozesse beschleunigt, würden vereinfachte Marketingprozesse und die zunehmende Möglichkeit digitaler Kommunikation zur Ergänzung aufwendiger Reisen als durchweg positiv bewertet.

Zitat: „Regeln, die den freien Wettbewerb nicht behindern und für alle gleich gelten, können helfen, nachhaltigere Produkte am Markt zu etablieren.“

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Der Kunststoffmarkt ist zurzeit noch deutlich durch erdölbasierte Produkte bestimmt und der Marktanteil der biobasierten Polymere bleibt konstant bei rund einem Prozent.³⁴⁰ Laut einer Studie des nova-Instituts existiert für jede Kunststoffanwendung mittlerweile eine biobasierte Alternative.³⁴¹ Allerdings müssten Biokunststoffe in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt werden und preislich konkurrenzfähig zu ihren fossilen Pendanten sein. Andernfalls müssten sie einen Mehrwert bieten, der den Preisunterschied rechtfertigt.³⁴²

Biokunststoffe stehen in dem Ruf, dass ihre Ausgangsprodukte (nachwachsende Rohstoffe) in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Albrecht et al.³⁴³ halten diesem Vorwurf Folgendes entgegen: Im Jahr 2014 wurden 0,001 Prozent der globalen Landfläche für Biokunststoffe genutzt. Im Jahr 2021 waren es laut der FNR 0,015 Prozent. Sie geht davon aus, dass der Flächenanteil bis 2025 auf 0,02 Prozent steigen wird.³⁴⁴ EUBP geht von 0,013 Prozent im Jahr 2021 aus und einer Steigerung auf 0,058 Prozent im Jahr 2026 – was aber nach wie vor eine deutlich kleinere Fläche ist als die beispielsweise für Biokraftstoffe benötigte.

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Fachleute des Branchenverbands EUBP sehen große Chancen für Biokunststoffe, nicht zuletzt, da diese ihrer Ansicht nach mehr und mehr von Verbraucher*innen gewünscht würden. Gleichzeitig wird das Wachstum auch durch besonders innovative Biopolymere angetrieben. Dazu zählen zum Beispiel Polyhydroxyalkanoate (PHAs), bakteriell hergestellte Polyester, die über hervorragende physikalische und mechanische Eigenschaften verfügen und zudem biobasiert sowie biologisch abbaubar sind. Rund 44 Prozent der weltweiten Produktionskapazitäten für Biokunststoffe entfallen zurzeit auf Polyethylen (PE) und Polyethylenterephthalat (PET), die biobasiert, aber nicht biologisch abbaubar sind. Während bei PE ein weiteres Wachstum erwartet wird, bleiben die Produktionskapazitäten bei PET hinter früheren Prognosen zurück. Der Trend geht stattdessen in Richtung eines neuen Polymers, dem Polyethylenfuranoat (PEF), das dem PET ähnlich, aber vollständig biobasiert ist. Das Material befindet sich noch in der Entwicklung und wird voraussichtlich erst im Jahr 2023 auf den Markt kommen.^{345, 346} Für Biokunststoffe spricht, dass zum Beispiel Bio-Polyethylen oder auch Bio-Polyacryl den gleichen chemischen Aufbau und auch die gleichen Materialeigenschaften wie ihre erdölbasierten Pendanten aufweisen und mit den gleichen Verfahren hergestellt und ebenso recycelt werden

Die Forschung arbeitet an der Entwicklung biobasierter und/oder gleichzeitig bioabbaubarer Kunststoffe.

340 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2020.

341 Bioökonomie.de 2019a.

342 Ceresana eK 2020.

343 Albrecht et al. 2016, S. 58.

344 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) o. J. a.

345 Bioökonomie.de 2019b.

346 European Bioplastics 2021.

können – und dies auf Basis nachwachsender Rohstoffe.³⁴⁷ Laut der FNR liegt der Anteil der Strukturpolymere im Bereich der biobasierten Polymere bei circa einem Prozent. Es wird von einer Steigerung der Produktionskapazitäten bis 2024 auf mehr als 2,4 Millionen Tonnen (ohne Cellulose-Acetate und Polyurethane) ausgegangen.³⁴⁸

8. Zusammenfassung

Da die Forschung im Bereich Biokunststoffe stetig weiter vorangetrieben wird, sehen die wirtschaftlichen Analysten gute Vorzeichen für die Zukunft dieser Branche. Allerdings müssen die Verbrauchenden gut informiert werden, damit Akzeptanz erzeugt und das richtige Verhalten – zum Beispiel in Bezug auf die Entsorgung – möglich wird.³⁴⁹ Biokunststoffe werden die fossilen Kunststoffe voraussichtlich nicht ersetzen. Das größte Anwendungsgebiet für Biokunststoffe ist aufgrund deren Eigenschaften bislang die Verpackungsbranche. Laut EUBP werden 43 Prozent aller biobasierten und sogar 50 Prozent aller bioabbaubaren Biokunststoffe in diesem Bereich eingesetzt.³⁵⁰ Weitere Branchen, die Biokunststoffe nutzen, sind Agrarwirtschaft, Konsumgüter, Textilindustrie (Fasern), aber auch vermehrt Automobilindustrie und Transportwesen.³⁵¹

347 Mundzeck 2022.

348 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) o. J.

349 Maier 2018.

350 European Bioplastics 2021.

351 Bioökonomie.de 2019b.



IX. Recycling

1. Definition

Recycling beschreibt stoffliche Verwertungsverfahren.³⁵² Das Kreislaufwirtschaftsgesetz schreibt eine Abfallhierarchie vor, die aus fünf Stufen besteht: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung (insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung) sowie Beseitigung.³⁵³

Das werkstoffliche Recycling von Metallen, Kunststoffen, Glas, Papier und Textilien bedeutet, dass der Abfall nach Aufbereitung und Verarbeitung als Wertstoff für ein neues Produkt genutzt wird (bspw. für Recyclingpapier oder Glas). Die chemische Struktur des Stoffs bleibt erhalten.³⁵⁴

Können die Abfallstoffe auf diese Weise nicht weiterverwendet werden, ist die rohstoffliche Verwertung eine weitere Option. Hierbei wird der Abfall in seine chemischen Bestandteile zerlegt, welche wieder als Rohstoffersatz genutzt werden. Für Kunststoffe soll das chemische Recycling die Erschließung neuer, bislang noch nicht werkstofflich verwertbarer Abfälle ermöglichen (siehe Exkurs).³⁵⁵

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Die nachhaltige und effiziente Nutzung von Ressourcen und das Vermeiden und Recyceln von Abfällen trägt insbesondere zu der Erreichung des SDG 12 „Nachhaltige Konsum- und Produktionsweisen“ bei. Wichtige Punkte in diesem Kontext sind die nachhaltige Beschaffung, eine gute Information über nachhaltige Produkte und die Reduktion von Lebensmittelverschwendung.³⁵⁶ Weiterhin reduziert das Recycling den Bedarf an natürlichen Ressourcen und trägt zu den umweltschutzbezogenen SDG (12, 13, 14, 15) bei.³⁵⁷

Der Beitrag und die Potenziale einer Kreislaufwirtschaft zum Ressourcenschutz werden am Beispiel des Aufkommens und der Verwertung von Kunststoffmengen in Deutschland deutlich. Laut der Conversio-Studie wurden im Jahr 2021 12,36 Millionen Tonnen Kunststoffe verbraucht. Zum Teil gelangen diese in langlebige Produkte (wie in den Bau- oder Automobilbereich) und fallen erst später als Abfälle an. Von den gesammelten Kunststoffabfällen von 5,67 Millionen Tonnen werden 2,64 der stofflichen Verwertung zugeführt. Die restlichen

352 Martens und Goldmann 2016.

353 Umweltbundesamt (UBA) 2022a.

354 Martens und Goldmann 2016.

355 Umweltbundesamt (UBA) 2020b.

356 Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) 2022.

357 United Nations Environment Programm UNEP 2019, S. 8 f.

3,03 Millionen Tonnen werden zum größten Teil energetisch verwertet.³⁵⁸ Hier bestehen noch Potenziale zum Ausbau der stofflichen Verwertung.

Die EU hat als Baustein des europäischen Green Deals zwei Aktionspläne (2015 und 2020³⁵⁹) für die Kreislaufwirtschaft verfasst.³⁶⁰ Ziel ist es, durch neue kreislaforientierte Geschäftsmodelle in allen Bereichen des Produktlebenszyklus den Ressourcenverbrauch innerhalb der Europäischen Union zu verringern und die Rate der Verwendung von Sekundärmaterialien zu erhöhen.³⁶¹ Damit die Ziele bis zum Jahr 2050 auch umgesetzt werden, wurde vom Europäischen Parlament im Februar 2021 eine Entschließung angenommen, welche schärfere Recycling- und Reduktionsziele von Materialien bis 2030 fordert.³⁶²

Die Verabschiedung der Taxonomie-Verordnung durch die Europäische Kommission soll nachhaltige Wirtschaftstätigkeiten innerhalb der europäischen Union durch klare Regeln und Rahmenbedingungen fördern. Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ist eines von sechs Umweltzielen in der Taxonomie-Verordnung.³⁶³

3. Märkte und Arbeitsplätze

Im „Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020“ wird berichtet, dass die Branche der Kreislaufwirtschaft im Jahr 2017 in Deutschland insgesamt einen Umsatz von 84 Milliarden Euro erzielte. Die Branche beschäftigte im Jahr 2019 circa 310.000 Erwerbstätige.³⁶⁴

Die Ellen MacArthur Foundation stellte fest, dass für jede zehntausendste Tonne, die recycelt wird, 36 Arbeitsplätze geschaffen werden können.³⁶⁵ Für den Kreislaufwirtschaftsaktionsplan untersuchte die Europäische Kommission in einer Studie, welche Auswirkungen die dort geplanten Maßnahmen der Europäischen Union auf dem europäischen Arbeitsmarkt haben. Bis zum Jahr 2030 werden demnach netto vermutlich circa 700.000 neue Arbeitsplätze entstehen.^{366, 367}

358 Lindner et al. 2022.

359 Europäische Kommission 2020a.

360 Europäische Kommission 2020d.

361 Umweltbundesamt (UBA) 2020d.

362 Europäisches Parlament 2021.

363 Envoria o. J.

364 ASA Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung e.V. et al. 2020, S. 81.

365 Ellen MacArthur Foundation 2021.

366 Der Begriff „netto“ wird verwendet, um darauf hinzuweisen, dass nicht nur Arbeitsplatzgewinne, sondern auch Arbeitsplatzverluste, z. B. durch neue Geschäftsmodelle, berücksichtigt wurden.

367 Europäische Kommission 2018, S. 39.

Die OECD geht in ihrem Working Paper von einem weltweiten Netto-Job-Potenzial von 1,8 Millionen Stellen bis zum Jahr 2040 im Vergleich zum Jahr 2018 aus.³⁶⁸

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 5.211 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Recycling*“ zu finden (Stand: 3.11.2022), die einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten:

- 64 AGs
- 3.992 GmbHs
- 68 vollhaftende Personengesellschaften
- 896 teilhaftende Personengesellschaften
- 191 Einzelunternehmen

Ein Beispiel für die Unterstützung von Recycling ist die Druckerei Lokay e. K.: Das Familienunternehmen gilt als eine der ersten klimaneutralen Druckereien in Deutschland und wurde 2022 mit dem deutschen Nachhaltigkeitspreis ausgezeichnet. Die gefährlichen Abfallmengen im Unternehmen wurden von 2017 bis 2021 um 80 Prozent verringert. Durch eine umfassende Beratung der Kund*innen liegt die Einsatzquote von Recyclingpapier bereits bei 54 Prozent.³⁶⁹

Die folgende Karte zeigt eine deutschlandweite Verteilung von Familienunternehmen in der Recyclingbranche.

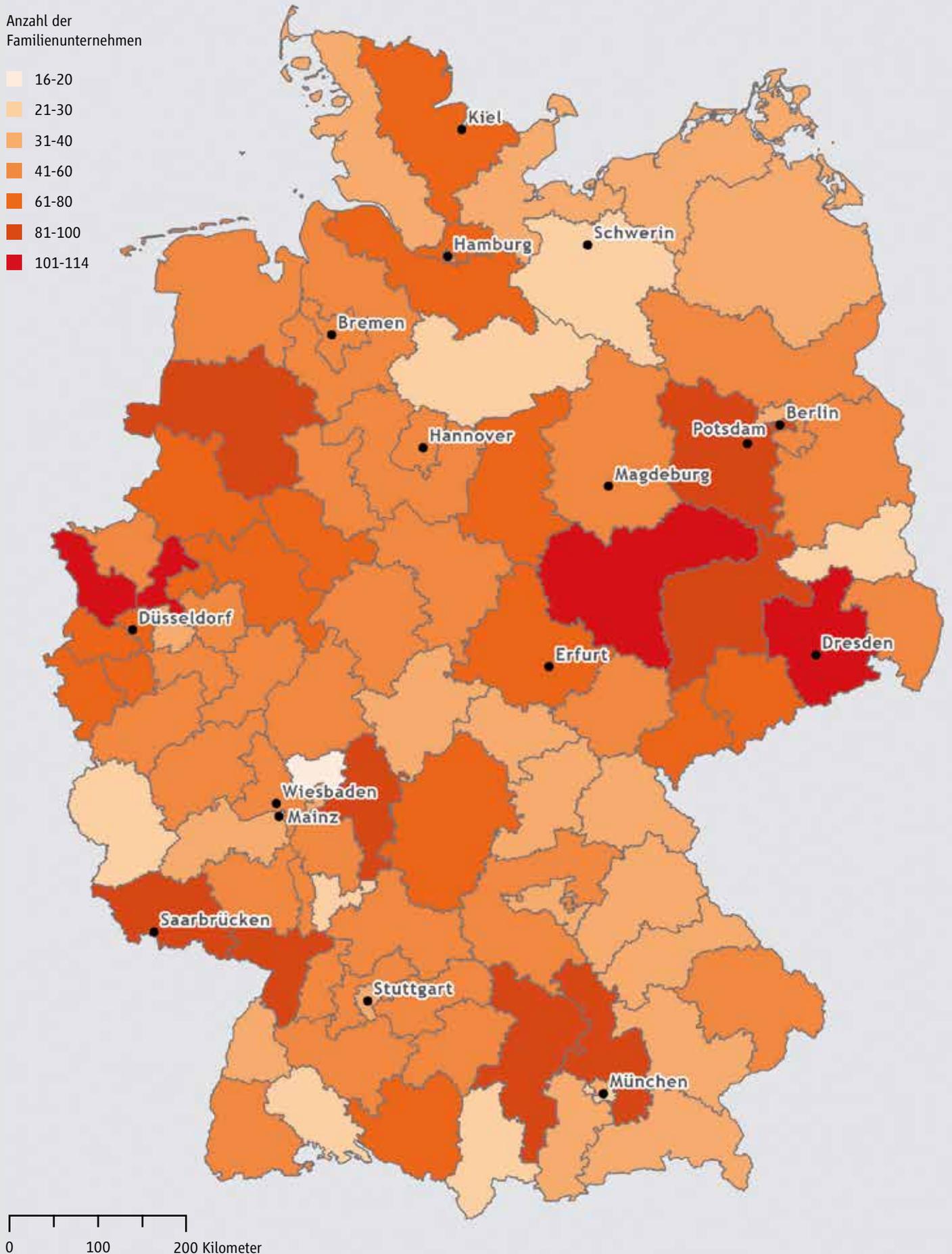
368 OECD 2020.

369 Deutscher Nachhaltigkeitspreis 2022.

Abbildung 15: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Recyclingbranche (nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 16-20
- 21-30
- 31-40
- 41-60
- 61-80
- 81-100
- 101-114



Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Remondis SE & Co. KG, Herwart Wilms (Geschäftsführer):

Remondis SE & Co. KG ist das größte deutsche Unternehmen für Recycling, Wasserwirtschaft sowie kommunale und industrielle Dienstleistungen mit Sitz in Lünen/NRW mit über 700 Standorten in Deutschland. Gesellschafter ist die in Familienbesitz befindliche Rethmann-Gruppe.

In der Kreislaufwirtschaft wurde über Jahrzehnte Wissen aufgebaut, sodass heute verschiedene Technologien im Einsatz seien. Innovationen gab und gebe es unter anderem bei der Gestaltung der Abfalltonnen, bei Identifizierungssystemen für Tonnen und Abfälle sowie bei umweltfreundlichen Antriebstechnologien für Müllfahrzeuge oder bei speziellen Verfahren zum Trennen einzelner Chargen.

Die Sammlung und Aufbereitung der meist sehr heterogenen Materialien stelle eine große Herausforderung dar. Ziel sei dabei, Ressourcenkreisläufe möglichst hochwertig zu schließen und das in größtmöglichem Umfang. Dafür sei es erforderlich, dass die entsprechenden Gebietskörperschaften und Behörden existierende Vorgaben des Gesetzgebers durchsetzen, wie zum Beispiel die flächendeckende Umsetzung der Biotonne (Vorschrift seit 2015). Das würde dazu führen, dass Bioabfälle nicht mehr verbrannt, sondern zur Gewinnung von Biogas und Nährstoffen genutzt werden könnten.

Kreislaufwirtschaft könne nur mit kreislauffähigen Produkten funktionieren. Daher sollte bereits bei der Produktgestaltung angesetzt werden im Sinne des „Designs for Recycling“. Es wäre wichtig, Rahmenbedingungen einzuführen, die Belohnungen für entsprechende Produkte vorsehen. Herr Wilms fordert: „Was der Mensch verbindet, das soll er auch wieder trennen können!“ Ein Hindernis sei häufig der Datenschutz, der verhindere, dass Klarheit über die Zusammensetzung und den Aufbau von Produkten vorliegt.

Datenschutz grundsätzlich sei als sehr wichtig zu erachten – es müsse aber geprüft werden, wo Lockerungen im Sinne der Nachhaltigkeit möglich oder gar notwendig seien. Hiermit könne auch die Basis für Labels gelegt werden, die Kund*innen helfen, Informationen über Recyclinganteile und Reparaturfähigkeit von Produkten zu erhalten.

Auf die Frage, wo Unterschiede zwischen Familienunternehmen und zum Beispiel börsennotierten Unternehmen bestehen, antwortet Herr Wilms, dass Familienunternehmen häufig die Möglichkeiten nutzen, Geld anzusparen beziehungsweise in das Unternehmen zu reinvestieren. So seien größere und sich längerfristig rechnende Investitionen realisierbar, die gleichzeitig Fortschritt und Kontinuität garantierten. Auch könne ein Familienunternehmen seine soziale

*Produkte
kreislauffähig
gestalten*

Verantwortung gegenüber den Beschäftigten besser wahrnehmen als börsennotierte Unternehmen, die unter kurzfristigem Renditedruck ständen.

Die Digitalisierung spielt in der Branche bereits eine sehr große Rolle, sei aber dennoch ausbaufähig. So würden mit dem bevorstehenden Renteneintritt der Babyboomer viele Arbeitnehmende ausscheiden: Die Digitalisierung könne hier helfen, Arbeitsschritte so zu verbessern beziehungsweise unnötig zu machen, dass dadurch frei werdende Beschäftigte in anderen Bereichen eingesetzt werden könnten und so der Fachkräftemangel zumindest in Teilen kompensiert werden könne.

Auch die Blockchain-Technologie könne einen großen Schritt in Richtung Transparenz ermöglichen: Durch Lieferengpässe oder Rohstoffknappheit könne es zum Beispiel für Hersteller von Elektrogeräten interessant sein, ihre Geräte, Bauteile oder verbauten Rohstoffe nach dem Recycling der Geräte wieder zurückzubekommen. Zur Identifikation und zum Informationsmanagement seien einfach zu nutzende Standards nötig, in deren Entwicklung die Recyclingunternehmen eingebunden werden sollten.

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Um eine hochwertige Kreislaufführung von Produkten und Materialien zu erreichen, müssen neben technologischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten auch Herausforderungen bei der Bereitstellung von Informationen gelöst werden.³⁷⁰ Eine wichtige Initiative zur Unterstützung der Kreislaufwirtschaft durch die Europäische Kommission ist die Sustainable Product Initiative (SPI), die unter anderem Anforderungen für Haltbarkeit, Reparaturfähigkeit und Anteil an Recyclingmaterial vorsieht. Gleichzeitig werden durch die EU wichtige Voraussetzungen für Produktlabels und für den digitalen Produktpass geschaffen³⁷¹ (siehe Exkurs Produktpass in Kapitel D.XV).

Durch ein recyclingfreundliches Design, eine entsprechende Sortier- und Verwertungsinfrastruktur sowie eine optimale Trennbarkeit und recyclingverträgliche Komponenten können höhere Recyclingquoten erreicht werden.³⁷² Dies muss auch für neue Produkte wie Elektro-batterien mit Lithium gelten.

370 Fraunhofer-Institut UMSICHT 2017, S. 115 f.

371 Europäische Kommission 2022b.

372 Schonlau 2020.

Exkurs: Lithium-Recycling (siehe auch Kapitel D.V zu Batterien)

Durch die Reduktion der Anzahl von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zugunsten von Elektrofahrzeugen gewinnen Lithium-Ionen-Batterien an Relevanz. Sie werden zudem auch vermehrt für stationäre Energiespeicher und im Elektronikbereich verwendet. Dies geht jedoch mit einem Verbrauch von endlichen Ressourcen einher. Längere Nutzungsphasen durch langlebige Produkte oder Nutzung in anderen Anwendungen (z. B. einer Autobatterie als stationärem Stromspeicher im Haus) sind wichtig, um die Produkte optimal zu nutzen. Am Ende der Lebenszeit müssen Recyclingverfahren dazu beitragen, die in den Produkten enthaltenen Materialien für einen neuen Lebenszyklus zurückzugewinnen.³⁷⁴

Eine sicherheitstechnische Herausforderung ist die hohe Energiedichte der Lithium-Ionen-Batterien: Es müssen thermische oder mechanische Beschädigungen am Ende des Lebenszyklus beim Recycling vermieden werden. Bei der Vorbehandlung der Lithium-Ionen-Batterien bestehen zusätzliche Herausforderungen: Aufgrund der unzureichenden Kennzeichnung der einzelnen Subtypen wird die Erkennung und Sortierung erschwert. Da sich die Materialien der Lithium-Ionen-Batterien voneinander unterscheiden, ist die Trennung für das Recycling maßgeblich. Auch die Demontage von Lithium-Ionen-Batterien gestaltet sich als zeitaufwendig und ist nur mit fachlich ausgebildetem Personal umzusetzen. Damit eine Lithium-Ionen-Batterie überhaupt recycelt werden kann, muss eine Entladung erfolgen. Allerdings ist der Aufwand beim Recycling angesichts mangelnder Automatisierung, der Artenvielfalt der Batteriemodule und des Mangels an Fachpersonal noch relativ hoch.³⁷⁵

Erreicht eine Lithium-Ionen-Batterie das Ende ihrer Nutzungsdauer, kann sie demon- tiert, zerkleinert und geschreddert werden. Dadurch entsteht eine körnige Konzen- tration aller in der Batterie gefundenen Metalle, die sogenannte schwarze Masse. Um diese Metalle zu extrahieren, können drei verschiedene Recyclingverfahren an- gewendet werden. Die Hydrometallurgie, bei der wässrige Lösungen für die Rück- gewinnung genutzt werden, die Pyrometallurgie mit einer Rückgewinnung durch den Einsatz von Wärme und das direkte Recycling, bei dem die Mineralien zu- rückgewonnen werden können, ohne sie zu zersetzen oder aufzulösen. Abhängig vom Batterietyp können diese drei Recyclingverfahren auch kombiniert werden.³⁷⁶

373 Nigl et al. 2021.

374 Nigl et al. 2021.

375 Faulkner 2022.

Während verschiedener Recyclingschritte, wie der thermischen Konditionierung oder der mechanischen Aufbereitung, können toxische Stoffe, zum Beispiel fluorhaltiges Benzol und Ester-Elektrolyt, freigesetzt werden. Um Explosionen und Brände zu vermeiden, muss das Recycling von Fachpersonal in entsprechenden Anlagen durchgeführt werden.³⁷⁷

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Eine kreislauffähige Produktgestaltung (Design for Circularity) zur Erhöhung der Produktlebensdauer muss unter anderem auf Monomaterialien, schadstofffreie Materialien, Modularität, Demontage- und Reparaturfreundlichkeit, Updatefähigkeit, Haltbarkeit und Recyclingfreundlichkeit achten. Die nötigen Informationen für Kunden*innen (z. B. Reparaturanleitungen) und Recyclingunternehmen können über Produktpässe, QR-Codes oder Labels zur Verfügung gestellt werden.

Es gibt dennoch Produkte, welche nicht auf Verbundwerkstoffe verzichten können (z. B. Faserverbundwerkstoffe). Um die enthaltenden Rohstoffe am Ende der Projektlebenszeit zu recyceln, werden innovative und effiziente Recyclingverfahren benötigt. Eine Entwicklung dazu ist das chemische Recycling.

Exkurs: Chemisches Recycling

Mechanisches Recycling gerät an seine Grenzen, wenn es sich um vermischte oder verunreinigte Kunststoffabfälle handelt. An dieser Stelle setzt das chemische Recycling an, welches eine Zerlegung von langkettigen organischen Makromolekülen in kurzkettenige organische Moleküle darstellt.

Im Gegensatz zum werkstofflichen Recycling wird beim chemischen Recycling also die Polymerstruktur der Kunststoffe verändert. Dabei werden die Polymerketten in kleinere Moleküle oder Monomere getrennt. Grundsätzlich lässt sich das chemische Recycling in lösemittelbasierte und thermochemische Prozesse unterscheiden. Bezeichnet werden diese als Solvolyse und Pyrolyse.

376 Nigl et al. 2021.

Der Begriff „Solvolyse“ fasst verschiedene Einzelverfahren zusammen, bei denen der zu recycelnde Stoff unter der Hinzugabe von Lösungsmitteln, einem Katalysator und Wärme in neue Rezyklate umgewandelt wird.

Die Pyrolyse wird bei Temperaturen von über 300 Grad Celsius vollzogen. Dadurch entstehen kurzkettige Kohlenwasserstoffe in Form von Öl oder Gasen. Das Pyrolyseöl kann zu neuen Kunststoffen oder chemischen Erzeugnissen weiterverarbeitet werden. Auch anorganische Komponenten können aus den Einsatzstoffen zurückgewonnen werden. Das chemische Recycling ermöglicht eine verbesserte Qualität des Rezyklats, woraus ein breiteres Anwendungsspektrum und höhere Recyclingquoten resultieren. Aufgrund der erhöhten Nachfrage von recycelbaren Kunststoffen gibt es verschiedenste Entwicklungs- sowie Pilot- und kommerzielle Projekte. Aktuell lässt sich die Wirtschaftlichkeit des chemischen Recyclings nicht bewerten.³⁷⁸

Zusätzlich richtet sich der Blick auf Strategien, die den Wert der Produkte möglichst erhalten sollen. Einen guten Überblick liefert Potting mit zehn Kreislaufwirtschaftsstrategien (R-Strategien), die in drei Gruppen unterteilt werden können: (1) Intelligenterer Produktnutzung, -design und -herstellung, (2) Erhalt von Produkten und Komponenten sowie (3) Erhalt von Materialien und Energie.

Zur ersten Gruppe gehören die Strategien Refuse, Rethink/Redesign und Reduce, zur zweiten Gruppen Reuse³⁷⁸, Repair, Refurbish³⁷⁹, Remanufacture³⁸⁰ und Repurpose und zur letzten Gruppe Recycle, Recover and Remine.³⁸¹

Wichtig ist der Blick auf den gesamten Produktlebenszyklus und auf die beteiligten Stakeholder, vor allem die Kund*innen. Gerade bei Verpackungen ist das Trennverhalten entscheidend. Ein Geschäftsmodell, das zu Ressourceneinsparung beitragen kann, ist „Product as a service“.³⁸² Hierbei besitzen die Kund*innen die Produkte nicht mehr selbst – stattdessen sind sie Nutzer*innen der Produkte oder Dienstleistungen, zum Beispiel durch ein Abonnement.

377 Hofmann et al. 2021.

378 Durch „Reuse“ (Wiederverwendung) können Produkte z. B. über Tauschplattformen weitergegeben werden.

379 Beim „Refurbishment“ werden Produkte wieder in einen guten gebrauchsfähigen Zustand versetzt.

380 Das „Remanufacturing“ umfasst die komplette Aufarbeitung des Produkts („wie neu“).

381 Potting et al. 2017.

382 Unter „Product as a service“ wird verstanden, dass nicht das Produkt verkauft wird, sondern der Nutzer einen Zugang zur Leistung bekommt.

Nach der verlängerten Nutzungsphase folgt das Recycling: Durch recyclingfreundliches Design, verbesserte Erfassung und Sortierung sowie optimierte technische Prozesse können höhere Recyclingquoten erreicht werden. Schadstoffe zum Beispiel in älteren Produkten können beispielsweise über die thermische Verwertung konzentriert und dann ausgeschleust werden. Ein Beispiel für diese Schadstoffe in älteren Produkten sind persistente organische Schadstoffe. Diese müssen abgesondert und im Sinne der POP³⁸³-Verordnung entsorgt werden.³⁸⁴

8. Zusammenfassung

Die Kreislaufwirtschaft spielt eine immer wichtigere Rolle zur Sicherung der Rohstoffversorgung und als Element im Klimaschutz. Dies zeigt unter anderem die Berücksichtigung der Kreislaufwirtschaft als eines der sechs Umweltziele in der Taxonomie-Verordnung der Europäischen Union. Es gibt viele Bestrebungen, um Veränderungen im Produktdesign zu erreichen (beispielsweise Produktaufbau, Reparaturfähigkeit, Monomaterialsysteme). Dies wird unter anderem durch die „Sustainable Product Initiative“ mit Regulierung zum Eco-Design unterstützt.

Durch die Umstellung linearer Wirtschaftsweisen auf Kreislaufwirtschaft sind in den nächsten Jahren Arbeitsplatzgewinne zu erwarten. Hierzu richtet sich der Blick stärker auf Strategien und Geschäftsmodelle, die den Wert der Produkte erhalten. Dies bietet Chancen für Familienunternehmen.

Zur Realisierung einer Kreislaufwirtschaft sind unterschiedliche Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette mit Know-how in Produktdesign, Reparatur, Sammlung und Aufbereitungstechnik nötig. Grundsätzlich sind werterhaltende und lebensdauererlösende Strategien wie Wiederverwendung oder Reparatur zu bevorzugen. Dennoch ist Recycling als eine kreislaufschießende Strategie zur Realisierung einer vollständigen Kreislaufwirtschaft unerlässlich. Bei neuen Produkten wie Lithium-Ionen-Batterien muss die Kreislauffähigkeit direkt mitgedacht werden. Innovationen im Recyclingbereich wie das chemische Recycling können Ressourcen erhalten, zum Beispiel bei Kunststoffgemischen, die sich mechanisch nicht recyceln lassen.

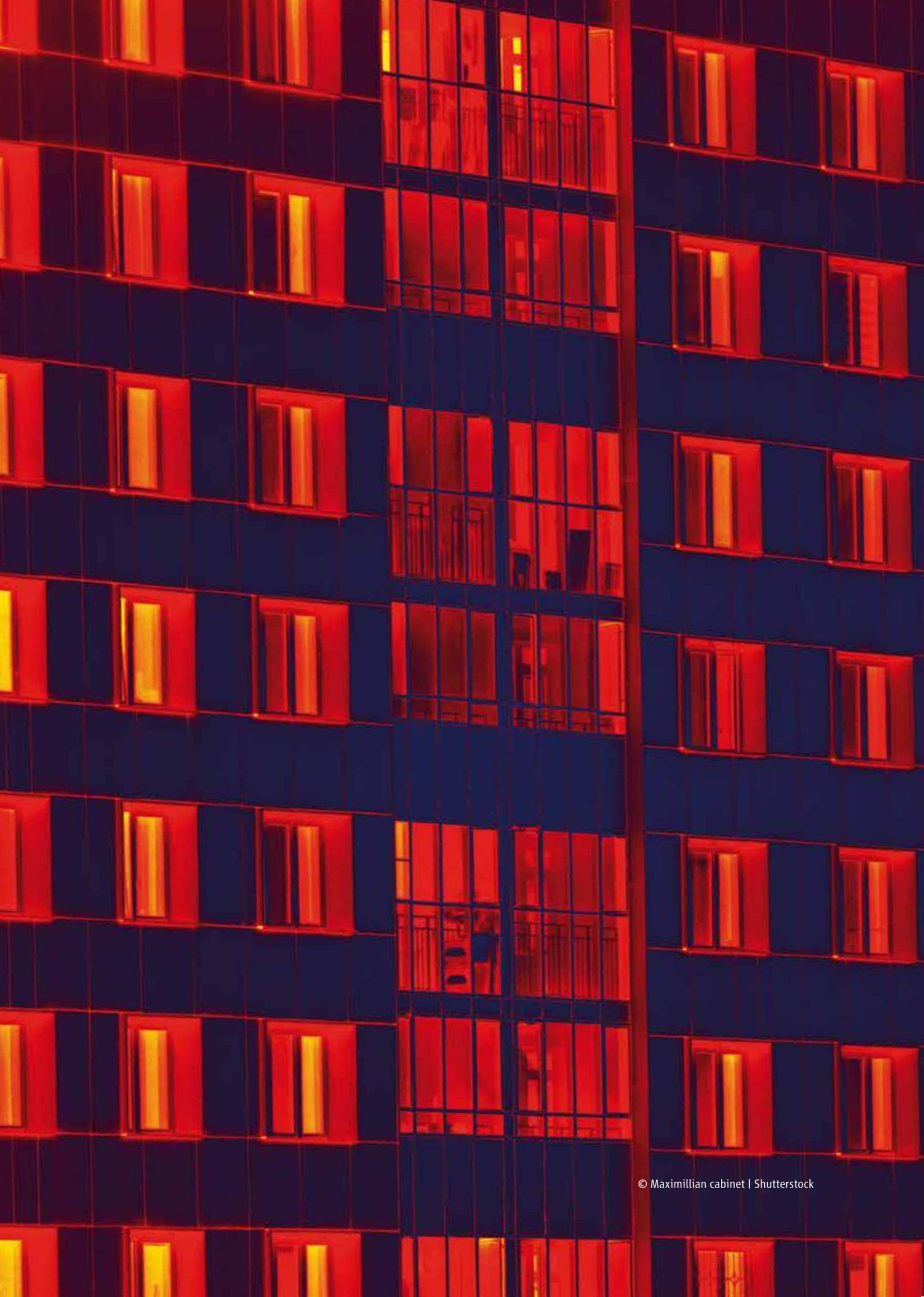
Der Markt ist in Bewegung und bietet durch den Wandel zur Kreislaufwirtschaft für Familienunternehmen Zukunftsperspektiven. Gefordert wird dazu allerdings ein systemisches und lebenszyklusübergreifendes Denken. Impulse, Strategien und Handlungsempfehlungen werden in einer eigenen Studie der Stiftung Familienunternehmen gegeben.³⁸⁵

*Wererhaltende
und lebensdauer-
verlängernde
Strategien verfolgen*

383 Die Abkürzung POP steht für Persistent Organic Pollutants (persistente organische Schadstoffe). POP sind organische Chemikalien, die sehr langlebig sind. Sie reichern sich in Organismen an und zeigen schädliche Wirkungen (z. B. auf den Menschen).

384 Europäisches Parlament 2019.

385 Stiftung Familienunternehmen 2021a.



X. Wärmedämmung

1. Wirkungsprinzip

Als Wärmedämmung wird eine Schutzmaßnahme gegen Temperatureinflüsse bezeichnet. Wärmedämmstoffe besitzen niedrige Zahlenwerte für die Wärmeleitfähigkeit.³⁸⁶ Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Stoffeigenschaft und gilt als Maß für den Wärmestrom durch ein Material. Je niedriger der Wärmestrom in einem Dämmmaterial ist, desto geringer ist dessen Wärmeleitfähigkeit und desto höher die Wärmedämmung. Im Allgemeinen betreffen Dämmmaßnahmen die Gebäudehülle, also Außenwände, Dächer, Keller, Geschossdecken und Bodenflächen sowie auch Fenster und Außentüren. Die Außenwanddämmung mittels Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) vor allem bei älteren Gebäuden, Innendämmung und das nachträgliche Anbringen einer Vorhangfassade oder multifunktionalen Fassade sind die gängigsten Arten der thermischen Wärmeisolierung. Der Begriff „Vorhangfassade“ meint die Konstruktion einer äußeren Gebäudehülle, die außerhalb des eigentlichen Tragwerks steht. Multifunktionale Fassaden beinhalten neben der Funktion als Dämm- oder Witterungsschutz weitere Haustechnikbereiche wie beispielsweise Photovoltaikanlagen oder Verschattungssysteme. Es wird zwischen Dämmstoffen aus mineralischen, synthetischen und nachwachsenden Rohstoffen unterschieden.

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Klimaneutralität im Gebäudesektor gehört zu den wichtigsten Eckpfeilern der Treibhausgas-minderungsziele bis 2045. Der gebäuderelevante Energieverbrauch besitzt einen Anteil von rund 35 Prozent am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland.³⁸⁷ Einer gesteigerten Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmeschutz der Gebäudehülle kommt daher eine tragende Rolle zu. Der benötigte Energieaufwand zur Herstellung von Dämmstoffen liegt in der Regel unter einem Vielfachen der Energiemenge, die im Laufe ihrer Nutzungsphase eingespart wird.³⁸⁸ Laut der Zielsetzung der Bundesregierung zur Verringerung der Treibhausgasemissionen soll entsprechend dem SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“ bis zum Jahr 2050 der Primärenergiebedarf in Gebäuden stufenweise um bis zu 80 Prozent verringert und die Sanierungsrate für Gebäude von etwa einem Prozent zwischen den Jahren 2010 und 2016³⁸⁹ auf mindestens 2 bis 2,5 Prozent verdoppelt werden.³⁹⁰ Diese Maßnahmen adressieren auch das SDG 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“. Allein eine Innendämmung von sechs Zentimetern kann bei einem Einfamilienhaus aus den 1950er-Baujahren eine Energieeinsparung von 55 Prozent im Vergleich zum ungedämmten Zustand ermöglichen.³⁹¹

386 Post und Schmidt 2019, S. 66.

387 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2021, S. 56.

388 Deutscher Bundestag 2022b, S. 7.

389 BiPRO GmbH et al. 2018, S. 51.

390 Umweltbundesamt (UBA) o. J. b.

391 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2019, S. 19.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Für das Jahr 2021 gibt das Statistische Bundesamt einen Bestand von 19,4 Millionen Wohngebäuden mit rund 41,7 Millionen Wohnungen an. Bei rund zwei Dritteln (68,8 Prozent) der 112.935 im Jahr 2020 neu gebauten Wohngebäude kommen erneuerbare Energien ganz oder teilweise für das Beheizen zum Einsatz.³⁹² Um die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen, müssen nicht nur Heizsysteme auf erneuerbare Energien umgerüstet, sondern auch Gebäudehüllen modernisiert werden. Eine fundierte Datenlandschaft ist eine Grundvoraussetzung, um den energetischen Sanierungsstand zu erfassen und in Abstimmung darauf Maßnahmen wie eine nachträgliche Fassadendämmung umzusetzen. Deutschland ist neben Rumänien gegenwärtig das einzige Land in der Europäischen Union, in dem sich der Energieausweis mit einer dazugehörigen Datenbank noch nicht als Informationsinstrument für Aussagen über den energetischen Gebäudezustand etabliert hat.³⁹³ Ein zukünftig geplantes Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) soll dem derzeitigen Datenmangel Abhilfe verschaffen.

Aus einem Bericht des UBA aus dem Jahr 2019 geht hervor, dass, ausgenommen von Neubauten, 51,4 Prozent der Wohngebäude in Deutschland als teilsaniert und 4,3 Prozent als vollsaniert gelten.³⁹⁴ Insbesondere bei Wohngebäude-Altbauten ist eine zusätzliche Verbesserung des Wärmeschutzes erforderlich. Allein für die Modernisierung des Altbaubestandes wird bei einer Beibehaltung der derzeitigen Modernisierungsrate ein Umsetzungszeitraum bis zum Jahr 2075 erwartet.³⁹⁵ Laut DUH (Deutsche Umwelthilfe) wäre jedoch eine Anhebung der energetischen Sanierungsrate auf mindestens sogar drei Prozent notwendig.³⁹⁶

Im Ausbaugewerbe, zu dem auch Wärmedämmung zählt, waren im Jahr 2021 428.432 Personen beschäftigt.³⁹⁷ Die Umsatzwerte können separiert für ausschließlich Wärmedämmung mit 8,7 Milliarden Euro im Jahr 2020 angegeben werden.³⁹⁸ Im Jahr 2011 lag der Umsatzwert für die Maßnahme zur Verbesserung der Energieeffizienz mittels Wärmedämmung noch bei rund 4,2 Milliarden Euro.³⁹⁹ Im Baugewerbe insgesamt zeigt sich zudem ein positiver Beschäftigungstrend im Bereich Umweltschutz mit knapp einem Fünftel der Umweltschutzbeschäftigten nach Wirtschaftsbereichen.⁴⁰⁰

392 Statistisches Bundesamt 2021a.

393 Becker 2022b, S. 19.

394 Metzger et al. 2019, S. 76.

395 Diefenbach und Clausnitzer 2010, S. 12.

396 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, S. 3.

397 Statistisches Bundesamt 2022d, S. 11.

398 Statistisches Bundesamt 2021b.

399 Statistisches Bundesamt 2021b.

400 Statistisches Bundesamt 2022a.

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland rund 824.000 Tonnen Dämmstoff produziert, davon 665.000 Tonnen Hütten-, Stein- und mineralische Wollen und 159.000 Tonnen Matten aus Glasfasern. Die Produktion erfährt in den letzten Jahren einen leichten Anstieg ausgehend von 519.000 Tonnen Hütten-, Stein- und mineralischen Wollen und 73.000 Tonnen Matten aus Glasfasern im Jahr 2010.⁴⁰¹

4. Beitrag von Familienunternehmen

Laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank sind 1.288 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Wärmedämmung*“ zu finden (Stand: 4.11.2022):

- 1 AG
- 999 GmbHs
- 6 vollhaftende Personengesellschaften
- 199 teilhaftende Personengesellschaften
- 83 Einzelunternehmen

Das Zusammenkommen von Tradition und Innovation zeigt sich am Beispiel eines familiengeführten mittelständischen Unternehmens, der maxit Gruppe. Deren Forscher*innen wurden im Jahr 2020 für die Entwicklung einer spritzbaren Dämmstofftechnologie auf Basis von Mikrohohlglaskugeln für den Deutschen Zukunftspreis nominiert.

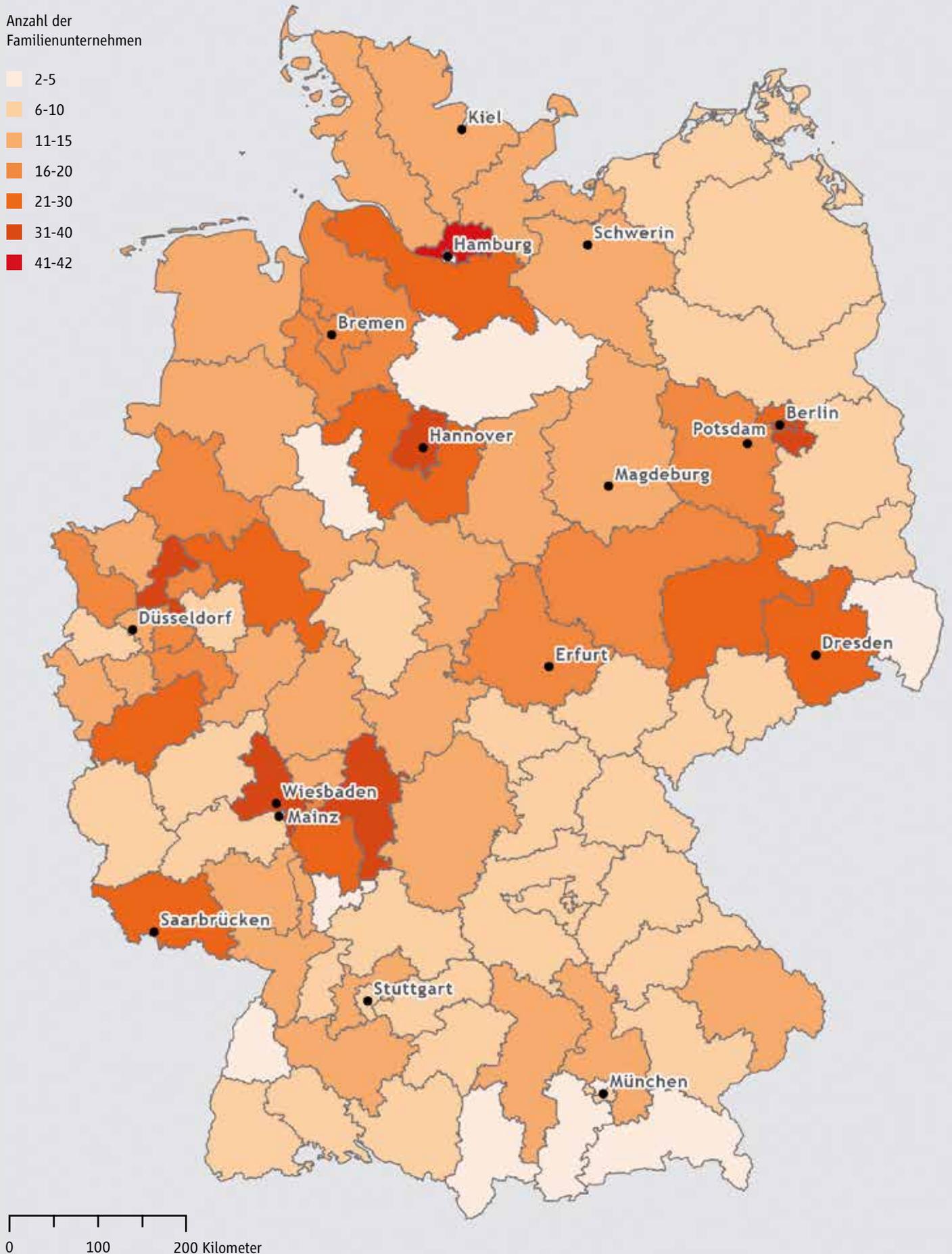
Ausgenommen des südlichen Raumes zeigen Familienunternehmen im Bereich der Wärmedämmung eine relativ ausgeglichene Verteilung in Deutschland.

401 Statistisches Bundesamt 2022f.

Abbildung 16: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Wärmedämmungsbranche
(nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 2-5
- 6-10
- 11-15
- 16-20
- 21-30
- 31-40
- 41-42



0 100 200 Kilometer

Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Cellco GmbH, Herrn Carsten Prüve (Büroleitung):

Das Familienunternehmen Cellco GmbH ist im Bereich Innendämmung tätig und setzt bei der ökologischen Innendämmung bereits seit 40 Jahren auf Wärmedämmlehm, der auf Korkgranulat basiert. Der Unternehmenssitz in Celle, einer historischen Fachwerkstadt, war für die damalige Unternehmensführung ein Ansporn, um das ökologisch nachhaltige Sanieren und Bauen im eigenen Familienbetrieb voranzutreiben. Denn Lehm und Holz, so Herr Prüve, gelten im Fachwerkbereich als eine perfekte Kombination, da Lehm die Holzanteile optimal vor Feuchtigkeit schützt.

Herr Prüve beobachtet in den letzten Jahren große Entwicklungen bei der Akzeptanz gegenüber ökologischen Dämmmaterialien bei Fachwerkgebäuden. Vor allem bei Neubauten sieht er jedoch einen Ausbaubedarf: „Hier müsste sicherlich auch der Gesetzgeber unterstützen mit Kampagnen oder eben auch Besteuerungsmaßnahmen, um stärker darauf hinzuwirken, dass ökologisch nachhaltige Produkte eingesetzt werden anstatt solcher, die uns in 50 oder 100 Jahren Probleme bereiten werden.“ Zwar gäbe es immer wieder regionale Förderprogramme. Allerdings seien die Mittel oftmals nur gering und die Vorgaben, die es dabei zu erfüllen gilt, würden zum Teil so hoch angesetzt, dass man sie nur mit konventionellen Wärmedämmungen erreichen könne: „Da baut man künstliche Hemmschwellen auf, die so eigentlich nicht sein müssen.“

Im Bereich der konventionellen Wärmedämmung fehle es weiterhin an wichtigen gesetzlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf die Wiederverwertung und Entsorgung von Dämmmaterialien. Seit der ersten öffentlichkeitswirksamen Diskussion um den Rückbau und die Entsorgung von beispielsweise Styropor gäbe es bis heute nur unzureichende Vorgaben, um den Einsatz solcher Produkte zu regulieren: „Und irgendwann habe ich sie nun mal auf der Müllkippe und dann müssen wir die Konsequenzen letztendlich alle tragen!“

Durch Besuche auf Fachmessen komme das Familienunternehmen immer wieder in den Austausch mit Studierenden, die bemängeln, dass der Bereich des ökologischen Bauens und Sanierens von den Lehrplänen an Universitäten mehr oder weniger ausgeklammert sei. Dementsprechend sieht Herr Prüve hier in Zukunft einen großen Handlungsbedarf wie auch bei der Förderung von Fachkräften.

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Nach vorläufigen Daten hat der Gebäudesektor im Jahr 2021 das zweite Jahr in Folge die vorgegebenen Klimaziele um zwei Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente verfehlt (115 Millionen

Tonnen statt 113 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente).⁴⁰² Laut kritischer Stimmen sei für die ausbleibende Sanierungswelle weniger ein Mangel an Technologien und Produkten verantwortlich, sondern vorrangig eine mangelhafte Anreiz- und Informationspolitik.⁴⁰³ Das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) und das BMWK haben im Juli 2022 gemäß ihrer Verpflichtung gegenüber dem Bundes-Klimaschutzgesetz mit einem Sofortprogramm für den Gebäudesektor reagiert.⁴⁰⁴

Welche energetischen Anforderungen Gebäude derzeit von regulatorischer Seite aus erfüllen müssen, wird in Deutschland seit dem 1. November 2020 über das Gebäudeenergiegesetz (GEG) definiert. Die darin enthaltenen Vorgaben zur Heizungs- und Klimatechnik, zum Hitzeschutz und auch zum Wärmedämmstandard werden jedoch von einigen Akteuren als zu wirkungslos empfunden, um die gesteigerten Klimaschutzziele zu erreichen, darunter beispielsweise auch das Umweltministerium Baden-Württemberg, welches eine Neukonzeption des GEG mit strengeren Vorgaben aufgesetzt hat.⁴⁰⁵

Dämmstoffe werden gegenwärtig größtenteils auf Basis von Erdöl oder aus Mineralwolle hergestellt. Die Herstellung von solchen Dämmstoffmaterialien hat einen hohen Energiebedarf und besitzt folglich auch ein erhebliches CO₂-Einsparpotenzial. Es mangelt bislang jedoch an politischen Anreizen zur Senkung der Emissionen. Das GEG und die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) bewerten ausschließlich die Nutzungsphase der Dämmstoffe in Gebäuden, nicht aber ihre Produktion.⁴⁰⁶

Für die Produktion von alternativen Dämmstoffen liegen oftmals keine offiziellen Regularien vor, was den Herstellungsprozess neuer Produkte verkompliziert. Auch wird es für innovative Produkte meist erschwert, sich gegen die etablierten Produkte wie Expandiertes Polystyrol (EPS) auf dem Dämmstoffmarkt durchzusetzen. Ein Grund dafür sind die höheren Preise, die sich zu einem großen Teil aus den derzeit nur geringen Produktionsmengen ergeben. Dieser Umstand birgt vor allem für Jungunternehmen ein finanzielles Risiko.⁴⁰⁷ Zellulose, Holzfaser- und Wiesengrasflocken als Einblasdämmstoffe gehören jedoch trotz im Vergleich niedrigerer Produktionsmengen schon seit einigen Jahren zu den preiswertesten Produkten am deutschen Markt für Dämmstoffe.⁴⁰⁸

402 Umweltbundesamt (UBA) und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022.

403 Repräsentanz Transparente Gebäudehülle GbR 2022.

404 Bundestagsfraktion 2022.

405 Pehnt et al. 2021.

406 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, S. 8.

407 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, S. 15.

408 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2020, S. 18.

Weiterhin fehlt im Bereich der Naturdämmstoffe oftmals auch die entsprechende Expertise bei den Fachkräften. Die DUH fordert daher, das Themenfeld des ökologischen Bauens stärker in den Lehrplänen der Aus- und Weiterbildung von Handwerker*innen zu integrieren.⁴⁰⁹

Die Baubranche als einer der ressourcenintensivsten Sektoren der Wirtschaft hinterließ im Jahr 2018 mineralische Bauabfälle in Höhe von 218,8 Millionen Tonnen.⁴¹⁰ Die Gruppe der Baustellenabfälle, denen auch Dämmmaterialien zugehörig sind, besaß mit 14 Millionen Tonnen einen Anteil von 6,4 Prozent an dem Gesamtabfallaufkommen, wovon wiederum nur 0,3 Millionen Tonnen (1,8 Prozent) recycelt und 13,5 Millionen Tonnen (96,9 Prozent) einer sonstigen Verwertung zugeführt wurden.⁴¹¹ Die Vorgabe von Rezyklateinsatzquoten kann dabei helfen, die rein technisch oft bereits mögliche Verwendung von recycelten Dämmmaterialien zu erhöhen.

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Dämmmaterialien weisen im Bereich der energetischen Gebäudesanierung eine hohe Innovationsdynamik auf. Dies betrifft nicht nur die Dämmstoffe selbst, sondern auch ihren Herstellungsprozess. Der Einsatz von Infrarottechnologien beispielsweise kann auch bei der Produktion bereits gängiger Dämmstoffe zu einer CO₂-Reduktion führen. Das Infrarotschäumen ist außerdem ein Trockenverfahren, welches kein Wasser und somit auch keine Treibmittel benötigt. Außerdem kann der Strombedarf über erneuerbare Energien gedeckt werden.⁴¹²

Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Dämmstoffen besitzen Naturdämmstoffe den Vorteil, dass sie zu einem großen Teil aus der einheimischen Land- und Forstwirtschaft gewonnen und so lange Transporte vermieden werden können.⁴¹³ Neben ihrer energieärmeren Produktion im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen ist eine thermische Verwertung zur Energiegewinnung für alle natürlichen Dämmstoffe möglich.⁴¹⁴ Lose oder mechanisch verlegte natürliche Dämmstoffe wie Zellulose- und Holzfasern können potenziell wiederverwendet werden. Andere Materialien wie Mattendämmstoffe aus Hanf oder Schafwolle sind recyclingfähig.

Über alle Dämmstoffarten hinweg findet eine stoffliche Verwertung der Dämmstoffe mittels Rückführung in die Produktion oder als Sekundärrohstoffe derzeit jedoch kaum statt. Die

409 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, S. 29.

410 Basten 2021, S. 6.

411 Basten 2021, S. 9.

412 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, S. 5 f.

413 Weinisch et al. 2020, S. 19.

414 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2020, S. 11.

Erkenntnisgewinnung aus der Forschung und Praxis sollte daher vorangetrieben werden. Vor allem bei synthetischen Dämmstoffen und Mineralschaum- sowie Schaumglasplatten könnten die Einsparungen bei der stofflichen Verwertung hinsichtlich der Ökobilanz besonders groß ausfallen.⁴¹⁵

Laut Schätzungen der FNR bestanden im Jahr 2019 neun Prozent der verwendeten Materialien auf dem Dämmstoffmarkt aus natürlichen oder nachwachsenden Rohstoffen.⁴¹⁶ Im Jahr 2011 waren es noch sieben Prozent. Gängige Naturdämmstoffe sind beispielsweise Holz, Zellulose, Hanf, Flachs, Schafwolle, Kork oder Stroh. Bedenken hinsichtlich des Einsatzes gesundheitsschädlicher Flammenschutzmittel, lungengängiger Fasern oder Schadstoffbelastungen mit Styrol bei den gängigen Produkten bewirkten in den letzten Jahren ein zunehmendes Umdenken bei Verbraucher*innen. Für die Nachfrage nach natürlichen Dämmmaterialien in der Gesellschaft zeichnet sich laut einer Studie der Hochschule Pforzheim ein positiver Trend ab.⁴¹⁷ Dabei sind persönliches Wohlbefinden und die eigene Gesundheit auch laut einer Forsa-Umfrage die treibenden Kräfte.⁴¹⁸

Die Wärmeleitfähigkeit von natürlichen Dämmstoffen entspricht in der Regel ähnlich niedrigen Werten, wie sie konventionelle Dämmstoffe aufweisen.⁴¹⁹ Laut FNR besitzen Naturfaserdämmstoffe außerdem ein überdurchschnittlich gutes Feuchteverhalten, da sie Feuchtigkeit transportieren oder für eine gewisse Zeit binden können, ohne dabei an Dämmkraft zu verlieren.⁴²⁰ Die am meisten verbreiteten Materialien sind Holzweichfaserplatten und Zellulose. Holzfaserdämmstoffe speichern zudem CO₂-Emissionen und hemmen durch ihre oberflächliche Verkohlungs-schicht im Brandfall den Branddurchgang. Weiterhin werden aktuell Pilotprojekte zu Dämmstoffmaterialien aus mineralischen Industrieabfällen, Altholz und aussonierten Jute-Säcken aus dem Warentransport durchgeführt.⁴²¹ Ein möglicher Preisanstieg fossiler Rohstoffe könnte die Nachfrage nach natürlichen Dämmstoffen erhöhen. Wiederum könnte sich eine zukünftige Vorfertigung größerer Dämmeinheiten im Werk positiv auf das Kostenreduktionspotenzial auswirken, da hierdurch der Personalaufwand beim Anbringen der Dämmmaterialien verringert würde.⁴²²

415 Reinhardt et al. 2019, S. 150.

416 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2021.

417 Hochschule Pforzheim 2018.

418 forsa 2018, S. 3.

419 Weinisch et al. 2020, S. 19.

420 Weinisch et al. 2020, S. 19.

421 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, 13 ff.

422 Bürger et al. 2017, S. 67 f.

Bei selektiven Rückbau- und Abbruchverfahren werden die verbauten Materialien bereits an der Abbruchstelle sorgfältig getrennt, um so die späteren Verwertungsmöglichkeiten zu optimieren. Aufgrund der Langlebigkeit der bereits verbauten Produkte und den daraus resultierenden geringen Rückbauraten besteht bisher jedoch kaum Erfahrung in selektiven Rückbau- und Abbruchverfahren. Spezielle Geräte für den Rückbau von beispielsweise Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) unterliegen somit einem dringenden Entwicklungsbedarf.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass aufgrund der teilweise großen Zeitspanne unbekannt ist, welche Baustoffe verwendet wurden. Im Jahr 2019 waren mehr als 80 Prozent der Wohneinheiten in Deutschland älter als 30 Jahre.⁴²³ Digitalisierte Gebäudepässe könnten dieses Problem zumindest für zukünftige Bauvorhaben lösen.⁴²⁴ Die DUH verweist jedoch darauf, dass kleinere Betriebe ohne finanzielle Hilfestellungen den Arbeitsaufwand zur Erstellung des durchaus sinnvollen Instruments des Gebäudepasses nur schwerlich zu erfüllen vermögen.⁴²⁵

Ökobilanzen können über den gesamten Bauprozess als auch Phasen des Abrisses und der Entsorgung wichtige Daten für die ökologische Bewertung eines Bauwerks liefern. Unterstützend bei einer solchen Ausarbeitung stellen das BMUV mit dem Baustoffinformationssystem „Wecobis“ und das Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) mit „Ökobaudat“ zwei solcher Datenbanken zur Verfügung.

Mit der Reform der BEG sind in Zukunft auch höhere Fördersummen vorgesehen. Wurden im Jahr 2020 noch fünf Milliarden Euro für die Sanierung zur Verfügung gestellt, soll dieser Wert nun ab 2022 stufenweise auf jährlich 12 bis 13 Milliarden Euro erhöht werden.⁴²⁶

8. Zusammenfassung

Dämmstoffkonzepte gehören im Gebäudesektor zu den wichtigsten Trägern bei der Umsetzung der Energiewende.

Ein sortenreiner Rückbau und die Wiederverwertung von Dämmstoffen besitzen eine hohe ökologische Relevanz. Bisher sind jedoch kaum Dämmstoffe zur Entsorgung angefallen, weswegen auch die Erfahrungswerte gering ausfallen. Zu den Grundvoraussetzungen für die Wiederverwertung gehören die Trennbarkeit der Baustoffe, vorliegende Gebäudeinformationen, funktionierende Recyclingkreisläufe sowie eine entsprechende Ausbildung der Handwerker*innen.

423 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2019, S. 16.

424 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, S. 35.

425 Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, S. 38.

426 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022a.

Wärmedämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen besitzen eine gute Ökobilanz von ihrer Herstellung bis zur Entsorgung und bieten daneben viele weitere Vorteile wie einen günstigen Feuchtigkeitstransport. Das Potenzial von Wärmedämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen sollte mittels weiterer Forschung bezüglich der Herstellungsverfahren und Leistungsfähigkeit optimiert werden.

Die Europäische Union hat jüngst den Gebäudesektor als einen der Bereiche mit der geringsten Digitalisierung identifiziert.⁴²⁷ Die Digitalisierung des Gebäudesektors stellt jedoch eine notwendige Voraussetzung auch für den Klimaschutz dar. Insbesondere im Bereich Wärmedämmung wird das Erfassen und Bereitstellen von Daten für die Verbrauchstransparenz, Sanierung und Planung von Neubauten in Zukunft immer wichtiger.

427 Europäische Kommission 2021d.



XI. Wärmepumpen

1. Wirkungsprinzip

Geothermie bezeichnet die technische Nutzung der Erdwärme. Unterschieden wird zwischen der oberflächennahen (bis circa 400 Meter) und der tiefen (Tiefen > 400 Meter) Geothermie (siehe Kapitel D.IV). Bei oberflächennaher Geothermie wird die sogenannte Umgebungswärme genutzt; diese kann aus der Luft, aus Oberflächengewässern oder aus dem Erdreich gewonnen werden. In Deutschland liegt die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche bei rund sieben bis elf Grad Celsius und nimmt zur Tiefe hin pro 100 Meter um circa 3 Grad Celsius zu. Um dieses Temperaturgefälle zum Heizen nutzen zu können, ist der Einsatz von Wärmepumpen nötig. Möglich ist auch die Anwendung eines horizontalen Kollektors, der in einer Tiefe von nur 1,50 Meter verlegt wird.⁴²⁸ Zugrunde liegt der Technik einer Wärmepumpe der Joule-Thomson-Effekt, demzufolge sich ein Gas durch Kompression erwärmt und bei Druckminderung wieder abkühlt. Die Wärmepumpe entzieht ihrer Umgebung (Wasser, Luft, Erde) Wärme und gibt diese dann wieder ab. Sie besteht in der Regel aus einem Verdampfer, einem Kompressor, einem Kondensator und einem Ventil. In der Wärmequellenanlage zirkuliert eine Flüssigkeit, in der Regel ein mit Frostschutzmittel versetztes Wasser. Diese Flüssigkeit nimmt Wärme aus ihrer Umgebung auf und transportiert sie über einen Wärmetauscher zu einem Kältemittelkreislauf. Das Kältemittel verdampft nun durch die eingebrachte Wärme, wird durch den Kompressor verdichtet und damit auf ein höheres Temperaturniveau angehoben.⁴²⁹

In einem zweiten Wärmetauscher, dem Verflüssiger, wird das unter hohem Druck stehende, heiße Kältemittelgas kondensiert, wobei es seine Wärme wieder abgibt. Durch das Entspannungsventil, die sogenannte Drossel, durch das der Druck des Kältemittels wieder verringert wird, wird das dann wieder flüssige und entspannte Kältemittel zum Verdampfer zurückgeführt. Die abgegebene Wärme wird an ein Heizmedium (in der Regel handelt es sich um Wasser) weitergegeben.

Luftwärmepumpen arbeiten nach einem ähnlich Prinzip: Diese saugen die Außenluft über einen Ventilator an und führen so der Wärmepumpe die Umgebungswärme zu.

Wärmepumpen arbeiten umso effizienter, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und dem Heizsystem ist, weshalb Grundwasser oder das Erdreich die überwiegend besseren Wärmequellen – verglichen mit Luft – sind.⁴³⁰ Diese Medien verfügen über eine relativ hohe und stabile Durchschnittstemperatur. Für ihren Betrieb benötigen Wärmepumpen

428 Bundesverband Geothermie 2022a.

429 Vaillant 2022.

430 Wolf 2023.

Strom.^{431, 432} Im Schnitt werden aus einer Kilowattstunde Strom, die die Wärmepumpe benötigt, drei Kilowattstunden Wärme. Die Energieeffizienz von Wärmepumpen wird durch zwei Kennwerte beschrieben: Der „Coefficient of Performance“ (COP)/Leistungszahl wird auf Prüfständen bestimmt und gibt das Verhältnis der abgegebenen Nutzwärmeleistung bezogen auf die eingesetzte elektrische Leistung für den Wärmepumpenantrieb an und gilt jeweils nur für einen einzelnen Betriebspunkt aus Wärmequellen- und Heizungsvorlaufemperatur. Die Jahresarbeitszahl (JAZ) gibt das Verhältnis der im Laufe eines Jahres abgegebenen Wärmemenge bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie für den Antrieb der Wärmepumpe einschließlich Verdichter und Hilfsantriebe an. Je höher die JAZ, desto größer die Energieeffizienz der Wärmepumpe.

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Der Wärmesektor ist für 56 Prozent des nationalen Energiebedarfs verantwortlich und im Haushalt der mit Abstand größte Verursacher von CO₂. Die Wärmepumpentechnologie macht Umweltenergie für Heizzwecke nutzbar. Eine elektrische Wärmepumpe ist – unter bestimmten Voraussetzungen – eine energiesparende Form der Wärmegewinnung mit geringeren CO₂-Emissionen als Heizöl- oder Erdgasheizungen. Wärmepumpen, die Gas (Luft) als Wärmedmedium nutzen, sind wegen ihrer niedrigeren Effizienz nur noch selten.⁴³³ Da Wärmepumpen je nach Quelle bis zu 80 Prozent Energie aus der Umwelt verwerten, die von der Natur immer wieder erneuert wird, zählt diese energieeffiziente Technologie zu den erneuerbaren Energien. Neben Wasser, Luft und Erde können auch Abwärme aus Abluft oder Abwasser als Wärmequellen genutzt werden. Durch den Einsatz von Wärmepumpen kann auf fossile Brennstoffe verzichtet werden. Da keine Verbrennung stattfindet, wird auch kein CO₂ emittiert. 25 Prozent der benötigten Heizenergie werden durch elektrischen Strom beigetragen. Werden Wärmepumpen mit ökologisch erzeugtem Strom betrieben, fällt ihre Umweltbilanz positiv aus. Für die Beurteilung der Effizienz wird die JAZ genutzt: Liegt sie bei vier oder darüber, ist Energieeffizienz gegeben.⁴³⁴

Auch bei den eingesetzten Kältemitteln gibt es Unterschiede: Die ehemals vor allem in Kühlschränken eingesetzten FCKW sind bereits seit dem Jahr 1995 verboten, weitere Einschränkungen traten im Januar des Jahres 2020 in Kraft. Mittlerweile werden vor allem sogenannte natürliche Kältemittel wie Kohlenstoffdioxid, Propan, Propen, Ammoniak oder auch Butan

431 Endres 2018.

432 Nguyen 2020.

433 Umweltbundesamt (UBA) 2022e.

434 Umweltbundesamt (UBA) 2022e.

eingesetzt.^{435, 436, 437} Aber auch alternative Arbeitsmittel werden hinsichtlich ihres Umwelteinflusses und ihrer Effizienz untersucht.⁴³⁸

Die Technologie der Wärmepumpen liefert einen direkten Beitrag zu SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“ und SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland zwölfmal so viele Wärmepumpen verkauft wie im Jahr 2000 und es waren insgesamt 1,37 Millionen Wärmepumpen installiert. Diese teilen sich in circa 300.000 Warmwasser- und 1.070.000 Heizungswärmepumpen auf. Die Fachleute, die die zitierte Branchenstudie für den Bundesverband Wärmepumpe e.V. verfasst haben, gehen von einer weiteren Steigerung der Absatzzahlen in den nächsten Jahren aus, da nun die Mitte der 90er-Jahre eingebauten 25-30 Jahre alten Anlagen ersetzt werden. Ein derartiger Anstieg wird bis circa 2030 prognostiziert, dann sollen je nach Quelle rund drei⁴³⁹ bis vier⁴⁴⁰ Millionen Geräte installiert sein. Wird die Erreichung der Klimaziele in den Jahren 2030 sowie 2050 als gesetzt angesehen, wird sich diese Zahl bis 2030 sogar auf 6,2 Millionen Anlagen steigern. Aufgrund der derzeitigen Energiekrise kann aber von den Verfassenden dieser Studie nicht beurteilt werden, wie die Entwicklung in diesem Markt voranschreitet. Exemplarisch für den dynamischen Wandel in diesem Umfeld ist zudem die Übernahme des Familienunternehmens Viessmann durch den US-Konzern Carrier Global, die kurz vor Abschluss dieser Studie bekanntgegeben wurde.

Zum Arbeitsmarkt sind keine belastbaren Zahlen zu finden, die sich ausschließlich auf diese Technologie beziehen, da Auslegung und Einbau von Wärmepumpen nicht nur von quantifizierbaren spezialisierten Wärmepumpenherstellern erfolgen, sondern meist von Elektrofachfirmen durchgeführt werden. Es ist aber bei steigenden Absatzzahlen auch von steigenden Beschäftigungszahlen auszugehen und davon, dass in diesem Sektor die Arbeitsplätze als relativ gesichert gelten.

435 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2018.

436 Endres 2018.

437 Haustec.de 2019.

438 Höges et al. 2022.

439 Backhaus et al. 2021.

440 Frost & Sullivan 2022g.

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 1.659 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Wärmepumpe*“ zu finden (Stand: 4.11.2022):

- 8 AGs
- 1.294 GmbHs
- 23 vollhaftende Personengesellschaften
- 236 teilhaftende Personengesellschaften
- 98 Einzelunternehmen

In diesem Bereich sind gleich drei große Familienunternehmen Marktführer: Bosch Thermotechnik GmbH, Viessmann GmbH & Co. KG und Vaillant GmbH.⁴⁴¹ Den größten Umsatz erwirtschaftet laut MARKUS-Unternehmensdatenbank die Firma Bosch.

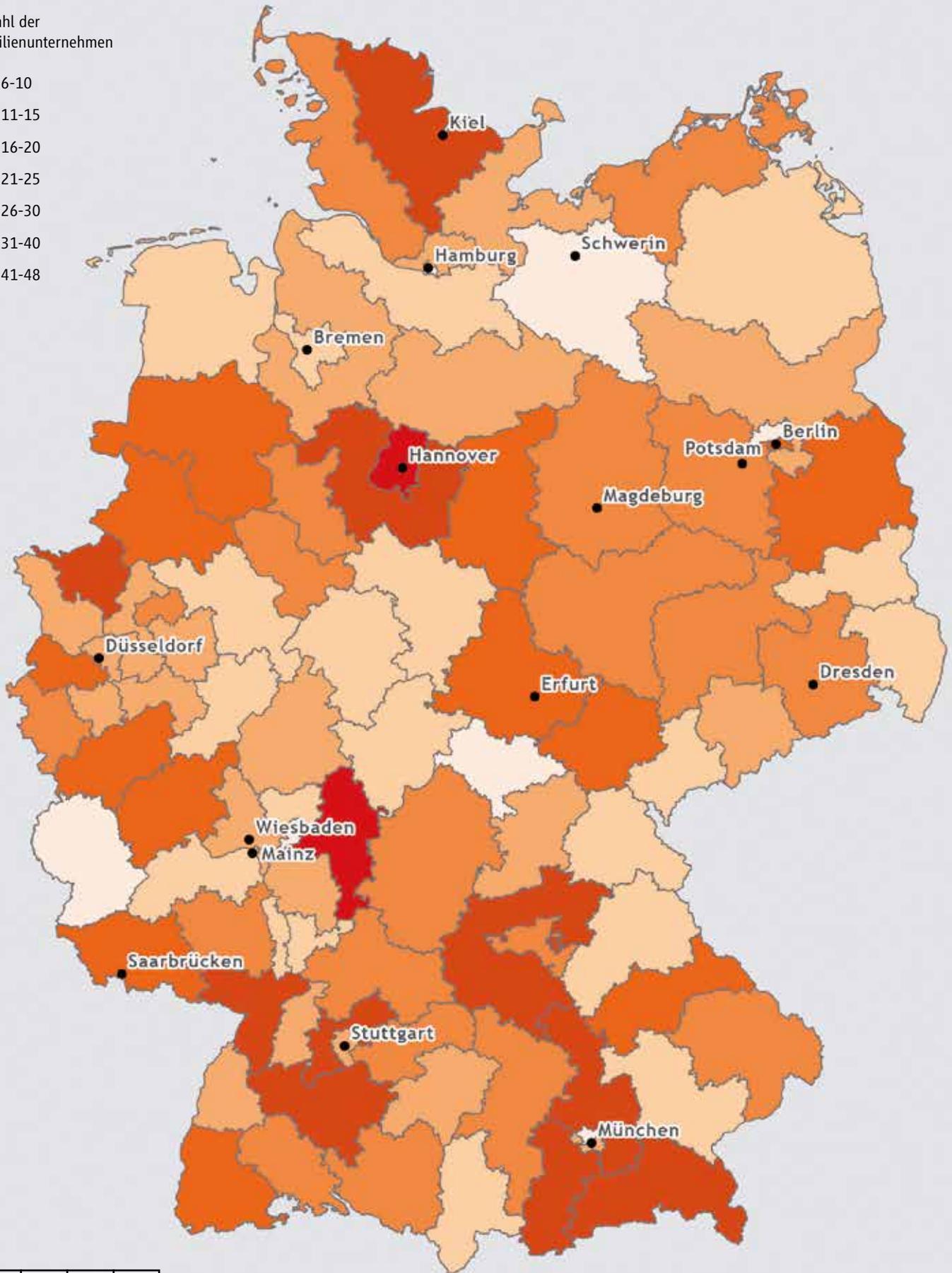
Abbildung 17 zeigt eine relativ gleichmäßige Verteilung der Unternehmen der Geothermie-Branche über Deutschland. Für die Karte wurden alle identifizierten Unternehmen zur Tiefengeothermie, Geothermie und Wärmepumpen addiert. Diese Zusammenlegung war nötig, um eine ausreichende Anzahl an Unternehmen zur anonymisierten Visualisierung zu erhalten.

441 Tagesschau 2022b.

Abbildung 17: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Tiefengeothermie-, Geothermie- und Wärmepumpenbranche (nach Postleitzahlen)

Anzahl der Familienunternehmen

- 6-10
- 11-15
- 16-20
- 21-25
- 26-30
- 31-40
- 41-48



0 100 200 Kilometer

Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Vaillant GmbH, Michael Gaertig (Director Group Strategy):

Das 1874 gegründete Familienunternehmen Vaillant Group ist eigenen Aussagen nach Weltmarktführer im Bereich Zentralheizgeräte mit Standorten in Europa und China. Es produziert energieeffiziente und umweltfreundliche Lösungen zum Heizen, Kühlen und zur Warmwasserbereitung, wie zum Beispiel effiziente Gas-Brennwerttechnik sowie Hybridsysteme. Das Zentrum der Forschung und Entwicklung ist das Johann Vaillant Technology Center am Unternehmenshauptsitz in Remscheid. Das Unternehmen fühle sich der Nachhaltigkeit verpflichtet und habe den Anspruch, einen Beitrag zu den internationalen Klimaschutzziele zu leisten. Dies habe das Unternehmen mit seinen 16.000 Mitarbeitern in seiner Vision verankert: „Taking Care of a better climate. Inside each home and the world around it“. Bereits vor mehr als zehn Jahren hat die Vaillant Group das Programm SEEDS (Sustainability in Environment, Employees, Development & Solutions and Society) ins Leben gerufen. Auch deshalb wurde die Vaillant Group im Jahr 2015 als „Deutschlands nachhaltigstes Großunternehmen“ mit dem Deutschen Nachhaltigkeitspreis ausgezeichnet. Im Rahmen ihrer globalen Nachhaltigkeitsstrategie habe sich die Vaillant Group ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt: Bis 2030 werde der Heiztechnikspezialist die aus dem operativen Geschäftsbetrieb entstehenden CO₂-Emissionen (Scope 1 und 2) halbieren, verbleibende Emissionen werden bereits seit 2020 vollständig durch hochwertige Aufforstungsprojekte ausgeglichen. Die Scope 3-Emissionen sollten bis 2030 um 55 Prozent und um mehr als 90 Prozent bis 2050 reduziert werden.

Ein Fokus des Unternehmens liegt auf Wärmepumpen, die bis zu 75 Prozent des Energiebedarfs mit kostenloser Umweltwärme decken können. Wärmepumpen der neuesten Generation werden mit einem natürlichen, umweltfreundlichen Kältemittel betrieben, das den Betrieb nicht nur in Neubauten, sondern auch in älteren, weniger gut wärmedämmten Bestandsgebäuden erlaube. Mit ihren digitalen Services schaffe die Vaillant Group zusätzlichen Nutzen für das Fachhandwerk, Endkunden und Wohnungsbaugesellschaften.

Die europäische Heiztechnikbranche befinde sich in einem sehr dynamischen Wandel, der durch politische Regulierung, die Digitalisierung und veränderte Kundenanforderungen beschleunigt werde. Unter dem Eindruck der Folgen des Klimawandels und der Diskussion über die Erdgasversorgung angesichts des Kriegs in der Ukraine unterstützen die Regierungen in Europa zunehmend die Elektrifizierung des Gebäudesektors. Die Vaillant Group investiere massiv in den Ausbau der Produktionskapazitäten für Wärmepumpen. Gleichzeitig würden Vertriebs- und Servicestrukturen erheblich ausgebaut. Diesen Wandel gestalte das Unternehmen gemeinsam mit seinen Kunden aus dem Fachhandwerk. Viele Installateure, die bislang auf Gasheizgeräte spezialisiert seien, müssten auf die Installation und Wartung von

Wärmepumpen geschult werden. Dafür habe die Vaillant Group sehr umfassende Schulungsprogramme aufgesetzt.

Familienunternehmen seien in der Regel langfristig orientiert und denken in Generationen. Die Vaillant Group teile sowohl ihre Vision als auch ihre Strategie mit den Mitarbeitenden, was Authentizität und ein Gefühl der Zugehörigkeit und der Mitverantwortlichkeit vermittelt. Bei einem Familienunternehmen mit gemeinsamen Werten, einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Zukunftsvision und einer langfristigen Strategie zu arbeiten, werde von Bewerberinnen und Bewerbern häufig als entscheidender Vorteil gesehen und als Grund, sich dort zu bewerben.

Zitat: „Die Vaillant Group treibt mit Hochdruck ihre Transformation zu einem führenden Anbieter elektrischer Wärmepumpen voran.“

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Die größten Herausforderungen im Bereich Wärmepumpen liegen in den Feldern Lieferprobleme, Materialmangel und fehlender Nachwuchs. Lieferzeiten von sechs Monaten oder mehr für die Pumpen oder notwendige Komponenten bestätigen auch die Inhaber von Haustechnikfirmen.⁴⁴² Auch der Fachkräftemangel ist nicht kurzfristig zu beheben. Die hohen Preise halten viele Hausbesitzer davon ab, sich eine Wärmepumpe installieren zu lassen, dem soll aber entgegengewirkt werden: Bauministerin Klara Geywitz will, dass über zwei Förderprogramme mit der Staatsbank KfW energetische Stadtsanierung und gebäudeübergreifende Quartierssanierung mitentwickelt werden.^{443, 444, 445} So soll die Umstellung auf Wärmepumpen sozialverträglicher gestaltet werden. Über weitere Maßnahmen wird nachgedacht. Die Wahl des jeweils eingesetzten Kältemittels sollte sich an deren Global Warming Potenzial (GWP) und im Falle von chemischen Zusatzmitteln wie per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) an deren Persistenz orientieren, um mögliche negative Umweltwirkungen zu vermeiden. Diesbezügliche Informationen müssen für den Verbraucher einfach zugänglich sein.

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Der kumulierte Nutzwärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser in Deutschland liegt aktuell bei 780 bis 800 Terawattstunden im Jahr (TWh/a). Erdwärmepumpen bieten das Potenzial, bis zu 75 Prozent dieses Wärmebedarfs, dies entspricht in etwa 600 TWh/a, zu decken.⁴⁴⁶ Seitens

442 Gläser 2022.

443 Focus online 2022.

444 Buhr 2022.

445 Petersdorff 2022.

446 Born et al. 2022.

Um zusätzlichen Stromverbrauch zu verhindern, sollen mehr erdgekoppelte Wärmepumpen eingesetzt werden.

der Politik ist der Einsatz von Geothermie/Wärmepumpen gewollt.⁴⁴⁷ Viele Forschergruppen bei der Leibniz-Gemeinschaft, der Helmholtz-Gemeinschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft beschäftigen sich intensiv mit der Weiterentwicklung dieser Technologie. Auch die Hersteller von Wärmepumpen sind engagiert, zum Beispiel Installateure weiter zu schulen, sodass der Einbau optimal auf die Anforderungen der Kund*innen eingestellt ist. Es ist davon auszugehen, dass diese Form der Wärmeerzeugung/Wärmenutzung in der Zukunft eine deutlich größere Rolle spielen wird. Das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik fordert die Förderung von effizienten Technologien mit dem Ziel, den Anteil erdgekoppelter Wärmepumpen von derzeit knapp 30 Prozent auf rund 50 Prozent der insgesamt verbauten Wärmepumpen zu heben, um einen zusätzlichen Stromverbrauch zu vermeiden.⁴⁴⁸ Auch Frost & Sullivan gehen von einem großen Zuwachs in Deutschland aus. So sollen im Jahr 2030 bereits 4,1 Millionen Wärmepumpen in Deutschland installiert sein (in 2022: 1,6 Millionen).⁴⁴⁹

8. Zusammenfassung

Durch Vorgaben, Förderung und sonstige finanzielle Anreize sind Wärmepumpen nach wie vor im Trend. Die zugrundeliegende Technik ist bereits ausgereift, die technische Umsetzbarkeit weit fortgeschritten. Nun will die Branche noch größeren Wert auf Fortbildungen in den Bereichen Planung und Installation legen, um die technische Umsetzung zu verbessern. Die Zukunftsaussichten sind vielversprechend, da es sich um eine sehr saubere, von der Politik gewollte Technologie handelt und der Einsatz fossiler Energieträger stark reduziert werden kann.

447 Kersting und Stratmann 2022.

448 Ganz 2022.

449 Frost & Sullivan 2022g.



XII. Luftreinhaltung

1. Definition

Die Luftreinhaltung ist ein wesentlicher Bestandteil des Umweltschutzes. Angelehnt an das Bundes-Immissionsschutzgesetz⁴⁵⁰ sind (i) Luftverunreinigungen „Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe und Geruchsstoffe“ und (ii) Luftschadstoffe „Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen“.⁴⁵¹ Zudem werden noch Emissionen (Freisetzung von Luftschadstoffen aus einer Quelle in die Umgebung) und Transmission (ihre Ausbreitung und Umwandlung in der Atmosphäre) unterschieden.⁴⁵²

Die Strategie zur Luftreinhaltung umfasst die Festlegung von Luftqualitätsstandards, emissionsbegrenzende Anforderungen (in der Regel Emissionsgrenzwerte) nach dem Stand der Technik, Produktregelungen sowie die Festlegung von Emissionsminderungsverpflichtungen.⁴⁵³

Im Sinne des siebten Umweltaktionsprogramms der EU soll in Europa langfristig eine Luftqualität erreicht werden, von der keine inakzeptablen Auswirkungen oder Gefahren für Mensch und Umwelt ausgehen.⁴⁵⁴ Luftqualitätsleitlinien der Weltgesundheitsorganisation und der Europäischen Union geben den Staaten bis hin zu den lokal verantwortlichen Kommunen einen Rahmen für die Entwicklung eigener Luftreinhaltepläne. Die Leitlinien werden mittels gesetzlicher Vorgaben, wie Grenzwerten für Luftschadstoffe und technischen Maßnahmen zur Verringerung der Freisetzung von Luftschadstoffen oder der Reinigung von Luft, auf nationaler Ebene umgesetzt.

Wesentliche Luftschadstoffe sind in Deutschland Feinstaub, Ozon und Stickstoffdioxid. Weitere Schadstoffe sind Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, flüchtige organische Verbindungen und Ammoniak, die sowohl zur Feinstaubentstehung in der Atmosphäre beitragen als auch Menschen, Tiere und Pflanzen direkt schädigen.⁴⁵⁵

Hauptsächliche Quellen der Luftverunreinigung sind Energieverbrauch, Straßenverkehr, Landwirtschaft und die Produktion von Gütern.⁴⁵⁶ Verbrennungsmotoren setzen umweltschädliche

450 Bundesamt für Justiz und Verbraucherschutz (BMJV) 2022.

451 Bundesamt für Justiz und Verbraucherschutz (BMJV) 2022, S. 7.

452 Baumbach 1994.

453 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2021.

454 Europäische Union 2013.

455 Umweltbundesamt (UBA) 2023b.

456 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2021.

Stickoxide frei. Bei der Verbrennung von Biomasse und fossilen Brennstoffen entstehen Schwefeloxide, Feinstaub, Stickoxide und zum Teil Schwermetalle. Schwefeldioxyde und Stickoxide verursachen saure Niederschläge, die Boden und Gewässer sowie Gebäude und Industrieanlagen schädigen.

Weit verbreitete Luftverschmutzungen sind neben Gasen Schwebstoffe der Kategorie PM10 (PM = Particulate Matter) mit einem Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer und lungengängiger Feinstaub PM2,5 mit einem Durchmesser kleiner als 2,5 Mikrometer. Sie werden vor allem bei der Verbrennung von Kraftstoffen, in der Industrie und bei der Verbrennung von Biomasse produziert oder fallen als Straßenstaub an.⁴⁵⁷ Auch Viren zählen zu den klassischen Luftverunreinigungen. In Deutschland wurden im Jahr 2020 rund 180 Tonnen Feinstaub mit einer Partikelgröße <10 Mikrometer (PM10) emittiert. Gegenüber dem Jahr 1995 hat sich die emittierte Feinstaubmenge um etwa 50 Prozent verringert.⁴⁵⁸

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Der Europäischen Umweltagentur (EUA) zufolge starben 2020 238.000 Menschen in Europa vorzeitig an Feinstaub;⁴⁵⁹ weltweit sind es gemäß der Weltgesundheitsorganisation sieben Millionen Todesfälle.⁴⁶⁰ Fachleute sind zuversichtlich, dass in Europa bis 2030 55 Prozent der vorzeitigen Todesfälle infolge Feinstaubbelastung durch Luftreinhaltemaßnahmen vermieden werden.⁴⁶¹ Voraussetzung dafür ist eine strikte Umsetzung der 2021 aktualisierten globalen Luftqualitätsleitlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO Air Quality Guidelines). Sie empfehlen eine mittlere jährliche Feinstaub PM2,5-Konzentration von höchstens 5 Mikrogramm pro Kubikmeter (Grenzwert in Deutschland: 10 Mikrogramm pro Kubikmeter) und eine mittlere jährliche Stickstoffdioxid-Konzentration von höchstens 10 Mikrogramm pro Kubikmeter (Grenzwert in Deutschland: 40 Mikrogramm pro Kubikmeter).⁴⁶²

In deutschen Städten und Gemeinden lässt sich bereits ein positiver Trend erkennen. Lagen 2016 noch 90 Städte und Gemeinden über den zulässigen Grenzwerten, waren es im Jahr 2020 weniger als 10.⁴⁶³ Zu einem gewissen Teil ist der starke Rückgang auch der coronabedingten Mobilitätseinschränkung geschuldet. Wesentlich ist aber die Umrüstung der Fahrzeugflotten

457 Almetwally et al. 2020.

458 Statista 2023.

459 Europäische Umweltagentur (EUA) 2022.

460 Weltgesundheitsorganisation (WHO) 2022.

461 Europäische Kommission 2021a.

462 Weltgesundheitsorganisation (WHO) 2021.

463 Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) 2021b.

auf emissionsärmere Autos. Das Ziel der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, die Emissionen des Jahres 2005 auf 55 Prozent im Jahr 2030 zu reduzieren, scheint erreichbar.⁴⁶⁴

Gesundheit ist ein zentrales Schutzgut, das präventiv zu sichern ist. In SDG 3 „Gesundheit und Wohlergehen“ wird explizit die Luftreinhaltung als Maßnahme gegen die Luftverschmutzung adressiert und in SDG 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“ die Reduzierung der städtischen Umweltbelastung pro Kopf mit Fokus auf Luftqualität und Abfallbehandlung gefordert.

Maßnahmen zur Minderung von Schwefelverunreinigungen in der Luft und resultierend sauren Niederschlägen tragen unmittelbar zu den SDGs 14 „Leben unter Wasser“ und 15 „Leben an Land“ bei, die den Schutz von Ozeanen und Meeren sowie Landökosystemen und explizit die Bekämpfung der Bodenverschlechterung und der Versäuerung der Gewässer zum Ziel haben.

Für die Luftreinhaltung ergibt sich ein Co-Benefit aus der Erreichung der Klimaschutzziele (SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“), die eng mit der Reduzierung von Luftschadstoffen verbunden sind (mehr regenerative, saubere Energien, Verzicht auf fossile Brennstoffe).

Luftreinhaltemaßnahmen sind nicht nur in sozialer und ökologischer Hinsicht nachhaltig, sondern auch volkswirtschaftlich lohnend. Für die USA wurde geschätzt, dass der Nutzen aus der geringeren Sterblichkeit, den niedrigeren medizinischen Ausgaben für luftverschmutzungsbedingte Krankheiten und der höheren Produktivität der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer etwa 30-mal größer ist als die Kosten für die Maßnahmen des Clean Air Act (US-amerikanisches Luftreinigungsgesetz) der letzten 30 Jahre.⁴⁶⁵

*Luftreinhaltung
lohnt sich in
volkswirtschaftlicher
Hinsicht.*

3. Märkte und Arbeitsplätze

Die Allgemeine Lufttechnik war 2020 die drittgrößte Teilbranche des deutschen Maschinenbaus.⁴⁶⁶ Sie erwirtschaftete in Deutschland im Jahr 2020 rund 11,7 Milliarden Euro. Dies machte 14,8 Prozent des gesamten Umsatzes für den Umweltschutz aus. Im Vergleich zum Vorjahr stieg der Umsatz der Luftreinhaltung um 10,8 Prozent.⁴⁶⁷ Für 2023 erwartet der VDMA-Fachverband „Allgemeine Lufttechnik“ allerdings nur einen nominalen Zuwachs von 3 Prozent im Vergleich zu 5 Prozent im Jahr 2022.⁴⁶⁸

464 Die Bundesregierung 2021a.

465 Umweltbundesamt (UBA) 2021a.

466 VDMA 2021.

467 Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022b.

468 VDMA 2022.

Auch Umweltschutzinvestitionen in die Elektromobilität haben einen Beitrag zur Luftreinhaltung; 18,8 Prozent betrug ihr Anteil an den gesamten Umweltschutzinvestitionen 2020 in Deutschland.⁴⁶⁹

Hauptsächliche Markttreiber sind strengere Vorschriften zur Luftreinhaltung, aber auch zunehmende Anwenderbranchen und die Sensibilisierung der breiten Masse für die Minderung von Gesundheitsrisiken. Demgegenüber wirken sich der Ausbau erneuerbarer Energien mit sehr geringen Emissionen und ein hoher Kapitalbedarf für die Installation industrieller Luftreinigungssysteme hemmend auf das Wachstum des Markts aus.⁴⁷⁰

Während der weltweit größte Markt im asiatisch-pazifischen Raum infolge zunehmender Industrialisierung neue Anlagen zur Luftreinhaltung nachfragt, bleibt der europäische Markt für die Luftreinhaltung überwiegend ein Markt für Sanierung und Instandsetzung. Infolge der strikten Gesetzgebung sind in Europa bereits flächendeckend Anlagen – insbesondere im Bereich der Kohlekraftwerke, Zement-, Chemie- und Metallindustrie – zur Luftreinhaltung installiert.⁴⁷¹

In der Luftreinhaltung wird zwischen Innenraum- und Außenraumanwendungen unterschieden. Filterlösungen im Innenraumbereich, die infolge von Corona einen Innovationsschub und ein Nachfragehoch erfahren haben, sind in zunehmendem Maße neben den mit hoher Wirksamkeit abscheidenden „high-efficiency particulate air“ (HEPA)-Filtern die UV-basierte Desinfektion und Ionisation.⁴⁷²

Im Zuge einer fortschreitenden Digitalisierung steigt auch die Nachfrage nach Produkten für Rechenzentren und Server. Insbesondere für Anbieter qualitativ hochwertiger Systemlösungen ist dort ein wachsender Markt zu erwarten.⁴⁷³

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 78 Unternehmen unter dem Stichwort „Luftreinhaltung*“ zu finden (Stand: 3.11.2022):

- 0 AGs
- 71 GmbHs

469 Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022a.

470 MordorIntelligence 2021.

471 Global Energy & Environment Research Team at Frost & Sullivan 2018.

472 Frost & Sullivan 2021.

473 VDMA 2021.

- 0 vollhaftende Personengesellschaften
- 6 teilhaftende Personengesellschaften
- 1 Einzelunternehmen

Die MANN+HUMMEL GmbH ist ein innovativer, in Familienbesitz befindlicher Hersteller für Filtersysteme zur Luftreinhaltung. Das Unternehmen leitet gegenwärtig das Forschungsprojekt AeroSolfid, das einen schnelleren Übergang hin zu einer sauberen Mobilität und einer gesünderen Umgebungsluft ermöglichen soll.

5. Interview

MANN+HUMMEL GmbH, Jan-Erik Raschke (Director Public Affairs MANN+HUMMEL):

Die Hauptaufgabe der Luftreinhaltung sei es, „Nützliches vom Schädlichen zu trennen und das in jedem Fluid [...] zum Wohle von Mensch und Umwelt“. Die Firma MANN+HUMMEL beschäftigt 23.000 Mitarbeitende im Bereich der Filtration, die sich diesem Ziel verpflichtet fühlten und den bestmöglichen Zustand der Umwelt herstellten und erhalten wollten.

Herr Raschke ist der Meinung, dass Filtration per se nachhaltig sei, da sie Luft und Wasser in einer Qualität sichere, die ein gesundes Leben von Geburt bis ins Alter ermögliche. „Durch die Corona-Pandemie ist das Thema Aerosole und Luftreinhaltung zentral in den Fokus gerückt, da alle Menschen von der Problematik betroffen waren.“

MANN+HUMMEL habe bereits 2022 eine Stabsstelle für Nachhaltigkeit besetzt, verfasse seit vielen Jahren Nachhaltigkeitsberichte und ermittele den CO₂-Fußabdruck. In der Produktion solle die Nachhaltigkeit unter anderem durch den verstärkten Einsatz von Rezyklaten erhöht werden.

Die Stärkung von Netzwerken und ein aktiver Dialog mit politischen Stakeholdern ist Herrn Raschke ein Anliegen. Er will regulatorische Aspekte gezielt mit technologischen Lösungsmöglichkeiten verknüpfen und Prozesse beschleunigen. „Technologie und Digitalisierung entwickeln sich sehr schnell, die Regulatorik jedoch meist eher langsam.“ Luftreinhaltepläne wirken langfristig, MANN+HUMMEL biete jedoch Lösungen, die sofort und vor allem zielgerichtet beispielsweise an innerstädtischen Feinstaub-Hotspots einsetzbar seien.

Herr Raschke betont die Beschleunigung und Optimierung infolge der erzeugten Transparenz als wesentlichen Vorteil der Digitalisierung. Die Kombination von digitalen Modellen (z. B. digitale Zwillinge) und physikalischen Mustern erhöhe die Geschwindigkeit bei Bauteilentwicklung

und Prototypenfertigung sowie die Energie- und Ressourceneffizienz. „Dadurch können wir auch in den Dialog mit den Lieferant*innen gehen und die Herstellbarkeit überprüfen.“ Predictive Maintenance optimiere die Standzeit von Anlagen und Produkten.

In seinen vier digitalen Hubs betreibe MANN+HUMMEL auf nationaler und internationaler Ebene Forschung, stärke strategisch und disziplinübergreifend die Zusammenarbeit mit der Wissenschaft und entwickle digitale Geschäftsmodelle.

Für Herrn Raschke ist das Prinzip eines Familienunternehmens, das von einer auf die nächste Generation übertragen wird, gelebte Nachhaltigkeit. Familienunternehmen verfolgen in der Regel eher langfristige Strategien, da sie für die Shareholder zumeist keine kurzfristige Dividende erwirtschaften müssten, sondern mit Beharrlichkeit und Ausdauer langfristige Ziele verfolgen könnten.

Die Anpassungsfähigkeit des Familienunternehmens MANN+HUMMEL zeige sich auch darin, dass es sich im Tätigkeitsschwerpunkt Mobilität als Konsequenz aus der Mobilitätswende flexibel neu ausgerichtet habe. Das Produktportfolio im Bereich Automotive werde beispielsweise um Bremsstaubpartikelfilter und Frontfilter zur Reduktion von Nichtabgasemissionen erweitert.

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Energie- und Ressourceneffizienz, neue Anforderungen im Umwelt-, Klima- und Arbeitsschutz sowie die Digitalisierung sind die zukünftigen Herausforderungen der Luftreinhaltungsbranche.

Die von der Bundesregierung forcierte Energiewende zwingt die Branche der Luftreinhaltung dazu, sich neu am Markt zu orientieren, da mit den Kohlekraftwerken ein umsatzstarkes Segment der Luftreinhaltung in den nächsten Jahrzehnten zumindest in Deutschland und Europa zugunsten alternativer und vor allem auch sauberer Energien deutlich reduziert wird.

Auch die Mobilitätswende erfordert eine Anpassung der Produktportfolios, da mittel- bis langfristig Filtertechnologien speziell für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren nicht mehr nachgefragt werden. Diese Entwicklung kann aber auch als Chance für neue innovative technische Lösungen betrachtet werden. Das Forschungsprojekt ZEDU befasst sich beispielsweise mit der Entwicklung emissionsfreier Autos⁴⁷⁴, wobei auch Reifen- und Bremsabrieb vollständig abgefangen werden.⁴⁷⁵

*Die Energie- und
Mobilitätswende
als Chance für neue
Märkte sehen*

474 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) 2022.

475 ADAC 2022.

Allerdings wird die Neuausrichtung der Branche stark durch die mangelnde Verfügbarkeit von Material und Vorprodukten gehemmt. Gestörte Lieferketten und Ausfälle von Produktionskapazitäten infolge der Corona-Pandemie und der Ukraine-Krise bedingen einen höheren Logistikaufwand.⁴⁷⁶

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Den Rahmen und die Motivation für Innovationen in der Branche der Luftreinhaltung geben vor allem internationale und nationale Gesetze, Verordnungen und Verwaltungsvorschriften. Die Europäische Kommission hat in den letzten Jahren diverse Vorschriften erlassen, zum Beispiel die NEC-Richtlinie 2016/2284/EU (NEC: National Emission Reduction Commitments) über nationale Emissionsminderungsverpflichtungen.⁴⁷⁷ In Deutschland wurde die NEC-Richtlinie im Jahr 2019 in das nationale Luftreinhaltprogramm mit einem Fokus auf Feinstaub umgesetzt und resultierte im August des Jahres 2021 unter anderem in der neuen „Technischen Anleitung Luft (TA Luft)“.⁴⁷⁸ Sie ist das zentrale behördliche Instrument zur Begrenzung von Luftschadstoffemissionen der rund 50.0000 genehmigungsbedürftigen Anlagen in Deutschland.⁴⁷⁹

Die neuen regulatorischen Rahmenbedingungen verändern technische Anforderungen und eröffnen Möglichkeiten für technologische Innovationen und die Erschließung neuer Märkte. Technologische Innovationen werden vor allem von der Digitalisierung erwartet, zum Beispiel Systeme mit Remote-Zugang, Bewegungssensoren, KI-Anwendungen, Internet der Dinge und Predictive Maintenance.⁴⁸⁰

Generell gewinnt die Luftqualität in Innenräumen zunehmend an Bedeutung. Bei den Innenraumanwendungen sind herausragende technische Trends neue Katalysatoren für energieeffiziente Anwendungen, bio-basierte Luftreinhaltetechnologien zur Entfernung vielfältiger Verunreinigungen und nanostrukturierte Katalysatoren für eine höhere Effizienz bei der Abluftreinigung. Innovative Geschäftsmodelle setzen im Bereich der Innenraumanwendungen mehr auf die Wartung von Filterprodukten als auf ihren Verkauf.

476 VDMA 2021.

477 Mager 2022.

478 Die Bundesregierung 2021c.

479 Die Bundesregierung 2021c.

480 Frost & Sullivan 2021.

Virenfilter

Im Zuge der Corona-Pandemie haben sich stationäre raumluftechnische Anlagen zur Luftreinigung von Partikeln oder Mikroorganismen als nachhaltige Maßnahme zur Verbesserung der Innenraumlufthygiene herausgestellt. Sie können sowohl zentral als Filtersystem für Gebäude oder auch dezentral für einzelne Räume verbaut werden.⁴⁸²

Die Luftreinigung unterscheidet drei verschiedene Technologien:

- **Filtertechnologie**

Um die bestmögliche Effizienz einer Filteranlage zu erreichen, sollten hocheffiziente Gewebefilter der Klasse H13 oder H14 (HEPA-Filter) in dem Gerät eingebaut sein. Für die Klasse H13 liegt der „Normabscheidegrad“ von Partikeln bei >99,95 Prozent.

- **UV-C Technologie**

Bakterien und Viren können durch die UV-C-Strahlung inaktiviert werden, weshalb diese Technik in Laboren schon fest etabliert ist. Voraussetzung für diese Technologie ist eine optimale Luftzirkulation. Zudem muss gewährleistet werden, dass das UV-Licht nicht im Raum freigesetzt wird, da dies ein Sicherheitsrisiko darstellen kann.

- **Ionisations- und Plasmatechnologie**

Auch diese Technologie ist in der Lage, Mikroorganismen zu inaktivieren, weshalb sie bereits seit vielen Jahren in Luftreinigungsanlagen genutzt wird. Die Geräte sind wartungsärmer als die Filtertechnologie, da keine Filter vorhanden sind, die ausgetauscht werden müssen.⁴⁸³

Weitere Anwendungsfelder für innovative Hersteller von Luftreinhaltetechnologien bietet die Euro-7-Norm, die 2025 in Kraft treten soll. Neben verschärften Vorgaben für den Ausstoß von Verbrennungsabgasen werden erstmals auch Grenzwerte für Partikel beziehungsweise Mikroplastikemissionen von Bremsen und Reifen festgelegt.⁴⁸³

Zusammen mit der Firma MANN+HUMMEL GmbH hat der Fahrzeughersteller Audi AG ein Pilotprojekt gestartet, bei dem ein äußerlich angebrachter Filter im Vorderwagen den Feinstaub

481 Umweltbundesamt (UBA) 2021c.

482 Umweltbundesamt (UBA) 2022d.

483 ADAC 2022.

aus der Umgebung aufnimmt. Dabei wird nicht nur der selbst produzierte Feinstaub gefiltert, sondern auch die Verunreinigungen von anderen Fahrzeugen. Je nach Nutzungsszenario ist der Filter in der Lage, die eigenen Emissionen komplett zu filtern.⁴⁸⁴

8. Zusammenfassung

Während die Luftqualität in Ländern mit hohem Einkommen wie Deutschland immer besser wird, nimmt sie in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen infolge von Urbanisierung und Industrialisierung sogar noch ab. SDG 3 „Gesundheit und Wohlergehen“ erscheint dort auch auf lange Sicht unerreichbar, obwohl bekannt ist, dass die volkswirtschaftlichen Kosten durch die Beeinträchtigungen von Luftverunreinigungen erheblich höher sind als die zu ihrer Bekämpfung.⁴⁸⁵

„Smarte“ spezialisierte Luftreinhaltssysteme, die das Internet of Things (IOT) oder KI nutzen, bieten innovativen Familienunternehmen Wachstumschancen auf den tendenziell gesättigten Märkten in Europa. Die Corona-Pandemie hat technische Innovationen im Bereich der Lufthygiene stimuliert, beschleunigt und neue Absatzmärkte wie zum Beispiel Schulen eröffnet.

Sowohl die Energie- als auch die Mobilitätswende erfordern je nach Marktsegment eine Neuausrichtung der Familienunternehmen in der Luftreinhaltung. Technische Innovationen sind im Bereich Automotive in Zukunft weniger bei Abgasemissionen als beim Partikelantrieb von Reifen und Bremsen gefragt.

Die Gesetzgebung ist nach wie vor der zentrale Treiber für den Markt der Luftreinhaltung. Allerdings erscheint die simple Festlegung von gesetzlichen Maximalkonzentrationen für Immissionswerte nicht mehr geeignet, die Bevölkerung bestmöglich zu schützen, da nach ihrem Erreichen wenig Anreiz für eine weitere Absenkung der Luftschadstoffkonzentrationen besteht. Die Weltgesundheitsorganisation schlägt stattdessen einen Paradigmenwechsel in der Luftqualitätsregulierung hin zum Konzept einer Kombination fester Grenzwerte mit einer kontinuierlichen Senkung der immer noch zu hohen durchschnittlichen Belastung vor.⁴⁸⁶

484 Audi 2022.

485 Kopal und Wittowsky 2022.

486 Umweltbundesamt (UBA) 2021a.



XIII. Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung

1. Wirkungsprinzip

Wasseraufbereitung ist eine Verfahrenstechnik, die mechanische, chemische und biologische Behandlungen nutzt, um Rohwasser so aufzubereiten, dass es den Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes genügt. Der Begriff Abwasserbehandlung beschreibt die Vorgänge, die notwendig sind, um durch häuslichen, gewerblichen, industriellen oder landwirtschaftlichen Gebrauch in seinen Eigenschaften verändertes Wasser sowie das bei Trockenwetter damit zusammen abfließende Schmutzwasser und auch das bei Niederschlägen von bebauten oder befestigten Flächen abfließende Niederschlagswasser aufzubereiten.

Je nach Wasserqualität und dem zugrundeliegenden Anforderungsprofil kommen unterschiedliche physikalische, biologische und chemische Verfahrenstechniken zur Reinigung des verunreinigten Wassers zur Konditionierung bestimmter Wässer oder zur Rückgewinnung von Wertstoffen zum Einsatz. Bei den Verunreinigungen kann es sich um Keime, Schadstoffe, Eisen, Mangan, Kalk oder Ähnliches handeln; zu den eingesetzten Reinigungsverfahren gehören unter anderem Filtration (Grob-, Mikro-, Ultra- und Nanofiltration), Adsorption, Desinfektion, Chlorierung, Entkalkung, Enteisenung oder Denitrifikation.⁴⁸⁷

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Um die Qualität des Wassers zu erhalten, werden alle Abwässer zunächst von Schmutz und Schadstoffen befreit, bevor sie wieder in den Wasserkreislauf gelangen. Dieses Vorgehen dient als Schutz für die natürlichen Gewässer, welche Lebensraum einer Vielzahl von Pflanzen und Tieren sind⁴⁸⁸, und für das Trinkwasser. Durch Wasseraufbereitung werden unter anderem die Abwasserent- sowie die Trinkwasserversorgung sichergestellt. Dadurch wird ein Beitrag zu SDG 3 „Gesundheit und Wohlergehen“ sowie zu SDG 6 „Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen“ geleistet.

In der industriellen Produktion werden zum Teil Prozess- und Abwässer aufbereitet und wiederverwendet. Diese Ressourcensparmaßnahme adressiert direkt SDG 9 „Industrie, Innovation und Infrastruktur“.

Zudem ergibt sich aus den Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele (SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“) ein zusätzlicher Vorteil bei der Wasseraufbereitung, da die Verknappung von Wasserreserven infolge des Klimawandels entschärft wird.

487 Baur et al. 2019.

488 Umweltbundesamt (UBA) o. J. a.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Mehr als 99 Prozent der privaten Haushalte in Deutschland sind an die öffentliche Wasserversorgung und 97,3 Prozent an eine der 8.891 Abwasserbehandlungsanlagen angeschlossen. Das deutsche Trinkwasser ist das am sorgfältigsten überwachte Lebensmittel.⁴⁸⁹ Die Germany Trade & Invest geht von einem jährlichen Wachstum der Wasserwirtschaft von mehr als 6 Prozent aus, was bedeutet, dass das Marktvolumen bis 2030 bei rund 78 Milliarden Euro liegen wird. Darüber hinaus ist Deutschland mit einem Volumen von 1,18 Milliarden Euro für Wasser- und Abwassertechnologien im Jahr 2021 der größte Exporteur von Wasseraufbereitungstechnologien in Europa.⁴⁹⁰

Laut Statista waren im Jahr 2021 rund 28.100 Mitarbeitende im Bereich Wasserversorgung in Deutschland tätig; die Zahlen sind in der letzten Dekade nahezu konstant geblieben.⁴⁹¹

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 1.767 Familienunternehmen unter den Stichwörtern „Wasseraufbereitung*“ und „Abwasserbehandlung*“ zu finden (Stand 4.11.2022).

- 28 AGs
- 1.367 GmbHs
- 10 vollhaftende Personengesellschaften
- 278 teilhaftende Personengesellschaften
- 84 Einzelunternehmen

Im Jahr 2020 waren im Bereich Wasseraufbereitung/Abwasserbehandlung 23.600 Mitarbeitende in den Rechtsformen AG, GmbH, voll- und teilhaftende Personengesellschaften sowie Einzelunternehmen beschäftigt und damit rund 4.000 weniger als 2019.⁴⁹²

Die Unternehmen der Branche sind gemäß nachfolgender Karte einigermaßen gleichmäßig über Deutschland verteilt.

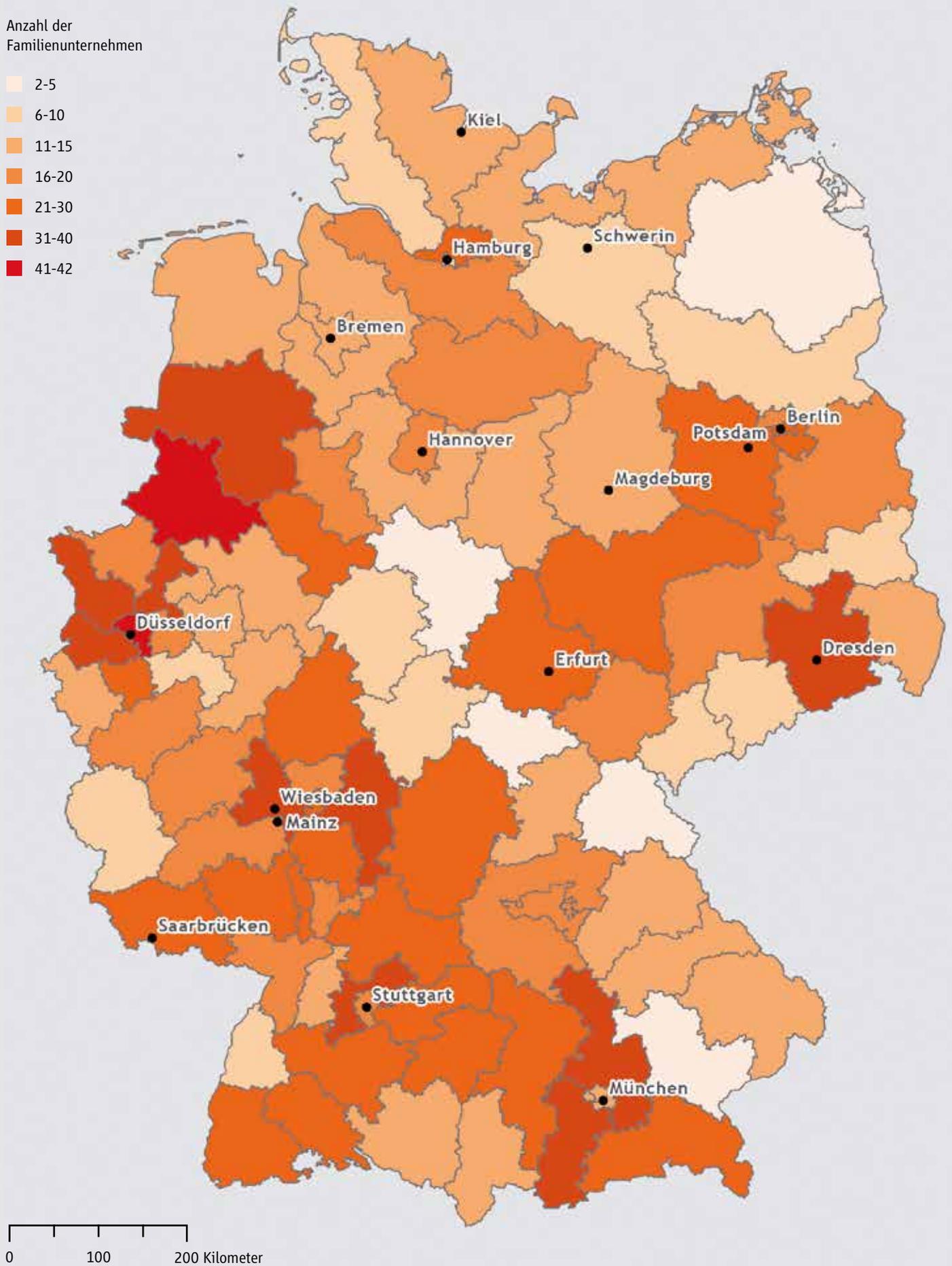
489 Umweltbundesamt (UBA) 2022j.

490 Germany Trade & Invest (GTAI) 2023.

491 Statista Research Department 2022a.

492 Statista Research Department 2022b.

Abbildung 18: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Abwasser- und Wasserbehandlungsbranche (nach Postleitzahlen)



Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

Die über 150 Jahre alte Huber-Gruppe ist eines von ihnen und beschäftigt mehr als 1.300 Mitarbeitende in rund 60 Ländern, davon über 800 Mitarbeitende am Stammsitz in Berching-Erasbach. Die Huber-Gruppe hat mehr als 50.000 Anlagen zur Abwasserreinigung, Wasseraufbereitung und Schlammbehandlung installiert und ist einer der bedeutendsten Vertreter dieser Branche.

5. Interview

Huber SE, Georg Huber (Vorstandsvorsitzender):

Die Huber SE – so Herr Huber – trage per se zur ökologischen Nachhaltigkeit durch Produkte zur Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und Trinkwasseraufbereitung bei, befasse sich mit der Rückgewinnung von Energie und der Aufbereitung von Reststoffen. Herr Huber betrachtet das hauptsächliche Arbeitsmedium Abwasser nicht als Abwasser, sondern als Wertstrom.

Darüber hinaus reduziere das Unternehmen, wo möglich, seinen Ressourcenverbrauch, verfolge den Lebenszyklus seiner Produkte und erstelle regelmäßig einen freiwilligen Nachhaltigkeitsbericht.

„Das Ziel war, das Thema Nachhaltigkeit ökonomisch, ökologisch und sozial in das Unternehmen einzubringen, bei den Mitarbeitern, den Vorgesetzten und natürlich in den gesamten Prozessen, bei den Innovationsprozessen, bei der Ansprache von Kunden, aber auch beim ganzen HR-Thema [HR: Human Resources].“

Neben einer intrinsischen Motivation entspräche die Huber SE durch die praktische Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele auch den Wünschen von Kunden und (neuen) Mitarbeitenden.

Obwohl Herr Huber die Branche seines Unternehmens tendenziell als konservativ und von gesetzlichen Rahmenbedingungen getrieben einschätzt, nehme Huber SE Förderprogramme zur gezielten Entwicklung neuer Technologien in Anspruch.

Herr Huber beschreibt die Vorteile von Familienunternehmen wie Huber SE wie folgt: Langjährige Mitarbeiterbindung, vertrauensvolle Zusammenarbeit, langfristige Strategien, „weniger Politik“, teils weniger Konkurrenzdenken und Standorttreue.

Die Digitalisierung sei – nicht zuletzt auch der Pandemie geschuldet – im Arbeitsalltag bei Huber SE angekommen und habe nicht nur durch die Möglichkeit zum Homeoffice, sondern auch durch neue Fernwartungssysteme dazu beigetragen, die Nachhaltigkeit des Unternehmens

zu stärken. Reisen entfielen; die Transparenz werde erhöht und die Kommunikation mit den Kunden erleichtert. Die digitale Transformation könne aber – betont Herr Huber – nur gelingen, wenn die „Mitarbeiter mitgenommen werden“ und die Datensicherheit gewährleistet sei.

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches DVGW bezeichnet Trinkwasser als „das Lebensmittel Nummer eins“, was die Wichtigkeit einer hohen Wasserqualität deutlich macht.⁴⁹³ Der Schutz von Ressourcen und Gewässern zählt zu den größten Herausforderungen in Zeiten des Klimawandels. Wasserknappheit und damit einhergehende Konkurrenz um die begrenzten Wasserressourcen werden durch den Klimawandel mit seinen Extremwetterereignissen verschärft.⁴⁹⁴

Die Bundesregierung veröffentlichte im Juli 2022 die Nationale Wasserstrategie, in der die öffentliche Wasserversorgung als Teil der Daseinsvorsorge bezeichnet wird.⁴⁹⁵ Als die zwei größten Herausforderungen werden in diesem Bericht die Sicherung der Trinkwasserqualität in Zeiten der Klimakrise mit ihren Trocken- und Starkregenepisoden, zunehmend austrocknenden Böden und sinkenden Grundwasserspiegeln sowie die Verschmutzung des Grundwassers, der Flüsse und der Seen durch Nitrat und Phosphor und diverse andere Stoffe genannt.⁴⁹⁶

Am 15.03.2023 wurde bereits eine neue Nationale Wasserstrategie⁴⁹⁷ verabschiedet, was auf die hohe Relevanz und Dynamik des Themas Wasser in Deutschland hinweist. Die 78 Maßnahmen des Aktionsprogramms zur Nationalen Wasserstrategie sollen schrittweise bis 2030 umgesetzt werden. Die Strategie gliedert sich in die zehn Strategischen Themen:⁴⁹⁸

- Den naturnahen Wasserhaushalt schützen, wiederherstellen und dauerhaft sichern – Wasserknappheit und Zielkonflikten vorbeugen.
- Gewässerträgliche und klimaangepasste Flächennutzung im urbanen und ländlichen Raum realisieren.
- Nachhaltige Gewässerbewirtschaftung weiterentwickeln – guten Zustand erreichen und sichern.
- Risiken durch Stoffeinträge begrenzen.

493 Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches / DVGW) 2022.

494 Unicef 2022.

495 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2022a.

496 Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches /DVGW); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) 2022.

497 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2023.

498 Umweltbundesamt (UBA) 2023c.

- Wasserinfrastrukturen klimaangepasst weiterentwickeln – vor Extremereignissen schützen und Versorgung gewährleisten.
- Wasser-, Energie- und Stoffkreisläufe verbinden.
- Leistungsfähige Verwaltungen stärken, Datenflüsse verbessern, Ordnungsrahmen optimieren und Finanzierung sichern.
- Meeresgebiete (Nord- und Ostsee) intensiver vor stofflichen Einträgen vom Land schützen.
- Bewusstsein für die Ressource Wasser stärken.
- Gemeinsam die globalen Wasserressourcen nachhaltig schützen.

Die Aktionsprogramme sind auch eine Reaktion auf zunehmende Nutzungskonflikte, die zum Teil sogar durch die Energiewende provoziert werden. Beispielsweise konkurriert die Wasserstoffelektrolyse mit Haushalten, der Landwirtschaft und Industrie um die Ressource Wasser (siehe Kapitel D.VI).

Weiterhin sind auch die Energiekosten zunehmend ein Thema in der Wasserwirtschaft. So benötigen Kläranlagen circa 20 Prozent des Energiebedarfs einer Kommune. Das große Ziel ist somit die Schaffung einer weitgehenden Energieautarkie.⁴⁹⁹

Der Einsatz moderner digitaler Technologien in der Wasserwirtschaft ist unabdingbar geworden. Nur mit ihrer Hilfe können die Daten über den Zustand von Gewässern und aktuelle Entwicklungen erhalten und ausgewertet werden.⁵⁰⁰

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Die Wasser- und Abwasserbranche begegnet der Klimakrise mit technischen Innovationen und neuen wasserwirtschaftlichen Ansätzen. Starkregenereignisse führen beispielsweise zu einer temporären extremen hydraulischen Last und Überlastung der Entwässerungssysteme; Städte werden überschwemmt. Innovative Ansätze zum Regenwassermanagement nutzen Vorhersagemodelle für das Wetter, hydraulische Modelle und Echtzeitsensorik, um die Wassermassen möglichst gleichmäßig und weiträumig auf alle Entwässerungssysteme zu verteilen und Überflutungen zu verhindern. Solche Maßnahmen im urbanen Raum werden unter dem

Um Starkregenereignissen besser begegnen zu können, setzt die Branche auch auf Digitalisierung.

⁴⁹⁹ Emschergenossenschaft Lippeverband (EGLV) 2022.

⁵⁰⁰ Umweltbundesamt (UBA) 2022i.

Begriff „Schwammstadt“ zusammengefasst und beinhalten neben lokalen Drainagesystemen (Mulden-Rigolen-Systemen⁵⁰¹) auch die Flächenentsiegelung.^{502, 503}

Viele Gebiete Deutschlands sind von dem anderen Wetterextrem betroffen – extremer Trockenheit. Die Bedrohung durch akute Wassernot wertet die Ressource Wasser stark auf und treibt einen Paradigmenwechsel voran.⁵⁰⁴ So wird Abwasser weniger als Abfall betrachtet, sondern als Wertstoff, der entsprechend aufgereinigt direkt zur Bewässerung in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann.⁵⁰⁵ Dies forciert die Entwicklung und Umsetzung der erforderlichen Technologien zur Entfernung von Spurenstoffen und Keimen und bietet den technologieorientierten Unternehmen (z. B. Filtertechnik, Entkeimungstechnologien) Wachstumsimpulse.⁵⁰⁶ Gleiches gilt für Anbieter von Systemen zur Abwasseraufbereitung, die die Rückgewinnung von Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff ermöglichen.

Der Sektor der industriellen Wasser- und Abwasseraufbereitung profitiert von gesetzlichen Anforderungen an nachhaltiges Wirtschaften (Taxonomie⁵⁰⁷, CSR⁵⁰⁸), die die Industriekunden zu Wassersparmaßnahmen motivieren. Innovative prozessintegrierte Technologien (z. B. maßgeschneiderte Ionentauscher oder elektrisch getriebene Prozesse wie die Elektrodialyse)⁵⁰⁹ und Strategien zum Wasserrecycling, wie zum Beispiel der ZLD-Ansatz, werden zunehmend Produktionsprozesse verändern.⁵¹⁰

501 Mulden-Rigolen-System: Der Straßenabfluss wird einer begrünten Versickerungsfläche, Mulde oder Tiefbeet genannt, zugeführt. Das Wasser versickert durch die Oberbodenschicht in eine darunter liegende „Rigole“ und wird durch die Bodenpassage weitgehend gereinigt.

502 Umweltbundesamt (UBA) 2018.

503 Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2015.

504 Deutscher Wetterdienst (DWD) 2022.

505 Umweltbundesamt (UBA) 2021e.

506 Umweltbundesamt (UBA) 2021d.

507 Die EU-Taxonomie ist ein regulatorisches Programm, welches im Sinne des European Green Deal nachhaltige Investitionen innerhalb der europäischen Wirtschaft fördert (Envoria o. J.).

508 Die Corporate Social Responsibility (CSR) ist eine Unternehmensführung mit ökonomischer, ökologischer und sozialer Verantwortung, welche die nachhaltige Entwicklung fördern soll (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) 2023).

509 Landgraf 2020.

510 DECHEMA e.V. 2015.

Exkurs: Zero Liquid Discharge

ZLD bezeichnet Abwasserbehandlungsprozesse in der Industrie, bei dem kein flüssiger Stoffstrom mehr in Gewässer oder die Kläranlage im Einzugsgebiet abgegeben wird. Oft werden am Ende konventioneller Aufbereitungsprozesse Membranverfahren sowie mehrstufige Verdampfungs- und Kristallisationsprozesse eingesetzt, um das Wasser eines Abwasserstroms nahezu vollständig wiederzuverwenden und seine Inhaltsstoffe als Feststoffe abzuscheiden und zu entsorgen.⁵¹² Das Familienunternehmen Wehrle-Werk AG hat beispielsweise 2020 für ein Kosmetikunternehmen das ZLD-Prinzip realisiert, sodass keine Abwässer mehr zu beseitigen sind.⁵¹³ ZLD-Prozesse helfen Trinkwasser zu sparen (Beitrag zu SDG 6 „Sauberes Wasser“), sind aber zum Teil sehr energieintensiv und können sich in solchen Fällen negativ auf SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“) auswirken.

Bei der Digitalisierung sind mittlerweile viele Ansätze wie zum Beispiel die vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance) realisiert. Besonders wichtig ist nun die Anpassung der Ausbildungsstandards und der Weiterbildungskonzepte für die Fachkräfte im Hinblick auf den Einsatz digitaler Medien, wie es die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall dringend empfiehlt.^{513, 514} So kann beispielsweise die sensorgestützte Prozesssteuerung im Bereich Abwasseraufbereitung eine gute Unterstützung umwelttechnisch relevanter Anlagen sein.⁵¹⁵ In einer Studie von Frost & Sullivan wird für Deutschland die Optimierung der Digitalisierung dieser Branche als besonders attraktive Zukunftsmöglichkeit herausgestellt.⁵¹⁶

8. Zusammenfassung

Die Hauptthemen im Bereich der Wasseraufbereitung/Abwasserbehandlung sind die Digitalisierung und die Folgen des Klimawandels. Die Nachhaltigkeitsziele in Bezug auf Wasserqualität und -quantität sind eng verknüpft mit den Klimazielen und der nachhaltigen Produktion.

Während in Deutschland bisher im Wesentlichen die Qualitätssicherung von Wasser, zum Beispiel Entfernung von Nitrat und Spurenstoffen, der Treiber für Innovationen in der Wasser- und Abwassertechnik war, sind in zunehmendem Maße smarte technologische Ansätze

511 Date et al. 2022.

512 Weissroth 2020.

513 Umweltbundesamt (UBA) 2022i.

514 Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) o. J.

515 Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) 2023.

516 Frost & Sullivan 2022e.

gefragt, die Wertstoffe aus dem Abwasser zurückgewinnen, Wasser recyceln und das städtische Wassermanagement optimieren.

Den Ergebnissen von Studien von Frost & Sullivan und der Einschätzung der wohl wichtigsten Vereinigung in dieser Branche, der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) folgend, sind die Unternehmen gut für die Zukunft aufgestellt.^{517, 518, 519, 520} Die Politik will an entsprechenden Stellen fördern (z. B. im Programm „Forschung für Nachhaltigkeit [FONA]“), sodass nicht davon auszugehen ist, dass hier Trends nicht erkannt oder zu spät angegangen werden.

517 Frost & Sullivan 2022b.

518 Frost & Sullivan 2022e.

519 Frost & Sullivan 2022d.

520 Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) 2017.



XIV. Biotechnologie

1. Definition

Als interdisziplinäre, angewandte Wissenschaft und Querschnittstechnologie vereinigt die Biotechnologie viele verschiedene Fakultäten, wie zum Beispiel (Bio-)Chemie, (Molekular- und Mikro-)Biologie, Medizin sowie diverse Ingenieurwissenschaften mit dem Fokus auf der Modifizierung lebender Organismen sowie Prozessen und Systemen für die Entwicklung innovativer biotechnologischer Produkte.⁵²¹ Zu Beginn wurden Mikroorganismen eingesetzt, um Bier, Wein und Brot herzustellen, heute werden mit ihrer Hilfe neue Medikamente, Pflanzen, Waschmittel und vieles mehr entwickelt.⁵²² Um die verschiedenen Fachbereiche voneinander abzugrenzen, wird zwischen der roten (Medizin und Pharmazie), der grünen (Landwirtschaft), der weißen (Industrie) und der grauen Biotechnologie (Umweltdiagnostik) unterschieden.⁵²³

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Mit Hinblick auf die Klimaziele kann die Biotechnologie dabei helfen, sich von fossilen Rohstoffen abzuwenden. Dies gilt sowohl für die Energiegewinnung als auch für die Herstellung alltäglicher Produkte. Eine kreislauforientierte, auf biogenen Rohstoffen basierende Wirtschaft kann konzipiert werden.⁵²⁴ Dazu gehört zum Beispiel die Herstellung von Biogas aus (Rest-) Biomasse, aber auch von Bioethanol, welches durch eine von Mikroorganismen ausgelöste Gärung kohlenhydrathaltiger Pflanzen entsteht.⁵²⁵ Als ein weiteres Beispiel sei hier auch der Zusatz von Enzymen zu Waschmitteln genannt, die es ermöglichen, schon bei niedrigeren Temperaturen dieselben Ergebnisse im Hinblick auf Sauberkeit zu erzielen.⁵²⁶

In der Medizin hat die Biotechnologie einen starken Nutzen. Viele Produkte wie Penicillin, verschiedene Impfstoffe sowie Tests zum Nachweis verschiedener Krankheiten werden biotechnologisch hergestellt. Auch im Bereich der Nahrungsmittelindustrie ist die Biotechnologie präsent – sei es bei der Bier- und Weinfermentation, der Brot- und Käsebereitung oder bei der Haltbarkeitsverlängerung von Nahrungsmitteln.⁵²⁷

Die Biotechnologie als etablierte Umwelttechnologie zahlt bereits seit Jahrzehnten auf folgende SDGs ein:

521 Frost & Sullivan 2022c.

522 biotechnologie.de 2023.

523 Reineke und Schlömann 2020b.

524 Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) 2022.

525 Reineke und Schlömann 2020a, 604 ff.

526 Buttlar et al. 2020b, 337.

527 Buchholz und Collins 2022.

- SDG 2 „Kein Hunger“: Durch gesündere und produktivere Nutzpflanzen kann die Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung sichergestellt werden.
- SDG 3 „Gesundheit und Wohlergehen“: Mit Hilfe von Biotechnologien können Medikamente und Impfstoffe entwickelt werden, um Krankheiten gezielt zu bekämpfen.
- SDG 6 „Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen“: Der Einsatz von Bakterien und Pflanzen in Abwasser kann dazu beitragen, dieses von chemischen Belastungen zu säubern.
- SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“: Biokraftstoffe, welche aus einer Vielzahl von erneuerbaren Rohstoffen produziert werden, stellen eine saubere und nachhaltige Energiequelle dar.
- SDG 12 „Nachhaltige/r Konsum und Produktion“: Innovationen in der weißen Biotechnologie können für einen verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen sorgen.
- SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“: Biokraftstoffe oder gentechnisch veränderte Pflanzen können Treibhausgasemissionen vermindern.
- SDG 15 „Leben auf dem Land“: Innovationen in der Biotechnologie ermöglichen eine präzisere Schädlingsbekämpfung, wodurch die Biodiversität besser erhalten wird.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Gemäß dem Deutschen Biotechnologie-Report existierten im Jahr 2021 774 Biotech-Unternehmen, von denen 750 den Privatunternehmen und 24 den börsenorientierten Unternehmen zuzuordnen sind.⁵²⁸ Im Vergleich zum Vorjahr verzeichnen die nicht-börsennotierten Unternehmen einen Zuwachs von einem Prozent und die börsenorientierten Unternehmen von vier Prozent. Im Jahr 2021 waren in Deutschland 44.565 (plus 16 Prozent im Vergleich zu 2020) Mitarbeitende in dem Bereich der Biotechnologie tätig. Diese Unternehmen erzielten zusammen einen Umsatz von 26,32 Milliarden Euro. Dadurch kam es innerhalb eines Jahres zu einer Steigerung von 279 Prozent.⁵²⁹ Die Anzahl der in diesem Bereich tätigen Unternehmen ist in den letzten zehn Jahren stetig gestiegen.

Die Verteilung der Familienunternehmen in der Biotechnologiebranche (siehe Abbildung 19) korreliert weitestgehend mit der Verteilung der wissenschaftlichen Einrichtungen in Deutschland.⁵³⁰

528 Ernst & Young GmbH 2022.

529 Ernst & Young GmbH 2022.

530 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2022.

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 2.479 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Biotechnologie*“ zu finden (Stand 3.11.2022):

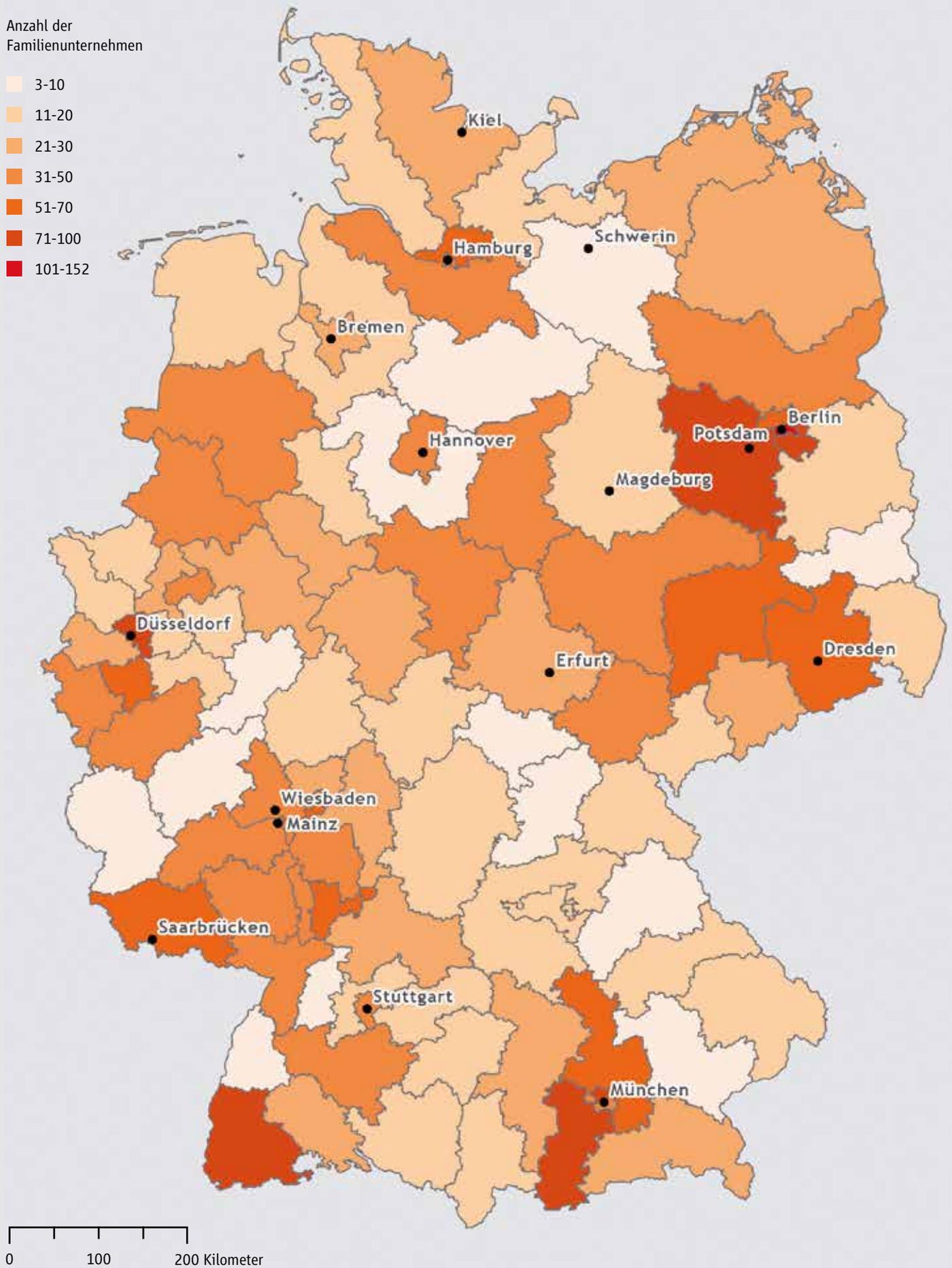
- 100 AGs
- 2.045 GmbHs
- 10 vollhaftende Personengesellschaften
- 303 teilhaftende Personengesellschaften
- 21 Einzelunternehmen

Einige der Unternehmen der Biotechnologiebranche sind Tochterunternehmen von großen, internationalen Firmen und können als Global Player kategorisiert werden. Diese großen Unternehmen haben entweder intern entsprechende Abteilungen eingerichtet oder Tochterunternehmen gegründet, die sich auf die biotechnologische Arbeit spezialisieren. 51 Prozent aller Unternehmen haben sich vor allem in der Pharma- und Medizinbranche etabliert.⁵³¹ Deren Einfluss auf die Gesamtentwicklung der Biotechnologie ist jedoch nur schwer abschätzbar. In der MARKUS-Unternehmensdatenbank finden sich 447 Familienunternehmen im Bereich Forschung und Entwicklung von Biotechnologie mit maximal fünf Gesellschafter*innen und Firmensitz in Deutschland.

Ein Familienunternehmen in dieser Branche ist die Rentschler Biopharma SE, wo in der bereits fünften Generation heute rund 800 Mitarbeitende beschäftigt sind. Sie ist ein Auftragsentwicklungs- und Produktionsunternehmen (Contract Development and Manufacturing Organization CDMO) und ausschließlich auf Kundenprojekte fokussiert. Im Kundenauftrag werden biotechnologische Prozesse sowie Biopharmazeutika entwickelt.

531 BIOCUM 2019.

Abbildung 19: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Biotechnologiebranche (nach Postleitzahlen)



Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Rentschler Biopharma SE als international tätiges Dienstleistungsunternehmen Dr. Rentschler Holding GmbH & Co. KG, Dr. Christian Schetter (Vorstand für Forschung, Entwicklung und Innovation):

Sie würden zum Wohle der Menschen eingesetzt und ständen deshalb auch selbst unter besonderem Schutz: Arzneimittel. Die dahinterstehende Industrie unterliege aus diesem Grund besonders starken Regularien und Qualitätsanforderungen. Was den Menschen schütze, könne jedoch insbesondere während der Produktionsphase für die Umwelt Belastung bedeuten, denn die Prozesse zur Herstellung hochreiner Wirkstoffe ließen sich nicht ausschließlich mit Mehrweg-Materialien durchführen. Dies sei ein Spannungsfeld, in dem sich auch das Laupheimer Unternehmen Rentschler Biopharma SE bewege.

An erster Stelle ständen immer die Arzneimittelsicherheit und der Schutz der Patient*innen. „Diesen beiden müssen wir unsere Bemühungen um Nachhaltigkeit unterordnen“, so Herr Dr. Schetter. Das Dienstleistungs- und Auftragsentwicklungsunternehmen, das gerade sein 150-jähriges Jubiläum feiert, produziert biotechnologisch hergestellte Medikamente, Biopharmazeutika – meistens in Form von Antikörpern. Dafür programmieren und vermehren sie Säugetierzellen in einem wochenlangen, aufwendigen Prozess, an dessen Ende ein sicherer, qualitativ einwandfreier Wirkstoff stehe.

Diese Produktion sei nicht nur langwierig und hochkomplex, sondern auch energieintensiv. Aus Verantwortung gegenüber seinen über 1.100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, den Kunden, Patienten und dem Planeten stelle sich das Unternehmen der schwierigen Herausforderung, mit einem ganzheitlichen Nachhaltigkeitsprogramm Ökonomie und Ökologie in einen besseren Einklang zu bringen. Moderne Produktions-, Lüftungs- und Klimaanlage könnten dazu ebenso beitragen wie die Digitalisierung. Diese erlaubt, Prozesse zu simulieren und damit Material und Zeit zu sparen.

Auch ein vorsorgendes, krisenfestes und modernes Gesundheitssystem wäre laut Herrn Dr. Schetter essenziell, um die Chancen biotechnologischer und medizinischer Verfahren bestmöglich zu nutzen. Sein grundsätzlicher Appell betrifft die aus seiner Sicht dringend nötige Verlässlichkeit: von der Naturwissenschaft im schulischen Lehrplan über solide ausgestattete Bildungsstätten und Universtitäten bis hin zur Energieversorgung und klaren Rahmenbedingungen für die Industrie.

Zur Zuverlässigkeit bekenne sich auch das Familienunternehmen Rentschler Biopharma SE in seinem eigenen Wertekanon, ebenso zu Fortschritt, Respekt und Verantwortungsbewusstsein,

alles mit dem Ziel, nachhaltig Nutzen zu stiften, für den Menschen und die Gesellschaft. Diese Werte würden im unternehmerischen Alltag gefordert und gefördert – so auch in der „Rentschler Academy“. Neben der fachlichen Kompetenz ständen im Programm immer auch die persönliche und soziale (Weiter-)Entwicklung im Fokus.

Nur so könne gelingen, wofür man antrete, so Herr Dr. Schetter: „Wir wollen Medizin vorantreiben, um Leben zu schützen. Gemeinsam!“

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Innovationen und Chancen der Biotechnologie sind häufig eng mit Fragen ethischer, politischer, sozialer und moralischer Art und Risikodebatten verbunden. Vor allem das Eingreifen in die Natur, sei es bei Nutzpflanzen, Nutztieren oder gar in menschliche Gene, sorgt häufig für Diskussionen.⁵³² Die Biotechnologie wird gesellschaftlich von zwei Blickwinkeln betrachtet. Alternative Rohstoffe wie Biokunststoffe und Biokraftstoff treffen innerhalb der Bevölkerung auf Akzeptanz; Lebensmittel aus gentechnisch veränderten Tieren und Pflanzen werden jedoch abgelehnt.⁵³³ Durch mangelnde Akzeptanz wird die Weiterentwicklung der Biotechnologie gehemmt. Laut der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften und der Körber Stiftung kann die Akzeptanz durch Transparenz und Integration der Bevölkerung erhöht werden. Nutzen und Fortschritt der verschiedenen Technologien müssen erläutert werden, da der ökonomische Aspekt meist nicht ausreicht, um auf allgemeine Akzeptanz zu treffen. Hinsichtlich der Regulierung gab es in den letzten Jahren keine gravierenden Änderungen. Ein Ziel des Verbandes BIO Deutschland ist unter anderen die Verbesserung der nationalen, europäischen und internationalen rechtlichen Vorgaben für die Prüfung und Zulassung biopharmazeutischer Produkte.⁵³⁴

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Viele Anwendungen der Biotechnologie basieren auf einem guten Verständnis der Funktionsweise von Organismen. Neue Methoden tragen zu einem Erkenntnisgewinn bei und ermöglichen zusätzliche medizinische Anwendungen. So können mithilfe der Genomsequenzierung multiresistente Keime besser eingedämmt werden oder in der Bioinformatik die Datenverarbeitung vereinfacht und dadurch das Verständnis von Biomolekülen vertieft werden.⁵³⁵

Die weiße und grüne Biotechnologie, also die Nutzung für die Industrie und die Landwirtschaft, können zukünftig als Bausteine für eine nachhaltige zukunftsverträgliche Chemie und eine optimale Nutzung von Pflanzen fungieren. In der industriellen Biotechnologie werden zum

532 Buchholz und Collins 2022.

533 Weitze und Zilker 2020.

534 BIO Deutschland 2023.

535 Thrän und Moesenfechtel 2020, S. 5.

Der große Nutzen der Biotechnologie muss der Bevölkerung gut kommuniziert werden, um die Akzeptanz zu erhöhen.

Beispiel Enzyme als technische Hilfsmittel innerhalb der verarbeitenden Industrie genutzt.⁵³⁶ Häufig können bisherige Anwendungen, wie zum Beispiel umweltbelastende chemische Herstellungsverfahren in der Industrie, durch vorteilhaftere biotechnische Verfahren ersetzt werden.⁵³⁷ Die genannten Anwendungsfelder lassen erwarten, dass sich das Wachstum der Biotechnologie-Branche in Zukunft fortsetzen wird.

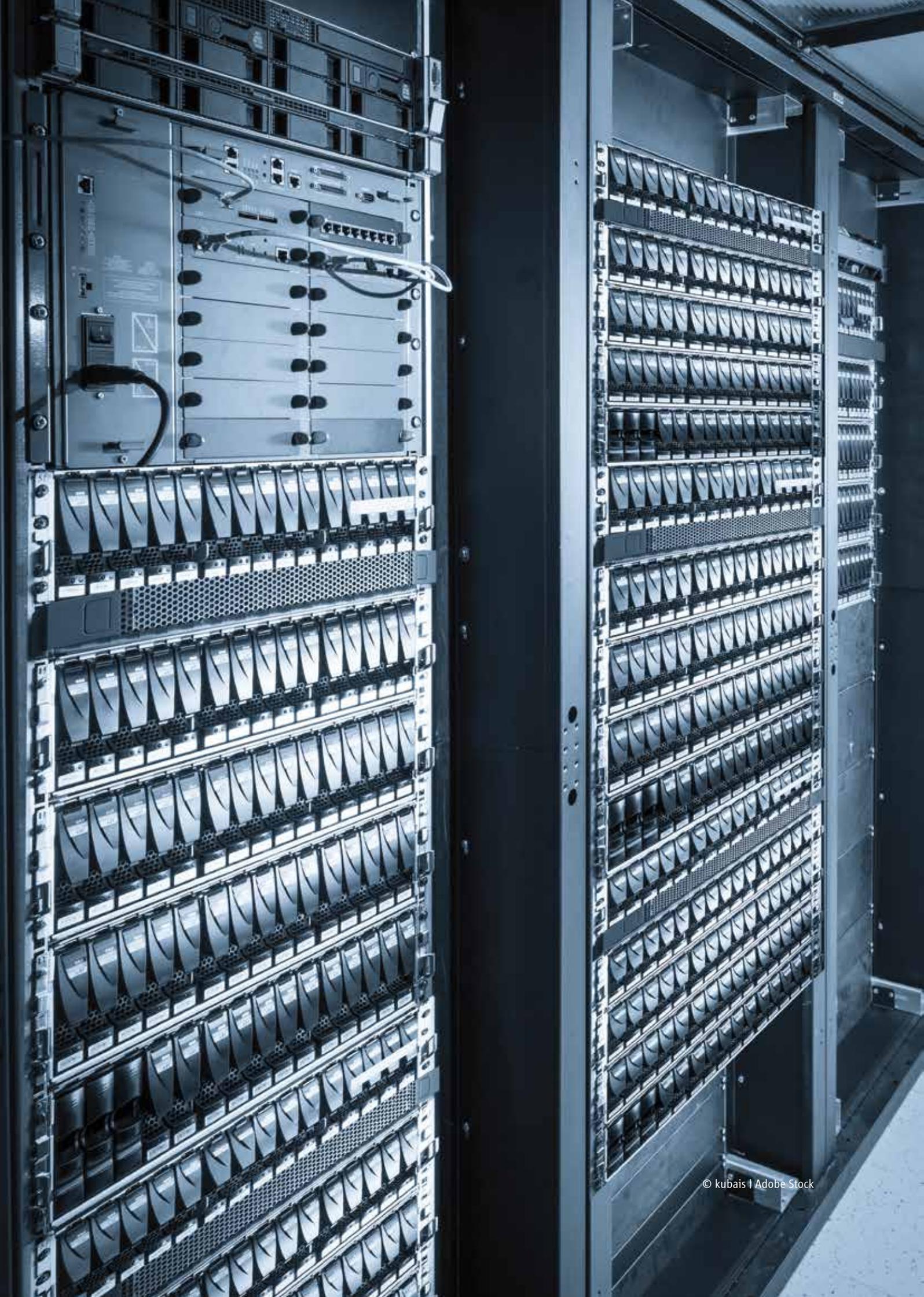
8. Zusammenfassung

Durch die vielseitige Anwendbarkeit in verschiedensten Branchen ist die Biotechnologie in der Lage, diese nachhaltig zu beeinflussen und zu verändern.⁵³⁸ Wie stark sich biotechnologische Produkte zukünftig durchsetzen werden, ist von der Akzeptanz der Bevölkerung abhängig und damit ungewiss. Es ist aber möglich, dass sich zum Beispiel die Diskussion um RNA-Impfstoffe, die während der Corona-Pandemie geführt wurde, auf die Einstellung der Gesellschaft positiv auswirkt.

536 Reineke und Schlömann 2020a, S. 578.

537 Buttlar et al. 2020a, S. 337.

538 Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) 2019.



XV. Digitalisierung

1. Definition

Digitalisierung umfasst die digitale Transformation von Wirtschaft, Staat, Gesellschaft und Alltag mit Hilfe der Digitaltechnik. Mit Bezug zur Umwelttechnik werden unter dem Begriff unter anderem subsumiert: Messtechnische Erfassung und Überwachung von Schadstoffen und Umweltschäden, Smart Meter, Track and Trace, Prozessoptimierungen/Simulationen, IIoT, IKT, Plattformtechnologien (z. B. Blockchain), Predictive Maintenance, digitaler Zwilling, KI, Green IT und Smart Home.

2. Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

Die Digitalisierung hat Einfluss auf alle der 17 SDGs. Exemplarisch werden im Folgenden mögliche Beiträge vorgestellt, die der Digitalisierung zugeordnet wurden.⁵³⁹

- SDG 2 „Kein Hunger“: Technologieentwicklungen für eine verbesserte landwirtschaftliche Infrastruktur nutzen.
- SDG 4 „Hochwertige Bildung“: Tertiäre Bildung durch digitale Lernformate und Plattformen unterstützen.
- SDG 3 „Gesundes Leben“: Krebsdiagnose mittels KI-basierter Bilderkennung⁵⁴⁰ oder Roboter in der Altenpflege.⁵⁴¹
- SDG 5 „Geschlechtergleichheit“: Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik, um die Selbstbestimmung der Frauen zu fördern.
- SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“: Mit Digitalisierung Energieinfrastrukturen- und -technologien verbessern (z. B. Stromhandel, Steuerung, Netzprognosen).
- SDG 8 „Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum“: Produktivitätssteigerung durch technologische Modernisierung und Innovation (z. B. durch Roboter).
- SDG 9 „Industrie, Innovation und Infrastruktur“: Nutzung umweltverträglicher Technologien und Gestaltung nachhaltiger Industrieprozesse sowie die Erweiterung des Zugangs zum Internet.

539 Leregger 2020.

540 healthcare-in-europe.com 2022.

541 Japandigest 2021.

- SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“: zum Beispiel geteilte Mobilität, intelligenter Transport, adaptive Heizungs- und Lüftungssteuerung.⁵⁴² Laut einer Hochrechnung könnten allein in Deutschland durch beschleunigte Digitalisierungsprozesse bis zum Jahr 2030 152 Millionen Tonnen CO₂ eingespart werden.⁵⁴³
- SDG 17 „Partnerschaften zur Erreichung der Ziele“: Diese können durch den Austausch über IKTs verbessert werden.

3. Märkte und Arbeitsplätze

Die digitale Transformation hat Einfluss auf alle Märkte der Umwelttechnik und ist daher über Arbeitsplatzzahlen und Marktvolumen schwierig zu erfassen. Zudem muss sorgfältig geprüft werden, wie die Zahlen zugeschlüsselt werden (Zuordnung z. B. zur Energiebranche oder zur Digitalisierung), um Doppelzählungen transparent zu machen. In den ausgearbeiteten Technologiesteckbriefen sind Einschätzungen des Impacts der Digitalisierung und, wo es möglich ist, auch Marktzahlen enthalten.

Die kurzen Innovationszyklen und die schnellen Veränderungen auf dem Markt erfordern von Unternehmungen ein hohes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit. Etablierte Geschäftsmodelle müssen vor dem Hintergrund der neuen Möglichkeiten beständig hinterfragt und weiterentwickelt werden. Dazu müssen sich Führungskräfte und Mitarbeitende beständig weiterbilden und entsprechende Marktchancen mutig nutzen.

Nach einer Umfrage des Digitalverbands Bitkom begreifen neun von zehn Unternehmen die Digitalisierung als Chance und sehen Potenziale für einen Aufbau an Arbeitsplätzen.⁵⁴⁴ Gleichzeitig besteht im Bereich der Digitalisierung ein hoher Wettbewerb. Als Schritt in die richtige Richtung wird unter anderem der Aufbau einer effizienteren digitalen Infrastruktur (GAIA X-Initiative) gesehen.⁵⁴⁵

4. Beitrag von Familienunternehmen

Insgesamt sind laut der MARKUS-Unternehmensdatenbank 3.959 Familienunternehmen unter dem Stichwort „Digitalisierung*“ zu finden (Stand: 3.11.2022):

- 69 AGs
- 2.864 GmbHs

⁵⁴² Bieser et al. 2020.

⁵⁴³ Bitkom e.V. 2021, S. 8.

⁵⁴⁴ Klingbeil-Döring 2020.

⁵⁴⁵ International Institute for Management Development (IMD) 2021.

- 17 vollhaftende Personengesellschaften
- 945 teilhaftende Personengesellschaften
- 64 Einzelunternehmen

Digitalisierung ist eine Querschnittstechnologie, die in der Umwelttechnik eine immer größere Rolle spielen wird – eine Chance für innovative Familienunternehmen, sich in den entsprechenden Leitmärkten für die Zukunft zu positionieren.

Das Familienunternehmen Festo SE & Co. KG hat 2019 den Preis als Digital Transformer of the Year erhalten, ist gleichzeitig ein Global Player und damit beispielhaft für die Innovationsstärke von Familienunternehmen. Das Unternehmen beschäftigt sich mit der industriellen Automatisierungstechnik und leistet durch Energie- und Materialeinsparungen einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung.⁵⁴⁶ Ein weiteres familiengeführtes Unternehmen, welches massiv in die Digitalisierung investiert, ist die Marquardt-Gruppe.⁵⁴⁷ Ein Schwerpunkt von Marquardt ist der Bereich der interaktiven Mechatronik an der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine.⁵⁴⁸

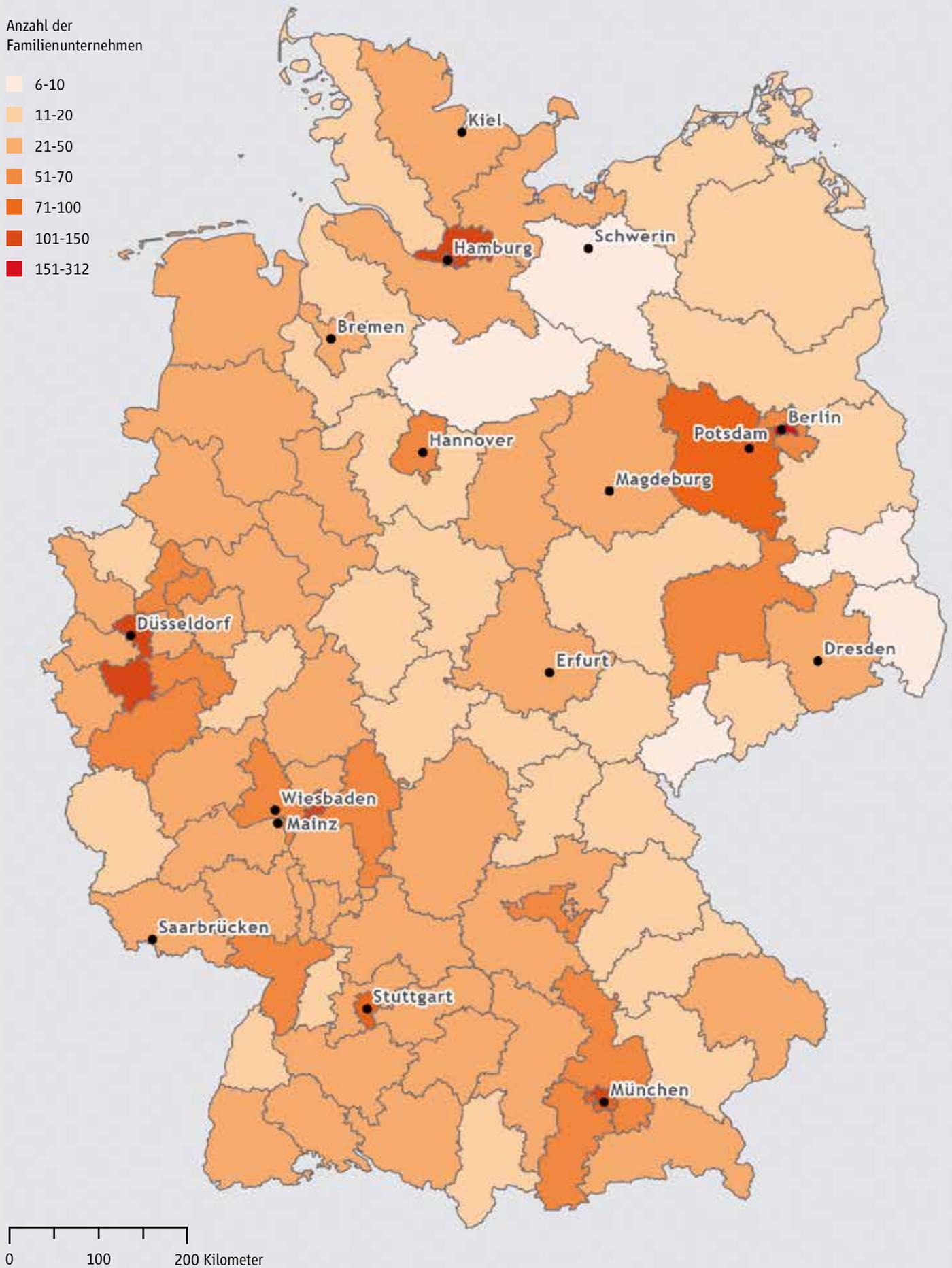
Die folgende Karte zeigt eine deutschlandweite Verteilung von Unternehmen der Digitalisierung mit einem leichten Schwerpunkt in Ballungsgebieten.

546 Festo 2020.

547 Schwäbische.de 2021.

548 Marquardt o.J.

Abbildung 20: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Digitalisierungsbranche (nach Postleitzahlen)



Maßstab (DIN A4): 1 : 7 000 000

Quelle: Sachdaten: MARKUS, Bureau van Dijk (Stand 11 / 2022), Geodaten: © Deutsche Post Direkt GmbH

5. Interview

Dürr AG, Hanjo Hermann (Senior Manager Corporate Sustainability) und Walter Schubert (Senior Manager Product Management DXQ):

Der Dürr-Konzern sei ein weltweit führender Maschinen- und Anlagenbauer mit ausgeprägter Kompetenz in den Bereichen Automatisierung und Digitalisierung. Der Konzern bestehe aus mehreren Divisions, die sich unter anderem mit Lackieranlagen, Abluftreinigungsanlagen oder Maschinen und Anlagen zur Holzbearbeitung beschäftigen.

Im letzten Jahrzehnt fokussierte sich die Industrie auf die Material- und Energieeffizienz und hat die entsprechenden Produktionsprozesse angepasst und optimiert. Heute trieben die Themen Digitalisierung und Nachhaltigkeit die Aktivitäten der Dürr AG an. Digitalisierungslösungen gäben der Industrie 4.0 neue Impulse für eine noch bessere Prozessgestaltung durch Vernetzung der Maschinen und Anlagen und intelligente Datenauswertung.

Die Dürr AG habe den digitalen Wandel aktiv angenommen und divisionsübergreifende Teams für Themen wie KI, Machine-Learning (ML) und IIoT gebildet. Im Jahr 2016 wurden die Teams auf agile Arbeitsweisen umgestellt, um den digitalen Wandel proaktiv zu gestalten. Derzeit arbeiten etwa 800 Beschäftigte des Konzerns in diesen Teams. Zur Gewinnung „digitalbewusster“ Mitarbeitender bemerkt Herr Hermann, dass der Imagewandel der Dürr AG von „Maschinenbauer“ zum „Digitalunternehmen“ ein wesentlicher Erfolgsfaktor sei.

Der Konzern biete plattformunabhängige digitale Lösungen für die betriebliche, analytische und steuersystemische Ebene des Maschinen- und Anlagebetriebs an. Die analytischen Lösungen ermöglichten zum Beispiel „Predictive Maintenance“ durch Anwendung von KI/ML-Algorithmen. Zu den steuersystemischen Lösungen gehöre unter anderem die Applikation „DXQenergy.management“, die einen großen Beitrag zur Optimierung der Anlagen leiste. Im Jahr 2022 habe der Dürr-Konzern den „Microsoft & Roland Berger-MIMA“-Preis für seine analytischen Lösungen von DXQanalyse gewonnen.

Die digitalen Lösungen der Dürr AG helfe den Kund*innen, ihre Anlagen zu verbessern und Potenziale zu heben, zum Beispiel in Richtung Produktqualität, Leistung und Verfügbarkeit. Hier bringe Dürr Hardware- und Software-Knowhow zusammen.

Hilfreich für den Maschinen- und Anlagenbau wäre die bessere Anerkennung der digitalen Aktivitäten durch die EU-Taxonomie. Ein Beispiel sei die Verlängerung der Anlagenlebensdauer durch digitalgesteuerte Instandhaltung und damit ein verringerter Ressourcenverbrauch. Hier solle der Fokus neben dem Endprodukt also auch auf der Produktion mit den entsprechenden

Maschinen und Anlagen liegen. Dies könnte Familienunternehmen Anreize geben, sich mehr mit diesen Themen zu beschäftigen.

Herr Schubert fasst zusammen, dass „es essenziell ist, dass sich Maschinen- und Anlagenbauer mit dem Thema der Digitalisierung auseinandersetzen. Diese kennen die Technologie und könnten durch dieses Know-how passfähige Lösungen entwickeln“.

6. Herausforderungen und Hemmnisse

Grundvoraussetzung für einen digitalen Wandel ist die Gewährleistung eines flächendeckenden Zugangs zu einer hochleistungsfähigen Breitbandversorgung. Der notwendige Kapazitätsausbau erfordert von Bund und Ländern finanzielle Unterstützung und auch klare Definitionen von Schnittstellen und Zuständigkeiten.⁵⁴⁹ Im Juni 2021 hatten laut Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) 95 Prozent der deutschen Haushalte einen Zugang zu einem Breitbandanschluss von mindestens 50 Megabits pro Sekunde.⁵⁵⁰ Die Bundesregierung möchte Deutschland im Bereich der Digitalisierung bis zum Jahr 2025 unter die Top Ten in Europa bringen.⁵⁵¹

Die Sammlung von Daten zu kommerziellen Zwecken, etwa personalisierter Werbung oder situativem Marketing, begünstigt einseitig global agierende Konzerne wie die sogenannten GAFAs, bestehend aus Google, Amazon, Facebook und Apple.⁵⁵² Die wachsenden Datenmengen erfordern daher von Familienunternehmen, aber auch der öffentlichen Hand Regulierungen bezüglich des Datenschutzes und der Datensicherheit. Dies gilt auch für neue Dienstleistungen, die Umweltdaten übertragen, zum Beispiel zur Schadstoffkontrolle, Predictive Maintenance und für Plattformen, zum Beispiel zum Verleih von Geräten. Kritisch betrachtet werden müssen die Resilienz intelligenter Systeme hinsichtlich der Ausfallsicherheit sowie der Cybersicherheit.⁵⁵³

Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik berichtet von einer Ansammlung kleinerer Hackerangriffe, die vermutlich im Zusammenhang mit dem Angriffskrieg gegen die Ukraine steht. Zum Beispiel konnten durch einen Ausfall der Satellitenkommunikation 5.800 vernetzte Windenergieanlagen nicht mehr durch Fernwartung betreut werden.⁵⁵⁴ Seit 2021 werden immer mehr Hackerangriffe auf Universitäten bekannt, so zum Beispiel auch auf die

549 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) 2017, S. 13.

550 Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) 2021a.

551 atene KOM 2022.

552 Lange und Santarius 2018, S. 157.

553 Deerberg et al. 2019, S. 5.

554 Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2022.

Universität Duisburg-Essen.⁵⁵⁵ Die Universität wurde gleich zweimal mit einer Schadsoftware angegriffen, woraufhin die gesamte IT-Infrastruktur heruntergefahren werden musste. Im Januar 2023 wurden die gestohlenen Daten im Darknet veröffentlicht und sollen nur gegen eine Lösegeldzahlung wieder entfernt werden.⁵⁵⁶

Gleichzeitig sind Chancen und Risiken von künstlicher Intelligenz stärker in die Debatte gerückt (siehe Diskussion um das Programm ChatGPT⁵⁵⁷). Hier sind Änderungen im Lernverhalten zu erwarten, verbunden mit Diskussionen über Urheberrechte. Es gibt Programme, die Bilder und Logos erzeugen⁵⁵⁸ und definiert coden, also programmieren können.⁵⁵⁹ Auch hier sind gesellschaftliche Diskussionen notwendig, zum Beispiel zur Kennzeichnung der Informationen. Durch diese neuen Möglichkeiten können auch Informationen schnell und glaubwürdig gefälscht und verändert werden (Fake News). Die Nutzer*innen und Leser*innen müssen daher aufmerksam Quellen und Inhalte auf Desinformation (absichtlich falsche Informationen), Fehlinformationen (falsche Informationen, die unabsichtlich verbreitet werden) und Malinformation (zutreffende Informationen, die absichtlich Schaden anrichten können wie Leaks oder dekontextualisierte Fakten) prüfen.⁵⁶⁰ Aktuell werden regulatorische Gegenmaßnahmen wie der AI Act der EU sehr kontrovers diskutiert. Einerseits soll verhindert werden, dass KI unkontrolliert zu falschen Informationen und/oder Entscheidungen führt, andererseits kann die Regulierung die rasante Entwicklung behindern und gegebenenfalls zu Wettbewerbsnachteilen in Europa führen.⁵⁶¹

Bietet die Digitalisierung einerseits Chancen, Ressourcen zu schonen, ist sie andererseits zum jetzigen Zeitpunkt jedoch selbst ein großer Treiber des Ressourcenverbrauchs. Hintemann und Hinterholzer (2020)⁵⁶² schätzen, dass sich die Datenmenge im letzten Jahrzehnt verzwanzigfacht hat, bei gleichzeitiger Verzehnfachung der weltweiten Rechenzentrumsleistung. Weltweit beläuft sich der Anteil der Treibhausgasemissionen, die auf die Digitalisierung zurückzuführen sind, auf 1,8 bis 3,2 Prozent.⁵⁶³ Zum Teil wird der gesteigerte Energieverbrauch allerdings durch Effizienzsteigerungen hin zu Hyperscale und cloudbasierten Rechenzentren kompensiert.

555 Kondruss 2023.

556 Spiegel 2023.

557 ChatGPT (Generative pre-trained Transformer) ist ein Prototyp eines Chatbots, also eines textbasierten Dialogsystems als Benutzerschnittstelle, der auf der Methodik des maschinellen Lernens beruht. ChatGPT nutzt künstliche Intelligenz, um menschliche Sprache zu „verstehen“ und Antworten zu erzeugen, die von menschlichen Ausdrucksformen kaum zu unterscheiden sind.

558 Z. B. <https://openart.ai/>.

559 Spinrath 2023.

560 Landesmedienzentrum Baden-Württemberg o. J.

561 Kerkmann 2022.

562 Hintemann und Hinterholzer 2020.

563 Bundesverband für Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. 2020, S. 45.

Der Fortschritt der Digitalisierung hat eine Vielzahl von Systemen mit unterschiedlichsten Möglichkeiten hervorgebracht. Aufgrund dessen kommt es jedoch auch zu ethischen Dilemmata hinsichtlich des Verbraucher- und Geschäftskontextes. Intelligente Geräte zeichnen durchgehend Daten auf oder können für unbeabsichtigte Zwecke genutzt werden. Die Corporate Digital Responsibility (CDR) legt gemeinsame Werte und Normen fest, die in die Organisationskultur von Unternehmen eingebettet sind und den Einsatz digitaler Technologien und Daten regelt.⁵⁶⁴ Handlungsfelder der CDR mit Bezug zur Umwelttechnik könnten der Energie- und Carbon-Footprint, Mengen an und Umgang mit Elektroschrott und der digitale Zusammenhalt beziehungsweise Einfluss sein.⁵⁶⁵

Auch der Datenschutz und die damit verbundene Datensparsamkeit spielen eine wichtige Rolle für die Verantwortung von Unternehmen. Die Privatsphäre von Verbrauchern und sichere Zahlungsmechanismen sollten gewährleistet sein und nur so viele personenbezogene Daten erhoben werden, wie auch für die Anwendung relevant sind.⁵⁶⁶ Das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung schlägt folgende drei zentrale Aspekte digitaler Verantwortung vor: Umgang mit personenbezogenen Daten, Umgang mit automatisierten Entscheidungssystemen (Nachvollziehbarkeit, Fairness) und die sozial-ökologische Verantwortung der Digitalisierung (Ausrichtung der Infrastruktur an den globalen Nachhaltigkeitszielen).⁵⁶⁷

7. Innovation und Zukunftsperspektiven

Die Bundesregierung möchte mit dem Start der Legislaturperiode 2021 strategisch digitalpolitische Maßnahmen umsetzen. Die Chancen der Digitalisierung sollen ausgeschöpft werden, in dem die verschiedenen Ministerien zusammenarbeiten und Schwerpunktvorhaben identifizieren. Beispielhaft werden im Folgenden ausgewählte digitale Innovationen der deutschen Bundesregierung für Umwelt, Klima und Ressourcen vorgestellt: Digitale Experimentierfelder in der Landwirtschaft sollen dazu beigetragen, dass Techniken zum optimalen Schutz der Umwelt, zur Arbeitserleichterung und zur Steigerung des Tierwohls eingesetzt werden.⁵⁶⁸ Durch Datenmanagement, KI und Mustererkennung in Verbindung mit DNA-Analysen sollen Arten und deren Populationen in urbanen Lebensräumen erfasst und bewertet werden. Das Ergebnis dieser Methodik soll ein verbesserter Naturschutz sein.⁵⁶⁹ Computermodelle und Datenbanken haben das Potenzial, deutsche Städte und Regionen dabei zu unterstützen, auf

564 Lobschat et al. 2021, S. 875 f.

565 Herden et al. 2021.

566 Thorun 2018.

567 Lautermann und Frick 2023.

568 Die Bundesregierung 2021b.

569 Die Bundesregierung 2021b.

bevorstehende Umweltrisiken wie Starkregen und erhöhte Schadstoffbelastung frühzeitig zu reagieren⁵⁷⁰ (siehe Kapitel D.XIII).

Die Umwelttechnik soll durch die Fördermaßnahme „Digital Green-Tech“ weiter digitalisiert werden.⁵⁷¹ Gefördert wurden unter anderem:

- Digitale Lösungen in der Forstwirtschaft: Hier sollen KI-basierte Kernparameter helfen, eine gezielte Optimierung bei der Aufforstung zu ermöglichen.
- Digitale Verfahren zur Verbesserung des Recyclings von Aktivmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterien (siehe Kapitel D.V).
- Intelligente Steuerungs- und Monitoringzentrale zur ressourceneffizienten Spurenstofflimitation aus Abwasser.

Exkurs: Digitalisierung in der Wasserwirtschaft

Auch innerhalb der Wasserwirtschaft kann die Digitalisierung Effizienzsteigerungen bewirken. Vor dem Hintergrund des Megatrends der Urbanisierung gewinnen der ressourcenschonende Betrieb und die Instandhaltung der Wasserinfrastruktur weiter an Gewicht. Mit neuen Generationen der Messtechnik kann es beispielsweise gelingen, Schadensfälle schneller und gezielter aufzuzeigen oder die Qualitätsüberwachung der Wasserversorgung zu optimieren.⁵⁷³

Wasserinfrastrukturen innerhalb der Wasserwirtschaft sind für gesellschaftliche und wirtschaftliche Prozesse unerlässlich. Mit unterschiedlichen Techniken zur Datenkommunikation können Echtzeit-Monitoring und Vorhersagemodelle von Frühwarn-, Produktions- und Entscheidungsprozessen zum Beispiel in Betrieben, Landwirtschaft oder ganzen Städten realisiert werden. Dies ermöglicht eine Risikoreduzierung von Schadensfällen und Kostenminderung.⁵⁷⁴

570 Die Bundesregierung 2021b.

571 FONA 2022.

572 Deerberg et al. 2019, S. 4.

573 Zimmermann et al. 2020, S. 39.

Durch klimawandelbedingte Folgen wie Starkregenereignisse können große Wassermengen aus der Abwasserversorgung infolge der sogenannten Mischwasserentlastung⁵⁷⁵ in die Umwelt gelangen.⁵⁷⁶ Auch mittels Mess-, Prognose-, Steuerungs- und Regelungssystemen kann eine digitalisierte Wasserwirtschaft auf Extremwetterereignisse in Folge des Klimawandels angemessener und schneller reagieren.⁵⁷⁷ Infolge der Hochwasserkatastrophe im Ahrtal im Jahr 2021 zog die deutsche Bundesregierung die notwendige Konsequenz, auch die Digitalisierung stärker einzubinden. Digitale Lagebilder und ein Warnkanal via Mobilfunk sollen als Frühwarnsysteme dienen.⁵⁷⁸

Das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (GDEW) ist ein wichtiger Innovationstreiber für den flächendeckenden Einsatz intelligenter Messsysteme (Smart Meter) zur Ermöglichung einer besseren Netz- und Ressourcensteuerung. Laut dem Barometer „Digitalisierung der Energiewende“ (Berichtsjahr 2020) sind bereits maßgebliche Fortschritte zu erkennen. Smart-Meter-messdatenbasierte Geschäftsmodelle haben im Ausland jedoch keine starke Nachfrage, wenn es über die Stromtarifizierung hinausgeht.⁵⁷⁸

Neben der Befähigung, Medien wie Wasser und Strom entsprechend zu steuern, müssen auch Produkte im Kreislauf geführt werden. Hier soll der digitale Produktpass helfen.

*Transparenz in der
Wertschöpfungskette
durch digitalen
Produktpass*

Exkurs: Digitaler Produktpass

Die Europäische Kommission veröffentlichte 2022 einen Vorschlag für eine neue Ökodesign-Verordnung, welche kreislaforientierte und nachhaltige Produkte ermöglichen soll. Zu den Anforderungen gehört unter anderem der digitale Produktpass. Dieser soll Verbraucher*innen über die Umweltverträglichkeit von Produkten informieren und die Reparatur- beziehungsweise Recycelfähigkeit optimieren. Gleichzeitig soll der Produktpass Behörden bei der Kontrolle von Produkten helfen.⁵⁸⁰ Der digitale Produktpass beinhaltet Informationen über die Herkunft, die Zusammensetzung und die sozialen und ökologischen Produktionsbedingungen, aber auch Hinweise auf die

574 Mischwasserentlastung bedeutet, dass bei Erreichen der Kapazitätsgrenze einer Kläranlage ein Teil des Abwassers unbehandelt in das angrenzende Gewässer eingeleitet wird.

575 Deerberg et al. 2019, S. 4.

576 Zimmermann et al. 2020, S. 38, 40.

577 Bundesministerium des Innern und für die Heimat (BMI) 2021.

578 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2020.

579 Europäische Kommission 2022a.

Entsorgungs- und Reparaturmöglichkeiten.⁵⁸¹ Damit sollen die Produktlebensdauer verlängert und Kreisläufe hochwertig geschlossen werden. Laut dem Koalitionsvertrag der Bundesregierung sollen solche Produktpässe in Deutschland eingeführt werden.⁵⁸²

Die Europäische Kommission spezifiziert allgemeine Anforderungen an den digitalen Produktpass. Der Pass muss über einen Datenträger mit einem Produktidentifikator verbunden und physisch auf dem Produkt oder seiner Verpackung integriert sein. Die im Produktpass enthaltenden Informationen müssen auf offenen Standards beruhen und maschinell lesbar, strukturiert und durchsuchbar sein.⁵⁸³ Somit würde der digitale Produktpass eine wichtige Hilfs- und Informationsquelle sein und zählt auf die Erreichung von SDG 12 „Nachhaltiger Konsum und Produktion“ ein.

Plattform-Technologien wie Blockchain können vor allem in der Energiebranche einen Vorteil mit sich bringen. Es können digitale Abbilder des realen Stromflusses aufgezeigt werden, da sowohl der produzierte als auch der verbrauchte Strom in Echtzeit den Verbrauchern zugeordnet und gehandelt werden kann.⁵⁸³

8. Zusammenfassung

Die Digitalisierung kann Geschäftsmodelle ablösen (siehe Videoverleih versus Streaming-Dienste). Sie bietet gleichzeitig vielfältige Chancen zur Entwicklung völlig neuer Geschäftsmodelle (z. B. der effizienteren Ressourcennutzung durch Cloud-Technologie), die positive Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft haben können. Ungesteuert kann die Digitalisierung aber auch zu hohen Ressourcenverbräuchen (Elektroschrott und Energieverbräuche der Infrastruktur) und problematischen Konzentrationsprozessen (wie Quasi-Monopolen) an den Märkten führen. Außerdem befördert sie Cyberkriminalität und den Missbrauch von personenbezogenen Daten.

Im positiven Sinne kann die Digitalisierung ein Hebel für mehr Umweltschutz sein, zum Beispiel durch bessere Erfassung von Umweltdaten, bessere Prognosen von Umweltentwicklungen, bessere Steuerung von Systemen (beispielsweise des Stromnetzes über Smartgrids⁵⁸⁴) oder Nachverfolgung und Wartung von Produkten zur Verlängerung der Lebensdauer. Für solche Innovationen kann beispielsweise der digitale Produktpass genutzt werden, um die

*Digitalisierung als
Chance für neue
Geschäftsmodelle*

580 Bundesverband der Deutschen Industrie e.V (BDI) 2021.

581 SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP 2021.

582 Europäische Kommission 2022b.

583 Jäger 2020.

584 S. Steckbrief I. Photovoltaik.

Kreislauffähigkeit von Produkten zu verbessern und den Verbraucher über die gesamte Lieferkette von Produkten zu informieren.

E. Diskussion und Fazit

I. Vergleich mit der Vorgängerstudie

Die Leitmärkte und besonders relevante Umwelttechniken haben sich im Kern im Vergleich zur Vorgängerstudie von 2021 nicht verändert. Aufgrund aktuell anhaltender energiepolitischer Entwicklungen fokussiert der vorliegende Technologieatlas stärker den Sektor der erneuerbaren Energien: Die Themen Smart Home und Leichtbau wurden durch die Themen Bioenergie (Biogas) und Tiefengeothermie ersetzt.

Generell ist im Vergleich zur Vorgängerstudie die Anzahl der Unternehmen in den betrachteten Umwelttechnologien mit Ausnahme der Windkraft, die einen leichten Rückgang der Unternehmenszahlen zu verzeichnen hat, auf dem gleichen Niveau verblieben oder sogar gewachsen. Dies stimmt mit den Erhebungen des GreenTech Atlas von 2021⁵⁸⁵ überein, der Marktzugewinne in den Jahren von 2018 bis 2021 im zum Teil zweistelligen Prozentbereich in den Leitmärkten berichtet.

Die meisten befragten Fachleute beklagen eine Zuspitzung des Fachkräftemangels im Vergleich zu 2021. Die Lehrpläne an Bildungseinrichtungen wie Universitäten scheinen zum Teil veraltet und bedürfen einer Anpassung in Bezug auf fortschrittliche Technologieentwicklungen mit einem stärkeren Nachhaltigkeitsbezug. Auch in gewerblichen und technischen Bereichen erfordern die neuen Technologien sehr große Anstrengungen, um „vor Ort“ kundiges Fachpersonal für Bau, Betrieb und Wartung der entsprechenden Einrichtungen zur Verfügung zu haben. Damit ist der Klimawandel auch eine bildungspolitische Herausforderung für die Umwelttechnikbranche.

Positiv entwickelt sich weiterhin die Wahrnehmung und die Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in innerbetrieblichen Prozessen sowie die Kommunikation in den Außenraum (Nachhaltigkeitsbeauftragte und -berichte, kreislaufbasierte Geschäftsmodelle und Lebenszyklusanalysen von Produkten).

II. Technologiesteckbriefe

Die konkreten Entwicklungen in den einzelnen Umwelttechnologien werden bis März 2023 in den Technologiesteckbriefen betrachtet, zum Teil fortgeschrieben und in Interviews aus Sicht von Marktteilnehmenden eingeordnet.

585 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021.

1. Globale Krisen

Der Betrachtungszeitraum der Studie ist geprägt durch internationale und zum Teil schwer berechenbare weltpolitische und gesellschaftliche Ereignisse wie den Ukraine-Krieg, die Energie-, Klima- und die Coronakrise. Neben Lieferkettenschwierigkeiten und Kostensteigerungen gehen von diesen Krisen auch stimulierende Wirkungen auf die Umwelttechnologien im Bereich Energie, Gesundheit und Umweltschutz aus.

Die Souveränität bei der Energieversorgung und geopolitische Unabhängigkeit ist ein wesentlicher Treiber für den Ausbau der regenerativen Energien Photovoltaik, Windkraft, Bioenergie und Geothermie, die nicht nur unendlich, sondern auch unabhängig von der geopolitischen Situation verfügbar sind.

Die Luftreinhaltungsbranche kann als Produzent von Virenfiltern neue Märkte zum Beispiel im Einzelgewerbe und bei Kommunen erschließen. Die Biotechnologie hat infolge der Vermarktung von Impf- und Heilstoffen in der Coronakrise ihr Image verbessern können und in einigen Bereichen Umsatzsteigerungen erreicht. Der Klimawandel führt zu Extremwetterereignissen wie Dürren und Überschwemmungen, die den Unternehmen der Wassertechnik einen Markt für KI-gestützte Monitoring- und Steuerungssysteme bereiten. Der fortschreitende Klimawandel erfordert ebenfalls eine Anpassung der existierenden Infrastrukturen, Gebäude und Anlagen hinsichtlich Extremwetterereignissen wie Hochwasserschutz, Hochtemperaturphasen und Dürre.

2. Zukunftsthemen

Auf nationaler und internationaler Ebene sind die Umwelttechnologien essenziell für die Umsetzung der politischen Agenden zu den Zukunftsthemen Wärme-, Energie- und Rohstoffwende, Circular Economy, Mobilität sowie Umwelt- und Gesundheit. In Deutschland sind Aktionsprogramme zum Beispiel der Koalitionsvertrag, das 7. Energieforschungsprogramm, die Nationale Wasserstoffstrategie, die Kreislaufwirtschaftsstrategie und andere. Tabelle 2 ordnet die Umwelttechnologien der Steckbriefe – zum Teil auch mehreren – Zukunftsthemen zu. Rohstoffwende und Circular Economy adressieren ähnliche Umwelttechnologien und werden zusammengefasst.

Tabelle 2: Klassifizierung der Umwelttechnologien nach den Zukunftsthemen

Wärmewende	Energiewende	Rohstoffwende/ Circular Economy	Mobilität	Umwelt und Gesundheit
■ Wärmepumpen	■ Photovoltaik	■ Recycling	■ Batterien	■ Wasser-/ Abwasser- behandlung
■ Wärmedämmung	■ Windkraft	■ Biotechnologie	■ Wasserstoff- technologie	■ Luftreinhaltung
■ Biogas	■ Biogas	■ Biokunststoffe	■ E-Fuels	■ Biotechnologie
■ Tiefengeo- thermie	■ Batterien	■ Abwasserbe- handlung	■ Biogas	■ Digitalisierung
■ Digitalisierung	■ Wasserstoff- technologie	■ Digitalisierung	■ Digitalisierung	
	■ Tiefengeo- thermie			
	■ Digitalisierung			

Klimaneutralität im Gebäudesektor ist von entscheidender Bedeutung, um die **Wärmewende** zu erreichen. Wärmepumpen und Dämmstoffe sind die wesentlichen technischen Systeme zu ihrer Umsetzung. Die derzeitige Sanierungsrate von etwa 1 Prozent ist dafür nicht ausreichend. Im Jahr 2022 hat der Gebäudesektor das dritte Jahr in Folge die Erreichung der vorgegebenen Klimaziele verfehlt. Auf kommunaler und regionaler Ebene können Wärmenetzwerke, die tiefengeothermisch gespeist werden, theoretisch etwa 25 Prozent des Gesamtwärmebedarfs in Deutschland decken.

Bis zum Jahr 2030 soll die **Energiewende** den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch auf mindestens 80 Prozent steigern. Im Jahr 2022 waren es etwa 46 Prozent. Die Unternehmen der Bereiche Bioenergie, Photovoltaik, Windenergie und Wasserstofftechnik sollen den grünen Strom für die Energiewende liefern und die Kopplung der Sektoren leisten. Sie werden zunehmend durch Förder- und Ausbauprogramme national und international unterstützt. Dies erfordert allerdings eine internationale Ausrichtung der Unternehmen, da der Bedarf an regenerativer Energie und grünem Wasserstoff nicht allein in Deutschland gedeckt werden kann, sondern Importe aus sonnen- und windreichen Ländern notwendig werden.

Im positiven Sinne wirkt sich die Energiewende auf die **Umwelt und Gesundheit** aus, da die klassischen, fossil betriebenen Kraftwerke mit ihren hohen Umweltemissionen substituiert werden. Aus Sicht von Unternehmen der Luftreinhaltungsbranche bedeutet dieser Trend ebenso wie das geplante Verbot oder zumindest die Einschränkung von Verbrennungsmotoren einen Verlust an Marktsegmenten, der durch Anwendungen beispielsweise im Bereich der Hygiene kompensiert werden muss.

Die **Mobilitätswende** schritt bis zur Abstimmung im EU-Parlament im Frühjahr 2023, das sich gegen die klassischen Verbrennungsmotoren entschieden hat, eher technologieoffen voran. Die Politik bekennt sich jetzt klar zu batteriebetriebenen Fahrzeugen und Wasserstoff als Treibstoff, wobei der Mobilitätssektor beim Wasserstoffbedarf in Konkurrenz zur chemischen Industrie und Stahlindustrie steht. Die Batterietechnik ist essenziell zur Elektrifizierung des Verkehrs. Deutschland und Europa könnten sich als einer der wichtigsten Standorte für die Batteriezellproduktion entwickeln. Allerdings sind dazugehörige zirkuläre Geschäftsmodelle erst im Aufbau begriffen. Ein großtechnisches Recycling der Lithiumbatterien gestaltet sich aufgrund der Komplexität der technischen Prozesse und der bisher geringen Stückzahlen noch schwierig.

Die Recyclingbranche wird in den letzten Jahren stark im Kontext der **Circular Economy** betrachtet. Neue Geschäftsmodelle, die zum Teil auf biogene Rohstoffe (z. B. Biokunststoffe) setzen, bieten innovationsfreudigen Familienunternehmen in den Umwelttechnologien Recycling, Biotechnologie und Biokunststoffe erhebliche Marktchancen. Sekundärrohstoffe aus Recyclingprozessen sowie biobasierte Rohstoffe und Materialien sind die Ressourcen einer zirkulären, souveränen Wirtschaft, da sie nicht nur nachhaltig gewonnen beziehungsweise entsorgt werden können, sondern auch die geopolitische Abhängigkeit und die von Lieferketten erheblich reduzieren. Die Politik kann diesen Trend durch die Einführung von vorgegebenen Rezyklatanteilen beschleunigen. Der digitale Produktpass schafft Transparenz, indem er Informationen über zum Beispiel Inhaltsstoffe, Aufbau oder Zustand von Stoffen speichert, und ermöglicht so neue Geschäftsmodelle.

3. Digitalisierung

In allen Umwelttechnologien wird über die Digitalisierung als Transparenz schaffend berichtet, sowohl in Geschäfts- und Produktionsprozessen als auch gegenüber den Kunden. Die Transparenz- und produktionssteigernde Datennutzung verleitet allerdings zunehmend zum Datenmissbrauch und zu Hackerangriffen. Gerade Familienunternehmen der Umweltbranche mit einer zum Teil hohen Nähe zum Endkunden (Solarzellen, Wärmepumpen, Batterien, Wasser- und Luftfilter) und als Produzenten von Medizinprodukten (Biotechnologie) müssen aufwendige Datenschutzkonzepte erstellen und umsetzen. Auf KI basierende Anwendungen wie Wetterprognosemodelle für eine smarte Wasser- und Abwasserinfrastruktur haben in den letzten Jahren einige Reifegrade bis zum Markteintritt durchlaufen und bieten neue Anwendungsmöglichkeiten in allen Umwelttechnologien. Während solche digitalen Tools in der Bioinformatik als Teilgebiet der Biotechnologie zunehmend unabdingbar bei der Herstellung maßgeschneiderter Medizinprodukte werden, steht der Gebäudesektor, den die Umwelttechnologien Wärmepumpen und -dämmung sowie Photovoltaik bedienen, noch am Anfang des digitalen Wandels.

4. Politische Strategien und Regulatorik

Ganz generell vermögen bewegliche Familienunternehmen sich eher auf ein dynamisch wandelndes Umfeld einzustellen, was vor allen in den noch nicht ausgereiften Märkten für E-Fuels, Wasserstoff und bei der Batterietechnologie vorteilhaft ist. Noch lässt sich bei der Herstellung und Markteinführung synthetischer Kraftstoffe nicht abschätzen, welche Auswirkungen das Verbot von Verbrennungsmotoren ab 2035 auf neue E-Fuels-Standorte wie „Green Fuels Hamburg“ haben wird. Aber selbst bei einem abgeschwächten Kompromiss, wie ihn die Bundesregierung anstrebt, sind die politischen Rahmenbedingungen eher hemmend für den Markthochlauf synthetischer Kraftstoffe. Die Elektrifizierung des Automobilverkehrs ist sicher, jedoch die Rohstoffverfügbarkeit zur Herstellung der notwendigen Lithium-Ionen-Batterien noch nicht. Grüner Wasserstoff ist von großem nationalem Interesse, aber wer die regenerative Energie zur kurz- bis mittelfristigen Umsetzung der grünen Wasserstoffwirtschaft bereitstellt und wo sie produziert wird, ist noch unklar.

Gerade die Unternehmen der vorher genannten Umwelttechnologien, die von schwer berechenbaren politischen und gesellschaftlichen Entwicklungen getrieben werden, profitieren von einer klaren Regulatorik. Zum Beispiel kann ein gesetzlich geregelter CO₂-Preis eine zentrale Rolle bei der Koordination zwischen Elektrifizierung, Wasserstoff und E-Fuels übernehmen und eine nachfrageseitige Transformation in Industrie, Verkehr und Gebäuden anstoßen. Der Wegfall der EEG-Umlage erhöht die Attraktivität von Betrieb und Investition in Solaranlagen und Windräder. Auf der anderen Seite bestehen aber immer noch gesetzliche Hürden in der Biotechnologie und der Windkraft, die aber im Fall der Biotechnologie auch Produktsicherheit erlauben und bei der Windkraft zunehmend pragmatischeren Lösungen zum Beispiel bei der Neuerrichtung von Windanlagen weichen. Das Lieferkettensorgfaltsgesetz, die Taxonomie-Richtlinie und die CSR-Berichtspflicht lassen in Zukunft noch weitere Aktivitäten der Umwelttechnologieunternehmen zur Umsetzung der SDG erwarten.

5. Expert*innenmeinungen aus Familienunternehmen

Die 15 befragten Expertinnen und Experten haben in den Interviews erneut die hohe Relevanz der Nachhaltigkeit in der Strategie und der Geschäftsmodellentwicklung unterstrichen und verstärkt auf die positive Außenwahrnehmung hingewiesen, die hilfreich bei der Rekrutierung neuer Mitarbeitender ist. Viele befragte Unternehmer*innen besitzen ein hohes Verantwortungsbewusstsein gegenüber Klima und Umwelt, wollen zum Teil zirkuläre Geschäftsmodelle umsetzen und berechnen den CO₂-Fußabdruck ihrer Prozesse und Produkte.

Oftmals wünschten sich die Befragten mehr politische Klarheit und Weitsicht sowie einen offenen, auf Sachebene geführten Dialog zwischen Industrie, Gesellschaft und Politik. Die Unternehmen des Energiesektors bemängeln zum Teil eine schwache Regulatorik und wünschen sich eine faire CO₂-Bepreisung.

Die Digitalisierung bewerten die Expertinnen und Experten vor dem Hintergrund des Fachkräftemangels und der Erfahrungen während der Corona-Pandemie als Schlüssel für Heimarbeit, digitale Lernkonzepte und einen höheren Automatisierungsgrad von Produktionsprozessen durchweg positiv. Allerdings sehen sie auch einen zunehmenden Bedarf für Weiterbildung.

Generell erachten die Befragten die jeweiligen Umwelttechnologien als bedeutend bei der Umsetzung der großen Zukunftsthemen und blicken positiv in die Zukunft.

III. Nachhaltigkeit

Viele der insgesamt 17 durch die Vereinten Nationen (UN) verabschiedeten Nachhaltigkeitsziele werden durch die in den Technologiesteckbriefen beschriebenen Umwelttechnologien adressiert (siehe Tabelle 3). Ähnlich zur Vorgängerstudie beziehen sich die identifizierten Technologien am häufigsten auf SDG 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“, gefolgt von SDG 7 „Bezahlbare, saubere Energie“. Der Einsatz digitaler Technologien berührt alle Nachhaltigkeitsziele und die Digitalisierung gilt somit als Querschnitts- und Hilfstechnologie. Jede in den Steckbriefen beschriebene Umwelttechnologie leistet zu mindestens zwei, meistens sogar zu drei oder vier Nachhaltigkeitszielen einen Beitrag. Dies unterstreicht die Schlüsselrolle von modernen Umwelttechnologien zur Verbesserung der Lebensbedingungen und zur Verringerung negativer Umweltauswirkungen.

Tabelle 3: Zuordnung der in den Technologieteckbriefen beschriebenen Umwelttechniken zu den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen

	1 bezahlbare, saubere Energie	2 gute Gesundheit und Wohlbefinden	3 gute Gesundheit und Wohlbefinden	4 qualitative Bildung	5 geschlechtergerechtigkeit	6 saubere Wasser- und Luftqualität	7 saubere Wasser- und Luftqualität	8 sozialökonomische Wachstum	9 ökologische Wachstum	10 soziale Gerechtigkeit	11 saubere Städte und Gemeinden	12 Nachhaltige Verbrauchsmuster	13 Klimawandel bekämpfen	14 Lebendige Ökosysteme	15 Leben unter Wasser	16 Friede, Sicherheit und Gerechtigkeit	17 Partnerschaft zur Erreichung der Ziele
Photovoltaik	X												X				
Windkraft	X												X				
Biogas	X												X				
Tiefengeothermie	X												X				
Batterien	X												X				
Wasserstofftechnologie			X					X					X				
E-Fuels								X					X				
Biokunststoffe													X				
Recycling													X		X		
Wärmedämmung													X				
Wärmepumpen													X				
Luftreinigung	X												X				
Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung		X												X			
Biotechnologie	X	X											X				
Digitalisierung																	

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Die sieben Leitmärkte der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz sowie deren Marktsegmente	6
Tabelle 2:	Klassifizierung der Umwelttechnologien nach den Zukunftsthemen	189
Tabelle 3:	Zuordnung der in den Technologiesteckbriefen beschriebenen Umwelttechniken zu den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen	193

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzahl der Familienunternehmen in den jeweiligen Umwelttechnologien (Quelle: MARKUS-Unternehmensdatenbank)	12
Abbildung 2:	Die 17 SDGs (Nachhaltigkeitsziele) der Vereinten Nationen	19
Abbildung 3:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Photovoltaikbranche (nach Postleitzahlen)	27
Abbildung 4:	Verteilung der Windenergieanlagen in Deutschland 2021 (mit freundlicher Genehmigung von BWE)	36
Abbildung 5:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Windkraftbranche (nach Postleitzahlen)	39
Abbildung 6:	Repowering (mit freundlicher Genehmigung von EnBW)	43
Abbildung 7:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Biogasbranche (nach Postleitzahlen)	48
Abbildung 8:	Geothermische Systeme zur Speicherung und Bereitstellung von Wärme sowie Kälte und Strom. Oberflächennahe Technologien (links) sind flächendeckend marktverfügbar (mit freundlicher Genehmigung Fraunhofer IEG)	58
Abbildung 9:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Tiefengeothermie-, Geothermie- und Wärmepumpenbranche (nach Postleitzahlen)	61
Abbildung 10:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Batteriebranche (nach Postleitzahlen)	70
Abbildung 11:	Prognose zu Marktvolumen und Beschäftigung in einer Wasserstoffindustrie in der Europäischen Union im Jahr 2030	82
Abbildung 12:	Standorte von Wasserstoff/PtX-Anlagen zur Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Kraft-, Brenn- und Rohstoffe in Deutschland in Gigawattstunden (Wasserstoffatlas des Bundesministeriums für Bildung und Forschung)	83
Abbildung 13:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Wasserstoffbranche (nach Postleitzahlen)	85
Abbildung 14:	Kunststofftypen	105
Abbildung 15:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Recyclingbranche (nach Postleitzahlen)	116
Abbildung 16:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Wärmedämmungsbranche (nach Postleitzahlen)	128
Abbildung 17:	Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Tiefengeothermie-, Geothermie- und Wärmepumpenbranche (nach Postleitzahlen)	141

Abbildung 18: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Abwasser- und Wasserbehandlungsbranche (nach Postleitzahlen).....	159
Abbildung 19: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Biotechnologiebranche (nach Postleitzahlen)	170
Abbildung 20: Anzahl der identifizierten Familienunternehmen in der Digitalisierungsbranche (nach Postleitzahlen)	178

Literaturverzeichnis

- ADAC (2022): Euro-7-Abgasnorm. Die geplante Reform im ADAC Check. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/abgasnormen/euro-7/>, zuletzt geprüft am 01.12.2022.
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2021a): Zustimmung für den Ausbau der Erneuerbaren Energien bleibt hoch. Online verfügbar unter <https://www.unendlich-viel-energie.de/zustimmung-fuer-den-ausbau-der-erneuerbaren-energien-bleibt-hoch>, zuletzt aktualisiert am 29.07.2022, zuletzt geprüft am 29.07.2022.
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2021b): #EEFakten: Solarstrom – Ertragreich und in der Bevölkerung beliebt. Online verfügbar unter <https://www.unendlich-viel-energie.de/eefakten-solarstrom-ertragreich-und-in-der-bevoelkerung-beliebt>, zuletzt aktualisiert am 29.07.2022, zuletzt geprüft am 29.07.2022.
- Albrecht, S.; Endres, H. J.; Knüpffer, E.; Spierling, S. (2016): Biokunststoffe – quo vadis? In: *uwf* 24 (1), S. 55-62. DOI: 10.1007/s00550-016-0390-y.
- Almetwally, A. A.; Bin-Jumah, M.; Allam, A. A. (2020): Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: an overview. In: *Environmental science and pollution research international* 27 (20), S. 24815-24830.
- Alms, K.; Jagert, F.; Fehnker, H.; Blömer, J.; Gehrke, I. (2022): LI -FLUIDS. Hg. v. Fraunhofer IEG, Fraunhofer UMSICHT, RWTH Aachen, BGR, Bundesverband Geothermie, GTN und Li-Fluids. Online verfügbar unter https://www.norddeutsche-geothermietagung.de/vortraege/2022/10_alms_Li-fluids.pdf, zuletzt geprüft am 27.02.2023.
- Alt, N. W. (2020): „Nicht der Verbrennungsmotor ist das Problem, sondern der fossile Kraftstoff“. In: *Motortechnische Zeitschrift* 81 (3), S. 24-27.
- ASA Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung e.V.; BDE Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V.; BDSAV Bundesverband deutscher Sonderabfallverbrennungsanlagen e.V.; BDSV Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V.; bvse Bundesverband Sekundärrohstoffe et al. (2020): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/01-bvse/2020/November/Statusbericht_der_deutschen_Kreislaufwirtschaft_2020.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2020.
- atene KOM (2022): Bundesverkehrsminister, Dr. Volker Wissing, stellt Monitoring-Maßnahmen für Digitalstrategie vor. Online verfügbar unter <https://atenekom.eu/bundesverkehrsminister-dr-volker-wissing-stellt-monitoring-massnahmen-fuer-digitalstrategie-vor/>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.

- Audi (2022): Audi Urban Purifier. der Feinstaubfilter für Elektrofahrzeuge. Online verfügbar unter <https://www.audi-mediacyber.com/de/pressemitteilungen/audi-urban-purifier-der-feinstaubfilter-fuer-elektrofahrzeuge-14949>, zuletzt geprüft am 01.12.2022.
- Ausfelder, F.; Beimann, C. Bertau, M. Bräuninger, S.; Heinzl, A.; Hoer, R.; Koch, W.; Mahlendorf, F. et al. (2015): Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (1-2), S. 17-89. DOI: 10.1002/cite.201400183.
- Backhaus, K. H.; Ehrhardt, H.; Jacob, A.; Petereit, L.; Schreinermacher, B.; Sperr, A. et al. (2021): Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen. Branchenstudie 2021. Hg. v. Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp).
- Basten, M. (2021): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018. Hg. v. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. Online verfügbar unter <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-12.pdf>, zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Baumbach, G. (1994): Luftreinhalteung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (2019): Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung. 1 Band: Springer LINK.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (lfu) (2021): Geothermie in Bayern. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/geologie/geothermie/geothermie_tief/index.htm, zuletzt geprüft am 29.09.2022.
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2022): Die Energieversorgung 2022. Jahresbericht. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/Jahresbericht_2022_final_20Dez2022.pdf, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Becker, A. (2022a): Trockenheit in Europa 2022. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20220706_trockenheit_europa_2022.pdf;jsessionid=2523EFD259BE427DB9A2C394577CA908.live31093?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 31.08.2022.
- Becker, S. et al. (2022b): Metastudie Verbesserung Datengrundlage Gebäudebereich. Berlin, München. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/metastudie-verbesserung-datengrundlage-gebäudebereich.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 26.10.2022.

- Behörde für Wirtschaft und Innovation Hamburg (2022): „Green Fuels Hamburg“ plant industrielle Produktion nachhaltiger Flugkraftstoffe für eine klimaneutrale Luftfahrt. Online verfügbar unter <https://www.hamburg.de/bwi/medien/16288680/2022-06-23-bwi-green-fuels-hamburg/>, zuletzt geprüft am 17.11.2022.
- Bellini, E. (2021): Fahrzeugintegrierte Photovoltaik für leichte Nutzfahrzeuge. In: *pv magazine*, 09.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2021/04/09/fahrzeugintegrierte-photovoltaik-fuer-leichte-nutzfahrzeuge/>, zuletzt geprüft am 20.07.2022.
- Bieser, J.; Hintemann, R.; Beucker, S.; Schramm, S.; Hilty, L. (2020): Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken. Hg. v. Bitkom e.V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf, zuletzt geprüft am 12.03.2021.
- BIO Deutschland (2023): Regulatorische Angelegenheiten. Online verfügbar unter <https://www.biodeutschland.org/de/regulatorische-angelegenheiten.html>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- BIOCOM (2019): Die deutsche Biotechnologie-Branche 2019. Online verfügbar unter https://biotechnologie.de/statistics_articles/28-die-deutsche-biotechnologie-branche-2019, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Bioökonomie.de (2019a): nova-Institut (2019): Biobasierte Polymere – Produktion, Kapazitäten, Trends. Der neue Markt- und Trendreport des nova-Instituts zeigt Kapazitäten und Produktionsdaten aller biobasierten Polymere. Online verfügbar unter <https://biooekonomie.de/nova-institut-2019-biobasierte-polymere-produktion-kapazitaeten-trends>, zuletzt geprüft am 07.12.2020.
- Bioökonomie.de (2019b): Bioplastik weiter im Aufwind. Online verfügbar unter <https://biooekonomie.de/nachrichten/neues-aus-der-biooekonomie/bioplastik-weiter-im-aufwind>, zuletzt geprüft am 17.12.2020.
- biotechnologie.de (2023): Meilensteine der Biotechnologie – ein Überblick. Hg. v. digitaler Mediendienst. BIOCOM. Online verfügbar unter https://biotechnologie.de/knowledge_base_articles/2-meilensteine-der-biotechnologie-ein-ueberblick, zuletzt geprüft am 27.01.2023.

- BiPRO GmbH; Öko-Institut e.V.; Fraunhofer IBP (2018): Weiterentwicklung des Umweltzeichens Blauer Engel für Wärmeverbundsysteme: Kriterien für Dämmstoffe sowie biozidfreie Putze und Beschichtungen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (TEXTE). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-01_texte_30-2018_waermedaemmverbundsysteme_korr.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Bitkom e.V. (2021): Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-10/20211010_bitkom_studie_klimaeffekte_der_digitalisierung.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2022.
- BloombergNEF (2020): Weltweite Elektrofahrzeug-Flotte 2030 | Statista. Hg. v. Statista DE. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1261909/umfrage/anzahl-der-weltweiten-elektrofahrzeuge/>, zuletzt aktualisiert am 28.08.2022, zuletzt geprüft am 28.08.2022.
- Boer, L. (2022): Steigende Metallpreise als mögliches Hindernis der Energiewende. Hg. v. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). Online verfügbar unter https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.833986.de/22-4-1.pdf, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- Born, H.; Bracke, R.; Eicker, T.; Rath, M. (2022): Roadmap Oberflächennahe Geothermie. Unter Mitarbeit von Fraunhofer-Gesellschaft.
- Bosch (2022): Bosch baut Wasserstoff-Portfolio aus, zuletzt aktualisiert am <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/ueber-uns/aktuelle-neuigkeiten/bosch-baut-wasserstoff-portfolio-aus/>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- BP (2020): Statistical Review of World Energy (69). Online verfügbar unter <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>, zuletzt geprüft am 27.02.2023.
- BR24 (2022): Windkraft-Ausbau in Bayern: Was jetzt passiert. Online verfügbar unter <https://www.br.de/nachrichten/bayern/windkraft-ausbau-in-bayern-was-jetzt-passiert,TNI4BNI>, zuletzt geprüft am 02.03.2023.
- Bracke, R.; Huenges, E. (2021): Roadmap Tiefengeothermie für Deutschland.
- Brémond, U.; Bertrandias, A.; Steyer, J. P.; Bernet, N.; Carrere, H. (2021): A vision of European biogas sector development towards 2030: Trends and challenges. In: *Journal of Cleaner Production* 287, S. 125065.
- Buberger, J.; Kersten, A.; Kuder, M.; Eckerle, R.; Weyh, T.; Thiringer, T. (2022): Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159, S. 112158. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112158.

- Buchholz, K.; Collins, J. (2022): Eine kleine Geschichte der Biotechnologie. Von Bier und Wein zu Penicillin, Insulin und RNA-Impfstoffen. Berlin, Germany, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Buhr, K. (2022): Energiewende: Was tun gegen den Fachkräftemangel? Hg. v. Umweltinstitut München e.V. Online verfügbar unter <http://www.umweltinstitut.org/aktuelle-meldungen/meldungen/2022/klima/energiewende-was-tun-gegen-den-fachkraeftemangel.html>, zuletzt geprüft am 31.10.2022.
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (2022a): Hintergrund „Bio“-Kunststoffe. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND).
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (2022b): Hintergrund „Bio“-Kunststoffe. Unter Mitarbeit von BUND-Arbeitskreis Abfall & Rohstoffe.
- Bundesamt für Justiz und Verbraucherschutz (BMJV) (2022): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG). Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BImSchG.pdf>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2022): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2022. Online verfügbar unter https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2022.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 09.01.2023.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2021): Kobalt – Informationen zur Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kobalt.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte ; Ergebnisbericht der fallstudiengestützten Expertise „Klimaanpassungsstrategien zur Überflutungsvorsorge verschiedener Siedlungstypen als kommunale Gemeinschaftsaufgabe“. Stand April 2015. Bonn: BBSR im BBR.
- Bundesministerium der Justiz (2023): Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz – WindSeeG). Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/windseeg/WindSeeG.pdf>, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

- Bundesministerium des Innern und für die Heimat (BMI) (2021): Bericht zur Hochwasserkatastrophe 2021: Katastrophenhilfe, Wiederaufbau und Evaluierungsprozesse. Online verfügbar unter https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2022/abschlussbericht-hochwasserkatastrophe.pdf;jsessionid=4DC725035970CC8CF1EF41C7666E33FF.2_cid287?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 27.01.2023.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2016): Carbon2Chem. Online verfügbar unter <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php>, zuletzt geprüft am 01.03.2023.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2021a): How partners in the H2Mare flagship project intend to produce hydrogen on the high seas. Online verfügbar unter <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/projects/h2mare>, zuletzt geprüft am 20.01.2023.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2021b): How the H2Giga flagship project aims to mass produce electrolyzers for the production and scale-up of hydrogen. Online verfügbar unter <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/projects/h2giga>, zuletzt geprüft am 20.01.2023.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2021c): How the TransHyDE flagship project aims to develop a hydrogen transport infrastructure. Online verfügbar unter <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/projects/transhyde>, zuletzt geprüft am 20.01.2023.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2021d): Wie Partner im Leitprojekt H2Mare Wasserstoff direkt auf hoher See produzieren wollen, zuletzt aktualisiert am <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/h2mare>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2022): Wissenschaftseinrichtungen. Online verfügbar unter <https://www.bundesbericht-forschung-innovation.de/de/Übersichtskarte-1791.html>, zuletzt geprüft am 15.03.2023.
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2021a): Bericht zum Breitbandatlas. Teil 1: Ergebnisse. Online verfügbar unter https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bericht-zum-breitbandatlas-mitte-2021-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 27.01.2023.
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2021b): Sofortprogramm Saubere Luft. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Mobilitaet/Urbane-Mobilitaet/Sofortprogramm-Saubere-Luft/sofortprogramm-saubere-luft.html>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.

- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019): forschungsfelder – Magazin für Ernährung und Landwirtschaft (2). Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Forschungsfelder-2-2019-Das-waechst-nach.pdf?__blob=publicationFile&v=14, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2018): Das richtige Kältemittel ist klimafreundlich. Online verfügbar unter <https://www.kaeltemittel-info.de/informationen/kaeltemittel/das-richtige-kaeltemittel-ist-klimafreundlich/>, zuletzt aktualisiert am 2020, zuletzt geprüft am 29.10.2020.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020): Wasserstoff und Klimaschutz. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/wasserstoff-und-klimaschutz/>, zuletzt aktualisiert am 10.08.2020, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2021): GreenTech made in Germany 2021 – Umwelttechnik-Atlas für Deutschland. München, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2017): Smart City Charta. Digitale Transformation in den Kommunen nachhaltig gestalten. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2017/smart-city-charta-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2021): Luftreinhaltung – Worum geht es? Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/luft/luftreinhaltung-worum-geht-es>, zuletzt geprüft am 24.02.2023.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2022a): Nationale Wasserstrategie. Kurzfassung, zuletzt geprüft am 15.12.2022.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2022b): Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2023): Nationale Wasserstrategie. Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023. Hg. v. BMUV.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=14.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2021a): IPCEIs in der Batteriezellfertigung. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads//infopapier-ipcei-batteriezellfertigung.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 20.03.2023.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2021b): Bericht der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bericht-der-bundesregierung-zur-umsetzung-der-nationalen-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=22.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2022): Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien 2000 bis 2021. Unter Mitarbeit von Oliver Deke. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihe-der-beschaeftigungszahlen-seit-2000.pdf;jsessionid=FCDE8DA41403B82783A648CD269FCCA3?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 02.08.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2020): Barometer Digitalisierung der Energiewende. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/barometer-digitalisierung-der-energiewende-berichtsjaehr-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=20, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2021): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 20.10.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022a): Bundeswirtschaftsministerium legt Reform der Gebäudeförderung vor – Fokus auf Sanierung und Vereinfachung der Antragstellung durch klarere Zuständigkeiten. Pressemitteilung vom 27. Juli 2022. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/07/20220726-bundeswirtschaftsministerium-legt-reform-der-gebaeudefoerderung-vor.html>, zuletzt geprüft am 19.12.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022b): Eckpunkte für eine Erdwärmekampagne. Geothermie für die Wärmewende. Bruchmann; Ullrich; IIC6, zuletzt geprüft am 21.11.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022c): Erstes Großprojekt aus der BMWK-Fördermaßnahme zum „Batterie-Ökosystem“ gestartet. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220329-erstes-grossprojekt-aus-der-bmwk-fordermassnahme-zum-batterie-okosystem-gestartet.html>, zuletzt geprüft am 07.11.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022d): Geothermie für die Wärmewende – Bundeswirtschaftsministerium startet Konsultationsprozess. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/11/20221111-geothermie-fuer-die-waermewende.html>, zuletzt geprüft am 21.11.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022e): BMWi Newsletter – Energiewende direkt. Solarstrom vom LKW-Dach. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2022/03/newsletter_2022-03.html?__act=renderPdf&__iDocId=3689938, zuletzt geprüft am 20.07.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022f): Bundesbericht Energieforschung 2022. Forschungsförderung für die Energiewende. Online verfügbar unter https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/agent/ptjpublications/E33331E5A7AF6A2AE0537E695E86221A/live/document/bundesbericht-energieforschung-2022.pdf, zuletzt geprüft am 29.07.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022g): Überblickspapier Osterpaket. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 12.07.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022h): Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien 2000 bis 2021. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihe-der-beschaefigungszahlen-seit-2000.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 12.12.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022i): Parlamentarischer Staatssekretär Kellner: „Batterien müssen in der EU so nachhaltig wie möglich sein – von der Produktion bis zum Recycling“. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/04/20220425-parlamentarischer-staatssekretar-kellner-batterien-muessen-in-der-eu-so-nachhaltig-wie-moeglich-sein.html>, zuletzt geprüft am 07.11.2022.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022j): Habeck: „Weitere Stärkung der Vorsorge durch kurzfristige Erhöhung der Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien und weitere Maßnahmen zur Senkung des Gasverbrauchs“. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/09/20220914-habeck-weitere-staerkung-der-vorsorge.html>, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022k): Geothermie für die Wärmewende – Bundeswirtschaftministerium startet Konsultationsprozess. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/11/20221111-geothermie-fuer-die-waermewende.html>, zuletzt geprüft am 07.02.2023.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023a): BMWK will zweites Batterie-IPCEI erweitern. Pressemitteilung vom 13.01.2023. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/01/20230113-bmwk-will-zweites-batterie-ipcei-erweitern.html>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023b): Die nationale Wasserstoffstrategie. Online verfügbar unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Dossiers/wasserstoffstrategie.html#:~:text=Die%20Bundesregierung%20plant%20daher%2C%20noch,auf%2010%20GW%20bis%202030\),](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Dossiers/wasserstoffstrategie.html#:~:text=Die%20Bundesregierung%20plant%20daher%2C%20noch,auf%2010%20GW%20bis%202030),) zuletzt geprüft am 08.03.2023.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (o. J.): Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Online verfügbar unter http://www.bmz.de/de/themen/2030_agenda/index.html?follow=adword, zuletzt geprüft am 02.10.2020.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (Hg.) (2022): AGENDA 2030 | 17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung. Online verfügbar unter <https://www.bmz.de/de/agenda-2030/sdg-12>, zuletzt geprüft am 29.12.2022.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (2023): Corporate Social Responsibility (CSR). Online verfügbar unter <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/corporate-social-responsibility-csr-14190>, zuletzt geprüft am 27.02.2023.
- Bundesnetzagentur (2019): EEG in Zahlen 2019. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEGinZahlen_2019_BF.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 10.03.2021.

- Bundesnetzagentur (2022): Photovoltaik – Installierte Leistung nach Bundesland 2021 | Statista. Hg. v. Statista DE. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250881/umfrage/installierte-photovoltaikleistung-nach-bundesland/>, zuletzt aktualisiert am 04.08.2022, zuletzt geprüft am 04.08.2022.
- Bundestagsfraktion, Bündnis 90/Die Grünen (2022): Expertenrat bestätigt Sofortprogramm Gebäude. Online verfügbar unter <https://www.gruene-bundestag.de/themen/bauen-wohnen-stadtentwicklung/gebaeude-fit-machen-fuer-klimaziele>, zuletzt aktualisiert am 11.10.2022, zuletzt geprüft am 11.10.2022.
- Bundesverband der Deutschen Industrie e.V (BDI) (Hg.) (2021): Der „Digitale Produktpass“ auf dem Prüfstand. Online verfügbar unter <https://bdi.eu/artikel/news/der-digitale-produktpass-auf-dem-pruefstand/>, zuletzt geprüft am 12.01.2023.
- Bundesverband für Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (2020): Klimaschutz durch digitale Technologien. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Bundesverband Geothermie (2022a): Oberflächennahe Geothermie. Hg. v. Bundesverband Geothermie, zuletzt geprüft am 24.08.2022.
- Bundesverband Geothermie (2022b): Risiken tiefegeothermischer Projekte. Online verfügbar unter <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/r/risiko-tiefegeothermischer-projekte.html>, zuletzt geprüft am 27.02.2023.
- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2023): Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik). Berlin. Online verfügbar unter https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2022/02/bsw_faktenblatt_photovoltaik.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2023.
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp) (2023): Gebäudeenergiegesetz: 65 Prozent EE-Regelung beim Heizungstausch verspricht notwendige Planungssicherheit für mehr Klimaschutz im Gebäudesektor. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/gebaeudeenergiegesetz-65-prozent-ee-regelung-beim-heizungstausch-verspricht-notwendige-planungssicherheit-fuer-mehr-klimaschutz-im-gebaeudesektor/#content>, zuletzt geprüft am 14.03.2023.
- Bundesverband WindEnergie (BWE) (2020): Widerstand- und Auftriebsläufer. Online verfügbar unter <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/widerstandlaeufer-auftriebslaeufer/>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Bundesverband WindEnergie (BWE) (2022): Zahlen und Fakten. Statistische Kennziffern zur Erfolgsgeschichte Windenergie. Online verfügbar unter <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

- Bundesverband WindEnergie (BWE) (2023): Ausbau der Windenergie an Land 2022: Genehmigungen sind der Zubau der Zukunft! Grüneisen, Frank. Online verfügbar unter <https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/detail/ausbau-der-windenergie-an-land-2022-genehmigungen-sind-der-zubau-der-zukunft/>, zuletzt geprüft am 08.05.2023.
- Bürger, V.; Hesse, T.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, P.; Quack, D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 – Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (CLIMATE CHANGE, 26/2017). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06_climate-change_26-2017_klimaneutraler-gebäudebestand-ii.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Buttlar, J.; Klein, C.; Bruch, A.; Fachinger, A.; Funk, J.; Hawer, H.; Kuijpers, A. (2020a): Genetik in der Kontroverse: Gentechnik, Biotechnologie und Ethik. In: J. Buttlar, C. Klein, A. Bruch, A. Fachinger, J. Funk, H. Hawer und A. Kuijpers (Hg.): Tutorium Genetik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 329-353.
- Buttlar, J.; Klein, C.; Bruch, A.; Fachinger, A.; Funk, J.; Hawer, H.; Kuijpers, A. (Hg.) (2020b): Tutorium Genetik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- C3-Mobility (o. J.): Klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft. Online verfügbar unter <http://www.c3-mobility.de/>, zuletzt geprüft am 17.11.2022.
- Cames, M.; Böttcher, H.; Hutfilter, U.; Wilson, R. (2021): Options for multilateral initiatives to close the global 2030 climate ambition and action gap Policy field synthetic e-fuels. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/076/52076054.pdf, zuletzt geprüft am 27.06.2022.
- Center for Entrepreneurial and Financial Studies (CEFS); Technische Universität München (TUM) (2019): Börsennotierte Familienunternehmen in Deutschland. Bedeutung, Merkmale, Performance. Hg. v. Stiftung Familienunternehmen. Online verfügbar unter https://www.familienunternehmen.de/media/public/pdf/publikationen-studien/studien/Boersennotierte-Familienunternehmen-in-Deutschland_Studie_Stiftung-Familienunternehmen_2019.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Ceresana eK (2020): Marktstudie Biokunststoffe. Online verfügbar unter <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/biokunststoffe/biokunststoffe-marktanteil-kapazitaet-angebot-nachfrage-prognose-innovation-anwendung-wachstum-produktion-industrie.html>, zuletzt geprüft am 18.12.2020.
- chemie.de (2023): Elektrolyseur. Online verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Elektrolyseur.html>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.

Custelcean, R. (2021): Direct air capture of CO₂ via crystal engineering. In: *Chemical science* 12 (38), S. 12518-12528.

Darmstädter Energie-Labor für Technologien in der Anwendung (DELTA) (2023): Schaufenster für die urbane Energiewende durch interagierende energieoptimierte Quartiere, zuletzt aktualisiert am <https://delta-darmstadt.de/#projektinfo>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.

Date, M.; Patyal, V.; Jaspal, D.; Malviya, A.; Khare, K. (2022): Zero liquid discharge technology for recovery, reuse, and reclamation of wastewater: A critical review. In: *Journal of Water Process Engineering* (49). DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103129.

DECHEMA e.V. (2015): Einordnung von Zero Liquid Discharge (ZLD) im industriellen Wassermanagement. Diskussionspapier der ProcessNet-Fachgruppe Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik. Online verfügbar unter https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Diskussionspapier_ZLD_2015.pdf, zuletzt geprüft am 08.03.2023.

Deerberg, G.; Hiebel, M.; Gehrke, I. (2019): Welche Chancen und Risiken birgt die Digitalisierung für die Nachhaltigkeit? 52. Essener Tagung für Wasserwirtschaft vom 20.03.-22.03.2019 in Aachen. 52. Essener Tagung für Wasserwirtschaft. Aachen.

Delhaes, D.; Sratmann, K. (2023): Deutschlands Wasserstoff-Strategie lässt auf sich warten – Unternehmen werden ungeduldig. Hg. v. Handelsblatt. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/klimaneutralitaet-deutschlands-wasserstoff-strategie-laesst-auf-sich-warten-unternehmen-werden-ungeduldig/28940674.html>, zuletzt geprüft am 08.03.2023.

Der Spiegel (2023): Klimawandel könnte Deutschland 900 Milliarden Euro bis 2050 kosten. Online verfügbar unter https://www.spiegel.de/wirtschaft/klimawandel-koennte-deutschland-laut-studie-900-milliarden-euro-bis-2050-kosten-a-d0f60fa2-593c-4b64-9cc1-6a7a1b74d13e?sara_ref=re-so-app-sh, zuletzt geprüft am 13.03.2023.

Deutsch-Dänische Handelskammer (2021): Dänemark. Bioenergie zur Erzeugung erneuerbarer Energien. Zielmarktanalyse 2021 mit Profilen der Marktakteure. Online verfügbar unter https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Marktanalysen/2021/zma-daenemark-2021-bioenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) (2019): Akademietag: Warum Biotechnologie immer wichtiger wird. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.acatech.de/allgemein/acatech-akademietag-warum-biotechnologie-immer-wichtiger-wird/>, zuletzt geprüft am 22.09.2020.

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) (2022): Horizonte: Biotechnologie.

- Deutsche Rohstoffagentur (DERA) und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2022): DERA stellt Ergebnisse der Rohstoffrisikobewertung Lithium vor: Hohe Angebotskonzentration bei Lithium – Schlüsselrohstoff und limitierender Faktor für die Verkehrswende und Speicherung regenerativer Energien. Andreas beuge. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/DERA/dera-bgr-2022-06-24_pm_dera-stellt-ergebnisse-der-rohstoffrisikobewertung-lithium-vor.html?nn=1542388, zuletzt geprüft am 24.06.2022.
- Deutsche Umwelthilfe e.V. (2020): Ökologisch und leistungsstark – Dämmen mit nachwachsenden Rohstoffen. Eine Broschüre für interessierte Praktiker*innen. Online verfügbar unter https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Praxisbroschue_NawaRo-Daemmstoffe_Web_2522020.pdf, zuletzt geprüft am 20.10.2022.
- Deutsche Umwelthilfe e.V. (2021a): Kreislaufwirtschaft in der Solarbranche stärken. Alte Photovoltaik-Module für den Klima- und Ressourcenschutz nutzen. Weißbuch zur Stärkung der Wiederverwendung und des Recyclings von Photovoltaik-Modulen. Hg. v. Deutsche Umwelthilfe e.V. Online verfügbar unter https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Pressemitteilungen/Kreislaufwirtschaft/210310_Wei%C3%9Fbuch_Kreislaufwirtschaft_Solarmodule_st%C3%A4rken_DEU_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2022.
- Deutsche Umwelthilfe e.V. (2021b): Innovationen in der Wärmedämmung. Eine Broschüre für interessierte Praktiker:innen. Online verfügbar unter https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Infobroschue%BCre_Innovationen_in_der_W%C3%A4rmed%C3%A4mmung.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (o. J.): Digitalisierung. Online verfügbar unter <https://de.dwa.de/de/digitalisierung.html>, zuletzt geprüft am 10.01.2023.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (2017): Digitalisierung und deren Herausforderungen für die Wasserwirtschaft meistern. Online verfügbar unter <https://de.dwa.de/de/digitalisierung-und-deren-herausforderungen-f%C3%BCr-die-wasserwirtschaft-meistern.html>, zuletzt geprüft am 10.03.2021.
- Deutscher Bundestag (2022a): Drucksache 20/5037. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU – Drucksache 20/4816. Online verfügbar unter <https://dserver.bundestag.de/btd/20/050/2005037.pdf>, zuletzt geprüft am 08.03.2023.

- Deutscher Bundestag (2022b): Studien zu Ökobilanzen von Gebäudedämmstoffen. In: *Wissenschaftliche Dienste*. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/891140/839fe19dbc21b7e9a5daddcd637dad71/WD-8-004-22-pdf-data.pdf>, zuletzt geprüft am 18.10.2022.
- Deutscher Bundestag (2022c): Nachbesserungsbedarf bei Gesetz zum Windkraftausbau angemahnt. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2022/kw25-pa-klimaschutz-energie-windkraft-899622>, zuletzt geprüft am 02.08.2022.
- Deutscher Nachhaltigkeitspreis (Hg.) (2022): Deutscher Nachhaltigkeitspreis Unternehmen 2023. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltigkeitspreis.de/unternehmen/preistraeger-unternehmen/2022/sieger/>, zuletzt geprüft am 29.12.2022.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches /DVGW) (2022): Trinkwasser. Lebensmittel Nummer eins. Online verfügbar unter <https://www.dvgw.de/themen/wasser>, zuletzt geprüft am 06.01.2023.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches /DVGW); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (2022): Raosmap 2030 – DVGW und DWA betreiben Vorsorge für zukunftsfähige Wasserwirtschaft. Technisch-wissenschaftliche Spitzenverbände erarbeiten konkrete Handlungsempfehlungen. Wosnitzka, Daniel, zuletzt geprüft am 15.12.2022.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2022): Wetter und Klima – Deutscher Wetterdien...ur extremen Trockenheit in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2022/20220812_trockenheit_news.html, zuletzt geprüft am 07.03.2023.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2023): Energetische Sanierung von Gebäuden kann durch Mindeststandards und verbindliche Sanierungsziele beschleunigt werden. Unter Mitarbeit von Sophie Behr, Merve Küçük und Karsten Neuhoff. Online verfügbar unter https://www.diw.de/de/diw_01.c.868221.de/publikationen/diw_aktuell/2023_0087/energetische_sanierung_von_gebaeuden_kann_durch_mindeststandards_und_verbindliche_sanierungsziele_beschleunigt_werden.html, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Deutsches Maiskomitee (DMK) (2020a): Gesamtviehdichte auf Kreisebene. Online verfügbar unter https://www.maiskomitee.de/web/upload/pdf/statistik/dateien_pdf/Gesamtviehdichte_an_LN_Kreisebene_2020.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2023.
- Deutsches Maiskomitee (DMK) (2020b): Vergleich des prozentualen Anteils des Maisanbaus an der Ackerfläche und an der Landwirtschaftlichen Nutzfläch. Online verfügbar unter https://www.maiskomitee.de/web/upload/pdf/statistik/dateien_pdf/Maisanteil_an_AF_und_LN_Kreisebene_2020.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2023.

- Deutsches Patent- und Markenamt (22.08.2022): Deutschland führend bei klimafreundlichen Innovationen. Online verfügbar unter <https://www.dpma.de/service/presse/pressemitteilungen/29032022/index.html>, zuletzt geprüft am 22.08.2022.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2022): ZEDU-1: Das im Betrieb umweltfreundlichste Auto der Welt. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/03/20220928_zedu-1-das-im-betrieb-umweltfreundlichste-auto-der-welt.html, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Deutschlandfunk (2022): Wie abhängig ist Deutschland von russischem Erdgas? Online verfügbar unter <https://www.deutschlandfunk.de/nord-stream-2-gas-kritik-abhaengig-100.html>, zuletzt geprüft am 27.02.2023.
- Die Bundesregierung (2021a): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873516/3d3b15cd92d0261e7a0bc8f43b7839/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-nicht-barrierefrei-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Die Bundesregierung (2021b): Digitalisierung gestalten. Umsetzungsstrategie der Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/992814/1605036/339a38c264fd50ff9efca6ad8da64bae/digitalisierung-gestalten-download-bpa-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- Die Bundesregierung (2021c): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). Online verfügbar unter https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund_18082021_IGI25025005.htm, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Die Bundesregierung (2022a): Eckpunktepapier BMWK BMUV und BMEL. Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz. Pressemitteilung vom 10. Februar 2022. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktepapier-ausbau-photovoltaik-freiflaechenanlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 04.08.2022.
- Die Bundesregierung (2022b): Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2022/fortschrittsbericht-wasserstoffstrategie-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 17.11.2022.

- Die Bundesregierung (2022c): Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 02.12.2022.
- Die Bundesregierung (2022d): Stromkunden werden entlastet. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa-im-dialog/eeg-umlage-faellt-weg-2011728>, zuletzt aktualisiert am 28.05.2022, zuletzt geprüft am 12.07.2022.
- Die Bundesregierung (2022e): Nationale Energieversorgung sichern. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/sichere-gasversorgung-2037912>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Die Bundesregierung (2023a): Mehr Windenergie auf See. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/windenergie-auf-see-gesetz-2022968>, zuletzt geprüft am 29.03.2023.
- Die Bundesregierung (2023b): Mehr Windenergie für Deutschland. „Wind-an-Land-Gesetz“ 2 % bis 2032. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/wind-an-land-gesetz-2052764>, zuletzt aktualisiert am 01.02.2023, zuletzt geprüft am 02.03.2023.
- Die Bundesregierung (2023c): Programm Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference, CCfD). Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Foerderung-National/018-pilotprogramm.html>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Diefenbach, N.; Clausnitzer, K.-D. (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt; Bremer Energie-Institut. Darmstadt, Bremen. Online verfügbar unter http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Endbericht_Datenbasis.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Dolega, P.; Buchert, M.; Betz, J. (2020): Ökologische und sozio-ökonomische Herausforderungen in Batterie-Lieferketten: Graphit und Lithium. Kurzstudie erstellt im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes Fab4Lib – Forschung zu Maßnahmen zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen entlang der gesamten Wertschöpfungskette (FKZ 03XP0142E). Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Graphit-Lithium-Oeko-Soz-Herausforderungen.pdf>, zuletzt geprüft am 13.08.2022.

- Dotzauer, M.; Barchmann, T.; Schmieder, U.; Rensberg, N.; Stinner, W.; Arnold, K.; Krüger, C. (2022): Kurzstudie zur Rolle von Biogas für ein klimaneutrales, 100 % erneuerbares Stromsystem 2035 (KS_BSKES). Hg. v. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Studien/Kurzstudie_Biogas_2022.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Dürfeld, K. (2022): Beschleunigungsprojekt soll Geothermie auf die Sprünge helfen. Hg. v. Helmholtz-Gemeinschaft, zuletzt geprüft am 26.10.2022.
- E-Fuels | Einfach.Genial.Klimaneutral (2022). Online verfügbar unter <https://www.e-fuels.de/>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2022, zuletzt geprüft am 04.07.2022.
- Ellen MacArthur Foundation (Hg.) (2021): Universal circular economy policy goals. Online verfügbar unter <https://emf.thirdlight.com/file/24/GgC25OAGLztng9GgtcoGqo7OJA/%5BEN%5D%20Universal%20circular%20economy%20policy%20goals.pdf>, zuletzt geprüft am 29.12.2022.
- Emschergenossenschaft Lippeverband (EGLV) (2022): Energieautarkie ist die neue Herausforderung für die Wasserwirtschaft. Jahreshauptversammlung des Lippeverbandes in Unna. Online verfügbar unter <https://www.eglv.de/medien/energieautarkie-ist-die-neue-herausforderung-fuer-die-wasserwirtschaft-2/>, zuletzt geprüft am 10.01.2023.
- EnBW (2021): Aus alt mach neu: Was bringt Repowering? Online verfügbar unter <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/was-bringt-repowering.html>, zuletzt aktualisiert am 04.11.2021, zuletzt geprüft am 08.08.2022.
- Endres, S. (2018): Propan-Wärmepumpe: Umweltfreundlich und effizient. In: *Weiter.vorn (Das Fraunhofer Magazin)* (3), 26f. Online verfügbar unter https://www.archiv.fraunhofer.de/weiter_vorn_3_2018/#26, zuletzt geprüft am 29.10.2020.
- Energate messenger (2023): Hydrex Green – Euro/KG. Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/markt/gas-oel-und-wasserstoff/preise/211752/hydrex-green-euro-kg>, zuletzt geprüft am 08.03.2023.
- Envoria (o. J.): EU Taxonomie Grundlagen. Online verfügbar unter <https://eu-taxonomy.info/de/info/eu-taxonomie-grundlagen>, zuletzt geprüft am 19.01.2023.
- Erdwerk GmbH (2022): Was ist Geothermie? Online verfügbar unter <https://www.erdwerk.com/de/hintergrund/was-ist-geothermie>, zuletzt geprüft am 29.09.2022.

Ernst & Young GmbH (2022): Deutscher Biotechnologie-Report 2022. Addendum zum Global Biotechnology Report „Beyond Borders“. Online verfügbar unter https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/de_de/noindex/ey-deutscher-biotechnologie-report-2022-18.pdf?mkt_tok=NTIwLVJYUC0wMDMAAAGHkyl9WVOZ0mAGVeBo49qy54uiLShloyeoS8VkfLLurSzIsiM4XpU-3FTBjSYq2znU8f-bbpPStgLradlFhbAvm1ATftUSZ8jU219btH1g2dI95n6oQ.

EuPD Research Sustainable Management GmbH (2019): Energiewende im Kontext von Atom- und Kohleausstieg. Perspektiven im Strommarkt bis 2040. Bonn. Online verfügbar unter https://www.solarwirtschaft.de/wp-content/uploads/2020/08/EUPD_Energiewende_Studie_Update_2020_webversion.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.

Europäische Kommission (2018a): Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Europäische Kommission. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.

Europäische Kommission (2018b): Implementing and delegated acts. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/adopting-eu-law/implementing-and-delegated-acts_en, zuletzt aktualisiert am 11.12.2018, zuletzt geprüft am 31.08.2022.

Europäische Kommission (2018): Impacts of circular economy policies on the labour market. Brüssel. Online verfügbar unter <http://trinomics.eu/wp-content/uploads/2018/07/Impacts-of-circular-economy-on-policies-on-the-labour-market.pdf>, zuletzt geprüft am 23.09.2020.

Europäische Kommission (2019): European Green Deal. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.

Europäische Kommission (2020a): Circular Economy Action Plan. Brüssel. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_action_plan.pdf, zuletzt geprüft am 25.09.2020.

Europäische Kommission (2020b): Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=DE>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.

- Europäische Kommission (2020c): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 04.12.2020.
- Europäische Kommission (2020d): Neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_20_420, zuletzt geprüft am 02.09.2020.
- Europäische Kommission (2020e): Why raising the alcohol content of Europe's fuels could reduce carbon emissions. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/why-raising-alcohol-content-europes-fuels-could-reduce-carbon-emissions>, zuletzt geprüft am 01.03.2023.
- Europäische Kommission (2021a): Auf dem Weg zu einem gesunden Planeten für alle EU-Aktionsplan: „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“.
- Europäische Kommission (2021b): Europäische Allianz für saubereren Wasserstoff. Online verfügbar unter <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=0e18ba78ea367f88jmltdHM9-MTY3MzU2ODAwMCZpZ3VpZD0xMjU4MmY1Yy1lYzQzLTY3MmWYtMDc2Ni0zZDAyZWQzMjY2ZmYmaW5zaWQ9NTE3Nw&ptn=3&hsh=3&fclid=12582f5c-ec43-671f-0766-3d02ed3266ff&psq=Europ%c3%a4ische+Allianz+f%c3%bcr+sauberen+Wasserstoff&u=a1aHR0cHM6Ly9lYy5ldXJvcGEuZXUvY29tbWlzc2lvbi9wcmVzc2Nvcmlkcm9nZW5fQWxsaWFuY2VfREUucGRmLnBkZg&ntb=1>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Europäische Kommission (2021c): Europäischer Grüner Deal. Kommission schlägt Neuausrichtung von Wirtschaft und Gesellschaft in der EU vor, um Klimaziele zu erreichen. Online verfügbar unter https://www.lag21.de/files/default/pdf/Portal%20Nachhaltigkeit/europa/portal-n-uberarbeitung/eu_2021_egd_pm.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2023.
- Europäische Kommission (2021d): Mitteilung: 2030 Digital Compass: the European way for the Digital Decade. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0118>, zuletzt aktualisiert am 24.10.2022, zuletzt geprüft am 24.10.2022.

Europäische Kommission (2022a): Ökodesign für nachhaltige Produkte. Die neue Verordnung wird die Kreislaufwirtschaft, die Energieeffizienz und andere Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit von EU-Produkten verbessern. Online verfügbar unter https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products_en, zuletzt geprüft am 12.01.2023.

Europäische Kommission (2022b): REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Online verfügbar unter https://environment.ec.europa.eu/system/files/2022-03/COM_2022_142_1_EN_ACT_part1_v6.pdf, zuletzt geprüft am 12.02.2023.

Europäische Kommission (2023): Renewable energy. method for assessing greenhouse gas emission savings for certain fuels. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12713-Renewable-energy-method-for-assessing-greenhouse-gas-emission-savings-for-certain-fuels_en.

Europäische Umweltagentur (EUA) (2022): Luftqualität in Europa 2022 (05/2022).

Europäische Union (2013): BESCHLUSS Nr. 1386/2013/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. November 2013 über ein allgemeines Umweltaktionsprogramm der Union für die Zeit bis 2020 „Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten“. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013D1386>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.

Europäische Union (2021): Hydrogen generation in Europe: Overview of costs and key benefits. Online verfügbar unter https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e4afa7d-d077-11ea-adf7-01aa75ed71a1/language-en?WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search.

Europäisches Parlament (2019): Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates über persistente organische Schadstoffe (POP-Verordnung). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1021&from=DE>, zuletzt geprüft am 19.01.2023.

Europäisches Parlament (Hg.) (2021): Wie will die EU bis 2050 eine Kreislaufwirtschaft erreichen? Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20210128STO96607/wie-will-die-eu-bis-2050-eine-kreislaufwirtschaft-erreichen>, zuletzt aktualisiert am 19.04.2022, zuletzt geprüft am 06.09.2022.

- Europäisches Parlament (2022): EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das?, zuletzt aktualisiert am <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20221019STO44572/verkaufsverbot-fur-neue-benzin-und-dieselfahrzeuge-ab-2035-was-bedeutet-das>, zuletzt geprüft am 23.02.2023.
- European Bioplastics (o. J.): What are bioplastics? European Bioplastics. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>, zuletzt geprüft am 03.12.2020.
- European Bioplastics (2021): Bioplastics – facts and figures, zuletzt geprüft am 25.10.2022.
- European Environment Agency (EEA) (2021): Areas in Europe with additional water stress in the future under a temperature increase of 3 °C. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/areas-in-europe-with-additional>, zuletzt geprüft am 01.03.2023.
- EWE (2022): Funktionsweise von Windkraftanlagen. Hg. v. EWE. Online verfügbar unter <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/windenergie/funktionweise-von-windkraftanlagen>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (o. J. a): Biokunststoffe – Marktsituation. Online verfügbar unter <https://biowerkstoffe.fnr.de/biokunststoffe/marktsituation>, zuletzt geprüft am 25.10.2022.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (o. J. b): Kraftstoff Biomethan. Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/biogas-nutzung/kraftstoff>, zuletzt aktualisiert am 29.11.2022, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (o. J. c): Wirtschaftsdüngervergärung. Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/wirtschaftsduenger/wirtschaftsduengervergaerung>, zuletzt aktualisiert am 29.11.2022, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2019): Marktübersicht. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. 10. Aufl. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch_Daemmstoffe_2019_web.pdf, zuletzt geprüft am 18.10.2022.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2020): Biokunststoffe. Pflanzen, Rohstoffe, Produkte. Unter Mitarbeit von Michael Thielen. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/brosch_biokunststoffe_2020_web.pdf, zuletzt geprüft am 18.12.2020.

- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2021): Marktanteil von Nawaro-Dämmstoffen wächst. Pressemitteilung vom 24. Februar 2022. Anton Windirsch. Online verfügbar unter <https://baustoffe.fnr.de/service/presse/pressemitteilungen/aktuelle-nachricht/marktanteil-von-nawaro-daemmstoffen-waechst>, zuletzt geprüft am 2022.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2022): Schweinegülle energetisch und wirtschaftlich nutzbar machen. Ökonomische und technische Optimierung der Vergärung in Biogasanlagen. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/projektfoerderung/ausgewaehlte-projekte/projekte/schweineguelle-energetisch-und-wirtschaftlich-nutzbar-machen-move>, zuletzt aktualisiert am 29.11.2022, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Fachverband Biogas e.V. (o. J.): Farbe ins Feld (FiF). Online verfügbar unter <https://biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Projekt-Farbe-ins-Feld->, zuletzt aktualisiert am 29.11.2022, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Fachverband Biogas e.V. (2019): Biogas. Regional. Verlässlich. Klimafreundlich. Online verfügbar unter [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Biogas-kanns/\\$file/Biogas%20Wissen_Versand.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Biogas-kanns/$file/Biogas%20Wissen_Versand.pdf), zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Fachverband Biogas e.V. (2022a): Branchenzahlen 2021 und Prognose der Branchenentwicklung 2022. Online verfügbar unter [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/22-10-06_Biogas_Branchenzahlen-2021_Prognose-2022.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/22-10-06_Biogas_Branchenzahlen-2021_Prognose-2022.pdf), zuletzt geprüft am 01.03.2023.
- Fachverband Biogas e.V. (2022b): Trotz großer Nachfrage nach Biogawärme nur wenig Zubau. Horbelt, Andrea. Online verfügbar unter [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Grosse-Nachfrage--wenig-Zubau/\\$file/22-10-06__PM_Branchenzahlen.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Grosse-Nachfrage--wenig-Zubau/$file/22-10-06__PM_Branchenzahlen.pdf), zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Faulkner, P. (2022): Making lithium-ion batter recycling more efficient. In: *Recycling Magazine*.
- Festo (2020): Festo ist Digital Transformer of the Year 2019. Online verfügbar unter <https://press.festo.com/de/company/festo-ist-digital-transformer-of-the-year-2019>, zuletzt geprüft am 20.01.2023.
- Fichtner, M. (2021): Der Superspeicher aus Kochsalz. In: *Tagesspiegel Background Verkehr & Smart Mobility*. Online verfügbar unter <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/der-superspeicher-aus-kochsalz>.
- FlugRevue (2021): atmosfair produziert strombasiertes Kerosin in Werlte. Online verfügbar unter <https://www.flugrevue.de/flugzeugbau/weltweit-erste-anlage-fuer-power-to-liquid-kraftstoffe-strombasiertes-kerosin-aus-werlte/>, zuletzt geprüft am 24.02.2023.

- Focus online (2022): Habeck verspricht Wärmepumpen-Offensive – doch ein massives Problem bleibt. Fachkräfte fehlen. Online verfügbar unter https://www.focus.de/finanzen/news/fachkraefte-fehlen-habeck-verspricht-waermepumpen-offensive-doch-ein-massives-problem-bleibt_id_108190776.html, zuletzt geprüft am 31.10.2022.
- FONA (2022): Digital GreenTech – Umwelttechnik trifft Digitalisierung. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Online verfügbar unter <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/DigitalGreenTech.php>, zuletzt geprüft am 17.02.2023.
- forsa (2018): DFH Trendbarometer Nachhaltigkeit 2018. Online verfügbar unter <https://mb.cision.com/Public/9230/2615089/95352c2d79d1fb7f.pdf>, zuletzt geprüft am 20.10.2022.
- Frantzen, M. (2022): Energiewende in Dänemark - Bald nur noch Biogas. Hg. v. Deutschlandfunk Kultur. Online verfügbar unter <https://www.deutschlandfunkkultur.de/biogas-in-daenemark-100.html>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2022, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Fraunhofer ISE (2023): Nettostromerzeugung in Deutschland 2022: Wind und Photovoltaik haben deutlich zugelegt. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2023/nettostromerzeugung-in-deutschland-2022-wind-und-photovoltaik-haben-deutlich-zugelegt.html>, zuletzt geprüft am 21.02.2023.
- Fraunhofer UMSICHT (2021): Erkundung der tiefen Geothermie in Hagen. Erste Ergebnisse aus den seismischen Messungen liegen vor. Online verfügbar unter <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2021/seismische-messungen-ergebnisse.html>, zuletzt geprüft am 31.03.2023.
- Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) (2023): Wasser 4.0 – Digitalisierung der Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/wasser-abwasser/wassermanagement/digitalisierung.html>, zuletzt geprüft am 10.01.2023.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2022): Bauwerkintegrierte Photovoltaik – Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/bauwerkintegrierte-photovoltaik-bipv.html>, zuletzt aktualisiert am 05.08.2022, zuletzt geprüft am 05.08.2022.

- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2022a): Europäische Batteriezellfertigung: Verzehnfachung der Produktionskapazitäten bis 2030. Online verfügbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2022/presseinfo-17-Batteriezellfertigung-Verzehnfachung-2030.html>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2022, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2022b): Europäische Batteriezellfertigung: Verzehnfachung der Produktionskapazitäten bis 2030. Presseinformation. Online verfügbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2022/presseinfo-17-Batteriezellfertigung-Verzehnfachung-2030.html>, zuletzt aktualisiert am 22.08.2022, zuletzt geprüft am 22.08.2022.
- Fraunhofer-Institut ISE (2020): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>, zuletzt geprüft am 06.08.2020.
- Fraunhofer-Institut UMSICHT (2017): Studie zur Circular Economy im Hinblick auf die chemische Industrie. Im Auftrag des Verbandes der Chemischen Industrie e.V. (VCI) Landesverband NRW. Oberhausen. Online verfügbar unter <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2017/zirkulaere-wirtschaft-fuer-chemische-industrie-gesamtstudie.pdf>, zuletzt geprüft am 02.09.2020.
- Frese, A. (2022): Batteriezellproduktion. Chance für den Maschinenbau. In: *Tagesspiegel Background Verkehr & Smart Mobility*, 22.08.2022. Online verfügbar unter https://utf.rdir.de/form.action?agnCI=1024&agnFN=fullview&agnUID=E.B.QA.DVuK.5Aq.CF_cd.A.civcdlKlJlgUpW6D5fe2JlNEyuDeK6HI9UdTeeP-4kgnbrFot0HF1rU7tBrx56rG6au18Ax46m1pDwlq5Q, zuletzt geprüft am 22.08.2022.
- Frost & Sullivan (2019): Frost Radar in the global bioplastics market. A measurement system to spark companies 2 action (C2A) – innovation that fuels new deal flow and growth pipelines. Unter Mitarbeit von Dilip Sarangan, zuletzt geprüft am 19.08.2019.
- Frost & Sullivan (2021): Technological Advancements Transforming Indoor Air Purification.
- Frost & Sullivan (2022a): Growth Opportunities Green Hydrogen.
- Frost & Sullivan (2022b): Global water treatment chemical growth opportunities. Innovation culture of sustainability and circular economy will be prominent in companies' technology strategies. Hg. v. Frost & Sullivan.
- Frost & Sullivan (2022c): Biotechnology Advancements that enable sustainability in the chemical industry: Technology growth opportunities. Unter Mitarbeit von Liberty Hodges.

- Frost & Sullivan (2022d): Innovations in wastewater treatment, solid waste management and carbon capture, utilization & storage. Industrial bioprocessing technology opportunity engine. Hg. v. Frost & Sullivan.
- Frost & Sullivan (2022e): European water and wastewater outlook, 2022. Transformative mega trends, including circular economy and net zero policies, are driving investments in resilient infrastructure. Hg. v. Frost & Sullivan.
- Frost & Sullivan (2022f): Innovations in sodium-ion batteries, geothermal energy, perovskite solar cells and off-shore wind turbines. Unter Mitarbeit von Liberty Hodges. Hg. v. Frost & Sullivan, zuletzt geprüft am 18.11.2022.
- Frost & Sullivan (2022g): Global residential heat pump growth opportunities. Technology strategies push heat pumps to play a significant role in decarbonizing heat. Unter Mitarbeit von Neha Tatikota, zuletzt geprüft am 07.02.2023.
- Gaikwad, A.; Maga, D.; Schlüter, S. (2022): Comparative Lifecycle Assessment of Methanol and Urea Produced from Steel Mill Gases. In: *Chemie Ingenieur Technik* 94 (10), S. 1476-1488. DOI: 10.1002/cite.202200040.
- Ganz, B. (2022): Metastudie zur nationalen Erdwärmestrategie. Ersatz fossiler Brennstoffe im Bereich Raumwärme und Warmwasser durch Geothermie als unverzichtbarer Bestandteil im Energiesektor Ökowärme bis 2045. Entwicklung des Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser gespiegelt mit Ausbaupfaden der Geothermie. Hg. v. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, zuletzt geprüft am 26.10.2022.
- Geldsetzer, F. (2007): Wasserstoff-Wirtschaft. RD-23-01286. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, et al. (RÖMPP). Online verfügbar unter <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-23-01286>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Germany Trade & Invest (GTAI) (2023): Water Technologies. The German Water Industry. Online verfügbar unter <https://www.gtai.de/en/invest/industries/environmental-technologies/water-technologies-68394>, zuletzt geprüft am 07.03.2023.
- Gläser, J. (2022): Autarkes Heizen: Immer mehr wollen weg von Öl und Gas. Online verfügbar unter <https://www.br.de/nachrichten/bayern/autarkes-heizen-immer-mehr-wollen-weg-von-oel-und-gas,SzTbHB4>, zuletzt geprüft am 28.10.2022.
- Global Energy & Environment Research Team at Frost & Sullivan (2018): Global Industrial Air Pollution Control Equipment Market, Forecast to 2025. Internet of Things (IoT)-related Advances Transforming Operational Efficiency and Driving Innovation, zuletzt geprüft am 11.03.2021.

- Goldberg, V.; Nitschke, F.; Kluge, T. (2022): Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland – Teil 2: Potenziale und Produktionsszenarien in Deutschland. In: *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 27 (4), S. 261-275.
- Grotelüschen, F. (2022): Entwicklungspotenzial der Geothermie in Deutschland. Erdwärme als Energieträger. Hg. v. Deutschlandfunk. Online verfügbar unter <https://www.deutschlandfunk.de/geothermie-in-deutschland-roadmap-zeigt-entwicklungspotenzial-100.html>.
- Hartmann, S. (2022): Deutschland ist in Europa Vorreiter bei Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien. Online verfügbar unter <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/deutschland-in-europa-vorreiter-bei-recyclinganlagen-fuer-lithium-ionen-batterien-240522/>, zuletzt aktualisiert am 30.05.2022, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- Haustec.de (2019): Wärmepumpen: Möglichkeiten und Grenzen der neuen Kältemittel. Online verfügbar unter <https://www.haustec.de/heizung/waermepumpen/waermepumpen-moeglichkeiten-und-grenzen-der-neuen-kaeltemittel#:~:text=Heizungsw%C3%A4rmepumpen%20haben%20%C3%BCblicherweise%20eine%20K%C3%A4ltemittelf%C3%BCllung,also%20auch%20nicht%20ersetzt%20werden>, zuletzt aktualisiert am 16.10.2019, zuletzt geprüft am 23.02.2023.
- healthcare-in-europe.com (2022): Die Bedeutung von KI für die Krebsmedizin. Online verfügbar unter <https://healthcare-in-europe.com/de/news/die-bedeutung-von-ki-fuer-die-krebsmedizin.html>, zuletzt geprüft am 08.03.2023.
- Heinhaus, A. (2022): Photovoltaik-Boom: Riesige Nachfrage nach Solaranlagen. In: *tagesschau.de*, 02.04.2022. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/solarenergie-boom-ukraine-krieg-101.html>, zuletzt geprüft am 29.07.2022.
- Henningsen, M.; Ruckdäschel, H. (2021): Was Windturbinen den richtigen Dreh gibt. In: *Chem. Unserer Zeit* 55 (6), S. 406-421. DOI: 10.1002/ciuz.202100012.
- Herden, C. J.; Alliu, E.; Cakici, A.; Cormier, T.; Deguelle, C.; Gambhir, S. et al. (2021): "Corporate Digital Responsibility". In: *NachhaltigkeitsManagementForum* 29 (1), S. 13-29.

- Hermann, S. (2022): Monatsbericht zur Entwicklung der erneuerbaren Stromerzeugung und Leistung in Deutschland. Unter Mitarbeit von Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/11-2022_agee-stat_monatsbericht_final.pdf, zuletzt geprüft am 21.11.2022.
- Hettesheimer, T.; Wietschel, M.; Neef, C.; Stijepic, D.; Moll, C.; Thielmann, A. et al. (2021): Batteriestandort auf Klimakurs. Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland. Hg. v. Agora Verkehrswende. Online verfügbar unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/Klimaneutrale-Batterieproduktion/59_klimaneutrale_Batterieproduktion.pdf, zuletzt geprüft am 28.08.2022.
- HH2E (Hg.) (2022): HH2E und MET Group gründen gemeinsame Projektgesellschaft für die Entwicklung einer der größten Anlagen zur Herstellung von grünem Wasserstoff in Europa in Lubmin, Mecklenburg-Vorpommern, Deutschland. Online verfügbar unter <https://hh2e.de/aktuelles/hh2e-und-met-group-gruenden-gemeinsame-projektgesellschaft-fuer-die-entwicklung-einer-der-groessten-anlagen-zur-herstellung-von-gruenem-wasserstoff-in-europa-in-lubmin-mecklenburg-vorpommern-deutsch/>, zuletzt aktualisiert am 31.08.2022, zuletzt geprüft am 31.08.2022.
- Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2020): Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung. Hg. v. Borderstep Institut. Berlin. Online verfügbar unter <https://digitale-infrastrukturen.net/studie-nachhaltige-digitalisierung-in-europa/>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Hochschule Pforzheim (2018): Vom Attitude-Behaviour-Gap zum Producer-People-Gap. Online verfügbar unter https://www.hs-pforzheim.de/en/forschung/forschungsschwerpunkte/vunk/news_detailsseite/news/vom_attitude_behaviour_gap_zum_producer_people_gap_1, zuletzt aktualisiert am 19.10.2022, zuletzt geprüft am 20.10.2022.
- Hofmann, A.; Franke, M.; Betsch, F.; Rieger, T.; Seiler, E.; Mäurer, A. (2021): Positionspaper. Hg. v. Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE. Online verfügbar unter https://www.ccpe.fraunhofer.de/content/dam/ccpe/de/dokumente/Fraunhofer_CCPE_Positionspapier_Recyclingtechnologien_DE.pdf, zuletzt geprüft am 19.01.2023.
- Höges, C.; Venzik, V.; Vering, C.; Müller, D. (2022): Bewertung alternativer Arbeitsmittel für Wärmepumpen im Gebäudesektor. In: *Forsch Ingenieurwes* 86 (2), S. 213-224. DOI: 10.1007/s10010-022-00584-0.

- Holzer, H.; Rudschies, W. (2022): Feststoffbatterie: Ist das die Zukunft im Elektroauto? Wissenswertes zur Elektromobilität. Hg. v. ADAC. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/feststoffbatterie/>, zuletzt aktualisiert am 29.06.2022, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- Hübner, G.; Pohl, J.; Warode, J.; Gotchev, B.; Ohlhorst, D.; Krug, M. et al. (2020): Akzeptanzfördernde Faktoren erneuerbarer Energien. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Deutschland. Bonn (BfN-Skripten), zuletzt geprüft am 08.08.2022.
- Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) (01.11.2020 – 31.10.2023): Transdisziplinäre End-of-Life Analyse von Windenergieanlagen zur Entwicklung technisch-wirtschaftlich optimaler Nachnutzungsstrategien. Online verfügbar unter https://www.iph-hannover.de/de/forschung/forschungsprojekte/?we_objectID=5767, zuletzt geprüft am 21.11.2022.
- Institute for Bioplastics and Biocomposites (IfBB) (2017): Häufig gestellte Fragen (FAQs). Biokunststoffe. Online verfügbar unter <https://www.ifbb-hannover.de/de/faqs.html>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- International Energy Agency (2021): World Energy Outlook 2021 ES German. Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/2b4fb6d7-5f2c-4bee-b2ff-3660be522f9c/WEO2021_ES_German.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2022.
- International Energy Agency (IEA) (2022a): Hydrogen. Energy system overview. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/hydrogen>, zuletzt geprüft am 24.02.2023.
- International Energy Agency (IEA) (2022b): Global Supply Chains of EV Batteries. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4eb8c252-76b1-4710-8f5e-867e751c8dda/GlobalSupplyChainsofEVBatteries.pdf>, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- International Institute for Management Development (IMD) (2021): China and US pursuing markedly different digital transformations. Online verfügbar unter <https://www.imd.org/news/updates/China-US-pursuing-markedly-different-but-equally-competitive-digital-transformations-WCC/>, zuletzt geprüft am 17.02.2023.
- Jäger, C. (2020): Blockchain in der Energiewirtschaft. Online verfügbar unter <https://energie-digitalisieren.de/knowhow/blockchain-in-der-energiewirtschaft/#:~:text=Blockchain%20hat%20einen%20entscheidenden%20Vorteil%20in%20der%20Energiebranche,Transaktionen%20ein%20digitales%20Abbild%20des%20realen%20Stromflusses%20ab>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.

- Japandigest (2021): Japans alternde Gesellschaft: Tele-Altenpflege und Robotertherapie. Online verfügbar unter <https://www.japandigest.de/aktuelles/technologie-roboter/tele-altenpflege-roboter/>, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Jendrischik, M. (2021): Methan-Pyrolyse: C-Zero sammelt Kapital für Produktion von türkischem Wasserstoff aus Erdgas. *cleanthinking.de*. Online verfügbar unter <https://www.cleanthinking.de/methan-pyrolyse-c-zero-sammelt-kapital-fuer-produktion-von-tuerkischem-wasserstoff-aus-erdgas/>, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Kasten, P. (2020): E-Fuels im Verkehrssektor. Kurzstudie über den Stand des Wissens und die mögliche Bedeutung von E-Fuels für den Klimaschutz im Verkehrssektor. Öko-Institut e.V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/E-Fuels-im-Verkehrssektor-Hintergrundbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 25.11.2020.
- Kerkmann, C. (2022): Künstliche Intelligenz: Wirtschaft warnt vor „massiven Einschränkungen“ durch AI Act. Hg. v. Handelsblatt. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/eu-regulierung-kuenstliche-intelligenz-wirtschaft-warnt-vor-massiven-einschraenkungen-durch-ai-act/28850684.html>, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Kersting, S.; Stratmann, K. (2022): Wie die Regierung Wärmepumpen zur Standardheizung machen will. In: *Handelsblatt*. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/politik/energieversorgung-wie-die-regierung-waermepumpen-zur-standardheizung-machen-will/28465616.html>, zuletzt geprüft am 26.10.2022.
- Kiefer, K.; Farnung, B.; Müller, B. (2018): Degradation in PV Power Plants: Theory and Practice. Presented at the 36th European PV Solar Energy Conference and Exhibition. Marseille, Frankreich. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/36-eupvsec-2019/Kiefer_5B075.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2022.
- Klingbeil-Döring, W. (2020): Digitalisierung und der Arbeitsmarkt. Hg. v. Bundeszentrale für politische Bildung (BPB). Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/themen/arbeit/arbeitsmarktpolitik/316908/digitalisierung-und-der-arbeitsmarkt/>, zuletzt geprüft am 17.02.2023.
- Köllner, C. (2019): Ist Second Life besser als direktes Akku-Recycling? In: *springerprofessional.de*, 12.03.2019 (Im Fokus). Online verfügbar unter <https://www.springerprofessional.de/batterie/recycling/ist-second-life-besser-als-direktes-akku-recycling-/16512034>, zuletzt geprüft am 24.08.2022.
- Kondruss, B. (2023): Cyberangriffe auf Universitäten. Hg. v. Kon Briefing. Online verfügbar unter <https://konbriefing.com/de-topics/cyber-angriffe-universitaeten.html>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.

- Kopal, K.; Wittowsky, D. (2022): Die gesunde Stadt im Kontext der Mobilitätswende. Einflüsse der gebauten Umwelt auf ein nachhaltiges und bewegungsförderndes Verhalten.
- Kopernikus-Projekt Ariadne (2021): Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).
- Kraftfahrt-Bundesamt (2022): Anzahl Elektroautos in Deutschland von 2012 bis 2022 | Statista. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>, zuletzt aktualisiert am 24.08.2022, zuletzt geprüft am 24.08.2022.
- Kummer, S.; Strobelt, A.; Kohlmeyer, R. et al. (2020): Empfehlungen des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforderungen nach ElektroG. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (TEXTE, 148). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_148-2020_bericht_empfehlungen_zu_behandlungsanforderungen.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2022.
- Landesmedienzentrum Baden-Württemberg (o. J.): Definition von Fake News. Online verfügbar unter <https://www.lmz-bw.de/medienbildung/themen-von-f-bis-z/hatespeech-und-fake-news/fake-news/was-sind-fake-news/>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Landgraf, E. (2020): Großbaustelle Gas-Kavernenspeicher. In: *CITplus* 23 (4), S. 20-22. DOI: 10.1002/citp.202000412.
- Lange, S.; Santarius, T. (2018): Smarte grüne Welt? Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit. München: Oekom Verlag.
- Lauer, M.; Thrän, D. (2017): Biogas plants and surplus generation: Cost driver or reducer in the future German electricity system? In: *Energy Policy* 109, S. 324-336. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.07.016.
- Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S. (2021): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2020. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA), zuletzt geprüft am 29.09.2022.
- Lautermann, C.; Frick, V. (2023): Corporate Digital Responsibility. Wie Unternehmen im digitalen Wandel Verantwortung übernehmen. Hg. v. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH. Online verfügbar unter https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2023/IOEW_SR_227_Corporate-Digital-Responsibility_Kurzfassung.pdf, zuletzt geprüft am 01.03.2023.

- Leipniz-Institut für Angewandte Geophysik (2022): Metastudie zur nationalen Erdwärmestrategie. Ersatz fossiler Brennstoffe im Bereich Raumwärme und Warmwasser durch Geothermie als unverzichtbarer Bestandteil im Energiesektor Ökowärme bis 2045. Entwicklung des Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser gespiegelt mit Ausbaupfaden der Geothermie. Unter Mitarbeit von Inga Moeck, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Leregger, F. (2020): Digitalisierung und Klimawandel im Kontext der Sustainable Development Goals. In: A. Sihn-Weber und F. Fischler (Hg.): CSR und Klimawandel. Unternehmenspotenziale und Chancen einer nachhaltigen und klimaschonenden Wirtschaftstransformation. 1. Aufl. 2020. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Management-Reihe Corporate Social Responsibility), S. 149-161.
- Lindner, C.; Schmitt, J.; Fischer, E.; Hein, J. (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021. Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Hg. v. Conversio Market&Strategy GmbH. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf, zuletzt geprüft am 19.01.2023.
- Lobschat, L.; Mueller, B.; Eggers, F.; Brandimarte, L.; Diefenbach, S.; Kroschke, M.; Wirtz, J. (2021): Corporate digital responsibility. In: *Journal of Business Research* 122, S. 875-888.
- Lübecke, A.; Eitze, J.; Löffler, M.; Biegel, M. (2022a): Elektrolyse in Deutschland. Kapazitäten, Zielsetzungen und Bedarfe bis 2030. Hg. v. Acatech und DECHMA. Online verfügbar unter https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Elektrolysekapazitaeten_.pdf, zuletzt geprüft am 31.08.2022.
- Lübecke, A.; Eitze, J.; Löffler, M.; Biegel, M. (2022b): Rohstoffe für die Elektrolyseurproduktion. Mögliche Engpässe aufgrund von Russlands Konfrontation mit dem Westen. Hg. v. DECHMA Acatech. Online verfügbar unter https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Elektrolyseurproduktion.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Mabanaft (2021): Zukunftstechnologie Wasserstoff: Mabanaft beteiligt sich an Energiespeicherspezialist NACOMPEX. Online verfügbar unter <https://www.mabanaft.com/de/news-info/aktuelles-pressemitteilungen/news-detail/zukunftstechnologie-wasserstoff-mabanaft-beteiligt-sich-an-energiespeicherspezialist-nacomplex/>, zuletzt geprüft am 20.01.2023.
- Mabanaft (2022): The Next Gate – zukunftsweisendes Demonstrationsprojekt in Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.mabanaft.com/de/news-info/aktuelles-pressemitteilungen/news-detail/the-next-gate-zukunftsweisendes-demonstrationsprojekt-in-hamburg/>, zuletzt geprüft am 27.02.2023.

- Mager, U. (2022): Umweltrechtswissenschaft: Heidelberg University Library.
- Maier, N. (2018): Biologisch abbaubare Kunststoffe. Arbeitspapier. Hg. v. Europäisches Netzwerk der Leitungen der Umweltschutzbehörden (EPA-Netzwerk)- Interessengruppe Kunststoffe (Interest Group Plastics). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/2019-02-20_ig_plastics_bdp_report_de.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Manthiram, A. (2020): A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. In: *Nature communications* 11 (1), S. 1550. DOI: 10.1038/s41467-020-15355-0.
- Marquardt (o. J.): Innovative Mechatronik von Marquardt verbindet Mensch und Maschine. Online verfügbar unter <https://www.marquardt.com/>, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Martens, H.; Goldmann, D. (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, zuletzt geprüft am 22.09.2020.
- McQueen, N.; Gomes, K.; McCormick, C.; Blumanthal, K.; Pisciotta, M.; Wilcox, J. (2021): A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future. In: *Prog. Energy* 3 (3), S. 32001.
- Mercure, M. (2020): Wood Mackenzie: Top three turbine OEMs poised to command market. Online verfügbar unter <https://nawindpower.com/wood-mackenzie-top-three-turbine-oems-poised-to-command-market>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Metzger, S.; Jahnke, K.; Walikewitz, N.; Otto, M.; Grondey, A.; Fritz, S. (2019): Wohnen und Sanieren - Empirische Wohngebäudedaten seit 2002. Hintergrundbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (CLIMATE CHANGE, 22/2019). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-23_cc_22-2019_wohnenundsaniieren_hintergrundbericht.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2022.
- Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (Hg.) (2020): Wasserstoff Roadmap.
- MordorIntelligence (2021): Markt für Lösungen zur industriellen Luftreinhaltung. Wachstum, Trends, Auswirkungen von COVID-19 und Prognosen (2023-2028).
- Mukimin, A.; Vistanty, H.(2023): Low carbon development based on microbial fuel cells as electrical generation and wastewater treatment unit. In: *Renewable Energy Focus* 44, S. 132-138.

- Müller, A. (2021): Warum diese drei Familienunternehmer eine Wasserstoff-Allianz schmieden. Hg. v. Handelsblatt. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/mittelstand/familienunternehmer/kritik-an-regierungsstrategie-warum-diese-drei-familienunternehmer-eine-wasserstoff-allianz-schmieden/27592788.html>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Mundzeck, L. (2022): Was Biokunststoffe zu einer zukunftsfähigen Kreislaufwirtschaft beitragen können. Online verfügbar unter <https://transforming-economies.de/was-biokunststoffe-zu-einer-zukunftsfahigen-kreislaufwirtschaft-beitragen-koennen/>, zuletzt aktualisiert am 02.11.2022.
- ICS 27.180; 91.200, Oktober 2020: Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-4866/326469199>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 4 „Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung“ (2021): Batterieproduktion für Deutschland und Europa. Bericht der Fokusgruppe Wertschöpfung AG 4 der NPM. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/10/NPM_AG4_Batteriezellproduktion.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2022.
- Neef, C.; Schmaltz, T.; Thielmann, A. (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- Neugebauer, R. (Hg.) (2022): Wasserstofftechnologien. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Springer eBook Collection).
- Next Kraftwerke (o. J.): Magic Word. Online verfügbar unter <https://www.next-kraftwerke.com/vpp/case-studies/magic-word-biogas-virtual-power-plant>, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Nguyen, M. D. (2020): Wärmepumpe: Funktion kurz erklärt. Heizung.de. Online verfügbar unter <https://heizung.de/waermepumpe/wissen/die-waermepumpe-funktion-kurz-und-verstaendlich-erklaert/>, zuletzt aktualisiert am 13.02.2020, zuletzt geprüft am 20.11.2020.
- Nigl, T.; Rutrecht, B.; Altendorfer, M.; Scherhauser, S.; Meyer, I.; Sommer, M.; Beigl, P. (2021): Lithium-Ionen-Batterien – Kreislaufwirtschaftliche Herausforderungen am Ende des Lebenszyklus und im Recycling. In: *Berg Huettenmaenn Monatsh* 166 (3), S. 144-149. DOI: 10.1007/s00501-021-01087-1.

- OECD (Hg.) (2020): OECD Environment Working Papers.
- OMV (2022): Konsortium will neue Prozesstechnologie zur Herstellung von nachhaltigem Flugkraftstoff entwickeln. Online verfügbar unter <https://www.omv.com/de/news/221116-konsortium-will-neue-prozesstechnologie-zur-herstellung-von-nachhaltigem-flugkraftstoff-entwickeln>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Osusky, L. (2022): Brüssel kündigt Gesetz zu kritischen Rohstoffen an. In: *Tagesspiegel Background Verkehr & Smart Mobility*, 19.09.2022. Online verfügbar unter <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/bruessel-kuendigt-gesetz-zu-kritischen-rohstoffen-an>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Pehnt, M.; Mellwig, P.; Lempik, J.; Werle, M.; Schulze-Darup, V.; Schöffel, W.; Drusche, V. (2021): Neukonzeption des Gebäudeenergiegesetzes (GEG 2.0) zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes. Ein Diskussionsimpuls. Hg. v. ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Architekturbüro Schulze Darup und Energie Effizienz Institut. Heidelberg, Berlin, Weimar. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/pdf/_ifeu_et_al._2021__GEG_2.0.pdf, zuletzt geprüft am 11.10.2022.
- Petersdorff, G. (2022): Ohne Fachkräfte keine Klimawende. Personalmangel bei Haus-Sanierung. Hg. v. Tagesschau. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/fachkraeftemangel-handwerk-energie-wende-101.html>, zuletzt geprüft am 31.10.2022.
- PlasticsEurope Deutschland e.V. (2021): Geschäftsbericht 2020.
- Post, M.; Schmidt, P. (2019): Praktische Bauphysik. Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen. 9. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A. (2017): Circular Economy. Measuring Innovation in the product chain.
- Reich, R.; Slunitschek, K.; Danisi, R. M.; Eiche, E.; Kolb, J. (2022): Lithium Extraction Techniques and the Application Potential of Different Sorbents for Lithium Recovery from Brines. In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, S. 1-20. DOI: 10.1080/08827508.2022.2047041.
- Reineke, W.; Schlömann, M. (2020a): Biotechnologie und Umweltschutz. In: W. Reineke und M. Schlömann (Hg.): *Umweltmikrobiologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 577-615.
- Reineke, W.; Schlömann, M. (Hg.) (2020b): *Umweltmikrobiologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Reinhardt, J.; Veith, C.; Lempik, J.; Knappe, F.; Mellwig, P.; Giegrich, J. et al. (2019): Ganzheitliche Bewertung von verschiedenen Dämmstoffalternativen. Endbericht. Hg. v. Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Heidelberg/ Neckargemünd. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Bericht-D%C3%A4mmstoffe_23032020.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Reinholz, T.; Schmidt, C.; Siegemund, S.; Völler, K. (2021): Marktmonitoring Bioenergie. Kurzbefragung zur Einschätzung der aktuellen Geschäftslage. Hg. v. dena Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/dena-ANALYSE_Marktmonitoring_Bioenergie.pdf.
- REN21 (2022): Renewables 2022. Global Status Report. Online verfügbar unter https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf, zuletzt geprüft am 05.08.2022.
- Repräsentanz Transparente Gebäudehülle GbR (2022): Emissionsdaten 2021: Gebäudesektor verfehlt erneut Klimaziele. Pressemitteilung vom 15. März 2022. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.presseportal.de/pm/159102/5171337>, zuletzt geprüft am 11.10.2022.
- Reuters (2022a): New plant to cover 20% of Germany's e-kerosene needs from 2026. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/business/energy/new-plant-cover-20-germanys-e-kerosene-needs-2026-2022-06-23/>, zuletzt geprüft am 24.02.2023.
- Reuters (2022b): Kleiner werden ist die Zukunft. In: *Tagesspiegel Background Verkehr & Smart Mobility*, 18.07.2022. Online verfügbar unter <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/kleiner-werden-ist-die-zukunft>.
- Richter, C.; Herms, M. (2023): EEG 2023 – Mehr Erneuerbare für den Klimaschutz. Hg. v. prometheus Rechtsanwalts-gesellschaft mbH, zuletzt geprüft am 07.02.2023.
- Roland Berger Strategy Consultants; Prognos AG (2020): Wegweiser Solarwirtschaft: PV-Roadmap 2020. Wettbewerbsfähig, klimafreundlich, dezentral – Die Solarwirtschaft als eine bedeutende Säule einer nachhaltigen Energieversorgung. Online verfügbar unter https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/content_files/roadmap_kurz.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Roth International (o. J.): Recycling & Verwertung von Windkraftanlagen, zuletzt geprüft am 09.08.2022.

- Rudschies, W. (2022): Synthetische Kraftstoffe: Sind E-Fuels die Zukunft? Hg. v. ADAC. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/#:~:text=Was%20wird%20ein%20Liter%20E-Fuel%20dann%20kosten%3F%20Die,Motoren%20nutzen%20kann%2C%20ohne%20dass%20diese%20gesch%3%A4digt%20werden%3F>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Santeramo, F. G.; Delsignore, M.; Imbert, E.; Lombardi, M. (2022): The future of the EU bioenergy sector: economic, environmental, social, and legislative challenges. Online verfügbar unter <https://mpr.ub.uni-muenchen.de/115454/>.
- Schlegl, A. (2022): Müllheizkraftwerk in Darmstadt stellt aus Abfall Wasserstoff her. Hg. v. Frankfurter Rundschau. Online verfügbar unter <https://www.fr.de/rhein-main/darmstadt/darmstadt-wasserstoff-aus-abfall-muellheizkraftwerk-91694383.html>.
- Schneider, A. (2022): Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen und Versorgungsanalyse Max Bögl Sengenthal. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg, zuletzt geprüft am 08.08.2022.
- Schneider, S.; Bajohr, S.; Graf, F.; Kolb, T. (2020): Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse. In: *Chemie Ingenieur Technik* 92 (8), S. 1023-1032.
- Schonlau, A. (2020): Unter welchen Voraussetzungen entscheiden sich Unternehmen für ein recyclingfreundliches Design? Hg. v. Maag. Online verfügbar unter <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/veranstaltungen/201207-nabu-kreislaufwirtschaft-vortrag-ansgar-schonlau-maag.pdf>, zuletzt geprüft am 07.09.2022.
- Schwäbische.de (2021): Marquardt baut neues Geschäftsfeld auf und Gründen dazu neue Firma. Online verfügbar unter <https://www.schwaebische.de/wirtschaft/marquardt-baut-neues-geschaeftsfeld-auf-105915>, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Siemens Energy (2022): Haru Oni: Ein neues Zeitalter der Entdeckungen. Online verfügbar unter <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2021/haru-oni.html>, zuletzt geprüft am 17.11.2022.
- Simeon, I. M.; Weig, A.; Freitag, R. (2022): Optimization of soil microbial fuel cell for sustainable bio-electricity production: combined effects of electrode material, electrode spacing, and substrate feeding frequency on power generation and microbial community diversity. In: *Biotechnology for biofuels and bioproducts* 15 (1), S. 124. DOI: 10.1186/s13068-022-02224-9.
- Solarwatt (2022): Einstrahlungskarte des Deutschen Wetterdienstes. Online verfügbar unter <https://www.solarwatt.de/ratgeber/einstrahlungskarte>, zuletzt geprüft am 15.03.2023.

- Sonderhaus, F. (2021): Umfrage zur Akzeptanz der Windenergie an Land Herbst 2021. Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage zur Akzeptanz der Nutzung und des Ausbaus der Windenergie an Land in Deutschland. Hg. v. Fachagentur Windenergie an Land e.V.
- SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Koalitionsvertrag 2021-2025. Hg. v. SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP. Online verfügbar unter https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Spiegel (2023): Daten der Uni Duisburg-Essen im Darknet aufgetaucht. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/netzwelt/web/universitaet-duisburg-essen-daten-nach-hackerangriff-im-darknet-aufgetaucht-a-82dfcdbc-a766-47d8-b95b-f0ba4154d570>, zuletzt geprüft am 20.01.2023.
- Spinrath, U. (2023): Chat-GPT: Ministerin will KI-App an Schulen nicht verbieten. Online verfügbar unter <https://www1.wdr.de/nachrichten/landespolitik/chat-gpt-app-schule-100.html>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Statista (2022): Anteil der Energieträger innerhalb des Primärenergieverbrauchs Erneuerbarer Energien in Deutschland im Jahr 2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1132494/umfrage/anteil-der-energietraeger-am-primarverbrauch-erneuerbarer-energien/>, zuletzt geprüft am 18.11.2022.
- Statista (2023): Menge der Feinstaub-Emissionen (PM10) in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2020. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1090854/umfrage/feinstaub-emissionen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 27.02.2023.
- Statista Research Department (2022a): Wasserversorgung – Anzahl der Beschäftigten in Deutschland bis 2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151459/umfrage/beschaeftigte-in-der-wasserversorgung-in-deutschland-seit-1991/>, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Statista Research Department (2022b): Anzahl der Beschäftigten in Abwasserentsorgungsunternehmen in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020. Hg. v. Statista Research Department. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/283341/umfrage/anzahl-der-beschaeftigten-kommunaler-unternehmen/>, zuletzt geprüft am 06.01.2023.
- Statistisches Bundesamt (2021a): K O R R E K T U R: Über zwei Drittel der im Jahr 2020 gebauten Wohngebäude heizen mit erneuerbaren Energien. Pressemitteilung Nr. 296 vom 24. Juni 2021. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21_296_31121.html, zuletzt geprüft am 11.10.2022.

- Statistisches Bundesamt (2021b): Umsatz mit Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden in Deutschland von 2011 bis 2019. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1301399/umfrage/umsatz-durch-energieeffizienz-verbesserungsmassnahmen-von-gebaeuden/>, zuletzt aktualisiert am 26.10.2022, zuletzt geprüft am 26.10.2022.
- Statistisches Bundesamt (2022a): Zahl der „Green Jobs“ im Jahr 2020 um 2,0 % gewachsen. Pressemitteilung vom 26. September 2022. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/09/PD22_409_325.html, zuletzt geprüft am 11.10.2022.
- Statistisches Bundesamt (2022b): Anzahl der Beschäftigten in der deutschen Batteriebranche bis 2021 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/817942/umfrage/anzahl-der-beschaeftigten-in-der-deutschen-batteriebranche/>, zuletzt aktualisiert am 28.08.2022, zuletzt geprüft am 28.08.2022.
- Statistisches Bundesamt (2022c): Umsatz der deutschen Batteriebranche bis 2021 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/373212/umfrage/umsatz-der-deutschen-batteriebranche/>, zuletzt aktualisiert am 28.08.2022, zuletzt geprüft am 28.08.2022.
- Statistisches Bundesamt (2022d): Bauhauptgewerbe / Ausbaugewerbe (Lange Reihen). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Baugewerbe-Konkunktur/lange-reihen-baugewerbe-ausbaugewerbe-pdf-5441001.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 11.10.2022.
- Statistisches Bundesamt (2022e): Deutsche Photovoltaikbranche – Umsatz bis 2020 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13542/umfrage/umsaetze-der-deutschen-photovoltaik-industrie-seit-2000/>, zuletzt aktualisiert am 05.08.2022, zuletzt geprüft am 05.08.2022.
- Statistisches Bundesamt (2022f): Produktion von Dämmstoffen in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/589622/umfrage/produktion-von-daemmstoffen-in-deutschland/>, zuletzt aktualisiert am 11.10.2022, zuletzt geprüft am 11.10.2022.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022a): Pressemitteilung Nr. 405 vom 22. September 2022. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/09/PD22_405_32.html, zuletzt geprüft am 03.02.2023.

- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022b): Pressemitteilung Nr. 418 vom 4. Oktober 2022. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/10/PD22_418_325.html;jsessionid=4A29F010AC4E3DF3636A8AECA1FBF9AB.live731.
- Stiftung Familienunternehmen (o. J.): Definition Familienunternehmen. Online verfügbar unter <https://www.familienunternehmen.de/de/definition-familienunternehmen>, zuletzt geprüft am 02.09.2020.
- Stiftung Familienunternehmen (Hg.) (2021a): Circular Economy in Familienunternehmen. Herausforderungen, Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen. Stiftung 2°; Fraunhofer UMSICHT. München. Online verfügbar unter https://www.familienunternehmen.de/media/public/pdf/publikationen-studien/studien/Circular-Economy-in-Familienunternehmen_Studie_Stiftung-Familienunternehmen.pdf.
- Stiftung Familienunternehmen (Hg.) (2021b): Technologieatlas Nachhaltigkeit - Familienunternehmen als Entwickler und Anwender von Umwelttechnologien, erstellt durch das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik; Stiftung Familienunternehmen. München.
- Stiftung Familienunternehmen (2022): Börsennotierte Familienunternehmen in Europa. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. Online verfügbar unter https://www.familienunternehmen.de/media/public/pdf/publikationen-studien/studien/zusammenfassung-studie_boersennotierte-familienunternehmen-in-europa.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Stober, I.; Fritzer, T.; Obst, K.; Agemar, T.; Schulz, R. (2016): Tiefe Geothermie. Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. 4. Aufl. Unter Mitarbeit von Ingrid Stober, Thomas Fritzer, Karsten Obst, Thorsten Agemar und Rüdiger Schulz. Hg. v. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG).
- Stober, I.; Fritzer, T.; Obst, K.; Schulz, R. (2010): Tiefe Geothermie. Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Strom-Report (2022): Windenergie in Deutschland. Daten, Fakten und Meinungen zur Windkraft, Stand 2022. Online verfügbar unter <https://strom-report.de/windenergie/>, zuletzt geprüft am 02.08.2022.
- Sunfire (2020): Syngas. The renewable feed gas. Online verfügbar unter <https://www.sunfire.de/en/syngas>, zuletzt geprüft am 17.11.2022.

- Tagesschau (2022a): Nord-Stream-Explosionen waren Sabotage. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/lecks-nord-stream-sabotage-101.html>, zuletzt geprüft am 27.02.2023.
- Tagesschau (2022b): Wer stellt die Wärmepumpen her? Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/waermepumpen-hersteller-deutschland-international-101.html>, zuletzt aktualisiert am 12.08.2022, zuletzt geprüft am 22.09.2022.
- Tagesschau (2023): UN einigen sich auf Hochseeabkommen. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/ausland/amerika/un-abkommen-schutz-hochsee-101.html>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Technische Universität Clausthal (2020): Mikrobielle Brennstoffzellen. Online verfügbar unter <https://www.demo-biobz.de/mikrobielle-brennstoffzellen>, zuletzt geprüft am 10.02.2023.
- TGA (Hg.) (2021): Wasserstoff: Wie viel Wasser wird dafür benötigt? Online verfügbar unter <https://www.tga-fachplaner.de/energietechnik/energietraeger-wasserstoff-wie-viel-wasser-wird-dafuer-benoetigt>, zuletzt aktualisiert am 09.11.2021, zuletzt geprüft am 31.08.2022.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023): Synthesis Report of the IPCC sixth Assessment Report (AR6). Summary for Policymakers. Online verfügbar unter https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- Thomann, Jana; Marscheider-Weidemann, Frank; Stamm, Andreas; Lorych, Ludger; Hank, Christoph; Weise, Friedrich et al. (2022): Hintergrundpapier zu nachhaltigem grünen Wasserstoff und Syntheseprodukten. HYPAT Working Paper 01/2022. Hg. v. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.
- Thorun, C. (2018): Corporate Digital Responsibility: Unternehmerische Verantwortung in der digitalen Welt. In: Christian Gärtner und Christian Heinrich (Hg.): Fallstudien zur Digitalen Transformation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 173-191.
- Thrän, D.; Moesenfechtel, U. (2020): Das System Bioökonomie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- thyssenkrupp Steel (2023): Klimastrategie: Mit grünem Stahl in die Zukunft. Online verfügbar unter https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/klimastrategie/?mtm_campaign=6521348312&mtm_kwd=Thyssenkrupp%20nachhaltigkeit&mtm_source=google&mtm_medium=cpc&mtm_group=79118709300&mtm_content=afact&keyword=thyssenkrupp%20nachhaltigkeit&device=c&network=g&gclid=EAlaIQobChMljoLXlduy_QIVie93Ch0elgVSEAAAYASAAEgImc_D_BwE, zuletzt geprüft am 01.03.2023.

- TÜV Nord (o. J.): Herstellung von Wasserstoff: Verfahren und Farbenlehre. Online verfügbar unter <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/herstellung-von-wasserstoff/>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Ueckerdt, F.; Bauer, C.; Dirnaichner, A.; Everall, J.; Sacchi, R.; Luderer, G. (2021a): Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. In: *Nat. Clim. Chang.* 11 (5), S. 384-393.
- Ueckerdt, F.; Pfluger, B.; Odenweller, A.; Günther, C.; Knodt, M.; Kemmerzell, J. et al. (2021b): Durchstarten trotz Unsicherheiten. Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfaehigen-wasserstoffstrategie/>, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (o. J. a): Wasser. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser>, zuletzt geprüft am 06.01.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (o. J. b): Wie ist der Stand der energetischen Gebäudesanierung in Deutschland? Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/bauen-wohnen/verursacher/energetischer-gebaeudezustand/wie-ist-der-stand-der-energetischen>, zuletzt aktualisiert am 24.10.2022, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018): Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs. Texte 55/2019. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Christian Kind, Theresa Kaiser, Miriam Riese und Bubeck. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-29_texte_55-2019_starkregen-stadtentwicklung.pdf, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020a): Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe#haufig-gestellte-fragen-faq>, zuletzt geprüft am 04.12.2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020b): Chemisches Recycling. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020c): Solarenergie. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/solarenergie>, zuletzt aktualisiert am 06.08.2020, zuletzt geprüft am 06.08.2020.

- Umweltbundesamt (UBA) (2020d): UBA begrüßt EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/uba-begruesst-eu-aktionsplan-fuer-die>, zuletzt geprüft am 02.09.2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020e): Cleaner Production Germany. Das Portal zum Umwelttechnologietransfer! Online verfügbar unter <https://www.cleaner-production.de/index.php/de/>, zuletzt aktualisiert am 06.08.2020, zuletzt geprüft am 06.08.2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021a): Die WHO-Luftqualitätsleitlinien 2021 – Gesundere Luft für alle. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/6232/dokumente/jointsocietystatement_german_adaption_final.pdf, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021b): Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization. Unter Mitarbeit von Katja Purr, Hans-Jürgen Garvens, Maja Bernicke, Jens Brieschke, Judith Kaliske, Hermann Kessler, Daniela Malsch, Sebastian Plickert, Christopher Proske und Bernhard Rothe. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2021_hgp_ccu_final_bf_out_0.pdf.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021c): Lüftung, Lüftungsanlagen und mobile Luftreiniger an Schulen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/lueftung-lueftungsanlagen-mobile-luftreiniger-an>, zuletzt aktualisiert am 10.09.2021, zuletzt geprüft am 03.11.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021d): Wasserwiedernutzung. Nutzung aufbereitenden Wassers zur Ressourcenschonung in der Europäischen Union. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasser-bewirtschaften/wasserwiederverwendung#nutzung-aufbereiteten-wassers-zur-ressourcenschonung-in-der-europaischen-union>, zuletzt geprüft am 03.03.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021e): Wasserwiederverwendung. UBA. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasser-bewirtschaften/wasserwiederverwendung#nutzung-aufbereiteten-wassers-zur-ressourcenschonung-in-der-europaischen-union>, zuletzt geprüft am 07.03.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021f): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/hg_erneuerbareenergien_dt_0.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022a): Abfallrecht. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht>, zuletzt geprüft am 19.01.2023.

- Umweltbundesamt (UBA) (2022b): Bioenergie. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/bioenergie#bioenergie-ein-weites-und-komplexes-feld->, zuletzt aktualisiert am 25.11.2022, zuletzt geprüft am 25.11.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022c): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/hg_erneuerbareenergien_dt_0.pdf, zuletzt geprüft am 09.12.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022d): Infektiöse Aerosole in Innenräumen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluft/infektioese-aerosole-in-innenraeumen?sprungmarke=luftreinigungsgeraete#was-sind-aerosole->, zuletzt aktualisiert am 30.03.2022, zuletzt geprüft am 03.11.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022e): Wärmepumpe. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/waermepumpe#gewusst-wie>, zuletzt aktualisiert am 31.03.2022, zuletzt geprüft am 26.08.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022f): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2021. Unter Mitarbeit von Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (Hintergrund). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/hg_erneuerbareenergien_dt.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022g): Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft>, zuletzt aktualisiert am 29.11.2022, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022h): Erstes Halbjahr 2022: Deutlich mehr Strom aus Wind und Sonne. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/erstes-halbjahr-2022-deutlich-mehr-strom-aus-wind>, zuletzt aktualisiert am 06.12.2022, zuletzt geprüft am 06.12.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022i): Digitalisierung Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/recht-oekonomie-digitalisierung/digitalisierung-wasserwirtschaft>, zuletzt aktualisiert am 19.07.2022, zuletzt geprüft am 10.01.2023.

- Umweltbundesamt (UBA) (2022j): Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft>, zuletzt geprüft am 10.02.2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2023a): Erneuerbare Energien in Zahlen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, zuletzt geprüft am 23.03.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2023b): Luftqualität 2022. Vorläufige Auswertung. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_hgp_luftqualitaet.pdf, zuletzt geprüft am 23.02.2023.
- Umweltbundesamt (UBA) (2023c): Nationale Wasserstrategie. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasser-bewirtschaften/nationale-wasserstrategie>, zuletzt geprüft am 29.03.2023.
- Umweltbundesamt (UBA); Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022): Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Prozent Bundesklimaschutzministerium kündigt umfangreiches Sofortprogramm an. Gemeinsame Pressemitteilung von Umweltbundesamt und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz vom 15. März 2022. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent>, zuletzt geprüft am 11.10.2022.
- Unicef (2022): Weltwassertag 2022: 10 Fakten über Wasser. Online verfügbar unter <https://www.unicef.de/informieren/aktuelles/blog/-/weltwassertag-2022-zehn-fakten-ueber-wasser/275338>, zuletzt geprüft am 06.01.2023.
- United Nations (2020): Ziele für nachhaltige Entwicklung. Bericht 2020. Online verfügbar unter https://www.bmz.de/de/mediathek/publikationen/reihen/infobroschueren_flyer/infobroschueren/sMaterialie515_sdg_bericht_2020.pdf, zuletzt geprüft am 04.12.2020.
- United Nations Environment Programm UNEP (2019): Global Resources Outlook 2019. Natural Resources for the Future We Want. Hg. v. United Nations Environment Programm UNEP. Nairobi, Kenia. Online verfügbar unter <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook>, zuletzt geprüft am 02.09.2020.
- Universität Stockholm (o. J.): The nine planetary boundaries. Online verfügbar unter <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries/the-nine-planetary-boundaries.html>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Vaillant (2022): Die Funktionsweise einer Wärmepumpe einfach – erklärt. Online verfügbar unter <https://www.vaillant.ch/privatkunden/ratgeber-heizung/heiztechnologie-verstehen/warmepumpen/funktionsweise-warmepumpe/>, zuletzt geprüft am 23.02.2023.

- VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Online verfügbar unter <https://www.dke.de/resource/blob/933404/3d80f2d93602ef58c6e28ade9be093cf/kompendium-li-ionen-batterien-data.pdf>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- VDMA (2021): Allgemeine Lufttechnik nach Krisenjahr 2020 wieder mit deutlichem Rückenwind. Online verfügbar unter <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/17409227>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- VDMA (2022): Hohe Nachfrage nach Energieeffizienz treibt die Branche. Online verfügbar unter <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/69038635>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Vekic, N. (2020): Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität: Status, Zukunftsperspektiven, Recycling.
- Veolia (2021): Windenergieanlagen-Recycling Veolia Deutschland. Nachhaltiges Repowering, Rückbauen und Recyceln von Windenergieanlagen, zuletzt geprüft am 09.08.2022.
- Vereinte Nationen (2020): Ziele für nachhaltige Entwicklung. Online verfügbar unter <https://unric.org/de/17ziele/>, zuletzt geprüft am 08.12.2020.
- Virtuelles Institut NRW (2022): Strom zu Gas und Wärme. Lebenszyklusorientierte analysen und Kritikalitätsanalyse von Power-to-X Optionen. Online verfügbar unter <http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2022/07/KoVI-SGW-Abschlussbericht-Band-II-M%C3%A4rz-2022-final.pdf>, zuletzt geprüft am 24.02.2023.
- Voss, J. (2022): Bioplastik: Wie umweltfreundlich ist Kunststoff aus Pflanzen? Haben Kunststoffverpackungen aus nachwachsenden Rohstoffen eine bessere Ökobilanz als herkömmliches Plastik? Umweltorganisationen kommen zu einem eindeutigen Ergebnis. Hg. v. National Geographic. Online verfügbar unter <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2022/08/bioplastik-wie-umweltfreundlich-ist-kunststoff-aus-pflanzen>.
- Weber, D.; Brian, M.; Schneider, J.; Jehle, K. (2019): Leitfaden – Öffentlichkeitsarbeit für Geothermieprojekte. Planung, strategische Ausrichtung und Umsetzung von Kommunikationsmaßnahmen durch Projektbetreiber. 2. Aufl. Hg. v. Enerchange. Online verfügbar unter https://www.enerchange.de/sites/default/files/pr-leitfaden_geothermie_neu_web.pdf, zuletzt geprüft am 27.02.2023.
- Weinisch, K. H.; Krines, M.; Löffland, H. (2020): Baustoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen. 6. Aufl. Hg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch%C3%BCre_Baustoffe_2020_Web_StandAktualisiert.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2022.

- Weissroth, M. (2020): Abwasserfreie Kosmetikproduktion. Erweiterung einer Industriekläranlage zum Zero Liquid Discharge. In: *Industrie Wasser*, S. 45-47.
- Weitze, M. D.; Zilker, B. (2020): TechnikRadar 2020: Was die Deutschen über die Bioökonomie denken. Hg. v. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech). München. Online verfügbar unter <https://www.acatech.de/allgemein/technikradar-2020-was-die-deutschen-ueber-die-biooekonomie-denken/>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Weltgesundheitsorganisation (WHO) (2021): WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Bonn, Germany: WHO European Centre for Environment and Health.
- Weltgesundheitsorganisation (WHO) (2022): Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data. Online verfügbar unter <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.
- Wermke, I. (2022): Erdwärme – Wie Geothermie Deutschland mit Wärme versorgen könnte. In: *Handelsblatt*, 01.05.2022. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/erdwaerme-heizen-der-zukunft-wie-geothermie-deutschland-mit-waerme-versorgen-koennte/28287012.html>, zuletzt geprüft am 26.10.2022.
- Wiedemann, K. (2022): Mehr blauer Wasserstoff für den Übergang. Hg. v. Energate messenger. Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/228554/mehr-blauer-wasserstoff-fuer-den-uebergang#:~:text=F%C3%BCr%20die%20%C3%9Cbergangsphase%20auch%20von,auch%20%C3%BCber%20Pipeline%20angebunden%20sind>, zuletzt geprüft am 08.03.2023.
- Wikipedia (2020): Umwelttechnik. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Umwelttechnik>, zuletzt aktualisiert am 26.07.2020, zuletzt geprüft am 06.08.2020.
- Wirth, H. (2022): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Hg. v. Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>, zuletzt geprüft am 12.07.2022.
- Wolf (2023): Wirkungsgrad einer Wärmepumpe. Hg. v. Wolf. Online verfügbar unter <https://www.wolf.eu/de-de/ratgeber/wirkungsgrad-waermepumpe#:~:text=Bei%20einer%20Vorlauftemperatur%20zwischen%2030,selten%20unter%2012%20%C2%B0C>, zuletzt aktualisiert am 2023, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

- WWF (2022): Das UN-Übereinkommen zur biologischen Vielfalt und die Weltnaturkonferenz. Online verfügbar unter <https://www.wwf.de/themen-projekte/artenschutz/politische-instrumente/cbd-die-un-konvention>, zuletzt geprüft am 13.03.2023.
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) (2022): Datenservice. Bestand an Elektro-Pkw weltweit. Online verfügbar unter <https://www.zsw-bw.de/mediathek/datenservice.html#c6700>, zuletzt aktualisiert am 12.12.2022, zuletzt geprüft am 12.12.2022.
- ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung; Institut für Mittelstandsforschung (IfM) (2019): Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Familienunternehmen. Unter Mitarbeit von Sandra Gottschalk. Hg. v. Stiftung Familienunternehmen. München. Online verfügbar unter https://www.familienunternehmen.de/media/public/pdf/publikationen-studien/studien/Die-volkswirtschaftliche-Bedeutung-der-Familienunternehmen-2019_Stiftung_Familienunternehmen.pdf, zuletzt geprüft am 02.03.2023.
- Zimmermann, M.; Schramm, E.; Ebert, B. (2020): Siedlungswasserwirtschaft im Zeitalter der Digitalisierung. In: *TATuP* 29 (1), S. 37-43.
- Zukunft Gas e.v (2023): Türkiser Wasserstoff durch Methan-Pyrolyse. Online verfügbar unter <https://gas.info/energie-gas/wasserstoff/herstellung-wasserstoff/tuerkiser-wasserstoff>, zuletzt geprüft am 03.02.2023.



Stiftung Familienunternehmen

Prinzregentenstraße 50
D-80538 München

Telefon + 49 (0) 89 / 12 76 400 02

Telefax + 49 (0) 89 / 12 76 400 09

E-Mail info@familienunternehmen.de

www.familienunternehmen.de

Preis: 39,90 €

ISBN: 978-3-948850-33-3