

GreenTech made in Germany 2025

Umwelttechnik-Atlas für Deutschland



Für Mensch & Umwelt

Umwelt 
Bundesamt

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 1.4
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt

Autor*innen:

Patrick Bechhaus, Tim Bichlmeier, Nico Dietzsch,
Johanna Draeger-Gebhard, Philipp Hutzenthaler,
Jannis Lambert, Robert Norpoth, Vera Wechner

Redaktion:

Prognos AG
Goethestraße 85
10623 Berlin

Satz und Layout:

dot.blue communication & design
Hochstraße 74
45894 Gelsenkirchen

Stand: 07.03.2025

Bildquellen:

S. 1 © Philipp/stock.adobe.com
S. 4 © Thomas Hecker/stock.adobe.com
S. 6 © biletskiyevgeniy.com/stock.adobe.com
S. 9 © Audrius/stock.adobe.com
S. 10 © signalstudio/stock.adobe.com
S. 12 © Adobe Contributor (KI)/stock.adobe.com
S. 15 © malp/stock.adobe.com
S. 16 © nmann77/stock.adobe.com
S. 20, 53 © romaset/stock.adobe.com
S. 24 © Viessmann Climate Solutions
S. 27 © ChutinanArt6/stock.adobe.com
S. 33 © Benoît/stock.adobe.com
S. 37 © teamjackson/stock.adobe.com
S. 38 © Peter/stock.adobe.com
S. 47 © Hermann/stock.adobe.com
S. 58 © photovs/istockphoto.com
S. 61 © Hermann/stock.adobe.com
S. 63 © ronstik/istockphoto.com
S. 65 © by-studio/stock.adobe.com
S. 66 © Daniel Balakov/istockphoto.com
S. 67 © Petair/stock.adobe.com
S. 71 © Daniel Schoenen/Alamy
S. 77 © Bim/istockphoto.com
S. 81 © vadimborkin/stock.adobe.com
S. 85 © reewungjunerr/stock.adobe.com
S. 88 © Reiling PV-Recycling GmbH & Co. KG
S. 90 © TimSiegert-batcam/stock.adobe.com
S. 92 © Andreas Gruhl/stock.adobe.com
S. 96 © Riccardo_Mojana/istockphoto.com



GreenTech made in Germany 2025

Umwelttechnik-Atlas für Deutschland



Inhalt



Zusammenfassung	6
------------------------------	----------



Dynamische Zeiten für die GreenTech-Branche	10
--	-----------



GreenTech-Branche: Der nationale und globale Markt für Umweltgüter- und Dienstleistungen

3.1. Bestandteile der GreenTech-Branche.....	17
3.2. GreenTech kurbelt die deutsche Wirtschaft an.....	18
3.3. Internationaler Handel mit GreenTech nimmt stetig zu	26
3.4. Deutsche GreenTech-Branche: ein wichtiger globaler Innovationstreiber	34



Blick in die Leitmärkte: Grüne Leistungen zeigen Wirkung

4.1. Circular Economy: das Rückgrat der GreenTech-Branche	39
4.2. Energieeffizienzlösungen: GreenTech Unternehmen mindern Umweltbeeinträchtigungen und Energiekosten	47
4.3. Erneuerbare Energiesysteme: Die Nachfrage steigt stark.....	53
4.4. Minderungs- und Schutztechnologien: Erhalt von Böden und Luft – sowie gesellschaftlich relevante Infrastrukturen.....	60
4.5. Nachhaltige Forst- und Landwirtschaft: Stärkung der Regenerationsfähigkeit ökologischer Systeme.....	65
4.6. Umweltfreundliche Mobilität: Boden gutgemacht.....	70
4.7. Wasserwirtschaft: Schutz der essentiellen Ressource	76



Circular Economy: Hebel der Transformation

5.1. Regulatorische Rahmenbedingungen: Auf EU- und Bundesebene wird die Circular Economy gezielt gefördert	82
5.2. Circular Economy: Leitbild eines ganzheitlichen Wirtschaftsmodells	82
5.3. Die Kreislaufführung von PV-Anlagen	84
5.4. Circular Economy für Windenergieanlagen	90

Quellen	97
----------------------	-----------

1

Zusammenfassung



Der GreenTech-Atlas 2025 zeigt, dass sich die deutsche GreenTech-Branche längst zu einer Schlüsselbranche in Deutschland entwickelt hat.¹ Viele grüne Technologien und Dienstleistungen sind schon heute wettbewerbsfähig und werden weiter an Bedeutung gewinnen. Die GreenTech-Branche schafft stabile Beschäftigung und leistet einen beachtlichen Wertschöpfungsbeitrag. Im Jahr 2023 betrug der Anteil der GreenTech-Branche an der gesamten volkswirtschaftlichen Bruttowertschöpfung 9,0 % und zeigte seit 2010 ein Wachstum von 4,7 % pro Jahr, deutlich mehr als andere Schlüsselbranchen. Im Jahr 2023 beschäftigte die GreenTech-Branche 3,4 Millionen Personen, ein Plus von 800.000 seit 2010. Zum Vergleich: die deutsche Schlüsselbranche des Fahrzeugbaus zählte 2023 etwa 1,1 Millionen direkte Erwerbstätige. Auch die einzelnen GreenTech-Leitmärkte, wie erneuerbare Energiesysteme, Energieeffizienz oder umweltfreundliche Mobilität, zeigen dynamische Trends.

Mit Blick auf den Außenhandel zeigt sich ebenfalls die starke Position der deutschen GreenTech-Branche. In den kommenden Jahren dürfte die globale Nachfrage nach grünen Gütern weiter stark steigen, gleichzeitig droht jedoch durch Handelskonflikte und protektionistische Maßnahmen ein Rückgang des gesamten Warenhandels. Zusätzlich intensiviert sich der globale Wettbewerb. Die deutsche GreenTech-Branche ist eng in den internationalen Handel eingebunden und exportierte 2023 Produkte im Wert von 132 Milliarden Euro. Mehr als die Hälfte der deutschen Ausfuhren gehen in andere EU-Länder. Der europäische Binnenmarkt ist damit fast sechs Mal so groß wie das wichtigste außereuropäische Exportziel, die USA. Damit hat die Europäische Union, in Zeiten wachsender internationaler Konkurrenz und drohender Handelskonflikte, eine herausragende Bedeutung für die deutsche GreenTech-Branche.

Im globalen Innovationswettbewerb erweist sich die deutsche GreenTech-Branche als konkurrenzfähig. Deutschland gehört im Beobachtungszeitraum 2010 bis 2023 zu den drei wichtigsten Ländern bei den GreenTech-Patenten und liegt mit einem Anteil von 16,5 % nur knapp hinter den USA und Japan.

Allerdings holt China bei den Patentanmeldungen rasch auf und könnte bereits in den nächsten Jahren zu der Top-3 Gruppe aufschließen. Wichtigste Innovations-Leitmärkte sind Erneuerbare Energiesysteme und die Umweltfreundliche Mobilität.

Die Bruttowertschöpfung der deutschen GreenTech-Branche könnte sich bis 2045 fast verdoppeln, der Welt-Importmarkt sogar vervierfachen. Grundlage für ein anhaltendes Wachstum der GreenTech-Branche ist eine stabile Nachfrage nach grünen Technologien und Dienstleistungen, unter anderem stimuliert durch ambitionierte Umwelt- und Klimapolitiken. Zusätzlich steht die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen GreenTech-Unternehmen im Mittelpunkt. Um das Potenzial der GreenTech-Branche in den kommenden Jahren tatsächlich zu erschließen, lassen sich auf Basis des vorliegenden Berichts drei zentrale Handlungsfelder identifizieren, die sowohl staatliche als auch privatwirtschaftliche Maßnahmen erfordern:

1. Deutschland muss den begonnenen Transformationspfad hin zur Netto-Treibhausgasneutralität und der Umsetzung einer Circular Economy konsequent fortsetzen und kann damit den Heimatmarkt für GreenTech stärken. Ähnlich wie für andere deutsche Schlüsselbranchen gilt, dass eine starke heimische Nachfrage die Basis darstellt, damit deutsche Unternehmen wettbewerbsfähige Produkte auf dem Weltmarkt anbieten können. Von zentraler Bedeutung sind verlässliche regulatorische Rahmenbedingungen, die an Zielen für Klimaschutz und Circular Economy festhalten und damit bestehende Marktanreize weiter stärken. Deutschland muss sich in der EU für einen konsequenten Transformationskurs einsetzen. Davon profitiert auch die deutsche GreenTech-Branche, für welche die EU den mit Abstand wichtigsten Exportmarkt darstellt.
2. Im Zuge geopolitischer Spannungen und zunehmender Handelshemmnisse zwischen der EU, den USA und China können deutsche GreenTech-Unternehmen verstärkt auf neue Marktchancen setzen. In vielen Ländern steigt der Bedarf nach

¹ Die GreenTech-Brache umfasst verschiedene ökonomische Aktivitäten, die einen direkten oder indirekten Umwelt-nutzen bereitstellen, ein Beitrag zur Klimaanpassung leisten oder eine wichtige Bereitstellungsfunktion haben. In 7 Leitmärkten erfasst die Analyse sowohl die Herstellung von Gütern als auch Dienstleistungen. In Kapitel 3.1 wird detailliert beschrieben, was als Teil der GreenTech-Branche definiert wird.

grünen Technologien: In Kambodscha und Vietnam wuchs der Import von GreenTech-Gütern um 20,7 % bzw. 15,3 % pro Jahr. In Israel und Neuseeland liegen die jährlichen Wachstumsraten bei 13,1 %. Die GreenTech-Importe Indiens wuchsen zwischen 2010 und 2022 um 12 % pro Jahr. Dabei stieg die Bedeutung deutscher Güter besonders seit 2020 schnell. Mit durchschnittlich 25 % jährlicher Wachstumsrate verdoppelte sich Indiens Einfuhr deutscher Waren zwischen 2020 und 2023. Auch in Zukunft bieten sich große Potenziale für deutsche Technologie- und Dienstleistungsanbieter. So plant zum Beispiel Indien die installierte Kapazität von Windenergieanlagen bis 2030 auf über 140 Gigawatt fast zu verdreifachen.² In den geführten Interviews für den GreenTech-Atlas schrieben mehrere Expert*innen Ländern in Afrika und Südamerika teils großes Potenzial für GreenTech in der Zukunft zu. Einzelne Länder zeigen bereits heute eine überdurchschnittliche Dynamik. Der chilenische Importmarkt ist zwar noch klein, wächst aber mit 7,2 % jährlich seit 2010 deutlich, die Importe aus Deutschland übertreffen das Wachstum mit 7,4 % p.a. sogar. An den Wachstumszahlen kann man ableiten, dass in diesen neuen Märkten große Potenziale für deutsche Unternehmen liegen, um in Zukunft Absatzchancen zu erschließen. Staatliche Akteure können diesen Prozess unterstützen, indem Freihandelsabkommen abgeschlossen und Exportbedingungen verbessert werden. Zusätzlich können die deutschen Außenhandelskammern und Exportinitiativen Informationen bereitstellen, die es Unternehmen erleichtern, diese neuen Märkte zu erschließen.

3. Damit die deutsche GreenTech-Branche dauerhaft international wettbewerbsfähig bleibt, ist die Stärkung von Forschung und Entwicklung von herausragender Bedeutung. In verschiedenen Leitmärkten haben deutsche GreenTech-Unternehmen Schlüsselinnovationen hervorgebracht. Der Siemens-Konzern tut sich in mehreren Leitmärkten bei Patentthemen wie Recycling in der Metallverarbeitung, Prozesseffizienz oder Smart Factory

hervor. Unternehmen wie Linde bei Minderungs- und Schutztechnologien für die Abscheidung und Speicherung von CO₂ oder Enercon (über die rechtliche Vertretung Wobben Properties) im Leitmarkt Erneuerbare Energiesysteme bei Windenergieanlagen nehmen zentrale Positionen im internationalen Innovationsvergleich ein. Um im internationalen Wettbewerb schrittzuhalten, insbesondere gegenüber der kompetitiven Innovationspolitik Chinas, braucht es eine wirksame Forschungsförderung, gute Rahmenbedingungen für Start-ups und eine effektive Zusammenarbeit privater und staatlicher Akteure.

² Alex, B. (2022). *Branche hofft auf frischen Wind durch Offshore-Projekte*. Abgerufen am 26. Mai 2025 von <https://www.gtai.de/de/trade/indien-wirtschaft/windenergie>



The background of the entire image is a blurred, high-contrast photograph of a financial market display. It features a grid of numbers in various colors (green, blue, yellow) and some faint line graphs, suggesting a stock exchange or data center environment. A large, solid green rectangle is positioned in the upper left quadrant, containing the number '2' and the title text. Below this rectangle, there is a horizontal band with a green and black diagonal hatched pattern.

2

Dynamische Zeiten für die GreenTech-Branche

Wie kaum ein anderes Land hat Deutschland von der globalen Handelsintegration profitiert und hochinnovative Produkte in die Welt exportiert. Doch die deutsche Wirtschaft sieht sich einer zunehmend herausfordernden globalen Wirtschaftslage ausgesetzt. Der internationale Wettbewerb intensiviert sich, während der regelbasierte globale Handel, der die vergangenen Jahrzehnte prägte, verstärkt unter Druck gerät. Die COVID-19-Pandemie und die Energiepreiskrise im Zuge des russischen Angriffskrieges haben viele Unternehmen erheblich belastet. Wichtige deutsche Schlüsselindustrien wie der Maschinenbau verzeichneten bereits vor der COVID-19-Pandemie stagnierende Produktionszahlen. Auch aktuell verschlechtern sich die Geschäftserwartungen der deutschen Exportindustrie weiter, beispielsweise in der Automobilindustrie, der angesichts der US-amerikanischen Zollpolitik unter der Trump-Administration weitere Herausforderungen drohen. Zusätzlich erhöht der fortschreitende Klimawandel die Notwendigkeit, fossile Prozesse und Infrastrukturen durch grüne Alternativen zu ersetzen, und beschleunigt darüber zusätzlich den Anpassungsbedarf. Angesichts dieser Entwicklungen stellt sich die zentrale Frage: Woher wird der zukünftige Wohlstand in Deutschland kommen?

Eine Antwort liegt in der GreenTech-Branche. Die Branche verspricht wirtschaftliche Dynamik durch innovative Technologien, die gleichzeitig ökologische Herausforderungen adressieren. Der globale Bedarf an klimafreundlichen und ressourcenschonenden Lösungen wächst stetig und wird getrieben durch politische Vorgaben, gesellschaftliche Erwartungen und technologische Fortschritte. Zahlreiche Länder fördern entsprechende Innovationen und schaffen so einen intensiven Wettbewerb um die technologische Vorreiterrolle in grünen Zukunftsmärkten. Mit dem GreenTech-Atlas 2025 wird die Berichtsreihe aktualisiert. Dabei werden die ökonomischen Kennziffern der Querschnittsbranche anhand eines überarbeiteten methodischen Vorgehens für den Betrachtungszeitraum 2010 bis 2023 sowie in der Projektion bis 2045 aktualisiert. Ein direkter Vergleich zu den vorherigen Ergebnissen ist nicht möglich. Darüber hinaus wird die Betrachtung um neue Analyseschritte ergänzt. Der aktualisierte Bericht nimmt eine Reihe von Fragen in den Blick: Wie ist Deutschland in diesem globalen Rennen um GreenTech aufgestellt? Welche Wachstumsraten verzeichnet die deutsche GreenTech-Branche? In welchen Bereichen ist sie international führend? Wo bestehen die größten

Herausforderungen? Welche Innovationen entwickeln deutsche Unternehmen, um sowohl ökonomische als auch ökologische Erfolge zu erzielen? Diese Fragen stehen im Zentrum der Analyse und beleuchten die Zukunftsperspektiven einer Branche, die für die wirtschaftliche und ökologische Transformation Deutschlands von entscheidender Bedeutung sein wird.

Zunehmender Druck durch globale Klima- und Umweltkrisen

Die weltweiten Rahmenbedingungen, unter denen die GreenTech-Branche agiert, sind geprägt von einer zunehmenden Dringlichkeit zur Bewältigung der Dreifachkrise aus Klimawandel, Umweltverschmutzung und Artensterben. Zentrale Triebfedern dieser Entwicklung sind internationale Abkommen wie das Pariser Klimaabkommen von 2015, in dessen Umsetzung die Staaten verbindliche Ziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen festgelegt haben. Daneben ist auch die zunehmende Implementierung nationaler und supranationaler Regulierungen zur Förderung erneuerbarer Energien, zur Dekarbonisierung und zur Steigerung der Energieeffizienz ein entscheidender Faktor. Darüber hinaus treiben technologische Innovationen sowie sinkende Kosten für grüne Technologien die Branche voran. Die wachsende gesellschaftliche Sensibilisierung für Umweltthemen und der Druck von Investoren auf Unternehmen, nachhaltige Praktiken zu implementieren, verstärken diesen Trend zusätzlich. Diese Faktoren schaffen ein dynamisches Umfeld, das die kontinuierliche Entwicklung und Verbreitung umweltfreundlicher Technologien weltweit fördert. Dies eröffnet aus Sicht der deutschen GreenTech-Branche neue Marktchancen – insbesondere in Ländern, die noch weiter am Anfang dieser Entwicklung stehen. Um hier erfolgreich zu sein, müssen Politik und Unternehmen die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen GreenTech-Branche festigen und kontinuierlich steigern.

Gleichzeitig schränken Handelshemmnisse und protektionistische Maßnahmen die Marktzugänge für deutsche Unternehmen zunehmend ein. In der Zukunftsbranche GreenTech zeigen sich derartige Tendenzen besonders deutlich. Eine mögliche weitere Verschärfung von geopolitischen Konflikten und Handelskriegen bringt viele Unsicherheiten für den globalen Handel mit sich. Ein Blick in die beiden derzeit größten GreenTech-Märkte, China und USA, verdeutlicht die widersprüchlichen Entwicklungen, die aktuell zu beobachten sind.

Chinas setzt auf GreenTech-Lösungen

China verfolgt das ehrgeizige Ziel, bis 2049 die führende Wirtschaftsmacht der Welt zu sein. Hierfür hat China im Rahmen seiner Entwicklungsstrategien Schlüsseltechnologien definiert, in denen das Land spätestens bis zum Jahr 2035 eine führende Rolle einnehmen will. Dies betrifft auch explizit Bereiche der GreenTech-Branche wie Energieeffizienz, umweltfreundliche Mobilität und erneuerbare Energiesysteme. China hat schon einige seiner Ziele erreicht. Mit massiven Subventionen und auf Basis eines hybriden, von staatlichen Eingriffen geprägten Wirtschaftsmodells hat das Land bereits eine führende Position in einigen GreenTech-Bereichen erreicht und dominiert die weltweiten Produktionskapazitäten.³ Durch starke Überkapazitäten, die weit über die Inlandsnachfrage hinausreichen, bestimmt China die Entwicklungen des Weltmarkts. Dies zeigt sich eindrücklich in den Bereichen Photovoltaik (PV) sowie der Batterieherstellung. China hält auf diesen Gebieten mehr als 75 % der weltweiten Produktionskapazitäten. Durch weitere angekündigte Investitionen in Höhe von 280 Milliarden Dollar dürfte sich diese Position auch in anderen Bereichen der GreenTech-Branche weiter verfestigen.⁴ Das Bestreben, durch weitere Initiativen wie "China Standards 2035" auch die Normen der Zukunft zu setzen und durch internationale Handelsverflechtungen zu verbreiten, unterstreicht Chinas intensive strategische Planung. Systematisch betriebene Handels- und Infrastrukturprojekte zielen nicht nur auf ökonomische Vorteile, sondern auch auf Normen- und Qualitätsführerschaft ab. Normen dienen in diesem Kontext nicht nur der Standardisierung zur Sicherung der Interoperabilität, sondern bestimmen auch über den Marktzugang die Wettbewerbsposition und bieten durch Lizenzeinnahmen direkte finanzielle Vorteile. Dieser Herausforderung müssen sich deutsche Unternehmen frühzeitig stellen und Strategien entwickeln, um ihre aktuelle Rolle zu sichern und für die Zukunft zu stärken.

Künftige Nachfrage der USA ungewiss

Parallel dazu manifestierte sich in den USA unter der Biden-Präsidentschaft ein vergleichbar strategischer Ansatz. Prägend war dabei der Inflation Reduction Act (IRA). Das im August 2022 verabschiedete Gesetz sah ein Investitions- und Ausgabenprogramm mit einem auf 10 Jahre verteilten Volumen von geschätzt 430 Milliarden Dollar vor. Damit war es das bislang größte klima- und transformationsorientierte⁵ Ausgabenprogramm der USA.⁶ Primäres Ziel war es, mit dem IRA die heimische Wirtschaft durch massive Investitionen in die inländische Produktion und die Förderung klimaneutraler Industrien zu stabilisieren und die Wettbewerbsfähigkeit vor allem auch gegenüber China zu sichern. Nach der Einführung des IRA war ein deutlicher Anstieg der Investitionen in die GreenTech-Branche und ein damit verbundener Zuwachs der Beschäftigung erkennbar.⁷ Vor allem im Bereich der Produktion, insbesondere in den verschiedenen Wertschöpfungsstufen der Elektromobilität, waren hohe Zuwächse zu verzeichnen.⁸

Die weitere Entwicklung in den USA ist ungewiss. Unter der Trump-Administration zeichnet sich eine deutliche Verschiebung der Prioritäten ab. Neben einer verstärkten Förderung von fossilen Technologien und Industriesektoren wurde der IRA in weiten Teilen pausiert und der Anwendungsbereich stark eingeschränkt. Die weiteren Entwicklungen sind nicht klar abzusehen. Es muss zumindest für die USA mit einem Rückgang der Dynamik in der GreenTech-Branche und Handelserschwernissen für deutsche Unternehmen gerechnet werden.

Die EU begegnet den Transformationsherausforderungen mit einem breiten Maßnahmenmix

Die Umwelt- und Klimapolitik der Europäischen Union bildet den prägenden Rahmen für die GreenTech-Branche in Deutschland. Zentraler Baustein

3 Gramke, K., Jank, K., Posch, D., Spuck, J. (2023). *Green tech made in Germany: how fit for the future are we?* Bertelsmann Stiftung (Hrsg.). <https://doi.org/10.11586/2024001>

4 Europäische Kommission (2024). *The Draghi report on EU competitiveness*. Abgerufen am 26. Mai 2025 von https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en

5 Der IRA ist nicht ausschließlich auf grüne Technologien ausgerichtet, sie stellen jedoch einen Schwerpunkt dar.

6 Bernoth, K. & Meyer, J. (2023). *US-Investitionspaket Inflation Reduction Act* erfordert schnelles strategisches Handeln der EU. Wochenbericht Nr. 6/2023. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. https://doi.org/10.18723/diw_wb:2023-6-1

7 Clean Investment Monitor (2025). *Clean investment by quarter*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.cleaninvestmentmonitor.org/>

8 E2 (2024). *Clean Jobs America 2024. IRA drives clean economy job surge*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://cleanjobsamerica.e2.org/wp-content/uploads/2024/09/E2-2024-Clean-Jobs-America-Report_September-17-2024.pdf

der europäischen Transformationsstrategie ist der European Green Deal aus dem Jahr 2019. Dieser hat zum Ziel, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen und gleichzeitig seine Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Die EU setzt dabei auf eine Kombination aus regulatorischen Maßnahmen, Investitionsprogrammen und Innovationsförderung. Einen wichtigen Umsetzungsschritt stellte das Maßnahmenpaket „Fit for 55“ dar. Hierdurch wurde eine weitreichende Überarbeitung der europäischen Regulatorik umgesetzt, welche weite Teile der Wirtschaft auf eine klimagerechte, kreislaforientierte Wirtschaftsweise ausrichten und somit gerade im Bereich GreenTech die dynamische Entwicklung weitertragen soll. Um dieses Ziel zu erreichen, setzt die EU unter anderem auf Investitionsanreize, verstärkte Innovationsbemühungen sowie zügigere und vereinfachte Genehmigungsverfahren.⁹ Weitere Maßnahmen und Verordnungen betreffen Erneuerbare Energien (Renewable

Energy Directive), Energieeffizienz (Energy Efficiency Directive) sowie die Circular Economy (Circular Economy Action Plan, geplanter Circular Economy Act).

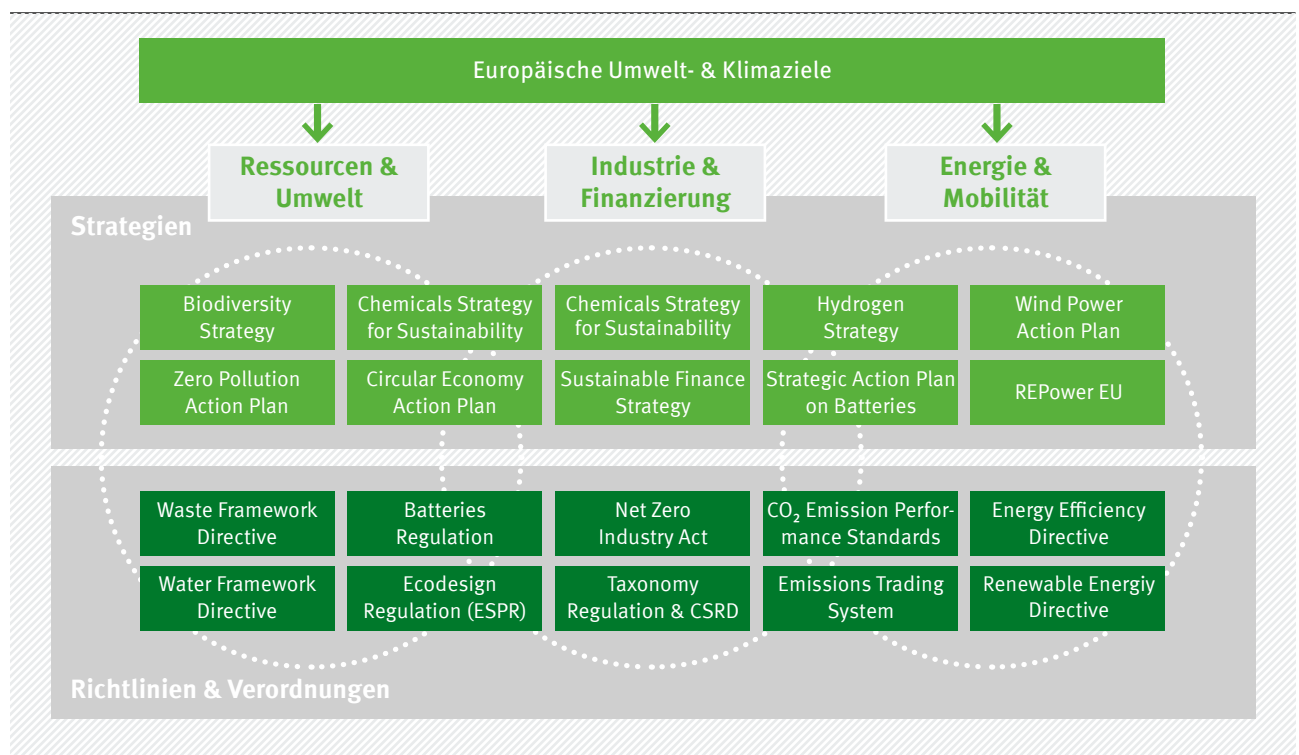
Neben regulatorischen Aspekten, die das Aktionsfeld der grünen Technologien mitbestimmen, hat die EU eine Reihe an Förderinstrumenten etabliert, um entsprechende Vorhaben zu unterstützen. Der am Jahresbeginn 2025 vorgestellte strategische Rahmen der EU-Kommission baut auf den Ergebnissen des Draghi-Reports auf und setzt den Schwerpunkt auf Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Dekarbonisierung. Mit dem neuen Clean Industrial Deal wurde der Rahmen konkretisiert.¹⁰ Die Kommission bekannte sich zum Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2050 und hielt an dem Zwischenziel und dem angekündigten 2040 Ziel fest. Die tragenden Säulen der neuen strategischen Ausrichtung sind günstige

⁹ Europäische Kommission (2025a). *Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Schaffung eines Rahmens für Maßnahmen zur Stärkung des europäischen Ökosystems der Fertigung von Netto-Null-Technologieprodukten (Netto-Null-Industrie-Verordnung).* (COM/2023/161 final). Dokument 52023PC0161. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/113794e9-07a8-11ef-a251-01aa75ed71a1/language-en>

¹⁰ Europäische Kommission (2025b). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions: The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation.* (COM(2025) 85 final). Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en

Abbildung 1

EU-Green Deal – Ausgewählte Strategien, Richtlinien und Verordnungen mit übergeordneter Bedeutung für die GreenTech-Branche



Energie, Dekarbonisierung sowie eine Stärkung der Circular Economy und der Innovationskraft des europäischen Binnenmarktes. Neben einer Förderung der Industrie wird die Rolle des „Clean-Tech Sektors“ als zentral erachtet, um die Wettbewerbsfähigkeit sowie die Innovationskraft des europäischen Binnenmarktes zu stärken. Ziel ist es, im Rahmen des Clean Industrial Deals ein Volumen von 400 Milliarden Euro aus öffentlichen und privaten Geldern zu mobilisieren.¹¹ Für die GreenTech-Branche bedeutet dies nicht nur eine umfassende Förderkulisse, Unterstützung im internationalen Wettbewerb und weitere Wachstumspotenziale im EU-Binnenmarkt, sondern darüber hinaus eine Rolle als zentrales Element der europäischen Industrie- und Wettbewerbsstrategie.

Deutschland setzt weitere Akzente

Die deutsche Gesetzgebung in den für die GreenTech-Branche relevanten Themenfeldern ist stark von der europäischen Ebene geprägt. Dabei verbleibt allerdings ein signifikanter Ausgestaltungsspielraum. Die Bundesrepublik entwickelt eine eigene strategische Ausrichtung sowie Prioritätensetzung. Das deutsche Klimaschutzgesetz, welches die Netto-Treibhausgasneutralität bereits ab 2045 festlegt, ist hier ein Beispiel. Das nach dem Gesetz von der Bundesregierung beschlossene Klimaschutzprogramm 2023 sieht konkrete Maßnahmen zur Erreichung dieses Zieles vor. Diese umfassen neben der Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) oder dem Solarpaket auch relevante Vorhaben in den Bereichen Gebäude, Industrie und Verkehr. Programme zur Stärkung der Bioökonomie, der Energieeffizienz sowie der verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien zur Wärmeerzeugung im Gebäudebereich bilden wichtige Teilbereiche ab. Sie bedeuten für die deutsche GreenTech-Branche eine weitere Stärkung und dürften das stabile Wachstum der vergangenen Jahre untermauern. Darüber hinaus hat sich Deutschland zuletzt mit der im Dezember 2024 verabschiedeten Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) weitergehende

Ziele zur Stärkung der Circular Economy gesetzt. Die NKWS folgt dem strategischen Leitbild der Senkung des Primärrohstoffverbrauchs.

Die deutsche GreenTech-Branche hat sich als Pionier in der Einführung von Spitzentechnologien, auch getrieben durch die regulatorischen Rahmenbedingungen in Deutschland und der EU, weltweit einen Namen gemacht. In Sektoren wie der Circular Economy haben sich deutsche Unternehmen durch innovative Lösungen und einen frühen Markteintritt eine Rolle als Weltmarktführer erarbeitet.¹² Die hohe Qualität, das Innovationsbestreben und dynamische Gründungsaktivitäten der deutschen GreenTech-Branche schaffen internationale Anerkennung und Wettbewerbsvorteile.¹³ Die internationale Wettbewerbsfähigkeit wird durch zahlreiche Initiativen gestärkt, die auf technologische Exzellenz und nachhaltigen Einsatz abzielen.

Insgesamt birgt das internationale Umfeld der deutschen GreenTech-Branche beträchtliche Potenziale. Viele Segmente der GreenTech-Branche stehen trotz immensen Wachstums erst am Anfang ihrer Entwicklung. Selbst im international zuletzt sehr stark gewachsenen Markt für erneuerbare Energien, mit einem Anstieg der installierten PV-Leistung um mehr als das zehnfache zwischen 2013 und 2023, ist das letztendliche weltweite Marktvolumen bisher schwer abschätzbar.¹⁴ Gleichzeitig zeigt sich hier genau wie im Bereich der Elektromobilität, dass diese Technologien nicht nur konkurrenzfähig gegenüber den konventionellen technologischen Alternativen sind, sondern diese mit der Zeit in Bezug auf Kosten und Marktfähigkeit übertrumpfen können. Durch die intelligente Nutzung neuer Marktchancen, die Förderung technologischer Innovationen und den Ausbau strategischer Kooperationen können deutsche Unternehmen nicht nur substanziell wachsen, sondern auch als zentrale Akteure in der globalen Transformation agieren.

11 Europäische Kommission (2025c). *Remarks by Executive Vice-Presidents Ribera and Séjourné and Commissioner Hoekstra at the press conference on the Clean Industrial Deal*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_25_630

12 Prognos AG (2024b). *Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2024*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/wp-content/uploads/2024/01/Statusbericht_2024_25012024_opt.pdf

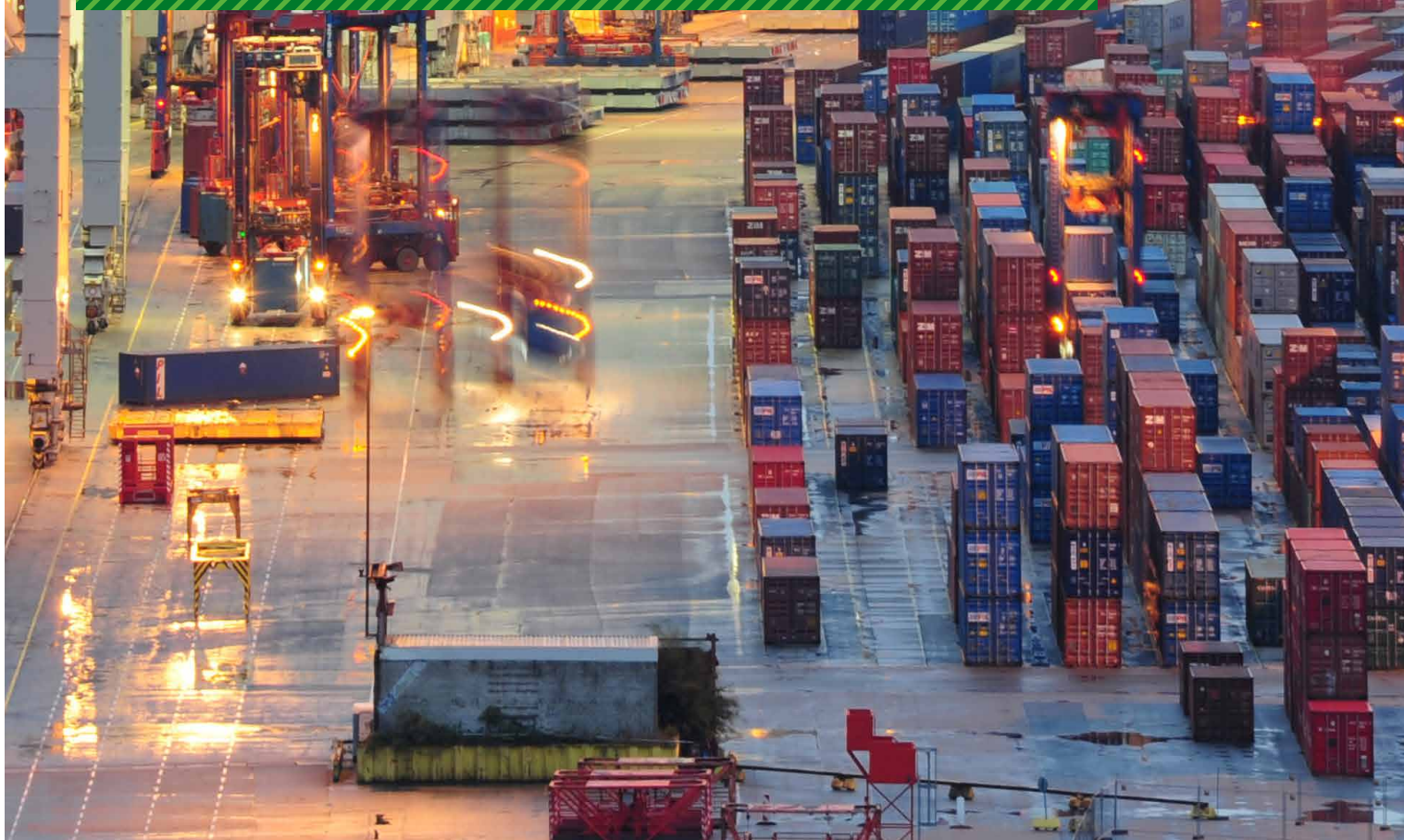
13 Bundesverband Deutsche Startups e.V. (2024). *Green Tech Monitor 2025*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://startupverband.de/fileadmin/startupverband/mediaarchiv/research/green_tech_monitor/GreenTech_Monitor_2025_.pdf

14 Weaver, J. F. (2023). *BloombergNEF: Photovoltaik-Zubau weltweit steigt 2023 um 58 Prozent auf 413 Gigawatt*. *PV-Magazin*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.pv-magazine.de/2023/11/29/bloombergnef-photovoltaik-zubau-weltweit-steigt-2023-um-58-prozent-auf-413-gigawatt/>



3

GreenTech-Branche: Der nationale und globale Markt für Umweltgüter- und Dienstleistungen



3.1. Bestandteile der GreenTech-Branche

Die GreenTech-Branche vereint Unternehmen, die umweltschützende bzw. umweltfreundliche Technologien und Dienstleistungen anbieten. Es handelt sich dabei um eine sehr heterogene Gruppe. Um die Berichtsreihe des GreenTech-Atlas fortzuführen und um den aktuellen Datenstand zu erneuern (2010-2023), erfolgt eine Betrachtung nach Leitmärkten, die sich am vergangenen GreenTech-Atlas 2021 orientiert.

Die sieben Leitmärkte der GreenTech-Branche

Die unterschiedlichen Leistungsbereiche der GreenTech-Branche lassen sich in sieben Leitmärkte systematisieren, die jeweils aus mehreren Marktsegmenten bestehen (Abbildung 2). Zusätzliche Informationen zu den erfassten Aktivitäten finden sich im Methodenpapier. Während das vorliegende Kapitel die wirtschaftliche Bedeutung der GreenTech-Branche insgesamt analysiert, wirft Kapitel 4 einen genaueren Blick auf die einzelnen Leitmärkte und die jeweils erfassten Marktsegmente.

Abbildung 2

Leitmärkte und Marktsegmente der GreenTech-Branche

 Circular Economy	 Energieeffizienz	 Erneuerbare Energiesysteme	 Minderungs- und Schutztechnologien	 Nachhaltige Forst- und Landwirtschaft	 Umweltfreundliche Mobilität	 Wasserwirtschaft
► Nachwachsende Rohstoffe und umweltfreundliche Materialien ► Abfallbehandlung und -verwertung ► Technik für die Abfallwirtschaft ► Zirkuläre Prozesse ► Abfallsammlung und -transport	► Energieeffiziente und resiliente Gebäude ► Energieeffiziente Produktionsprozesse und Technologien	► Elektrifizierung in der Industrie ► Erneuerbare Energien ► Intelligente Energiesysteme und Netze ► Speichertechnologie	► Bodenschutztechnologien und -sanierung ► Lärmminierungs- und Luftreinigungs-technologien ► Übergeordnete Klimaanpassungsleistungen	► Holzbearbeitung und Holzwerkstoffe ► Nachhaltige Forstwirtschaft ► Nachwachsende Holzbaustoffe ► Naturschutzorientierte Bewirtschaftung ► Nachhaltige Landwirtschaft ► Umweltfreundliche Technologien für die Landwirtschaft	► Fahrradwirtschaft ► Intelligente Verkehrssysteme und Infrastruktur ► Umweltfreundliche Logistik- und Mobilitätsdienstleistungen ► Umweltfreundliche Mobilitäts- und Antriebstechnologien	► Infrastrukturen für Wasser, Abwasser und Überflutungsschutz ► Monitoring und Analyseverfahren, Wasser- und Abwassermanagement ► Wassergewinnung, -aufbereitung und Abwasserbehandlung

Prognos AG 2025

Die Analyse stützt sich vor allem auf statistische Datenquellen

Die ökonomische Analyse des GreenTech-Atlas 2025 stützt sich auf amtliche Wirtschaftsdaten, wie zum Beispiel die Beschäftigungsstatistik der Bundesagentur für Arbeit. Die statistischen Klassifikationssysteme, nach welchen diese Datensätze aufbereitet werden, weisen die GreenTech-Branche nicht gesondert aus. Die Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) beispielsweise ist nach der Logik klassischer Wirtschaftsbranchen (Landwirtschaft, Chemie, Maschinenbau, etc.) strukturiert und differenziert

nicht nach ökologischen bzw. Transformations-Kriterien. Wirtschaftliche GreenTech-Aktivitäten finden sich über die verschiedenen traditionellen Branchen verteilt. Da die verfügbaren ökonomischen Daten nach der Wirtschaftszweigklassifikation geordnet sind, bedarf es einer präzisen Abgrenzung umweltrelevanter WZ-Codes. Dasselbe gilt für die übrigen verwendeten statistischen Klassifikationssysteme, wie etwa das Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken (GP 2019), das Warenverzeichnis für Außenhandel (WA 2010-2023) sowie ihre internationalen Pendant¹⁵.

¹⁵ Weitere Informationen zu den Klassifikationssystemen finden sich auf dem Klassifikationsserver des Statistischen Bundesamts: <http://www.klassifikationsserver.de/>

Zur systematischen Erfassung der GreenTech Aktivitäten nutzt Prognos das Envigos-Modell („Model for Environmental Industry, Goods and Services“)¹⁶. Dieses Modell ermöglicht die Identifikation und statistische Analyse von GreenTech-Technologien und -Dienstleistungen innerhalb bestehender wirtschaftsstatistischer Kategorien. Es werden vier Kriterien angesetzt, anhand derer das Modell die relevanten WZ-Codes identifiziert.

► **Kriterium 1: Direkter Umweltzweck**

Produkte und Dienstleistungen, die einen unmittelbaren Umwelteffekt erzielen, indem sie Schäden an Luft, Wasser, Böden, der Biodiversität oder Landschaften mindern. Auch die Reduktion von Lärm oder das Vermeiden von Ressourcenübernutzung wird hierunter gefasst.

► **Kriterium 2: Umweltfreundliche Substitute**

Produkte und Dienstleistungen, die konventionelle und umweltschädlichere Aktivitäten ersetzen.¹⁷ Zum Beispiel ersetzen Erneuerbare Energien konventionelle Formen der Elektrizitätserzeugung und mindern Treibhausgas-Emissionen.

► **Kriterium 3: Klimaanpassungsfunktion**

Produkte und Dienstleistungen, die zur vorbeugenden Vermeidung oder Minderung potenzieller Schäden und der Erhöhung der Resilienz gegenüber tatsächlichen und noch zu erwartenden Klimafolgen beitragen.

► **Kriterium 4: Unterstützende Wertschöpfungsfunktion**

Produkte und Dienstleistungen, die für die Bereitstellung eines umweltfreundlichen Gutes oder eine Dienstleistung eine besondere Unterstützungsfunktion einnehmen. Beispielhaft sind Ingenieur- oder Handwerksdienstleistungen für umweltfreundliche Produkte.

Produkte und Leistungen, die einem dieser vier Kriterien entsprechen, erfasst die Analyse als Teil der GreenTech-Branche. Ein prägender Bestandteil sind Leistungen, die einen Klimaschutzbeitrag leisten.

Dabei wird ein breiter Definitionsrahmen gesetzt, der sowohl die Herstellung von Gütern als auch grüne Dienstleistungen entlang unterschiedlicher Innovationsniveaus umfasst. Zum Beispiel erfasst das Modell die Herstellung und die Implementierung innovativer Hochtechnologien, etwa intelligente Energienetze. Die Abgrenzung betrachtet jedoch auch Leistungen, die als etabliert gelten, etwa Verwertungsleistungen der Abfallbetriebe oder die Bereitstellung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV).

Ergänzend zu den Ergebnissen der statistischen Analyse wurden im Zeitraum Oktober bis November 2024 eine Unternehmensbefragung sowie Expertengespräche durchgeführt. In Kooperation mit der Deutschen Industrie und Handelskammer (DIHK) wurden Unternehmen der GreenTech-Branche zur Teilnahme an einer Onlinebefragung aufgerufen. In Summe nahmen 120 Unternehmen an der Befragung teil. Die Ergebnisse der Befragung werden im Bericht gesondert hervorgehoben und liefern zusätzlich Erkenntnisse zu relevanten GreenTech-Branchentrends.

3.2. GreenTech kurbelt die deutsche Wirtschaft an

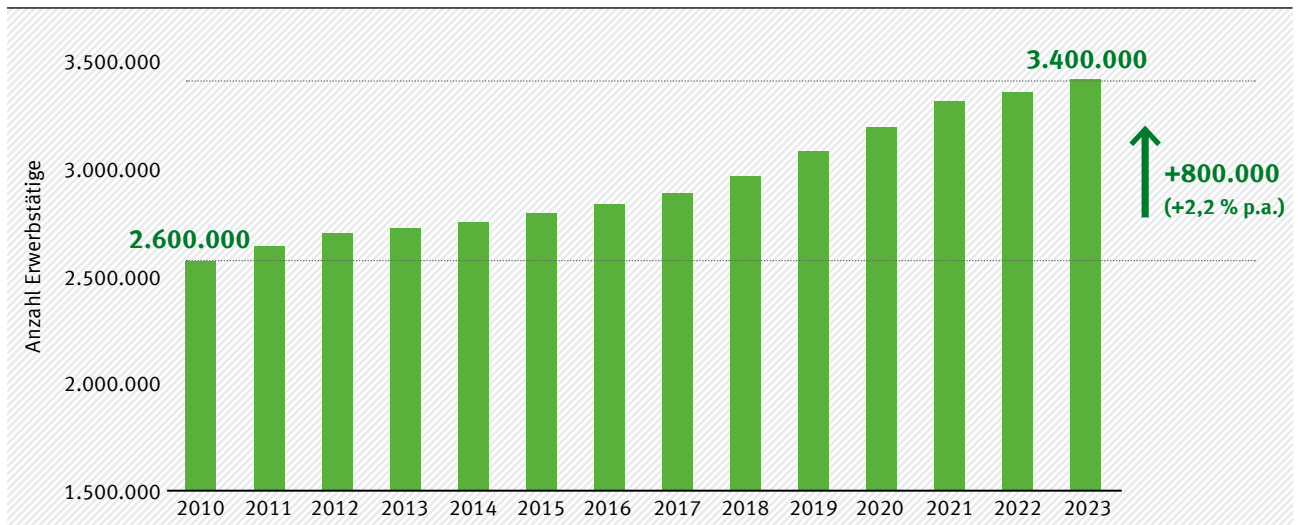
Fragt man deutsche Unternehmen branchenübergreifend nach einer Einschätzung der gegenwärtigen und zukünftigen Geschäftslage, äußern sich diese zunehmend skeptisch. Der Ifo Geschäftsklimaindex sank im Dezember 2024 auf den niedrigsten Wert seit Mai 2020.¹⁸ Der Austausch mit Unternehmen der GreenTech-Branche zeigt hingegen, dass das allgemeine Stimmungsbild in der GreenTech-Branche besser ist. Im Rahmen der Unternehmensbefragung antworteten knapp 43 % der Unternehmen, dass sie die gegenwärtige Geschäftslage als gut oder sehr gut einschätzen. Insbesondere die Zukunft wird optimistisch gesehen. Von den befragten Betrieben gehen 46 % davon aus, dass sich die Geschäftslage ihrer Betriebe in Zukunft positiv entwickelt.

¹⁶ Weitere Informationen zum Envigos-Modell finden sich auf: <https://www.prognos.com/de/envigos>

¹⁷ Für die Berücksichtigung ist entscheidend, dass das Angebot eine grundsätzliche (technologische) Alternative mit substanziellem ökologischem Mehrwert darstellt. Beispielsweise werden Elektrofahrzeuge erfasst, während besonders sparsame Benzin- oder Diesel-Fahrzeuge nicht berücksichtigt werden.

¹⁸ Ifo Institut (2024). *ifo Geschäftsklimaindex gesunken*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.ifo.de/fakten/2024-12-17/ifo-geschaeftsklimaindex-gesunken-dezember-2024>

Abbildung 3

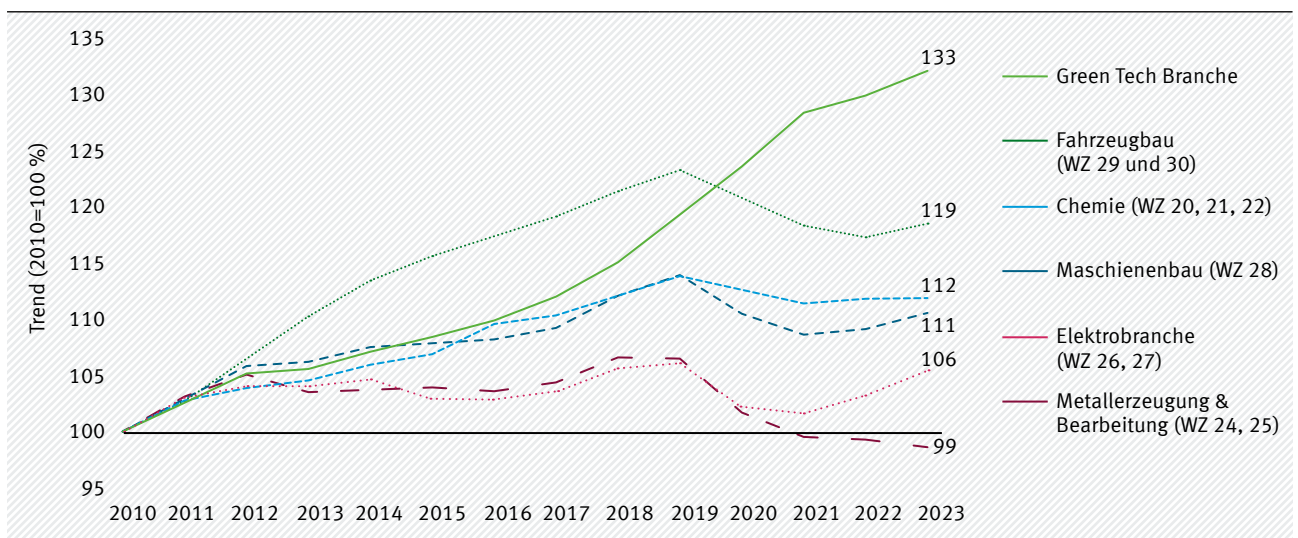
Erwerbstätige in der deutschen GreenTech-Branche**Über 3,4 Millionen Erwerbstätige in der deutschen GreenTech-Branche**

Unsere Analyse der ökonomischen Kennzahlen der GreenTech-Branche bestätigt eine positive Entwicklung. Mit über 3,4 Millionen Erwerbstätigen ist die Querschnittsbranche GreenTech ein wichtiger Arbeitgeber (Abbildung 3). Zum Vergleich: die deutsche Schlüsselbranche des Fahrzeugbaus zählte 2023 etwa 1,1 Millionen direkte Erwerbstätige. Die Zahl der Beschäftigten stieg zwischen 2010 und 2023 um etwa 800.000 Personen an. Der Anteil an den Erwerbstätigen der Gesamtwirtschaft stieg von 6,7 % auf 7,5 %.

GreenTech-Branche lässt andere Branchen hinter sich

Interessant ist der Vergleich zwischen GreenTech und ‚klassischen‘ Schlüsselbranchen im Zeitverlauf (Abbildung 4). Während die GreenTech-Branche an Dynamik gewann und auch während der COVID-19-Pandemie ein starkes Wachstum verzeichnete, zeigte sich für die übrigen Branchen eine deutlich schwächere Entwicklung.

Abbildung 4

Trend der Erwerbstätigen in Deutschland in der GreenTech-Branche und in Vergleichsbranchen (Indexiert 2010 = 100 %)

Fachkräftemangel als überragendes Zukunftsrisiko für deutsche Unternehmen

Zentrale Wettbewerbsvorteile, die den Wachstumspfad begründen könnten, sind aus Sicht der Unternehmen der GreenTech-Branche das hohe Qualifikationsniveau der Mitarbeiter*innen und hiesige Forschungs- und Entwicklungs- (F&E) Kompetenz. Diese sind entscheidend, um die steigende Nachfrage auf dem Heimatmarkt bedienen zu können sowie im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben. Allerdings droht dieser Wettbewerbsvorteil in den kommenden Jahren verloren zu gehen. Das Bundesministerium für Arbeit und Soziales weist im 2024 veröffentlichten Fachkräftemonitoring aus, dass

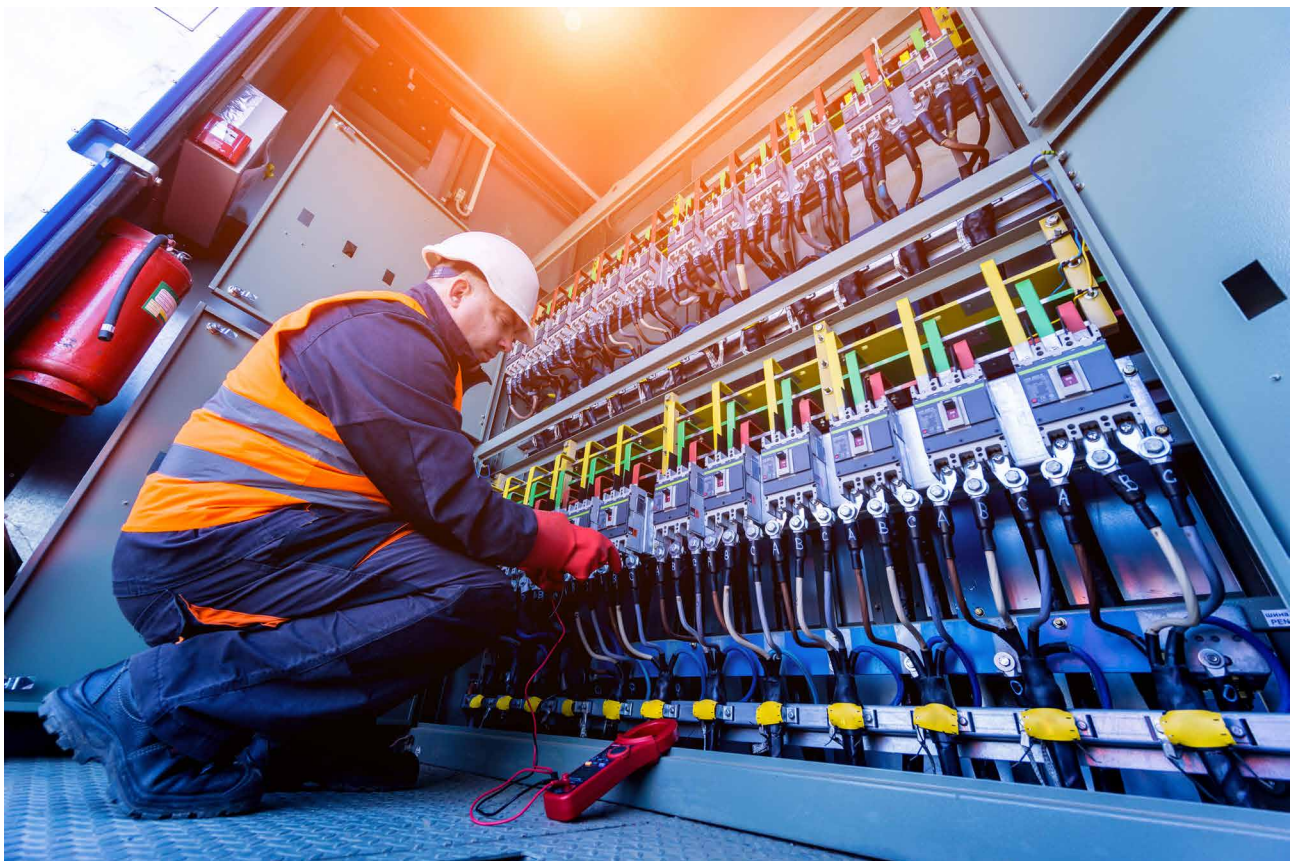
bereits bis 2028 relevante Engpässe bei der Verfügbarkeit geeigneter Fachkräfte in vielen Branchen entstehen könnten.¹⁹ Auch langfristig drohen entsprechende Engpässe.²⁰ Die Know-How intensive GreenTech-Branche wird diesem Trend im Besonderen ausgesetzt sein.

Damit steht die GreenTech-Branche vor der Frage, ob sie ihr Wachstumspotenzial in den kommenden Jahren voll ausschöpfen kann. Allein für die Schlüsseltechnologien der Windenergieanlagen, PV und Wasserstoff könnten bis 2035 etwa 350.000 Erwerbstätige zusätzlich benötigt werden.²¹ Der Fachkräftemangel wird von Unternehmen wie auch Branchenkenner*innen als enormes Risiko eingeschätzt.

19 Zika, G., Kalinowski, M., Krinitz, J., Maier, T., Mönnig, A., Schneemann, C., Schur, A., Wolter, M. I., & Zenk, J. (2024). *Fachkräftemonitoring für das BMAS – Mittelfristprognose bis 2028*. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS). Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Forschungsberichte/fb-647-fachkraeftemonitoring-bmas-mittelfristprognose-bis-2028.pdf>

20 Maier, T., Kalinowski, M., Schur, A., Zika, G., Schneemann, C., Mönnig, A., & Wolter, M. I. (2024). *Weniger Arbeitskraft, weniger Wachstum: Ergebnisse der achten Welle der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen bis zum Jahr 2040 (BIBB Report 1)*. Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB). Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bibb.de/dienst/publikationen/de/19940>

21 Prognos AG (2024). *Defossilisierung und Klimaneutralität. Fachkräftebedarf und Fachkräftegewinnung in der Transformation*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.dihk.de/resource/blob/125844/fb44e61c7128505cae35eac05f57d0b6/dihk-prognos-studie-fachkra-fte-fu-r-die-defossilisierung-data.pdf>



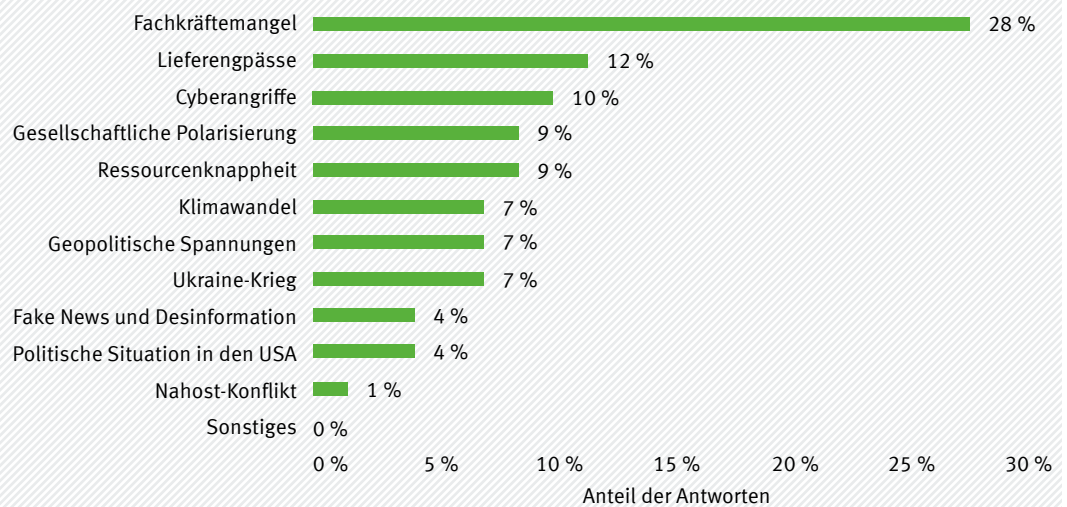
Ergebnisse der Unternehmensbefragung:

Die Verfügbarkeit von Fachkräften sticht bei der Unternehmensbefragung als besonders bedeutendes Thema hervor. Auf die Frage, wo aus Sicht der Befragten die größten Wettbewerbsvorteile der deutschen GreenTech-Branche liegen, entfielen 21 % der Antworten auf die Qualifizierung von Mitarbeiter*innen. Gleichzeitig zeigen die Antworten, dass der Fachkräftemangel als größtes Risiko für das jeweils eigene Unternehmen gesehen wird.

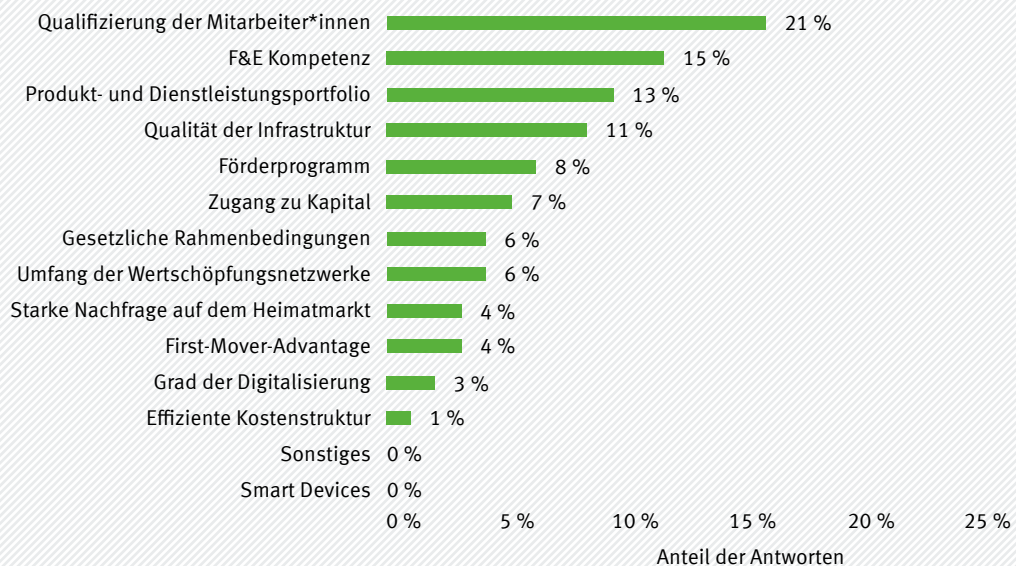
Abbildung 5

Ergebnisse der Unternehmensbefragung

Welche der folgenden Entwicklungen stellen das höchste Risiko für Ihr Unternehmen dar?



Wo sehen Sie die größten Wettbewerbsvorteile der deutschen Green-Tech Branche im internationalen Wettbewerb?



Quelle: Prognos AG 2025. Anzahl der befragten Unternehmen: 120. Befragungszeitraum Oktober bis November 2024. Es konnten Mehrfachantworten gegeben werden. Aufgrund von gerundeten Werten ergibt die Summe der Anteile nicht exakt 100 %.

314 Milliarden Euro Bruttowertschöpfung und ein jährliches Wachstum von 4,7 %

Neben der Zahl an Erwerbstätigen spielt auch die Bruttowertschöpfung eine zentrale Rolle, um die Leistungsfähigkeit der GreenTech-Branche abzubilden. Der Indikator beschreibt den Wert der hergestellten Güter und Dienstleistungen, abzüglich der benötigten Vorleistungen. Damit wird gemessen, welcher ökonomische Mehrwert durch die Unternehmen der Branche geschaffen wird. Rund 314 Milliarden Euro betrug die (preisbereinigte) Bruttowertschöpfung der GreenTech-Branche im Jahr 2023 (Abbildung 6); das entsprach 9,0 % der gesamten volkswirtschaftlichen Bruttowertschöpfung. Zum Vergleich: auf den Maschinenbau entfielen etwa 3,1 % der Bruttowertschöpfung.

Mit Blick auf den Trend seit 2010 zeigt sich ein ähnliches Bild wie bereits bei der Entwicklung der Erwerbstätigenzahlen. Während die Bruttowertschöpfung der gesamten Volkswirtschaft, preisbereinigt, um ca. 3,1 % p.a. stieg, wuchs jene der GreenTech-Branche überproportional stark, um durchschnittlich 4,7 % pro Jahr. Die größte Dynamik verzeichneten die Leit-

märkte Erneuerbare Energiesysteme und Umweltfreundliche Mobilität mit Wachstumsraten von 8,3 % bzw. 7,2 %. Auch in den übrigen Leitmärkten zeigten sich dynamische Trends.

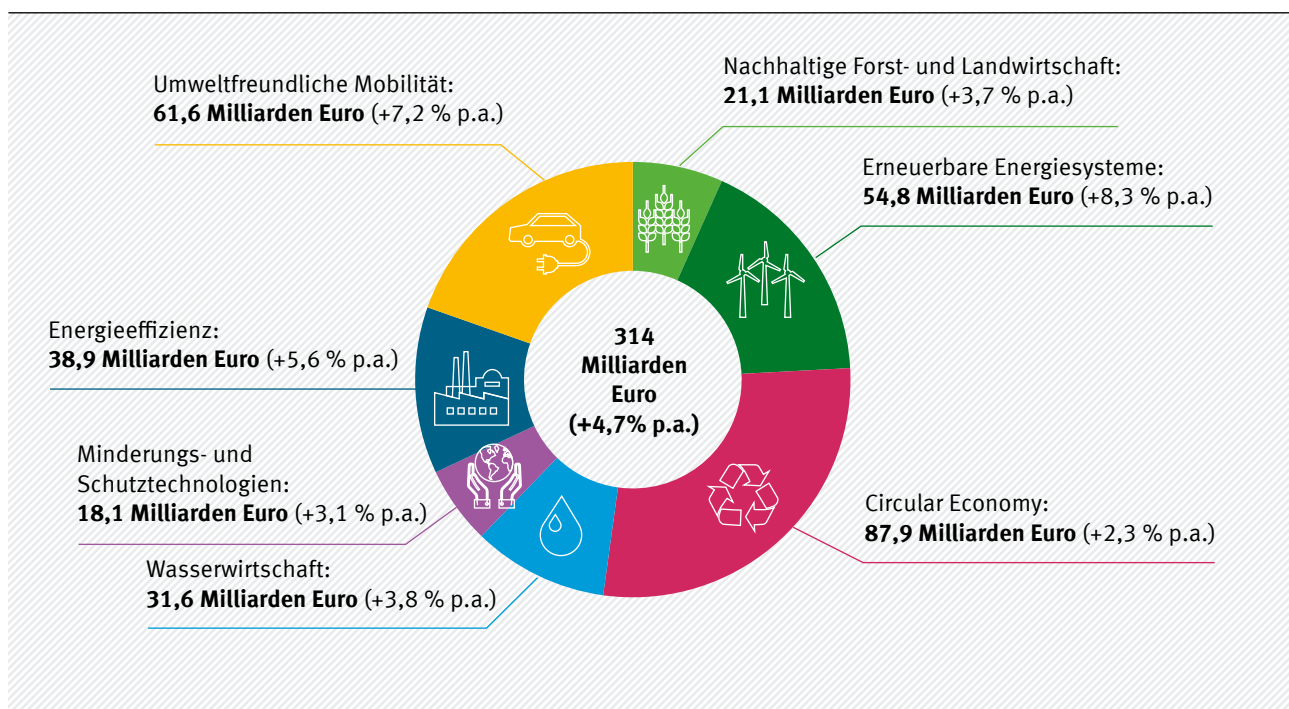
Politische Weichenstellungen beeinflussen Potenzial bis 2045

Auf Basis von Annahmen zu unterschiedlichen Entwicklungen der politischen Rahmenbedingungen simulieren wir drei mögliche Entwicklungspfade der Branche bis 2045. Damit zeigen wir auf, wie die GreenTech-Branche weiterwachsen könnte, wenn die bisherigen Transformationsentwicklungen anhalten, sie zusätzlich an Dynamik gewinnen oder abflachen.

Für die Potenzialabschätzung betrachten wir zwei Variablen. Zum einen die gesamtwirtschaftliche Entwicklung, für die wir uns auf die Prognosedaten des VIEW-Modells stützen (siehe Kasten). Zum anderen schätzen wir in drei verschiedenen Szenarien unterschiedliche Nachfragetrends für die GreenTech-Branche ab:

Abbildung 6

Bruttowertschöpfung der deutschen GreenTech-Branche in 2023 (gesamt und nach Leitmärkten) und durchschnittliches jährliches Wachstum von 2010 bis 2023 (preisbereinigt)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamts und der Statistischen Ämter der 16 Bundesländer. Die Werte werden preisbereinigt und somit frei von Preiseinflüssen dargestellt. Referenzjahr der Preisbereinigung ist 2015. Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

► **Szenario 1: Fortsetzung des gegenwärtigen Pfades – die deutsche GreenTech-Branche wächst weiter wie bisher**

geht davon aus, dass sich die in den Jahren 2018 – 2023 zu beobachtende Steigerung der Nachfrage nach GreenTech-Leistungen in gleichem Maße weiter fortsetzt. Zum Beispiel stieg der Ausbau der Erneuerbaren Energien bis 2023 stark, die Fortschreibung geht davon aus, dass dieser Trend anhält. Auf Anbieterseite bedeutet dies, dass der Anteil an GreenTech-Leistungen an der (ebenfalls zunehmenden) gesamtwirtschaftlichen Leistung weiter steigt. Für alle Aktivitäten der GreenTech-Branche werden die Trends der Jahre 2018 - 2023 bis 2045 fortgeschrieben.

► **Szenario 2: Klimaneutrales und Zirkuläres Deutschland – die deutsche GreenTech-Branche gewinnt zusätzlich an Dynamik**

bildet einen konsequenten, gegenüber heute gesteigerten, Transformationspfad Deutschlands hin zur Netto-Treibhausgasneutralität und umfassenden Verwirklichung einer Circular Economy bis 2045 ab. Für Technologien, die in den zurückliegenden Jahren keine ausreichende Nachfragesteigerung zeigten, die jedoch für die Erreichung der Klima- und Zirkularitätsziele zentral sind, unterstellen wir eine zusätzliche Dynamik. Zum Beispiel stieg die Herstellung von Wärmepumpen zwischen 2018 und 2023 zwar leicht an, um die Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen bedarf es aber in etwa einer Verzehnfachung der Anzahl an installierten Geräten. Szenario 2 unterstellt, dass sich die umfassende Transformation in eine gesteigerte Nachfrage für deutsche GreenTech-Güter übersetzt. Zusätzlich stärkt die umfassende Transformation Deutschlands hiesige exportorientierte Anbieter grüner Technologien, da Innovationen gefördert werden und darüber die Position deutscher GreenTech Unternehmen auf dem Weltmarkt gefestigt wird.

► **Szenario 3: Stagnation bei Transformations-technologien – die deutsche GreenTech-Branche verfehlt ihr Potenzial**

simuliert eine Stagnation der Nachfrage nach Technologien und Dienstleistungen deutscher GreenTech-Unternehmen, die für das Erreichen der Klima- und Zirkularitätsziele zentral sind. Zwei denkbare Entwicklungen könnten diesen Trend auslösen: Zum einen könnte es zu veränderten regulatorischen Rahmenbedingungen kommen, die Klima- und weitere Nachhaltigkeitsthemen an Bedeutung verlieren lassen, was dazu führt, dass weniger Nachfrage nach

den Technologien und Dienstleistungen der GreenTech-Branche entsteht. Zum anderen ist es möglich, dass die Nachfrage nach grünen Technologien hoch bleibt, es jedoch zu einem Verlust der Wettbewerbsfähigkeit deutscher GreenTech-Unternehmen kommt. Die Nachfrage würde dann verstärkt von Unternehmen aus dem Ausland bedient.

Alle drei Szenarien weisen eine absolute Zunahme der Bruttowertschöpfung bis 2045 auf, jedoch unterscheidet sich der Leistungsumfang der GreenTech-Branche je nach Szenario.

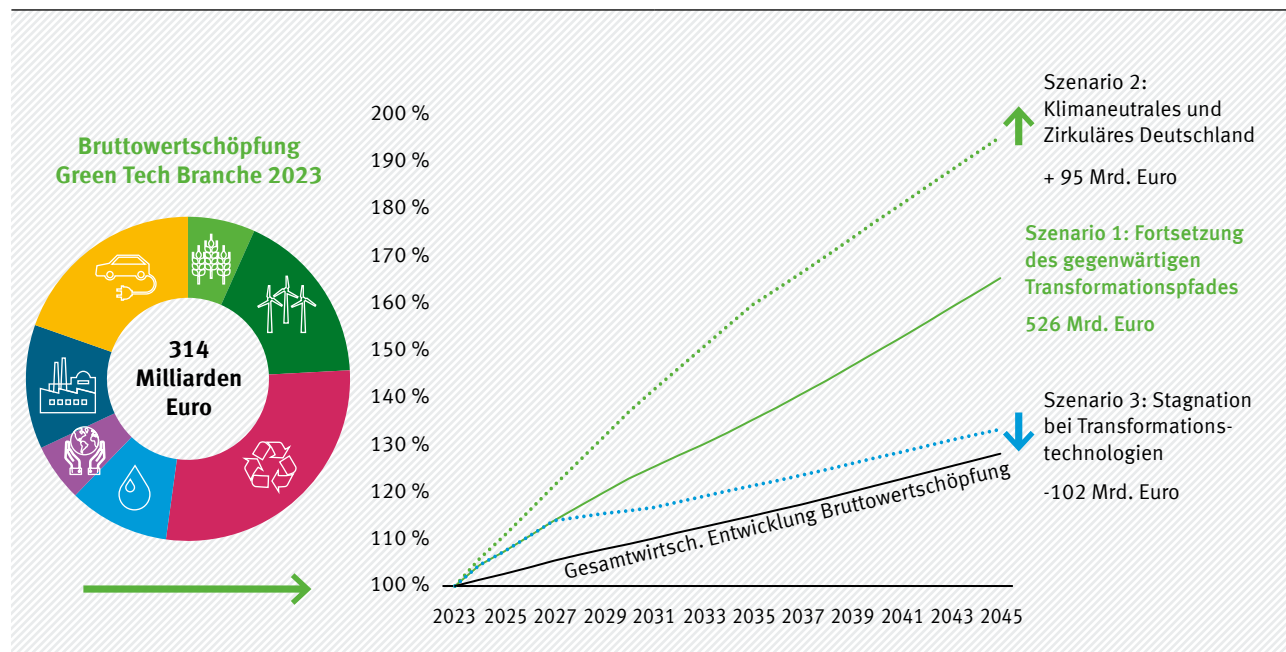
In Szenario 1, der Fortsetzung der bisherigen Trends, erhöht sich die Bruttowertschöpfung von 314 Milliarden auf 526 Milliarden Euro. Mit einer jährlichen Wachstumsrate von 2,3 % wächst sie deutlich schneller als die Gesamtwirtschaft (1,1 % p.a.). Der Anteil der GreenTech-Branche an der Gesamtwirtschaft steigt von 9,0 % im Jahr 2023 auf 11,0 % bis 2045.

Szenario 2 unterstellt eine ambitionierte Gestaltung regulatorischer Rahmenbedingungen, um die Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 zu erreichen. Daraus ergibt sich bis 2035 eine deutlich gesteigerte Technologie- und Dienstleistungsnachfrage, verglichen mit Szenario 1. In diesem Szenario erreicht die GreenTech-Branche eine Bruttowertschöpfung von 622 Milliarden Euro bis 2045. Das Wachstum p.a. liegt bei 3,1 % und lässt den Anteil der GreenTech-Branche an der Gesamtwirtschaft auf 13,0 % ansteigen.

Stagniert hingegen die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen zur Erreichung der Klima- und Zirkularitätsziele, ergibt sich in Szenario 3 zwar eine Erhöhung auf 424 Milliarden Euro der absoluten Bruttowertschöpfung, die Branche bleibt jedoch deutlich hinter ihrem Potenzial zurück. Mit einem jährlichen Wachstum von 1,3 % liegt sie nur knapp über dem Trend der Gesamtwirtschaft (1,1 % p.a.), entsprechend stagniert der Anteil an der Gesamtwirtschaft bei 9,0 %.

Abbildung 7

Potenzial der Bruttowertschöpfung in der deutschen GreenTech-Branche bis 2045 (Indexiert 2023 = 100%)



Quelle: Prognos AG 2025



Methodik zur Szenarioanalyse

Um die zukünftige Entwicklung der einzelnen ökonomischen Aktivitäten, die im Rahmen des Green-Tech-Atlas erfasst sind, zu ermitteln, schätzen wir zwei Variablen. Das Vorgehen orientiert sich dabei an dem Vorgehen des Envigos-Modells, um konsistente Ergebnisse zu ermöglichen:

- ▶ Zunächst schätzen wir das allgemeine branchenspezifische Wirtschaftswachstum in Deutschland bis 2045, dabei erfolgt noch keine Fokussierung auf grüne Technologien und Dienstleistungen. Dafür werden Prognosedaten des VIEW-Modells²² der Prognos AG herangezogen. Das VIEW-Modell berücksichtigt ca. 600 demografische und makroökonomische Variablen, auf deren Basis das BIP-Wachstum bis 2045 modelliert wird.
- ▶ Im zweiten Schritt schätzen wir den Anteil an der gestiegenen Wirtschaftsleistung, der auf die Aktivitäten der GreenTech-Branche entfällt. Dieser Anteil fußt auf Annahmen zur zukünftigen Nachfrage nach den Produkten der deutschen GreenTech-Branche. Diese Nachfrage wird wiederum abgeleitet aus Annahmen zu steigenden Bedarfen an grünen Technologien und der Fähigkeit der deutschen Unternehmen, diese Nachfrage zu bedienen. Dabei werden je nach Szenario historische Entwicklungstrends, spezifische politische Zielformulierungen und relevante Sekundärquellen berücksichtigt:

Szenario 1: Es wird angenommen, dass sich die Dynamik der steigenden Nachfrage grüner Güter und Dienstleistungen fortsetzt. Für alle abgegrenzten Leistungen der GreenTech-Branche wird der Trend der Anteilsrechnung der Jahre 2018 - 2023 bis 2045 fortgeschrieben.

Szenario 2: Auf Basis der Studie ‚Klimaneutrales Deutschland 2045‘ werden Technologiebedarfe bis 2045 abgeleitet und Anteile an den Aktivitäten gemäß Wirtschaftszweigklassifikation angesetzt.²³ Zwei Beispiele für derartige Technologiebedarfe: bis 2035 wird die PKW-Produktion vollständig auf elektrische Antriebe umgestellt. Die installierte Leistung der PV wird sich bis 2045 von 100 GW auf 469 GW erhöhen. Neben diesen und weiteren Technologiebedarfen wird eine wachsende Bedeutung der Circular Economy angenommen, unter anderem durch expandierende Sharing-Modelle, verbesserte Produktreparaturen oder eine verstärkte stoffliche Verwertung.

Szenario 3: Angenommen wird ein allgemeiner Bedeutungsverlust von Klima- und Nachhaltigkeitsthemen bzw. ein Verlust der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen GreenTech-Branche. Das Szenario unterstellt, dass die grünen Technologien der deutschen GreenTech-Branche weniger nachgefragt werden. Die Leistungen der GreenTech-Branche erleben entsprechend kaum weiteren Bedeutungszuwachs gegenüber klassischen Branchen.

Die erstellten Szenarien basieren auf vereinfachenden Annahmen und stellen keine Prognosen dar. Vielmehr bilden sie einen Korridor der zukünftigen grünen Wachstumspotenziale ab und heben die möglichen ökonomischen Effekte unterschiedlich ambitionierter Klima- und Nachhaltigkeitspolitiken hervor. Die tatsächliche Entwicklung der GreenTech-Branche wird von einer Reihe weiterer Faktoren abhängig sein, die im Rahmen dieser Szenarien nicht dynamisch abgebildet werden, z. B. konjunkturelle Schwankungen, die globale Handelsintegration im Kontext geopolitischer Konflikte, der globale Wettlauf um Wettbewerbsvorteile auf grünen Zukunftsmärkten oder Marktverzerrungen aufgrund von Subventionsprogrammen.

²² Detaillierte Informationen zu diesem unter weiteren Modellen von Prognos finden sich unter <https://www.prognos.com/de/view>.

²³ Agora Think Tanks (2024). *Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf

3.3 Internationaler Handel mit GreenTech nimmt stetig zu

Als eine der führenden Exportnationen der Welt erzielt Deutschland einen erheblichen Teil seines wirtschaftlichen Wohlstands durch den Außenhandel. GreenTech spielt dabei eine erhebliche Rolle.

GreenTech ist wesentlich für den Status der Exportnation Deutschland

132 Milliarden Euro – fast 8,5 % der deutschen Ausfuhren – betrug das Exportvolumen der deutschen GreenTech-Branche im Jahr 2023. Die im Hinblick auf die Bruttowertschöpfung festgestellte signifikante ökonomische Bedeutung der Branche zeigt sich somit auch für den Außenhandel. Die GreenTech-Branche leistet einen entscheidenden Beitrag zum Wachstum der deutschen Exportwirtschaft (Abbildung 8). Während sich der deutsche Gesamtexport und der GreenTech Export bis zum Jahr 2019 parallel entwickelten, zeigt sich seitdem ein klarer Trend: das Wachstum der Exporte der GreenTech-Branche liegt deutlich oberhalb der Gesamtexporte, treibt diese also an.

Die wirtschaftlichen Unsicherheiten der COVID-19-Pandemie im Jahr 2020 verkräftete die GreenTech-Branche deutlich besser als die Gesamtwirtschaft. Sie

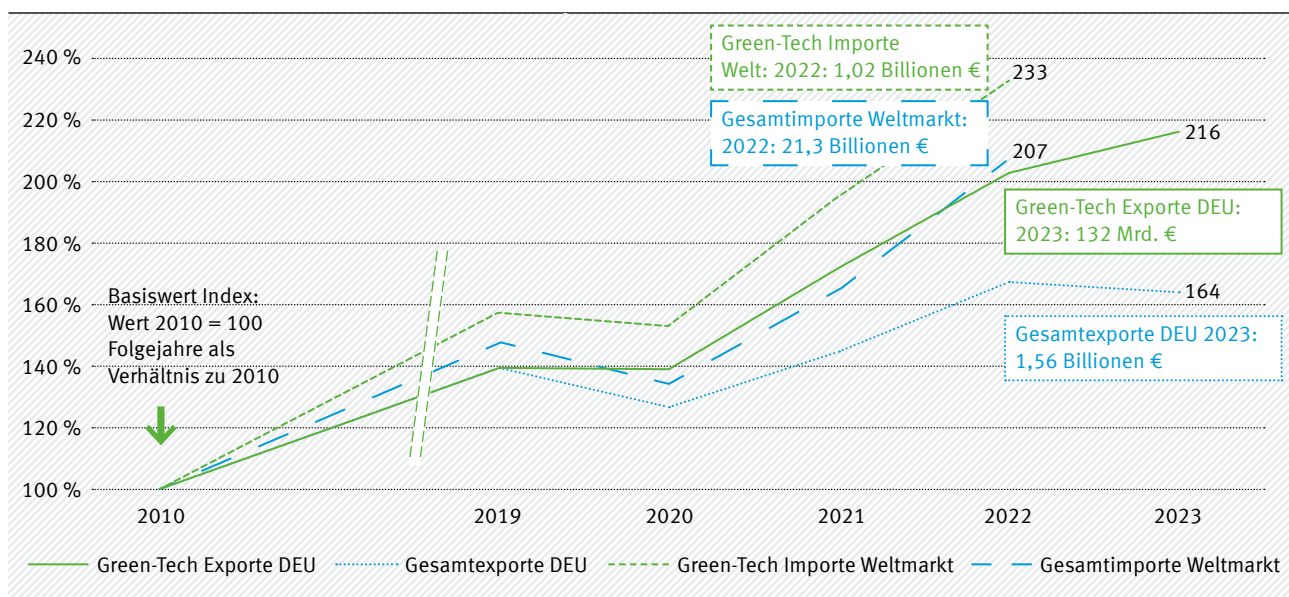
konnte im ersten Krisenjahr das Exportniveau zumindest halten – wohingegen die Gesamtwirtschaft einen Rückgang um ca. 10 % verzeichnete. In den beiden Folgejahren driftete die Entwicklung weiter auseinander. Während die Gesamtexporte in diesem Zeitraum langsam wieder anstiegen, zeigten die GreenTech-Exporte einen deutlich steileren Wachstumskurs. Dieser setzte sich (etwas gedämpft) auch im Krisenjahr 2023 fort, was den gesamtdeutschen Exporten nicht gelang. Sie gingen im Jahr 2023 zurück. Insgesamt fungiert GreenTech als Wachstumstreiber und als Stabilitätsanker der deutschen Exportwirtschaft.

Der deutsche GreenTech-Export profitiert von globaler Nachfrage

Die Entwicklung der deutschen GreenTech-Exporte profitierte dabei von einer Explosion der globalen Nachfrage nach GreenTech. Der Weltmarkt, d. h. die Summe aller globalen Importe, weist seit 2020 eine rasante Entwicklungsdynamik auf (Abbildung 8). Den deutschen Unternehmen gelang es, auf die steigende Nachfrage zu reagieren und beim Exportwachstum weitgehend Schritt zu halten – was gerade auch im Vergleich zu anderen Branchen als beachtlicher Erfolg gewertet werden darf. Gleichwohl wird aus der Unternehmensbefragung und den Experteninterviews deutlich, dass die globale Konkurrenz zunimmt.

Abbildung 8

Trend des Weltmarktes (2010-2022) und der deutschen Exporte (2010-2023), nominal, jeweils gesamt und für die GreenTech-Branche (Indexiert 2010 = 100 %)



Die globalen Importdaten liegen nur bis einschließlich 2022 vor, für die deutschen Exporte weist das Statistische Bundesamt auch Werte für 2023 aus.
Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamts sowie des Prognos Welthandelsmodells/UN COMTRADE

Vorgehen zur Analyse der Exporte und des Weltmarkts

Die Analyse des Außenhandels und des Weltmarktes baut grundsätzlich auf denselben Grundlagen des Envigos-Modells, wie in Kapitel 1 beschrieben, auf. Jedoch wird die Wareneinfuhrstatistik (WA-Statistik) mit den dazugehörigen Außenhandelsdaten des statistischen Bundesamtes genutzt. Die Abgrenzung von Produkten und Technologien der GreenTech-Branche und ihrer Leitmärkte, Marktsegmente und Technologiebereiche wird dafür in die WA-Statistik überführt. In der Außenhandelsstatistik sind keine Dienstleistungen erfasst, weshalb die Außenhandelsanalyse nur Güter und Technologien abdeckt. Dienstleistungen machen bei den Erwerbstätigen in Deutschland gut die Hälfte der GreenTech-Branche aus. Es ist jedoch davon auszugehen, dass im internationalen Handel Dienstleistungen einen geringeren Stellenwert einnehmen.

Zur Berechnung werden die Exportdaten des statistischen Bundesamtes der Jahre 2010 bis 2023 genutzt. Diese Daten decken die Exporte Deutschlands in alle Länder global ab.

Das Prognos Welthandelsmodell

Die Berechnung des globalen Nachfragevolumens nach GreenTech-Gütern erfolgt auf Basis der Außenhandelsabgrenzung mit Hilfe des Prognos-eigenen Welthandelsmodells. Die zugrunde liegende Datenbank basiert auf den Handelsströmen zwischen 64 Volkswirtschaften, detailliert nach Gütergruppen, im Zeitraum von 1995 bis 2022. Damit liegen die aktuellsten Daten des Welthandelsmodells ein Jahr weiter zurück als die Exportdaten. Die berücksichtigten Länder erwirtschaften zusammen rund 95 % des globalen Bruttoinlandsprodukts. Auch Importe aus anderen Ländern werden berücksichtigt. Das Modell deckt alle relevanten HS (Harmonisiertes System) -Gütergruppen der GreenTech-Branche ab und kann damit eine mit den Exporten vergleichbare Analyse erreichen.

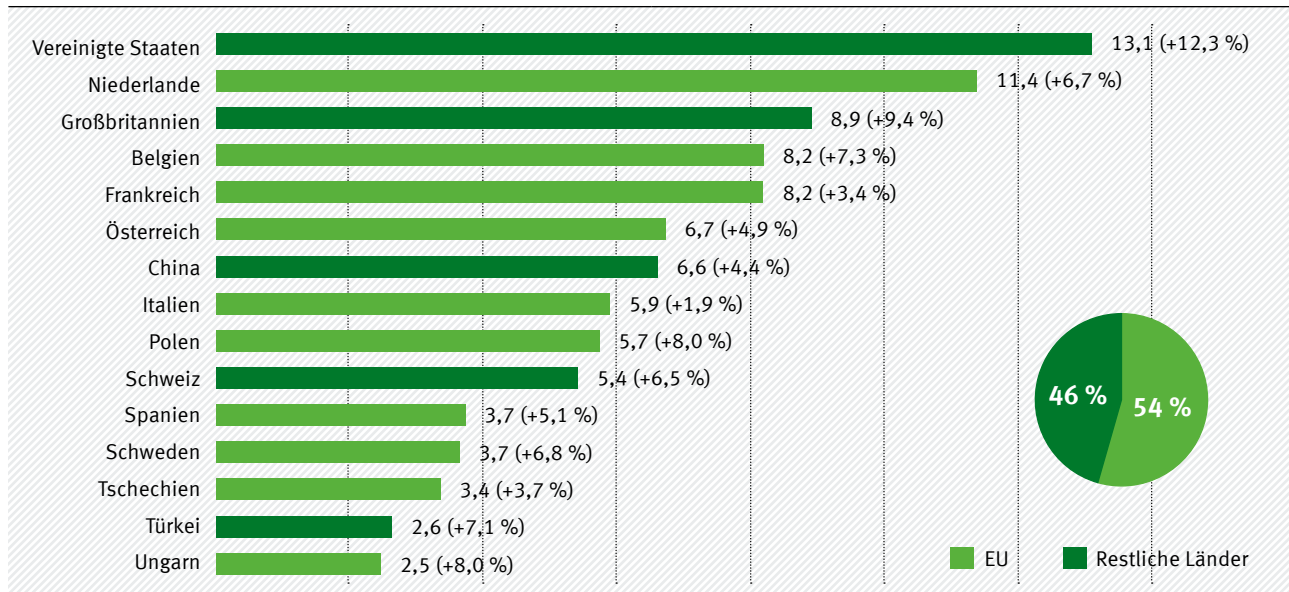
Für diese Analyse wurde das Prognos Welthandelsmodell um Informationen zur statistischen Abgrenzung der GreenTech-Branche ergänzt. Die HS-Statistik ist mit der für den deutschen Außenhandel genutzten Statistik anschlussfähig.

Das Modell liefert umfassende Erkenntnisse zu globalen Wirtschaftsbeziehungen, Welthandelsanteilen, Wertschöpfungsstrukturen und der internationalen Arbeitsteilung in Fertigung und Forschung. Die Größe des Weltmarkts wird dabei als Summe der Importe aller Länder definiert.



Abbildung 9

Ziellmärkte der GreenTech-Branche nach Exportvolumen Deutschlands 2023, in Mrd. Euro, mit Wachstum (nominal) 2010-2023 in % p.a. (hellgrün markiert sind Ziellmärkte in der EU)



Der europäische Binnenmarkt ist das Rückgrat deutscher GreenTech-Exporte

Zehn der 15 wichtigsten Absatzmärkte der deutschen GreenTech-Branche liegen in der EU (Abbildung 9). Der europäische Binnenmarkt bildet damit das Rückgrat des deutschen GreenTech-Außenhandels. Die deutschen GreenTech-Exporte in die EU umfassten 2023 knapp 72 Milliarden Euro oder fast 55 % aller deutschen GreenTech-Ausfuhren. Deutlich zeigt sich dabei auch die Bedeutung des US-amerikanischen sowie des britischen Marktes. So exportierte Deutschland 2023 GreenTech-Güter im Wert von mehr als 13 Milliarden Euro in die USA. Zudem weisen die Exporte in die USA die größte Wachstumsdynamik unter den 15 wichtigsten Märkten auf. Die drohenden Handelsbarrieren (vgl. Kap. 2) stellen daher für die deutsche GreenTech-Branche ein besonderes Risiko dar. Der Absatz in einzelnen EU-Ländern entwickelte sich im betrachteten Zeitraum stark. Die Exporte nach Polen und Ungarn wuchsen um je 8,0 % p.a., nach Belgien um 7,3 % p.a. Während für Polen und Ungarn vor allem bis 2022 besonders dynamische Entwicklungen zu beobachten waren, war für den Absatz nach Belgien vor allem das Jahr 2023 entscheidend. In diesem Jahr nahmen die GreenTech-Exporte nach Belgien um fast 30 % zu. Eine ähnliche Entwicklung ist für die Niederlande zu beobachten.

Überraschend ist die Dynamik für den dritt wichtigsten Absatzmarkt der deutschen GreenTech-Branche,

Großbritannien. Mit über 9 % Wachstum p.a. zwischen 2010 und 2023 war Großbritannien nach den USA der dynamischste Zielmarkt. Bis 2020, dem Jahr der Brexit-Umsetzung, verlief die Export-Entwicklung nicht überdurchschnittlich dynamisch. Doch zwischen 2020 und 2023 verdoppelten sich die Exporte mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 25 %.

China stellt ebenfalls ein wichtiges Abnehmerland dar, die Exporte in das Land bleiben jedoch hinter den Dynamiken vieler anderer Länder zurück. Während die Ausfuhren 2022 mit 7,5 Milliarden Euro noch einen Höchststand erreichten, nahmen sie 2023 um ca. 12 % ab. Den größten Anteil hieran hatte eine Abnahme von 16 % im gewichtigen Leitmarkt der Umweltfreundlichen Mobilität, der bei den gesamten deutschen Exporten 2023 um 32 % zunahm.

Für fast alle großen Märkte zeigten sich im Betrachtungszeitraum Mindestwachstumsraten von ca. 5 % pro Jahr. Einige asiatische Länder mit sehr dynamischer Nachfrage-Entwicklung wie Indien, dessen GreenTech-Importe seit 2010 mit durchschnittlich ca. 12 % p.a. wuchsen, werden für den deutschen Markt vor allem seit 2020 immer wichtiger. Die Exporte nach Indien wuchsen seitdem um ca. 25 % jährlich, was zu einer annähernden Verdopplung führte. Damit nahm das Land 2023 Rang 23 unter den wichtigsten Zielländern mit Exporten von ca. 1,5 Milliarden Euro ein.

Ergebnisse der Unternehmensbefragung:

Aus Sicht der befragten Unternehmen liegen die wichtigsten internationalen Absatzmärkte aktuell und auch in Zukunft in Westeuropa – ein Befund, der sich mit den Ergebnissen der Handelsanalyse deckt (s.o.). Die relative Bedeutung dieses Standbeins wird jedoch abnehmen. Interessant ist auch der Blick auf China: Zwar ist das Land gegenwärtig der zweitwichtigste Markt, wird aber nach Einschätzung der befragten Unternehmen in Zukunft an Bedeutung verlieren. Dagegen wird insbesondere für Indien angenommen, dass es an Bedeutung gewinnt.

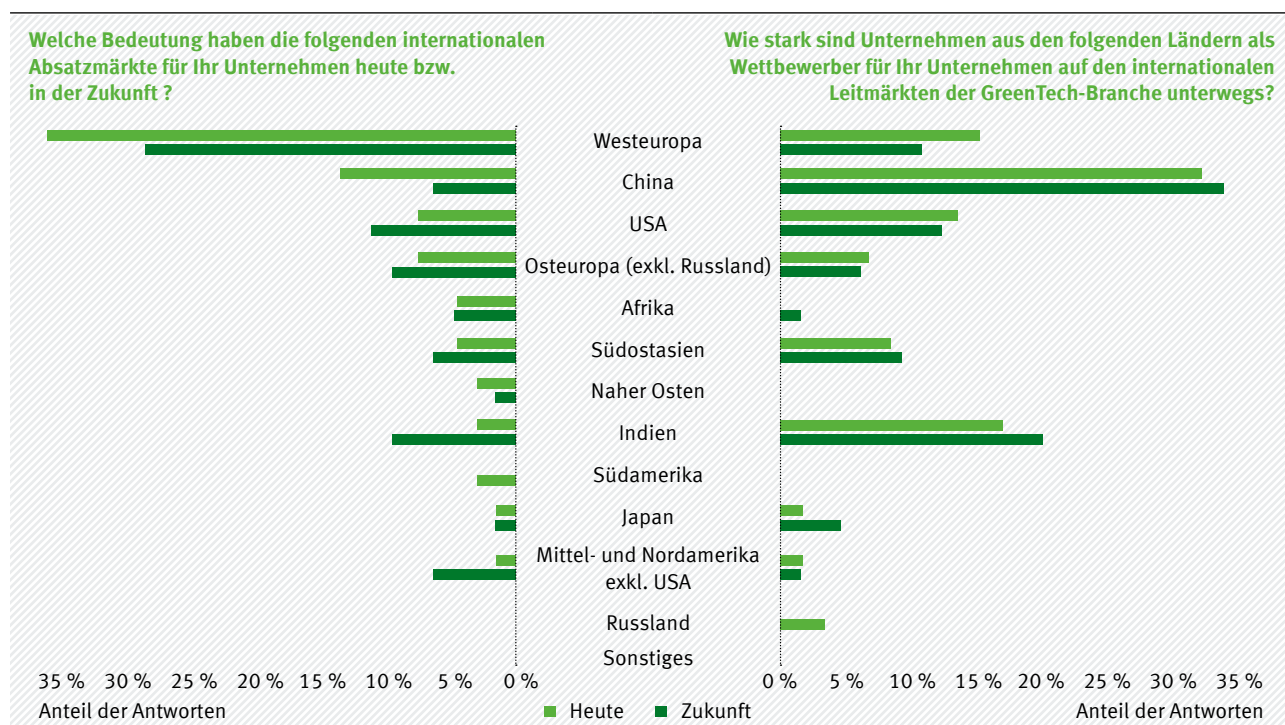
Sowohl um die etablierten als auch besonders die wachsenden Exportmärkte wird es künftig einen zunehmenden Wettbewerb geben. Ob dabei überall faire Marktzugänge bestehen, wird als unsicher eingeschätzt. Vor allem chinesische Unternehmen werden von den befragten Unternehmen und Experten als große Konkurrenz eingeschätzt. Massive staatliche Subventionen für GreenTech bei gleichzeitigem Aufbau von Barrieren für den Marktzugang europäischer Firmen in China, stellen für die deutschen Unternehmen potenziell Probleme dar. China drängt zudem sehr aktiv mit billigen Gütern und Technologien auf andere Märkte. Es wird jedoch auch berichtet, dass in manchen Ländern nach schlechten Erfahrungen mit chinesischen Konzernen die Nachfrage nach teureren Qualitätsprodukten u. a. aus Deutschland wieder steigt.

Auch in den USA, dem wichtigsten Absatzmarkt deutscher GreenTech-Güter, zeigen sich politische Unsicherheiten, potenzielle Handelsbeschränkungen durch Zölle und Bestrebungen zur Stärkung der heimischen Produktion. Eine große Wirkung zeigte der Inflation Reduction Act als wirksames Subventionspaket für die grüne Transformation. Davon konnten bislang auch deutsche Unternehmen profitieren. Die Exporte in die USA entwickelten sich dementsprechend besonders gut und die befragten Unternehmen sowie Experten sahen im Herbst 2024 großes Potenzial und gute Aussichten für den US-Markt. Die weitere Entwicklung muss jedoch abgewartet werden.

Vor dem Hintergrund zunehmender Konkurrenz betonen die Gesprächspartner die Stärkung des europäischen Binnenmarktes. Insbesondere in den osteuropäischen Ländern wird ein hohes Potenzial für deutsche Unternehmen gesehen. So kommt auch dort die ambitionierte Umwelt-Regulatorik der EU zum Tragen und die Nachfrage nach GreenTech steigt, gleichzeitig bestehen keine Handelsbarrieren.

Abbildung 10

Ergebnisse der Unternehmensbefragung



Quelle: Prognos AG 2025, Anzahl befragte Unternehmen: 120.

Deutschland ist auf den wichtigsten internationalen Nachfragemärkten präsent

Einen großen Einfluss auf die positive Entwicklung der deutschen Ausfuhren hat die dynamische Entwicklung des Weltmarktes. Der Weltmarkt setzt sich in unserer Analyse aus den globalen Einfuhren von GreenTech-Produkten aller Länder zusammen. Um die Potenziale für deutsche Anbieter zu beleuchten, lohnt sich ein genauerer Blick auf das Importvolumen einzelner Länder.

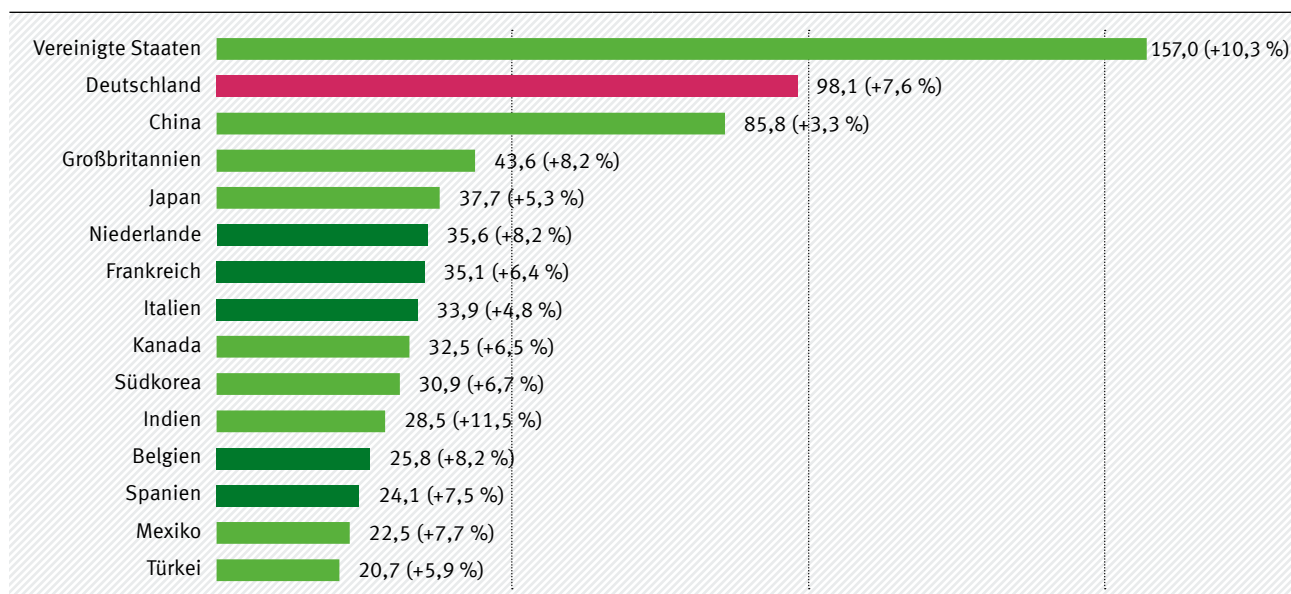
Die weltweite Nachfrage wird dominiert von den drei mit Abstand wichtigsten Abnehmern der Branche, den USA, Deutschland und China. Die bedeutende Rolle des US-Marktes spiegelt sich auch in den deutschen Exporten wider. Der deutsche Marktanteil beträgt dort ca. 8 %. Dabei erreichten die USA diese zentrale

Stellung erst innerhalb des Beobachtungszeitraumes. Im Jahr 2010 war China noch der größte Nachfragemarkt weltweit. Die gegensätzlichen Entwicklungen zeigen sich in den Wachstumsraten seit 2010. Die USA weisen das stärkste Importwachstum mit über 10 % p.a. auf, während China mit nur knapp 3 % p.a. das geringste unter den Top-15 Abnehmerländern zeigt. Dieser Bedeutungsverlust zeigt sich ebenfalls bei den deutschen GreenTech-Exporten. Dennoch liegt der Marktanteil Deutschlands in China bei fast 8 %.

Der deutsche Markt ist weltweit der zweitgrößte und wächst signifikant. Für deutsche Unternehmen lässt sich daraus schließen, dass auch im deutschen Binnenmarkt weiterhin große Absatzchancen existieren. Die übrigen globalen Importmärkte folgen mit einigem Abstand. Die europäischen Märkte sind präsent,

Abbildung 11

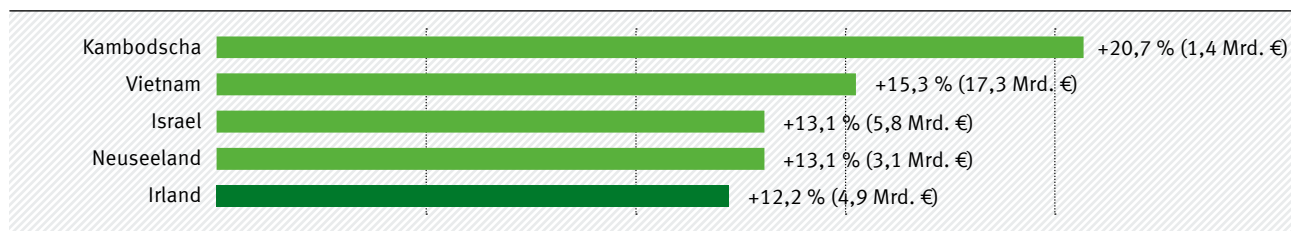
Die 15 wichtigsten Importmärkte der GreenTech-Branche weltweit 2022, Importe in Mrd. Euro mit Wachstumsrate 2010-2022 in % p.a., nominal (dunkelgrün markiert sind Märkte in der EU, hellrot markiert ist der deutsche Markt selbst)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis des Prognos Welthandelsmodells / UN COMTRADE
Importe in Milliarden Euro mit Wachstumsrate 2010-2022 in % p.a., nominal (dunkelgrün markiert sind Märkte in der EU, hellrot markiert ist der deutsche Markt selbst). Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Abbildung 12

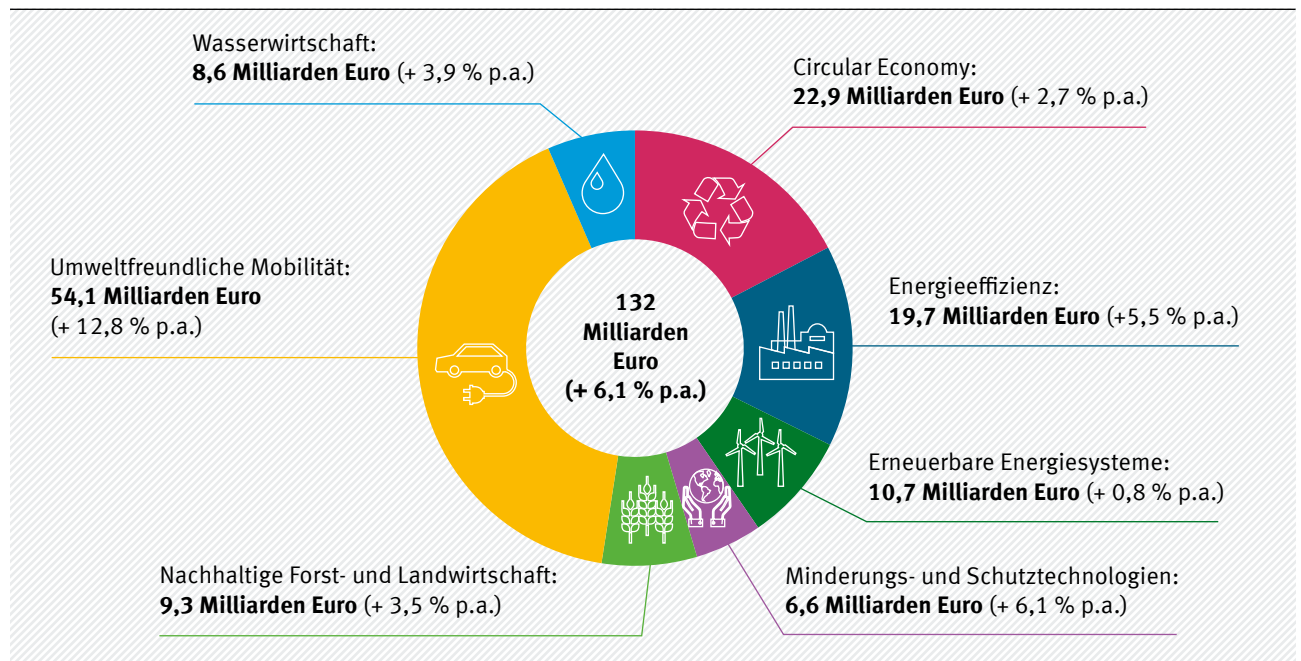
Top-5 Wachstumsmärkte des GreenTech-Weltmarkts 2010-2022, Wachstum in % p.a., mit Importen 2022 in Mrd. €, nominal (dunkelgrün markiert sind Märkte in der EU)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis des Prognos Welthandelsmodells / UN COMTRADE
Wachstum in % p.a., mit Importen 2022 in Milliarden Euro, nominal (dunkelgrün markiert sind Märkte in der EU). Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Abbildung 13

Exportvolumen Deutschlands in den Leitmärkten in Mrd. Euro im Jahr 2023, mit Wachstum 2010-2023 in % p.a., nominal



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamts
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

nehmen in der globalen Nachfrage jedoch nicht denselben Stellenwert ein wie bei den deutschen GreenTech-Exportzielen. Die deutsche GreenTech-Branche hat in den EU-Ländern in der Regel besonders hohe Marktanteile. Demgegenüber zeigt sich in der globalen Nachfrage vor allem eine hohe Relevanz einiger asiatischer Märkte. Neben China sind dies allen voran Japan, Südkorea und Indien. In diesen Ländern ist der deutsche Marktanteil meist unterdurchschnittlich. So lag dieser beispielsweise in Japan – dem fünftwichtigsten Markt weltweit – 2022 bei unter 4 %. Trotz Herausforderungen in der Markterschließung liegen hier Steigerungspotenziale für die deutschen GreenTech-Exporte. Der dynamischste unter den 15 wichtigsten Märkten ist Indien, noch vor den USA, mit einer Zunahme von 11,5 % p.a. seit 2010. Vor allem kleinere Märkte zeigen sich als besonders dynamisch in der Nachfrageentwicklung.

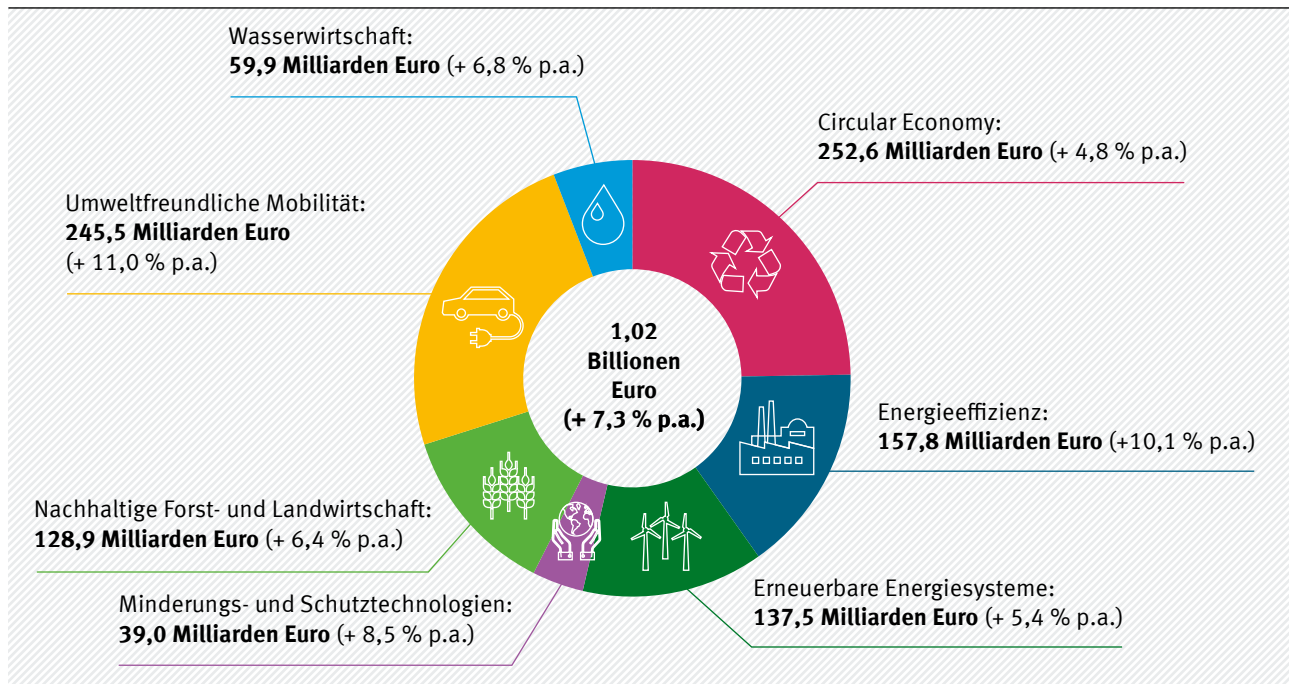
Exportschlager Umweltfreundliche Mobilität

Die Auswertung der Exportdaten zeigt, dass die sieben Leitmärkte der GreenTech-Branche unterschiedlich stark zu der Export-Dynamik beitragen. Eine besondere Rolle nimmt der Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität ein. Über 40 % der gesamten Exporte der GreenTech-Branche stammen aus diesem Leitmarkt (Abbildung 13). Die Bedeutung der Automobilindustrie

für den Export wird somit auch im Kontext GreenTech deutlich – wichtigstes Exportgut sind elektrische PKW. Doch auch andere Güter, wie etwa Schienenfahrzeuge, spielen eine wichtige Rolle. Insgesamt weisen die Exporte des Leitmarkts ein enormes Wachstum auf: seit 2010 stiegen die Exporte jährlich um fast 13 % und haben sich damit verfünffacht. Damit hat Deutschland 2022 im Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität einen Anteil von fast 17 % am globalen Handel.

Ein hohes Wachstum zeigt sich auch bei den Exporten von Minderungs- und Schutztechnologien sowie im Leitmarkt Energieeffizienz. Die Ausfuhrwerte haben sich seit 2010 jeweils mehr als verdoppelt. Im Gegensatz dazu verzeichnet der Leitmarkt Erneuerbare Energiesysteme kaum Wachstum. Bei der Herstellung und dem Export von Erneuerbaren-Energien-Anlagen gehört Deutschland nicht mehr zu den global dominierenden Ländern. In dem entsprechenden Marktsegment ging der Weltmarktanteil von ca. 15 % im Jahr 2010 auf ca. 8 % 2023 zurück. Ein durchaus positives Bild ergibt sich jedoch für Energiesystem-Technologien: die beiden Marktsegmente Intelligente Energiesysteme und Netze sowie Speichertechnologien wuchsen zwischen 2010 und 2023 mit jeweils ca. 6 % pro Jahr.

Abbildung 14

Nachfrage des Weltmarkts in den Leitmärkten 2022 in Mrd. Euro, mit Wachstum 2010-2022 in % p.a., nominal

Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis des Prognos Welthandelsmodells / UN COMTRADE
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Leitmarkt Circular Economy führt bei globaler Nachfrage

Der Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität zeigt mit Blick auf die globale Nachfrage ein ähnliches Bild. Er vereint einen sehr hohen Anteil der globalen Nachfrage auf sich und zeigte zwischen 2010 und 2023 ein starkes Wachstum.

Einen noch höheren Stellenwert nimmt allerdings der Leitmarkt Circular Economy ein. Hier zeigt sich ein Unterschied zu den deutschen Exportschwerpunkten. Über 250 Milliarden Euro wurden im Jahr 2022 in diesem Leitmarkt gehandelt. Dahinter verbergen sich vor allem Güter des Marktsegments Abfallbehandlung und -verwertung sowie Nachwachsende Rohstoffe und Materialien. Besonders Sekundärrohstoffe, Abfälle und nachwachsende Rohstoffe machten einen Großteil des Nachfragemarktes aus. Mit einem durchschnittlichen Wachstum von 4,8 % entwickelte sich der Markt allerdings unterdurchschnittlich.

Eine starke Dynamik wies dagegen der drittgrößte Leitmarkt Energieeffizienz mit einer Wachstumsrate von über 10 % p.a. auf. Der weltweite Handel im Leitmarkt der Erneuerbaren Energiesysteme zeigte hingegen das zweitgeringste Wachstum. Dieser Leitmarkt gewann jedoch erheblich an Dynamik: 2021 wuchs die Nachfrage gegenüber dem Vorjahr um über 13 %, im

Jahr 2022 waren es bereits über 33 % Wachstum. Kein anderer Leitmarkt verzeichnete im Jahr 2022 ein so hohes Wachstum. Blickt man auf den globalen Trend der installierten Leistung Erneuerbarer Energien, scheint eine Fortsetzung dieses Wachstums sehr wahrscheinlich.

Weltmarkt könnte sich bis 2045 vervierfachen

Um die weitere Entwicklung des Weltmarktes für GreenTech zu skizzieren, werden die Szenarien aus Kapitel 3.2 aufgegriffen und auf den internationalen Handel übertragen.

Im Ergebnis zeigen alle Szenarien eine positive Wachstumskurve bis 2045 (Abbildung 15). Die Unterschiede der Szenarien fallen geringer aus als in der Berechnung für die deutsche Bruttowertschöpfung. Der Grund ist die deutlich dynamischere wirtschaftliche Basisentwicklung des Weltmarkts, der neben anderen Parametern maßgeblich vom Wachstum und von Aufholeffekten von Schwellenländern beeinflusst wird. Während der GreenTech-Weltmarkt aktuell noch 1,02 Billionen Euro umfasst, steigt er bis 2045 bei der Trendfortschreibung von Szenario 1 bereits massiv auf ca. 3,18 Billionen Euro an. Das entspricht einem jährlichen Wachstum von 5,1 % pro Jahr.



Methodik zur Szenarioanalyse für den Weltmarkt

Für die Szenarioprojektionen der Weltmarktvolumina bis zum Jahr 2045 wurde – wie bereits für die Potenzialabschätzung der deutschen GreenTech-Branche in Kap. 3.2 – das Prognos-Weltwirtschaftsmodell VIEW herangezogen.²⁴ Interaktionen und Rückkopplungen zwischen den einzelnen Ländern und Branchen werden in VIEW explizit erfasst und modelliert. In VIEW integriert sind länder- und zeit-spezifische Input-Output-Tabellen, welche die Entstehungsseite (Produktion, Wertschöpfung) des jeweiligen Landmodells auf konsistente Weise mit der Verwendungsseite (Konsumausgaben, Investitionen, Ex-/Importe) verknüpfen.

Analog zu Kap. 3.2 wurde diese Datenbasis mit den drei dort definierten Szenarien verrechnet, um unterschiedliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

- ▶ Szenario 1 beschreibt die Fortsetzung des gegenwärtigen Transformationspfads, der in den Jahren 2018 bis 2023 bereits zu einem signifikanten Wachstum des Weltmarkts führte.
- ▶ Szenario 2 simuliert eine darüberhinausgehende Entwicklung, die erwartet werden kann, wenn die globale Staatengemeinschaft die im Rahmen internationaler Klimaschutzvereinbarungen und weiterer Verpflichtungen festgehaltenen Transformationsziele umfassend verfolgt. Vereinfachend wurde hierfür der für Deutschland für 2045 angenommene ökonomische Bedeutungszuwachs der GreenTech-Branche an der gesamten Volkswirtschaft auf die durch das VIEW Modell bereitgestellten länderspezifischen Importprognosen übertragen. Dies basiert auf der Annahme, dass sich das deutsche GreenTech-Angebot in Szenario 2 analog zur globalen Nachfrage entwickelt.
- ▶ Szenario 3 unterstellt, dass die globalen Klimaschutz- und Transformationsbemühungen zurückgehen. Dies führt zu einem Rückgang des Anteils von GreenTech an den Gesamtimporten. Dennoch ist vor dem Hintergrund des globalen Bevölkerungszuwachses, der wirtschaftlichen Entwicklung insbesondere der Schwellen- und Entwicklungsländer und bestehender marktwirtschaftlicher Gründe für den Einsatz grüner Technologien mit einer abflachenden Entwicklung anstelle eines absoluten Rückgangs zu rechnen.

Dabei gehen die Szenarien von einem Fortbestehen der derzeitigen globalen Handelsordnung aus. Es werden keine verschärften geopolitischen Spannungen oder Handelskonflikte modelliert.

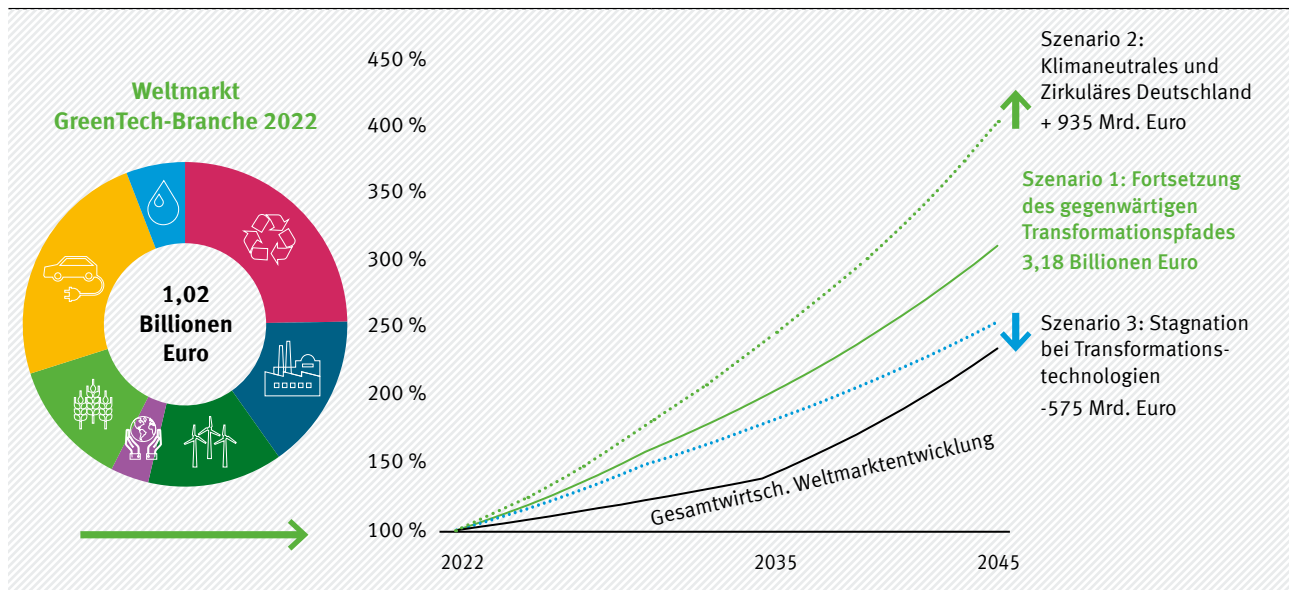
²⁴ Detaillierte Informationen zu diesem unter weiteren Modellen von Prognos finden sich unter <https://www.prognos.com/de/view>.

Im berechneten Szenario 2 liegt das Wachstum mit 6,2 % p.a. nochmals höher. Das heißt: Wenn alle relevanten Handelsnationen weltweit eine ambitionierte Transformationspolitik verfolgen bzw. diese weiter intensivieren, kann dies bis 2045 im Vergleich zu Szenario 1 zu einem Plus von 935 Milliarden Euro bzw. einem knapp 30 % stärkeren globalen GreenTech-Markt führen. Das zeigt eindrücklich, welche Chancen für deutsche GreenTech-Unternehmen eine starke

globale Transformationspolitik bereithalten kann. Im Gegensatz dazu führt ein Abschwächen der internationalen Transformationspfade in Szenario 3 zu einer um fast 20 % verringerten Nachfrage im Vergleich zu Szenario 1. Das Wachstum für den Gesamtzeitraum liegt bei nur noch 4,1 % p.a., was nur geringfügig über der Basis-Prognose für die Importentwicklung von 3,8 % p.a. liegt.

Abbildung 15

Szenarien des Weltmarkts der GreenTech-Branche bis 2045 (Indexiert 2022= 100%)



Quelle: Prognos AG 2025

3.4. Deutsche GreenTech-Branche: ein wichtiger globaler Innovationstreiber

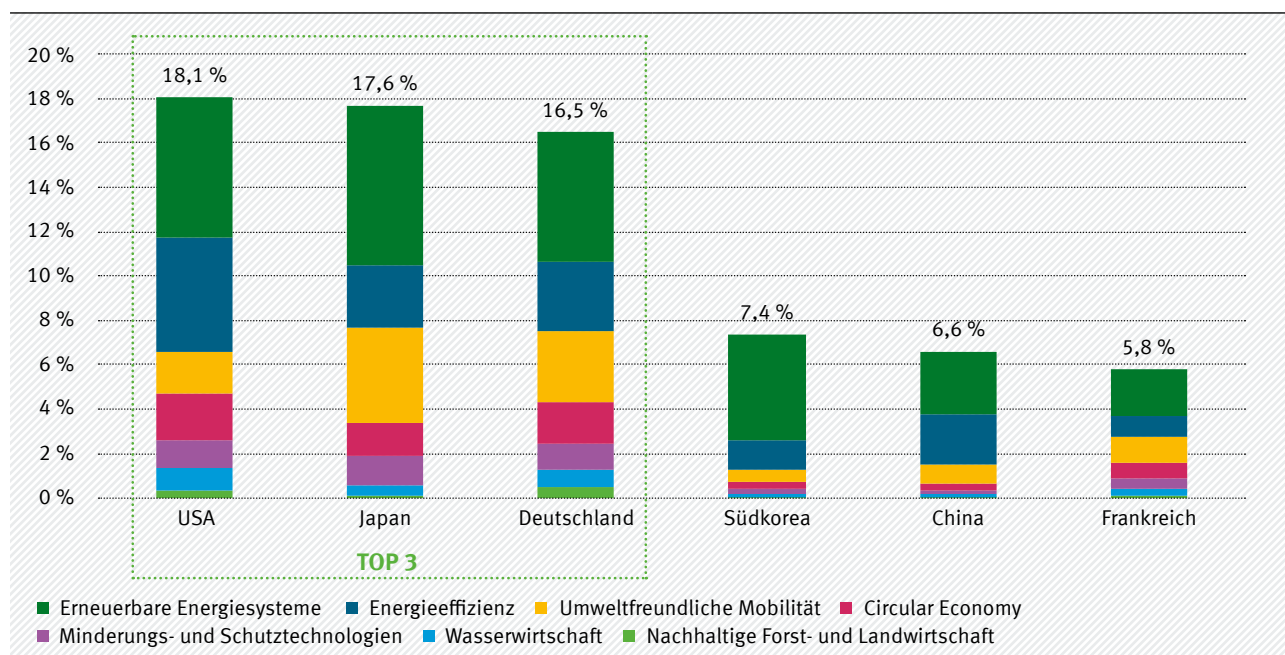
Damit die deutsche GreenTech-Branche weiterhin zu den wirtschaftlichen Wachstumstreibern gehört, sind neue technologische Lösungen und innovative Ansätze eine wichtige Voraussetzung. Unsere Analyse betrachtet die Innovationsaktivitäten der GreenTech-Branche in Deutschland und im internationalen Vergleich sowie die jeweilige Fokussierung auf bestimmte Technologien. Für die Analyse der Innovationen der GreenTech-Branche wird eine Auswertung internationaler Patente vorgenommen. Der detaillierte Daten-

satz des europäischen Patentbüros (EPO) ermöglicht es, technologische Innovationen auf nationaler und internationaler Ebene zu vergleichen und Trends, Stärken und Potenziale zu identifizieren.

Deutschland gehört zu den TOP3 Ländern für GreenTech-Patente

Über die Hälfte aller Patentanmeldungen der GreenTech-Branche kommen aus drei Ländern: USA, Japan und Deutschland (Abbildung 16). Den größten Anteil weisen hier US-Unternehmen auf, die einen starken Fokus auf Innovationen in den Leitmärkten Energieeffizienz und Erneuerbare Energiesysteme legen. Fast zwei Drittel der im Betrachtungszeitraum angemeldeten Patente aus den USA sind diesen beiden Leitmärkten zuzuordnen. Bis 2016 nahmen die ameri-

Abbildung 16

Anteile der Länder an den gesamten GreenTech-Patenten zw. 2010 und 2023, in %

Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

kanischen Patente jährlich stetig zu und steigerten sich gegenüber 2010 annähernd auf das Fünffache. Seitdem gingen die jährlichen Anmeldungen wieder leicht zurück. Japan hatte, als zweitwichtigster internationaler Innovationstreiber, die stärksten Anmeldejahre bereits 2011 und 2012 und fiel danach auf das Ausgangsniveau von 2010 zurück. Auch japanische Unternehmen spezialisierten sich vorrangig auf Erneuerbare Energiesysteme, sowie die Umweltfreundliche Mobilität. Das deutsche Innovationsgeschehen fokussierte ebenfalls stark auf Erneuerbare Energiesysteme, gefolgt von Umweltfreundlicher Mobilität. Im Jahr 2020 erreichte Deutschland seine höchste Zahl an Patentanmeldungen und erzielte hierbei ein Wachstum gegenüber 2010 von 115 %.

Auf dem 4. Rang der Patentanmeldungen liegt Südkorea, das sich in besonderem Maße auf Erneuerbare Energiesysteme spezialisierte. Während bei den Top-3 Ländern jeweils 35-40 % der Patente in diesem Leitmarkt angemeldet wurden, lag der Anteil in Südkorea bei ca. 65 %. Auch hier war die Entwicklung in den Jahren 2010 bis 2023 sehr dynamisch.

Unter den 15 wichtigsten Ländern befinden sich neben Deutschland neun weitere europäische Länder. Hier waren ebenfalls fast durchgehend positive Entwicklungen zu beobachten, wenn auch keine Dynamik,

die mit Südkorea oder China vergleichbar war. Diese zehn wichtigsten europäischen GreenTech-Innovationszentren stellen insgesamt ca. 40 % der GreenTech-Patente und damit mehr als die USA und Japan zusammen oder ca. sechsmal mehr als China.

China holt bei der Zahl der Patente rasant auf – Absolute Patentzahlen spiegeln jedoch nicht bei jeder Betrachtungsweise dieselbe Innovationswirkung wider.

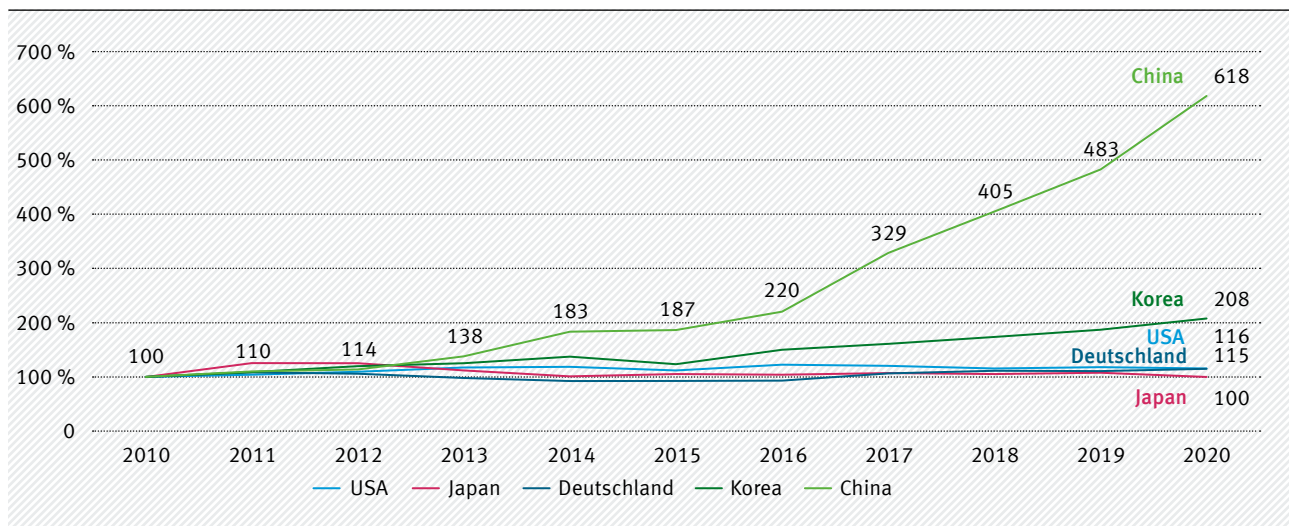
In der vorliegenden Analyse liegt China mit 6,6 % auf Rang 5 von in Europa geltenden GreenTech-Patenten und nimmt damit noch keine Vorreiterrolle ein. Allerdings holt China im zeitlichen Verlauf rasant auf (Abbildung 17). Die Zahl der Patente in der GreenTech-Branche stiegen äußerst dynamisch seit dem Jahr 2010 und erreichten im Jahr 2020 über 600 % des Startwertes. Hält diese Dynamik weiter an, wird es nicht lange dauern, bis China in der Branche zu den drei Spitzenreitern USA, Japan und Deutschland aufgeschlossen hat.

Andere Patentanalysen von Klimaschutz- bzw. GreenTech-Technologien weisen der Volksrepublik bereits eine deutlich dominanter Rolle zu.²⁵ Dies liegt an unterschiedlichen methodischen Zugängen und Datengrundlagen der Patentanalysen.

Auffällig bei chinesischen Patenten ist, dass der Anteil der bei internationalen Ämtern wie der EPO angemeldeten Patente im Vergleich zu den rein nationalen geringer ausfällt. Dafür gibt es verschiedene Erklärungsansätze, wie die politische Dimension von Patenten in China.²⁶

Abbildung 17

Indexierte Entwicklung der Patentanmeldungen von 2010 bis 2020, 2010 = 100 %



Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT.

Erneuerbare Energien und Mobilität dominieren die deutschen Patentanmeldungen

Der Leitmarkt Erneuerbare Energiesysteme nimmt den größten Anteil deutscher GreenTech-Patentanmeldungen ein (Abbildung 18). Da dieser Sektor allerdings auch international bei den meisten Ländern im Fokus steht, ist der deutsche Weltpatentanteil mit 15 % unterdurchschnittlich. Für die deutsche GreenTech-Branche sind Patentanmeldungen in den Leitmärkten

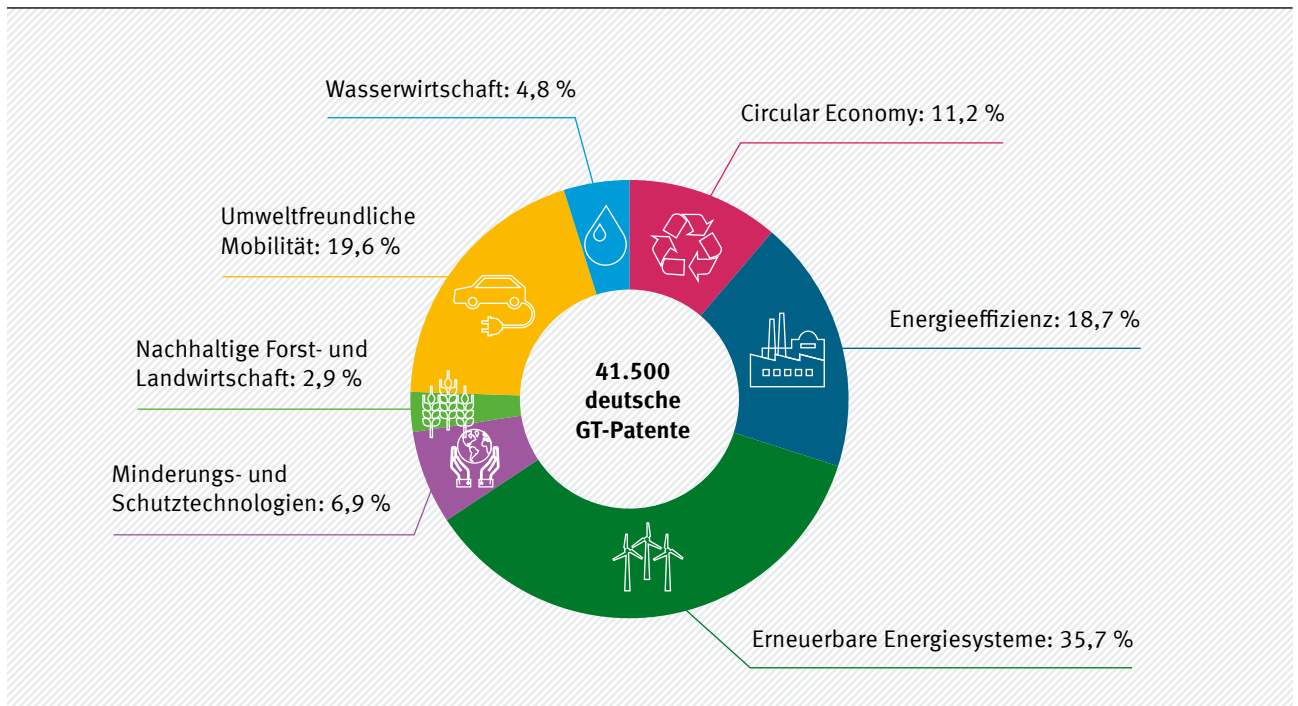
Energieeffizienz und Umweltfreundliche Mobilität nahezu gleichbedeutend mit je ca. 20 %. Der Anteil an den globalen Patenten liegt im Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität allerdings mit über 21 % deutlich höher. Die beiden Leitmärkte Energieeffizienz und Umweltfreundliche Mobilität wiesen hohe Wachstumsraten bei den deutschen Patentanmeldungen auf und kamen im Jahr 2020 auf ca. 40 % bzw. 50 % mehr Patentanmeldungen als noch 2010.

²⁵ Gramke, K., Jank, K., Posch, D., Spuck, J. (2023). *Green tech made in Germany: how fit for the future are we?* Bertelsmann Stiftung (Hrsg.). <https://doi.org/10.11586/2024001>

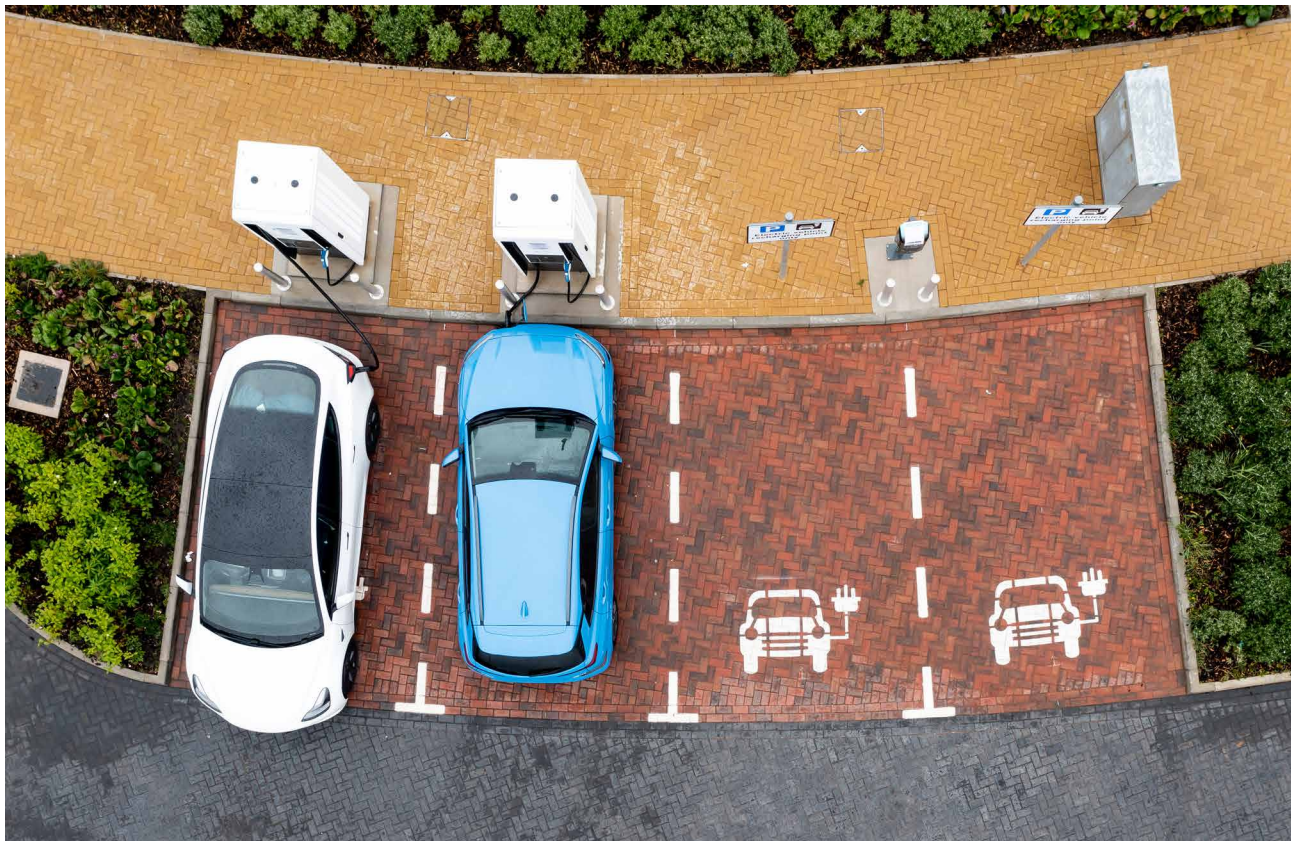
²⁶ He, A. (2021). *What Do China's High Patent Numbers Really Mean?* Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.cigionline.org/articles/what-do-chinas-high-patent-numbers-really-mean/>

Abbildung 18

Anteile der Leitmärkte an den gesamten deutschen GreenTech-Patenten 2010 – 2023, in %



Quelle: Prognos AG 2025
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.



4

**Blick in die Leitmärkte:
Grüne Leistungen
zeigen Wirkung**



4.1. Circular Economy: das Rückgrat der GreenTech-Branche

Die Circular Economy ist von zentraler Bedeutung für die nachhaltige Entwicklung, sowohl in Deutschland als auch global. Sie zielt darauf ab, die Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen zu verringern und Materialien in Kreisläufen zu führen. Die Bedeutung der Circular Economy zeigt sich im EU Clean Industrial Deal. Hier wird für die EU das Ziel ausgerufen, bis 2030 der Weltmarktführer im Bereich Circular Economy zu sein. Die Circular Economy wird daneben als zentrales Element der europäischen Bemühungen im Bereich kritischer Rohstoffe sowie einer gestärkten Resilienz gesehen.²⁷

Mit der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) formuliert die Bundesregierung ambitionierte Ziele.²⁸ Eine Unternehmensbefragung der Deutschen Industrie- und Handelskammer zeigt, dass sich rund die Hälfte der befragten Unternehmen bisher nicht mit der Frage beschäftigt hat, wie sie ihr Geschäftsmodell in Richtung Circular Economy anpassen können.²⁹ Hier bestehen große Potenziale: Unternehmen, die bereits Strategien zur Steigerung der Zirkularität verfolgen, weisen einen höheren Unternehmenserfolg vor.³⁰ Im Rahmen des GreenTech-Atlas werden verschiedene Produkte und Dienstleistungen der Circular Economy abgebildet. Erfasst werden sowohl die Anbieter von Technologien zur stofflichen Verwertung (z. B. Hersteller von Recyclinganlagen), als auch die Betreiber derartiger Anlagen in Deutschland, die Materialien verwerten. Folgende Marktsegmente umfasst der Leitmarkt:

Abbildung 19

Marktsegmente Circular Economy

Nachwachsende Rohstoffe und umweltfreundliche Materialien	Abfallbehandlung und -verwertung	Technik für die Abfallwirtschaft	Zirkuläre Prozesse	Abfallsammlung und -transport
▶ Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen ▶ Kosmetik und Reinigungsmittel aus nachwachsenden Rohstoffen ▶ Materialforschung	▶ Stoffliche Verwertung ▶ Energetische Verwertung ▶ Abfallbeseitigung	▶ Sammel- und Transportbehälter ▶ Anlagentechnik ▶ Fahrzeugtechnik	▶ Mess-, Steuer- und Regeltechnik ▶ Materialeffiziente Verfahrenstechnologien ▶ Installations-, Reparatur- und Beratungsleistungen ▶ Vermietungsdienstleistungen	▶ Abfallsammlung (nicht gefährliche Abfälle) ▶ Abfallsammlung (gefährliche Abfälle) ▶ Abfallbehandlung und -beseitigung ▶ Straßenreinigung

Quelle: Prognos AG 2025

27 Europäische Kommission (2025b). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions: The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation. (COM(2025) 85 final)*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en

28 Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2024). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). Rahmenbedingungen für eine zirkuläre Wirtschaft*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bmu.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaftsstrategie>

29 Deutsche Industrie- und Handelskammer (2024). *Kreislaufwirtschaft als Chance: DIHK Umfrage zur Circular Economy*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.dihk.de/resource/blob/117788/4847632a7db7d7cdf922f1dc55e6ac8a/dihk-circular-economy-report-2024-v3-data.pdf>

30 Fluchs, S., Neligan, A., Schleicher, C., Schmitz, E. (2022). *Zirkuläre Geschäftsmodelle. Wie zirkulär sind Unternehmen?* IW-Report 27/2022. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2022/IW-Report_2022-Zirkul%C3%A4re-Gesch%C3%A4ftsmodelle.pdf

Abbildung 20

Anzahl Erwerbstätige im Leitmarkt Circular Economy und nach Marktsegmenten in 2023
(in Klammern Wachstum p.a. seit 2010) und Bruttowertschöpfung (preisbereinigt)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamts
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Der Leitmarkt Circular Economy zählt die meisten Erwerbstätigen und die höchste Bruttowertschöpfung

Die Circular Economy ist mit Blick auf die Zahl der Erwerbstätigen der größte Leitmarkt der deutschen GreenTech-Branche: über 1 Millionen Personen arbeiten im Leitmarkt. Mit fast 90 Milliarden Euro vereint die Circular Economy mehr Wertschöpfung als alle anderen Leitmärkte. Das Wachstum des Leitmarktes liegt jedoch unterhalb des GreenTech-Branchendurchschnitts. Pro Jahr wuchs die Zahl der Erwerbstätigen seit 2010 um etwa 1 %.

Ein Großteil der Erwerbstätigen (ca. 790.000) arbeitet im Marktsegment Zirkuläre Prozesse, insbesondere im Bereich von Reparaturdienstleistungen. Für die Reparatur und Instandhaltung von Kraftwagen, Maschinen und anderen Ausrüstungsgegenständen besteht bereits ein etabliertes Netz aus Unternehmen, die dafür sorgen, dass die entsprechenden Güter möglichst lang genutzt werden. Die damit verbundene Erhöhung der Produktlebensdauer soll durch die von der EU verabschiedete Richtlinie zum „Recht auf

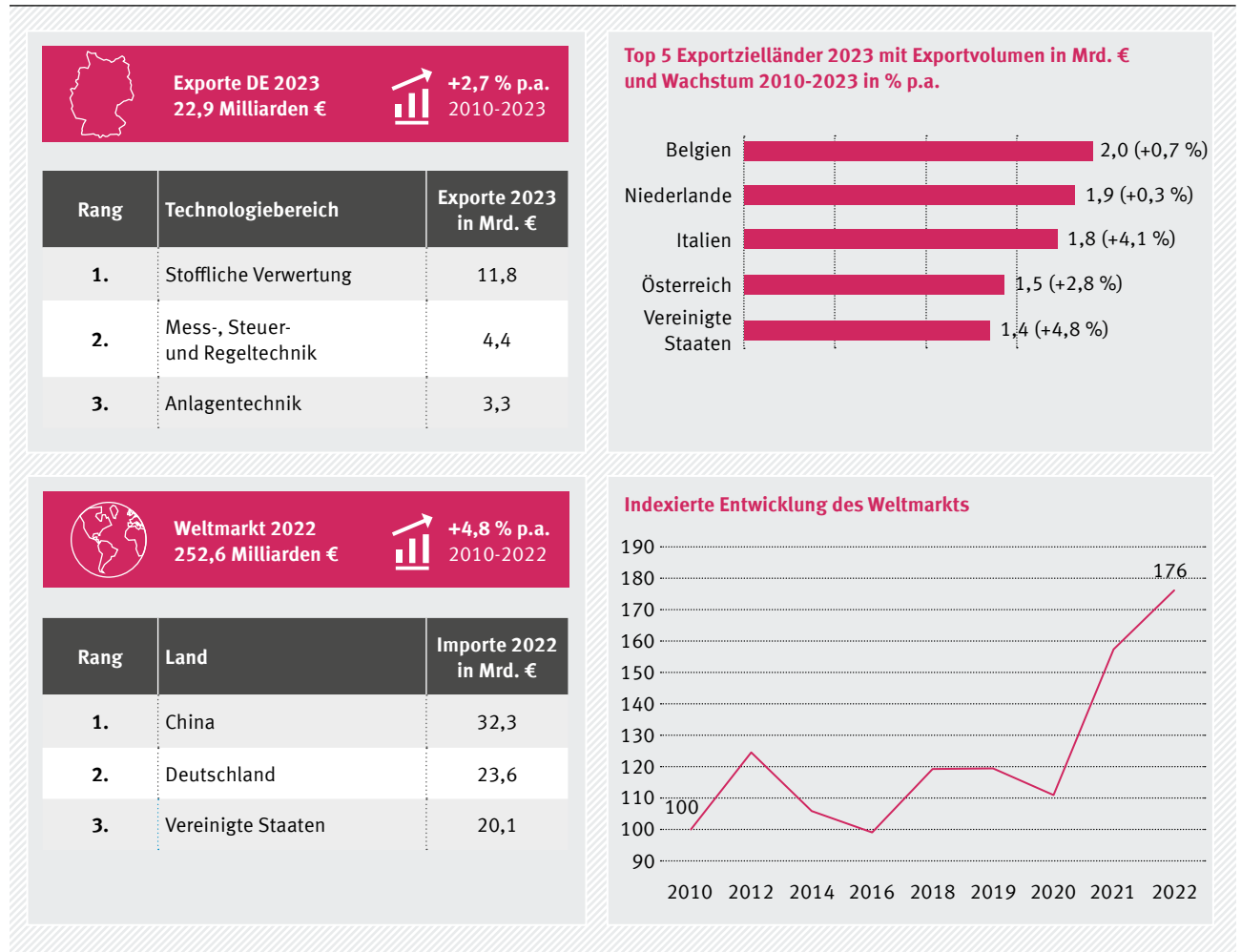
Reparatur“ auch für andere Produktgruppen erreicht werden. Eine entsprechende Zunahme der Reparaturleistungen könnte in den kommenden Jahren zu positiven Beschäftigungseffekten führen.³¹ Das durchschnittliche Wachstum von 0,8 % p.a. zeigt jedoch bislang keine entsprechende Dynamik.

In den drei Marktsegmenten der klassischen Recycling- und Abfallwirtschaft arbeiten knapp 300.000 Erwerbstätige und sorgen dafür, dass Produkte und Materialien nach Ende ihrer Nutzungsdauer für die Wiederverwendung vorbereitet oder stofflich oder energetisch verwertet werden. Die Tätigkeiten reichen von der Abfallsammlung bis zur Abfallbehandlung, -verwertung und -beseitigung, sowie der Herstellung dafür benötigter Abfalltechnik. Für die Abfallbehandlung und -verwertung sowie die Herstellung von Abfalltechnik zeigten sich zwischen 2010 und 2023 geringe Wachstumsraten von 1 % beziehungsweise 0,5 % p.a.

31 Thobe, I., Eckermann, F., Maier, T. (2023). Das „Recht auf Reparatur“ – mögliche Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt. In: BWP 52 4, S. 12-16. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bwp-zeitschrift.de/dienst/publikationen/de/19251>

Abbildung 21

Übersicht über die wichtigsten Kennzahlen des deutschen Außenhandels und des Weltmarkts für den Leitmarkt Circular Economy, nominale Werte



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Materialien der stofflichen Verwertung dominieren den Weltmarkt und den deutschen Export

Die Summe aller weltweiten Importe im Leitmarkt Circular Economy erreichte im Jahr 2022 über eine Viertel Billion Euro und stellt damit den größten internationalen Nachfragemarkt der GreenTech-Branche dar. Auch für die deutschen Exporte war der Leitmarkt mit fast 23 Milliarden Euro im Jahr 2023 bedeutend. Die Wachstumsdynamik der Exporte des Leitmarkts seit 2010 erwies sich mit 2,7 % p.a. als unterdurchschnittlich im Vergleich zur gesamten GreenTech-Branche.

Wichtigster Technologiebereich der deutschen Exporte des Leitmarkts war 2023 die Stoffliche Verwertung. Dieser Technologiebereich machte etwas mehr als die Hälfte der gesamten deutschen Exporte im Leitmarkt Circular Economy aus (Abbildung 21). Dahinter verbergen sich vor allem Schrotte und Sekundärrohstoffe. Diese Kategorie enthält explizit keine minderwertigen Abfälle wie Hausmüll, Kunststoffabfälle oder ähnliches, wo ein Export ggf. in den Zielländern nicht mit einer adäquaten Weiterverarbeitung verbunden sein könnte.³² Abnehmer dieser Mengengüter waren vor allem Länder in der direkten europäischen Nach-

³² Es wird keine Position bezogen im Hinblick auf die Verwertungsqualität in anderen Ländern oder inwiefern ein Export bestimmter Ressourcen strategisch positiv oder negativ zu bewerten ist. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass ein Handel auch mit den Materialien der stofflichen Verwertung grundsätzlich sinnvoll sein kann vor allem im europäischen Kontext und Spezialisierungen einzelner Länder existieren.

barschaft Deutschlands wie Belgien, die Niederlande oder Österreich. Belgien und die Niederlande haben große Hafeninfrastrukturen, was teilweise zu den Werten beigetragen hat.

Die globale Nachfrage im Leitmarkt wurde ebenfalls von Gütern der Stofflichen Verwertung dominiert. Über zwei Drittel der globalen Handelsvolumen der Circular Economy waren in diesem Technologiebereich verzeichnet. Deutschland trat trotz der hohen Exportleistung insgesamt nicht als Netto-Exporteur im Technologiebereich Stoffliche Verwertung auf. Vielmehr war die Bundesrepublik vor dem Hintergrund der ausgeprägten und hochwertigen Verwertungsinfrastruktur weltweit der wichtigste Importeur dieses Technologiebereichs, mit einem Einfuhrvolumen von fast 19 Milliarden Euro. Nach Deutschland stellten Indien und China die größten Nachfragemärkte dieses Technologiebereichs dar.

Der Technologiebereich Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR) aus dem Marktsegment Prozesse sticht durch eine hohe Exportentwicklung hervor. Mit fast 7 % p.a. wuchsen die deutschen Ausfuhren hier mehr als 2,5-mal so schnell wie im gesamten Leitmarkt. Ausschlaggebend sind vor allem IT-Ausrüstungen für industrielle Effizienz. Die wichtigsten Abnehmerländer für deutsche Produkte dieses Technologiebereichs waren dabei die Niederlande, Taiwan und Ungarn.

Mit Blick auf die Wachstumsdynamik im Leitmarkt treten andere Zielmärkte in den Vordergrund. Wichtige Wachstumsmärkte der deutschen Exporte des Leitmarkts sind die USA, Polen und die Schweiz. Rumänien ist mit Rang 20 der deutschen Exportziele zwar noch kein bedeutender Markt, entwickelte sich mit ca. 13 % p.a. aber besonders rasant und wird bei anhaltender Dynamik schnell zu einem der wichtigsten Märkte werden. Die Exporte des Leitmarkts nach China gingen im Betrachtungszeitraum um mehr als 2 % p.a. zurück. Der Grund für diesen Rückgang ist der Technologiebereich Stoffliche Verwertung, wo die Exporte aus Deutschland von 2010 bis 2023 um fast 10 % p.a. sanken, von über 900 Millionen Euro auf ca. 250 Millionen Euro. Der Hauptgrund dafür dürften die in dem Zeitraum erlassenen strengeren Regeln für den Import von Schrotten und Abfällen durch die Volksrepublik sein.

Die weltweite Nachfrage im Leitmarkt Circular Economy entwickelte sich mit einer durchschnittlichen

Wachstumsrate von 4,8 % p.a. von 2010 bis 2022 positiv. Allerdings entfiel diese Entwicklung nahezu vollständig auf die Jahre 2021 und 2022. In den Jahren 2021 und 2022 stieg die Nachfrage sprunghaft an. Dies ist mindestens zum Teil auf gestiegene globale Rohstoffpreise zurückzuführen. Besonders betroffen davon ist der Technologiebereich Stoffliche Verwertung, in dem auch Sekundärmetalle und Schrotte aus z. B. Eisen, Stahl, Kupfer einen bedeutenden Anteil haben. Bei den deutschen Exporten ließ sich in diesem zentralen Technologiebereich ein vergleichbarer Preiseffekt beobachten, der sich in 2023 zum Teil mit wieder sinkenden Preisen korrigierte. Dieser Effekt zeigte sich zumindest für die deutschen Exporte in 2023. Dort stiegen die Exportvolumen in Tonnen 2021 nur um 2 %, die Exportvolumen in Euro aber um 50 %. 2022 gingen die Exporte in Tonnen wieder zurück, die Werte in Euro stiegen aber weiter um fast 4 %. 2023 gingen dann die Euro-Werte stärker zurück als die Tonnen-Werte.

Die wichtigsten globalen Nachfragemärkte im Leitmarkt Circular Economy sind China, Deutschland und die USA. In der Entwicklung seit 2010 zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen diesen Ländern. Während Deutschland und die USA ihre Importvolumina von jeweils ca. 10 Milliarden Euro von 2010 bis 2023 knapp verdoppelten, nahmen die Importe Chinas in demselben Zeitraum leicht ab, was in fast keiner anderen bedeutenden Volkswirtschaft der Fall war. Am deutlichsten ist dies bei den Gütern des Technologiebereichs der Stofflichen Verwertung zu beobachten, hier nahmen die Importe Chinas um ca. 6 Milliarden Euro ab. In den USA fand dagegen ein Importboom beim Marktsegment Anlagentechnik für die Abfallwirtschaft statt, die Importe wuchsen seit 2010 auf mehr als das Dreifache, dies entsprach ca. 3 Milliarden Euro.

Im Vergleich zu anderen Leitmärkten überdurchschnittlich bedeutend sind für den Circular Economy-Weltmarkt die Märkte Indien, die Türkei und Belgien, die alle eine hohe Dynamik im Beobachtungszeitraum aufwiesen. Die indischen Importe vervierfachten sich bis 2022 vor dem Hintergrund der raschen industriellen Entwicklung und des steigenden Rohstoffbedarfs des Landes. Belgien ist vor allem im Hinblick auf die Volumengüter im Technologiebereich Stoffliche Verwertung durch seine wichtigen Häfen u. a. in Antwerpen ein wichtiges Importland.

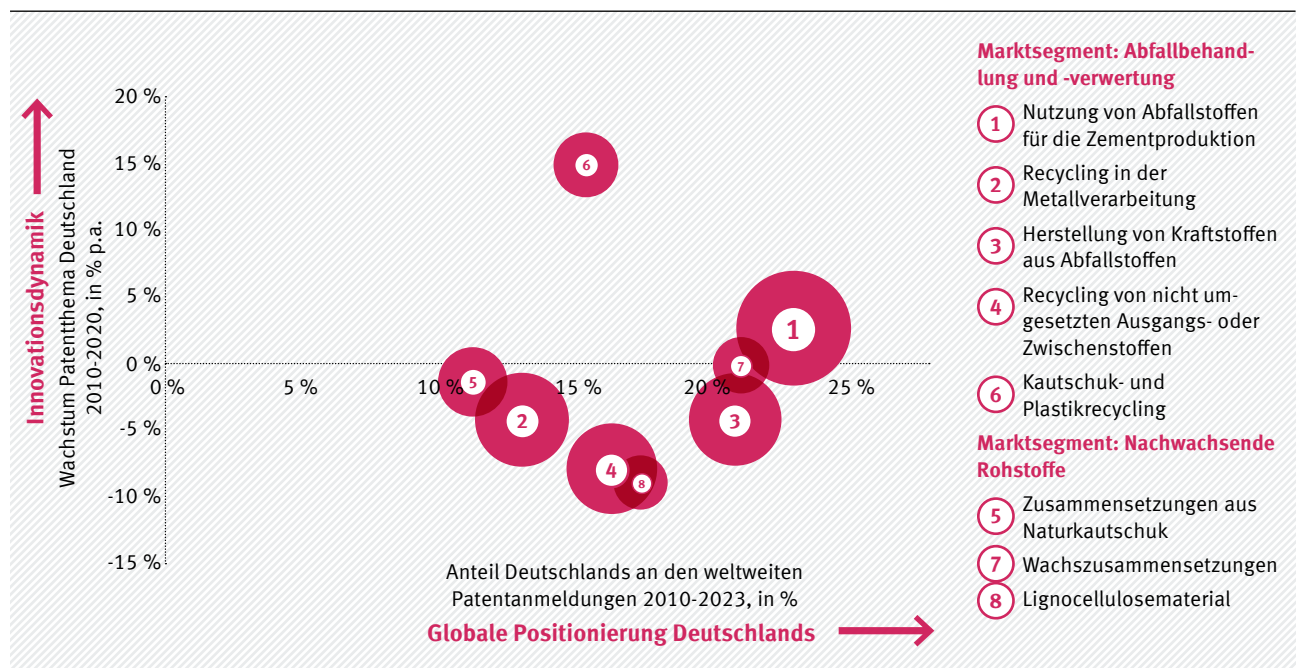
Die klassische Kreislaufwirtschaft bestimmt das Innovationsgeschehen der Circular Economy

Im globalen Innovationswettbewerb ist Deutschland mit einem Anteil von 18 % der weltweiten Patente im Leitmarkt Circular Economy wettbewerbsfähig und an zweiter Stelle hinter den USA. Diese starke Position im Leitmarkt konnte Deutschland im Untersuchungszeitraum verteidigen. Der Trend der Patentanmeldungen zeigte sich für den Leitmarkt zuletzt positiv. Während 2018 und 2019 jeweils weniger Patente in Deutschland als im Basisjahr 2010 angemeldet wurden, konnte Deutschland 2020 wieder aufholen und zeigte eine erhöhte Patentaktivität.

Aus der Innovationsperspektive stellte die Abfallbehandlung und -verwertung mit einem Anteil von 43 % der Patente des Leitmarktes zwischen 2010 und 2023 das wichtigste Marktsegment dar. Insbesondere der Technologiebereich Stoffliche Verwertung ist wichtig und machte 82 % des Marktsegmentes aus. Ein Effekt, der im Leitmarkt Circular Economy besonders Einfluss findet, aber auch in anderen Leitmärkten vorkommt, sind Erfassungsunterschiede zwischen etablierten bzw. klassischen Technologien und breiteren Querschnittstechnologien. Je höher der Querschnittscharakter wie bei der Materialeffizienz, desto schwerer ist die Erfassung in den Patentcodes.

Abbildung 22

Innovationsdynamik und globale Positionierung bei den Top 8 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Circular Economy

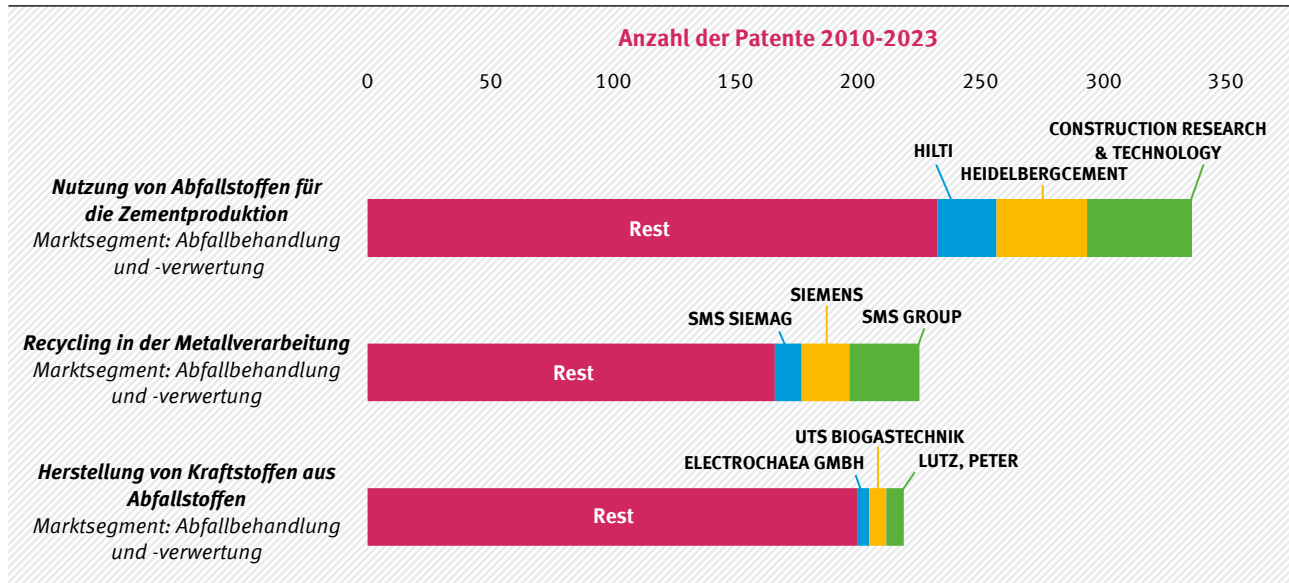


Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Dargestellt sind die wichtigsten acht deutschen Patentthemen im Leitmarkt. Die Blasengröße symbolisiert die absolute Zahl der in Deutschland angemeldeten Patente im Zeitraum 2010-2023. Die x-Achse stellt für jedes Thema anhand des Anteils an den weltweiten Patentanmeldungen im Zeitraum 2010-2023 die globale Positionierung Deutschlands im Innovationswettbewerb dar. Die y-Achse zeigt anhand des Wachstums der Patentanmeldungen zwischen 2010 und 2020* die Innovationsdynamik der Themen auf. (*Für die Beurteilung der Entwicklung im Zeitverlauf werden die drei verfügbaren Jahre 2021-2023 ausgeklammert, um Verzerrungen auf Grund noch nicht abgeschlossener Patentanmeldungen zu vermeiden.)

Abbildung 23

Top 3 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Circular Economy mit Verteilung auf die bedeutendsten Innovationsakteure



Lesehilfe: Zu sehen sind die drei patentstärksten Themen des Leitmarktes in Deutschland. Die Länge der Balken repräsentiert die absolute Zahl der zwischen 2010-2023 in Deutschland angemeldeten Patente. Farblich hervorgehoben sind die drei Akteure, welche in Deutschland die meisten Patente zum jeweiligen Thema angemeldet haben. Bei den Anmelder*innen kann es sich neben Unternehmen oder Forschungseinrichtungen auch um Privatpersonen oder beauftragte Kanzleien handeln.

Blickt man tiefer in die Innovationsaktivitäten der verschiedenen Marktsegmente, lassen sich hervorste-
chende Patentthemen identifizieren (Abbildung 22).
Das nach absoluter Patentzahl im Zeitraum 2010-2023
wichtigste Patentthema im Leitmarkt ist *Nutzung von
Abfallstoffen für die Zementproduktion*. Deutschland
ist darin mit einem globalen Patentanteil von fast
23 % international führend. Besonders Heidelberg-
Cement und Construction Research & Technology
(bekannt unter dem Namen Master Builders
Solutions) sind innovativ in diesem Patentthema.
Damit vereinen sie einen beachtlichen Anteil von
knapp einem Viertel aller Patente beim Thema
Nutzung von Abfallstoffen für die Zementproduktion
auf sich (Abbildung 23).

Im zweitwichtigsten Patentthema *Recycling in der
Metallverarbeitung* haben Siemens und SMS Group
die meisten Patente angemeldet. Ein weiterer wichti-
ger Innovationsbeitrag deutscher Circular Economy-
Unternehmen zum Klimaschutz wird mit Patenten
zur *Herstellung von Kraftstoffen aus Abfallstoffen*

geleistet. Auf dieses Thema entfallen die drittmeisten
Anmeldungen des Leitmarkts im Beobachtungszeit-
raum. Deutschland leistete hier trotz leicht negativer
Dynamik bis 2020 noch immer mehr als ein Fünftel
der weltweiten Anmeldungen.

Ebenfalls relevant in der deutschen Innovationsland-
schaft ist das Marktsegment Zirkuläre Prozesse. Die
Innovationsaktivitäten verteilen sich hier stärker auf
verschiedene Patentthemen, weshalb keines der
Patentthemen aus diesem Marktsegment unter den
Top-8 des Leitmarkts (Abbildung 22) zu finden ist.
Nichtsdestotrotz handelt es sich um das Marktsegment
mit der stärksten globalen Position Deutschlands in
der Circular Economy: Mit 30 % der globalen Patent-
anmeldungen liegt Deutschland deutlich vor den
beiden einzigen relevanten Wettbewerbern, USA und
Japan. Dies ist hauptsächlich auf die Erfahrung deut-
scher Unternehmen in der MSR-Technik zurückzufüh-
ren: 71 % der deutschen Patente des Marktsegments
gehen auf diesen Technologiebereich zurück.

Einblicke in das Innovationsgeschehen zum Patentthema Recycling von Kunststoff und Gummi

15%

jährliches Wachstum
2010-2020

Deutsche Patentanmeldungen
wachsen rasant

Die Weiterverwertung von Kunststoff und Gummi ist ein wichtiger Hebel, um Ressourcen zu schonen und das Klima zu schützen. In diesem Abschnitt wird beleuchtet, welche Innovationen aus Deutschland die starke Dynamik dieses Patentthemas der letzten Jahre getrieben hat. Dafür haben wir Abstracts der Patenttexte und Unternehmensberichte der wichtigsten deutschen Akteure untersucht.

DEEP DIVE

Recycling von Reifen

Altreifen können und müssen in Zukunft recycelt werden. Durch das Verfahren der Pyrolyse kann insbesondere Carbon Black gewonnen werden. Jedoch ist Pyrolyse oft noch zu energieintensiv, um wirtschaftlich zu sein.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Verwendung von sekundärem Carbon Black in der Reifenherstellung
- ▶ Devulkanisierung von Altgummi in Planetwalzenextrudern



Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Dosierung von Lösungsmitteln mit Wärmestabilisatoren zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften
- ▶ Verwendung von Trennflüssigkeiten zur Auftrennung von Verbundverpackungen mit Metall- und Polymerschichten
- ▶ Sortierung von Kunststoffen unter Verwendung von Markern wie Fluoreszenzlebensdauer und Reflektionsintensität unter Infrarotlicht

Recycling von Verpackungen

Kunststoffverpackungen sind wegen ihrer Leichtigkeit und Barriereeigenschaft (Schutzfunktion) aus unserem Leben kaum noch wegzudenken. Allerdings sind vor allem Mehrschichtverbunde von Kunststoffen schwer zu recyceln.

Verwendung von Kunststoff-Rezyklaten

Getrennte Kunststoffe können als Granulat erneut für die Herstellung neuer Produkte verwendet werden. Bei niedrigen Erdölpreisen ist das bisher allerdings oft unwirtschaftlich. Außerdem können aus hygienischen und funktionalen Gründen nicht alle Kunststoffprodukte mit Rezyklaten gefertigt werden.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Entwicklung neuer kombinierter Kunststoffe aus rezyklierten und neuem Kunststoffmaterial
- ▶ Hitzeverfahren zur Dekontaminierung von Rezyklaten
- ▶ Herstellung hochwertiger Kunststoffe durch die Vermischung von Rezyklaten mit Matrixpolymeren



Neue Innovationen im Patentthema Nutzung von Abfallstoffen für die Zementproduktion

Zement ist einer der wichtigsten Stoffe in der Bauwirtschaft, weil er unverzichtbar für die Herstellung von Beton ist. Die Reduzierung seines enormen CO₂-Abdruckes ist deswegen essenziell für nachhaltiges Bauen. Die Trends in der deutschen Innovationslandschaft wurden auf Basis der Patente und Unternehmensberichte untersucht.

1. Platz

für Deutschland
2010-2020

Kein anderes Land meldete
so viele **Patente** an

Sekundäre Rohstoffe im Zement

Konventioneller Zement wird überwiegend aus Klinker hergestellt, welcher hohe Treibhausgasemissionen verursacht. Zunehmend werden Klinker deswegen durch Substitute ersetzt und durch Füller ergänzt. Hierbei handelt es sich vor allem um Sekundärrohstoffe oder industrielle Beiprodukte.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Verwendung von industriellen Nebenprodukten (z.B. Flugasche von Kohle, Schlacke von Metallen) als Substitute
- ▶ Nutzung von Abfällen (z.B. Kunststoff, Papier) als Füller
- ▶ Recycling von Bioraffinerieabfällen



Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Abscheiden von CO₂ durch Systeme auf Aminobasis und membranbasierte Gasabscheidung.
- ▶ Integration CO₂ mit Schlacke zur Herstellung von Kalkstein und Magnesit



CCU und CCS für unvermeidbare Emissionen der Zementproduktion

Die Abscheidung von CO₂ ist in zwei Hinsichten für die Zementproduktion relevant. Unvermeidlich anfallendes CO₂ kann daran gehindert werden, in die Umwelt zu gelangen und die gespeicherten Treibhausgase potenziell in Produktionsprozessen selbst verwendet werden. Insbesondere die Wirtschaftlichkeit stellt hier noch eine Herausforderung dar.

Zementersetzende Zusatzstoffe (SCM)

Der wichtigste Verwendungszweck von Zement ist für Herstellung von Beton. In der Baubranche fallen jährlich Millionen Tonnen an Betonabfällen an, hieraus können mit modernen Technologien wieder zementersetzende Zusatzstoffe für Beton gewonnen werden. Dadurch können enorme Mengen an Energie, Material und CO₂-Emissionen eingespart werden.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Karbonatisierung von Beton aus Bauabfällen zur Gewinnung von SCM
- ▶ Nutzung von anderen natürlichen Rohstoffen zur Herstellung von SCM
- ▶ Hydrothermale Behandlung von hydriertem Zement für SCM-Herstellung



4.2. Energieeffizienz- lösungen: GreenTech- Unternehmen mindern Umweltbeeinträchtigungen und Energiekosten

Die Reduktion des Energieverbrauches bei gleichzeitig wachsender Wirtschaftsleistung erfordert eine Steigerung der Energieeffizienz. Energieressourcen können eingespart und Treibhausgas-Emissionen reduziert werden. Gleichzeitig schafft sie ökonomische Vorteile für Unternehmen und Haushalte: finanzielle Mittel, die zuvor für die Energiebereitstellung benötigt wurden, können nun anderweitig eingesetzt werden.³³

Die hohe Bedeutung der Energieeffizienz für das Erreichen der Umwelt- und Klimaziele wurde durch eine Reihe von Gesetzen unterstrichen. Das 2010 in Kraft getretene Energiedienstleistungsgesetz (EDL-G) verpflichtet Unternehmen, die nicht unter die Definition von Kleinunternehmen, kleinen oder mittleren Unternehmen (KMU) fallen, ein Energieaudit durchzuführen. Mit dem 2023 beschlossenen Energieeffizienzgesetz (EnEfg) wird der Kreis der betroffenen Betriebe

weiter gefasst. Geregelt wird, dass Unternehmen ab einem bestimmten Energieverbrauch Energie- und Umweltmanagementsysteme einführen müssen, außerdem müssen Umsetzungspläne veröffentlicht werden, die Endenergieeinsparmaßnahmen vorsehen.³⁴

Die GreenTech-Branche bietet verschiedene Lösungen für Betriebe und Privathaushalte zur Steigerung der Energieeffizienz:

Abbildung 24

Marktsegmente Energieeffizienz

Energieeffiziente und resiliente Gebäude	Energieeffiziente Produktionsprozesse und Technologien
▸ Bau- und Installationsleistungen ▸ Dämmstoffe ▸ Gebäudetechnik	▸ Abwärmernutzung ▸ Druckluft- und Pumpsysteme ▸ Installations- und Beratungsleistungen ▸ Prozessleit- und MSR-Technik

Quelle: Prognos AG 2025

³³ Wichtig für das Erreichen einer absoluten Energieeinsparung ist, dass die freigewordenen Mittel in Anwendungen fließen, die eine geringere Energieintensität vorweisen als die ursprüngliche Aktivität. Andernfalls ergeben sich sogenannte Rebound-Effekte, die den Einsparungseffekt teilweise oder vollständig aufheben.

³⁴ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2025). *Merklblatt für das Energieeffizienzgesetz (EnEfg)*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_merkblatt_energieeffizienzgesetz.pdf



Der Bedarf an Energieeffizienzleistungen steigt stetig

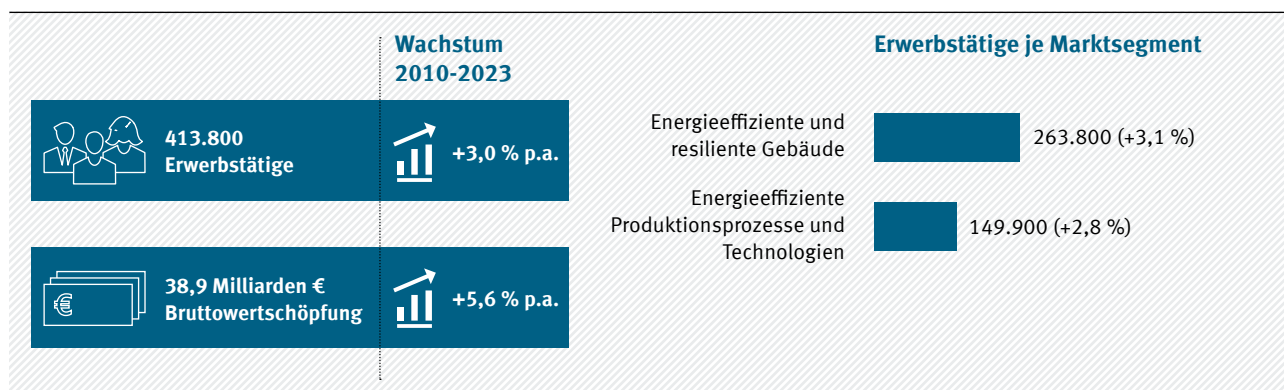
Seit 2010 entwickelte sich der Leitmarkt der Energieeffizienz überdurchschnittlich dynamisch: die Zahl der Erwerbstätigen stieg jährlich um 3,0 % auf über

400.000 Erwerbstätige im Jahr 2023 an. Noch dynamischer entwickelte sich die Bruttowertschöpfung, mit einem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs von 5,6 %.

Abbildung 25

Anzahl Erwerbstätige im Leitmarkt Energieeffizienz und nach Marktsegmenten in 2023

(in Klammern Wachstum p.a. seit 2010) und Bruttowertschöpfung (preisbereinigt)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamts
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Ein wesentlicher Bestandteil ist das Marktsegment Energieeffizienz und resiliente Gebäude, das unter anderem die Dämmung von Gebäuden umfasst. Seit 2010 erhöhten sich die Bau- und Installationsleistungen um etwa 50 %. Der Bau von Niedrigenergiehäusern wird von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) gefördert. Daneben finden energetische Sanierungen bei Altbauten statt. Damit steigt auch der Bedarf an den dafür notwendigen Produkten.

Auch für Unternehmen besteht der starke Anreiz, Energiekosten zu senken. Dieser Anreiz spiegelt sich in dem stabilen Wachstum des Marktsegmentes Energieeffiziente Produktionsprozesse und Technologien, das um durchschnittlich 2,8 % p.a. wuchs. Zum Beispiel verdoppelte sich seit 2010 die Zahl der Erwerbstätigen, die Dienstleistungen der Prozessoptimierung anbieten. Auch die Herstellung von Regel- und Vernetzungstechnik zeigt einen deutlichen Zuwachs der Erwerbstätigen. In Zukunft wird die Bedeutung dieser Lösungen weiter steigen, um die Industrie 4.0 mit größtmöglicher Energieeffizienz zu ermöglichen.

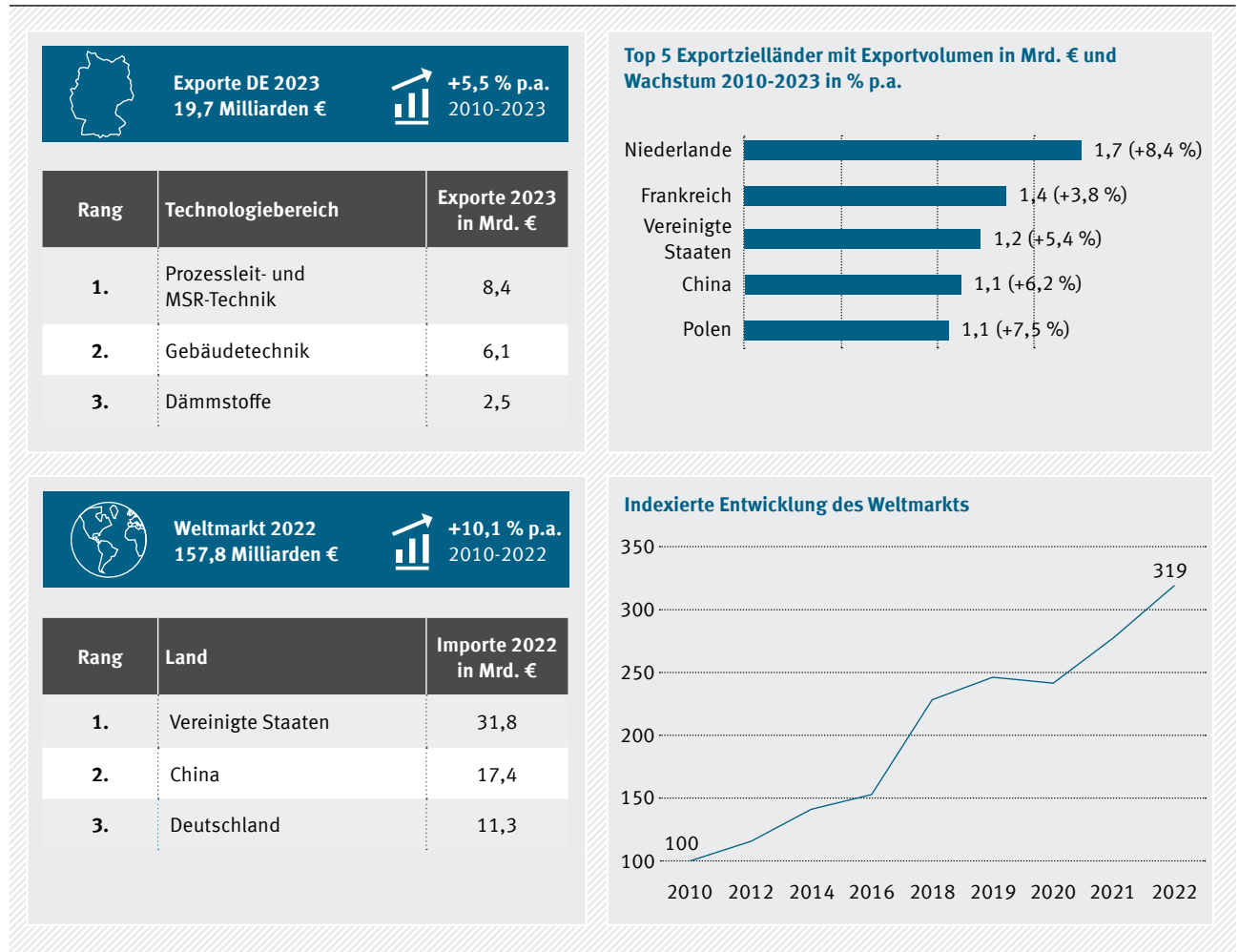
Potenziale für Export von Energieeffizienztechnologien nicht vollständig ausgeschöpft

Die weltweite Nachfrage nach Energieeffizienztechnologien boomt seit 2010: die Summe der weltweiten Importe (Weltmarkt) wuchs seit 2010 um über 10 % pro Jahr. Für das Jahr 2022 beträgt der Wert der gehandelten Güter fast 160 Milliarden Euro (Abbildung 26). Damit liegt das Wachstum des Leitmarktes weit über dem Durchschnitt der Gesamtwirtschaft und der restlichen GreenTech-Branche.

Auch die deutschen Exporte verzeichnen eine positive Entwicklung. Mit knapp 20 Milliarden Euro an Exporten deckte Deutschland ca. 12 % der weltweiten Nachfrage. Mit einem Wachstum der deutschen Exporte von 5,5 % p.a. schöpften die deutschen Unternehmen aber nicht das volle Maß der Nachfrageentwicklung aus. Der relevanteste Technologiebereich des Leitmarktes sind Prozessleit- sowie MSR-Technik, darunter fällt zum Beispiel Regel und Vernetzungstechnik für Produktionsprozesse. Dahinter folgt der Technologiebereich Gebäudetechnik, der mit rund 9 % p.a. besonders schnell wuchs. Zwischen 2010 und 2023 verdreifachten sich die deutschen Exporte von Gebäudetechnik fast.

Abbildung 26

Übersicht über die wichtigsten Kennzahlen des deutschen Außenhandels und des Weltmarkts für den Leitmarkt Energieeffizienz, nominale Werte



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet. MSR steht für Mess-, Steuer- und Regeltechnik.

Die wichtigsten Zielmärkte für deutsche Energieeffizienztechnologien weisen allesamt eine relevante Dynamik auf. In der europäischen Nachbarschaft bestehen weitere Chancen für die deutsche Exportwirtschaft. Besonders dynamisch zeigte sich der Trend für Rumänien: hierhin nahmen die Ausfuhren seit 2010 um 15 % p.a. zu. China war für Energieeffizienztechnologien seit 2010 ebenfalls ein dynamischer Zielmarkt für deutsche Exporte.

Interessant ist die Entwicklung der Ausfuhren nach Taiwan. Das Land ist einer der wichtigsten internationalen Standorte der Chip- und Halbleiter-Produktion. Entsprechend stark ist die Nachfrage nach Energieeffizienztechnologien. Die deutschen Exporte nach Taiwan stiegen seit 2010 rasant, über 90 % davon sind Prozessleit- und MSR-Technik. In kein anderes Ziel-

land wuchsen die Exporte mit ca. 20 % p.a. so stark. Die deutsche Energieeffizienz-Branche verzehnfachte ihre Ausfuhren nach Taiwan seit 2010. Damit belegt das südostasiatische Land mittlerweile den 9. Rang der deutschen Absatzmärkte im Leitmarkt Energieeffizienz. Im Technologiebereich der Prozessleit- und MSR-Technik ist Taiwan neben den Niederlanden sogar wichtigstes Exportziel für Deutschland.

In die USA wurden Energieeffizienzgüter im Wert von 32 Milliarden Euro eingeführt und damit über 20 % des globalen Handelsvolumens, fast doppelt so viel wie nach China auf Rang 2. Gegenüber 2010 vervierfachte sich die Nachfrage der USA. Aber auch China, Deutschland und die Niederlande als weitere zentrale Absatzmärkte wuchsen durchweg mit großem Tempo.

Anbieter von Effizienztechnologien für das Produzierende Gewerbe sind besonders innovativ

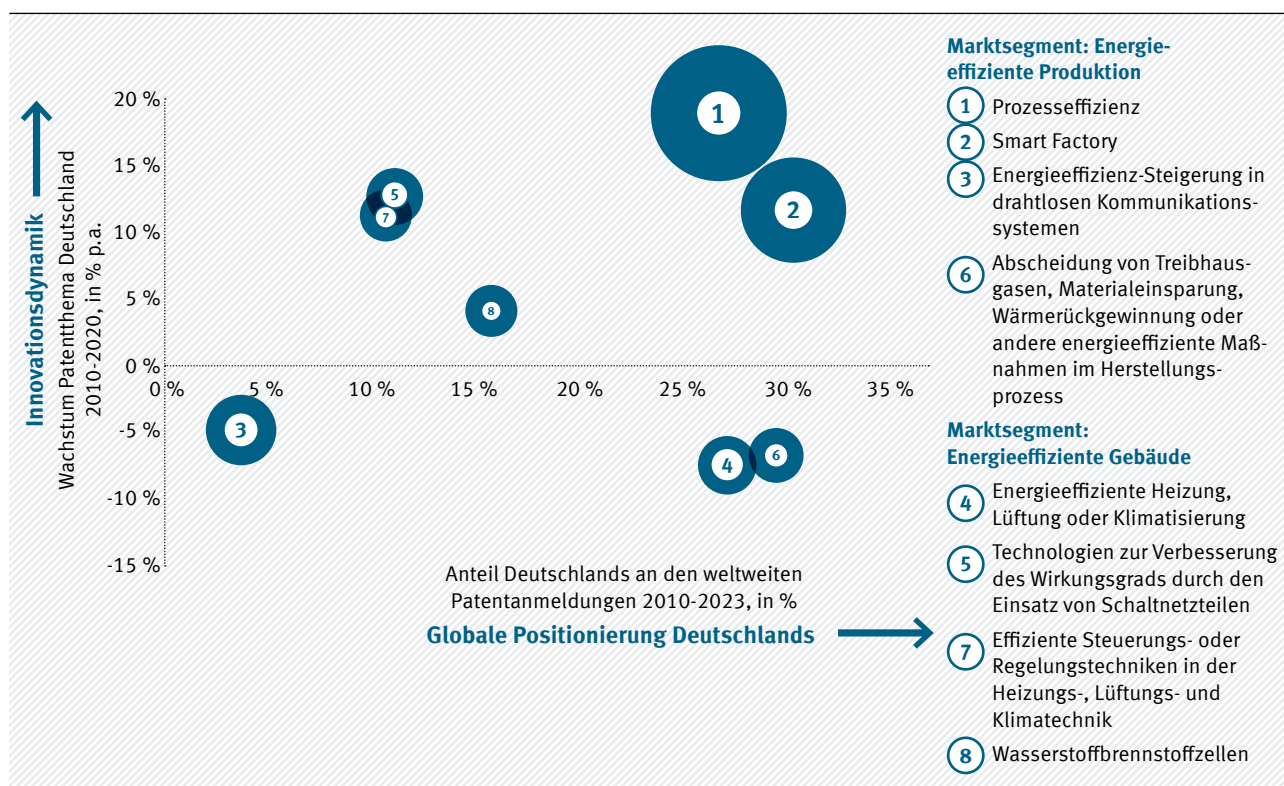
Die Innovationsleistung Deutschlands in diesem Leitmarkt nahm seit 2010 deutlich zu. Trotz einer bereits starken Position im internationalen Vergleich legten die deutschen Patentanmeldungen nochmals zu und erreichten 2020 über 40 % mehr Anmeldungen als 2010.

Knapp 60 % der deutschen Patente des Leitmarkts konzentrieren sich auf das Marktsegment zur energieeffizienten Optimierung von Produktionsprozessen. Mit einem Anteil von 14 % an den weltweiten Patenten liegt Deutschland auf dem zweiten Platz hinter den

USA. Besondere Bedeutung hat hierbei der Technologiebereich Prozessleit- und MSR-Technik mit über 50 % der deutschen Patente des gesamten Leitmarkts. Dieser Technologiebereich umfasst Technologien, die Fertigungsprozesse detailliert erfassen und steuernd eingreifen. Dieser Technologiebereich steht bei den deutschen Patentanmeldungen innerhalb der Green-Tech-Branche auf Platz 2. Während sich die jährlichen Patentanmeldungen im Technologiebereich Prozessleit- und MSR-Technik in Deutschland zwischen 2010 und 2020 verdoppelten, stiegen sie zum Vergleich in China um ein Achtfaches. Durch diese enorme Dynamik hat China Deutschland in diesem Technologiebereich auf Platz 3 verdrängt.

Abbildung 27

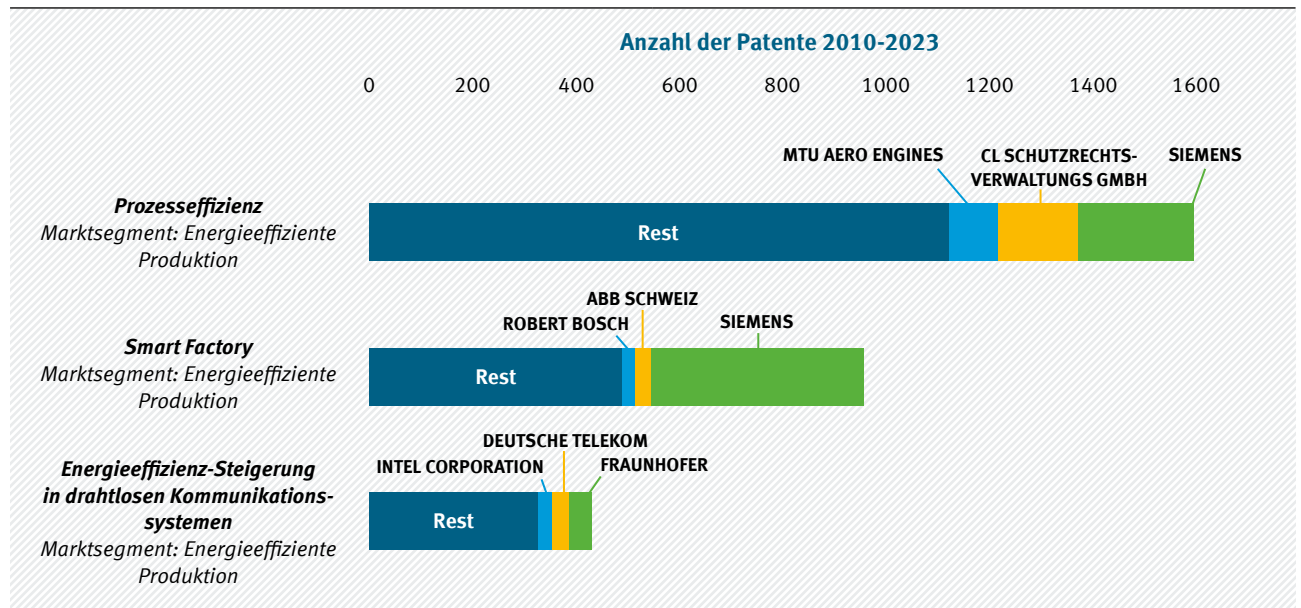
Innovationsdynamik und globale Positionierung bei den Top 8 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Energieeffizienz



Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Dargestellt sind die wichtigsten acht deutschen Patentthemen im Leitmarkt. Die Blasengröße symbolisiert die absolute Zahl der in Deutschland angemeldeten Patente im Zeitraum 2010-2023. Die x-Achse stellt für jedes Thema anhand des Anteils an den weltweiten Patentanmeldungen im Zeitraum 2010-2023 die globale Positionierung Deutschlands im Innovationswettbewerb dar. Die y-Achse zeigt anhand des Wachstums der Patentanmeldungen zwischen 2010 und 2020* die Innovationsdynamik der Themen auf. (*Für die Beurteilung der Entwicklung im Zeitverlauf werden die drei verfügbaren Jahre 2021-2023 ausgeklammert, um Verzerrungen auf Grund noch nicht abgeschlossener Patentanmeldungen zu vermeiden.)

Abbildung 28

Top 3 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Energieeffizienz mit Verteilung auf die bedeutendsten Innovationsakteure

Lesehilfe: Zu sehen sind die drei patentstärksten Themen des Leitmarktes in Deutschland. Die Länge der Balken repräsentiert die absolute Zahl der zwischen 2010-2023 in Deutschland angemeldeten Patente. Farblich hervorgehoben sind die drei Unternehmen, welche in Deutschland die meisten Patente zum jeweiligen Thema angemeldet haben. Bei den Anmelder*innen kann es sich neben Unternehmen oder Forschungseinrichtungen auch um Privatpersonen oder beauftragte Kanzleien handeln.

Eine hervorgehobene Rolle im Technologiebereich Prozessleit- und MSR-Technik hat das Patentthema *Prozesseffizienz*, das in Deutschland rund ein Fünftel der Patentanmeldungen des gesamten Leitmarkts auf sich vereint (Siehe Deep Dive). In dem Patentthema *Smart Factory* führt Deutschland mit einem Anteil von 30 % den globalen Innovationswettbewerb sogar an. Patentanmeldungen zu den beiden Themen *Prozesseffizienz* und *Smart Factory* wuchsen bis 2020 im Mittel mit je über 10 % jährlich deutlich.

Mit Blick auf die deutschen Unternehmen, die in dem gesamten Marktsegment Energieeffiziente Produktion besonders innovativ sind, nimmt Siemens mit etwa 22 % der angemeldeten deutschen Patente im Markt-

segment und 13 % der Anmeldungen im Leitmarkt eine Schlüsselrolle ein. Sowohl im Patentthema *Prozesseffizienz* als auch *Smart Factory* ist Siemens das wichtigste Unternehmen.

Im Marktsegment Energieeffiziente Gebäude ist Deutschland mit einem weltweiten Patentanteil von 15 % international nur knapp auf dem zweiten Platz hinter den USA. Besonders im Technologiebereich Gebäudetechnik konnten die deutschen Unternehmen ein konstant hohes Maß an energieeffizienten Entwicklungen hervorbringen. Ein Drittel der Patente des gesamten Leitmarkts sind diesem Technologiebereich zuzurechnen.

Einblicke in das Innovationsgeschehen zum Patentthema Prozesseffizienz

Prozesseffizienz macht ein gutes Fünftel der Patente des ganzen Leitmarktes aus. Um herauszufinden, welche konkreten Innovationen der deutschen Branche hinter dieser beeindruckenden Zahl stecken, wurden Abstracts der Patenttexte und Unternehmensberichte ausgewertet.

1500+

Patente
2010-2023

Über ein Viertel aller globalen Patente
kommen **aus Deutschland**

Energieeffiziente 3D-Drucker

Die durch 3D-Drucker möglich gemachte additive Fertigung kann z.B. in der Automobilindustrie Energie sparen, weil nur so viel Material bearbeitet wird, wie nötig ist, und keine Nachbearbeitung durchgeführt werden muss. Eine bestehende Herausforderung ist der hohe eigene Energieverbrauch der Geräte.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Technologien zur Überwachung und Steuerung in Echtzeit und Geräte zur selektiven Energieversorgung von Transmittern ermöglichen einen effizienten Betrieb
- ▶ Prozessverschlinkung durch die gleichzeitige Herstellung mehrerer Schichten
- ▶ Optimierte Konsolidierung der pulverförmigen Materialien durch eine Rotation der Energiestrahlen



Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Durch deutsche Forschung kann Strom- und Wärmenutzung besser überwacht und im Fall von Spitzenlasten gedrosselt werden.
- ▶ Recycelte Gase zum Vorwärmen
- ▶ Nutzung der Abwärme thermischer Prozesse

Energieeffizienz in thermischen Prozessen

Einige thermische Prozesse z.B. in der Stahl- und Zementproduktion gehören zu den energieintensivsten Fertigungsschritten und sind aktuell unvermeidlich.

Digitaler Zwilling

Ein digitaler Zwilling ist ein statistisches Modell eines Produktionsprozesses, welches auf Basis von Sensoren erstellt wird. Es kann helfen die Energieeffizienz stark zu verbessern, die Umsetzung ist jedoch komplex.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Integration digitaler Zwillinge in übergeordnete Cloud-Systeme
- ▶ Bündelung von Sensor-Daten, um Produktionsprozesse zu simulieren und Energieverbräuche zu optimieren



4.3. Erneuerbare Energiesysteme: Die Nachfrage steigt stark

Bis 2045 soll der deutsche Stromverbrauch aus erneuerbaren Energiequellen stammen. 2024 lag der Anteil der Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch bei 54,4 %.³⁵ Um die gesetzlichen Klimaschutzziele bis 2045 zu erreichen, bedarf es in den kommenden Jahren einer umfassenden Elektrifizierung verschiedener Prozesse, zum Beispiel in der Mobilität oder der

Wärmebereitstellung, was insgesamt mit einer Verdopplung des elektrischen Energieverbrauchs einhergehen könnte.³⁶ Um gleichzeitig die Netzstabilität zu gewährleisten, bedarf es umfassender Investitionen in das Stromnetz, in Speichertechnologien sowie in Technologien zur Flexibilisierung und Steuerung auf der Nachfrageseite (Demand Side Management).

Erneuerbare Energietechnologien sowie zugehörige Dienstleistungen und Systemtechnologien sind Teil der GreenTech-Branche. Diese gliedern sich in der Analyse in die folgenden vier Marktsegmente:

Abbildung 29

Marktsegmente Erneuerbare Energiesysteme

Elektrifizierung in der Industrie	Erneuerbare Energien	Intelligente Energiesysteme und Netze	Speichertechnologie
► Elektrische Prozessenergiebereitstellung	► Beratung und Forschung ► Bioenergie ► Geothermie ► Solar ► Wasserkraft ► Windenergie	► IKT für Energiesysteme ► Netzausbau und -betrieb ► Netztechnik	► Elektrochemische Speicherung ► Grüne Wasserstofftechnologien ► Mechanische Speicherung ► Thermische Speicherung

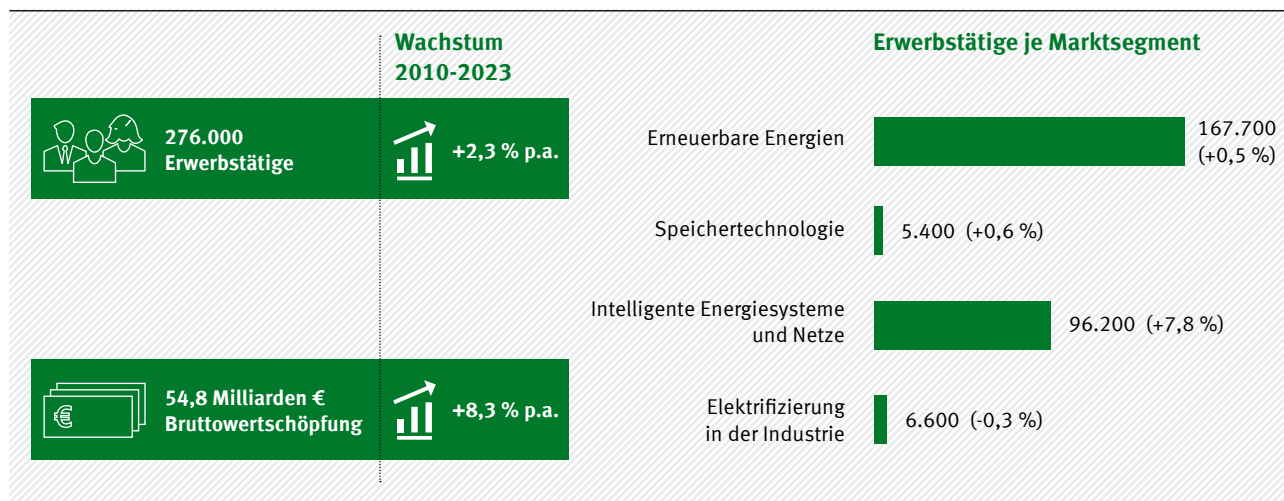
Quelle: Prognos AG 2025

³⁵ Umweltbundesamt (2025a). *Erneuerbare Energien in Zahlen*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen/>
³⁶ Vgl. zum Beispiel Bundesnetzagentur (2024). *Szenariorahmenentwurf zum Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/NEP/DL_Szenariorahmen/SR_Entwurf2025Strom.pdf?__blob=publicationFile&v=2



Abbildung 30

**Anzahl Erwerbstätige im Leitmarkt Erneuerbare Energiesysteme und nach Marktsegmenten in 2023
(in Klammern Wachstum p.a. seit 2010) und Bruttowertschöpfung (preisbereinigt)**



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamts
Angabe Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Der Markt für Erneuerbare Energien boomt seit 2014

Seit 2010 wuchs die Zahl der Erwerbstätigen des Leitmarktes Erneuerbare Energiesysteme in Deutschland um durchschnittlich 2,3 % pro Jahr. Zwischen 2012 und 2015 verlor die Branche eine Vielzahl von Erwerbstätigen, insbesondere in der deutschen PV-Branche. Ab 2015 setzte wieder ein positiver Trend ein. Zwischen 2018 und 2023 betrug das durchschnittliche jährliche Wachstum 6,3 %. Deutlich dynamischer ist das Wachstum der Bruttowertschöpfung, die zwischen 2010 und 2023 um durchschnittlich 8,3 % jährlich zunahm. Damit stechen die Erneuerbaren Energiesysteme deutlich hervor: kein anderer Leitmarkt der GreenTech-Branche erwirtschaftet so viel Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigen.

Wichtigstes Marktsegment sind die Erneuerbaren Energien mit knapp 170.000 Erwerbstätigen. Relevante Erwerbstätigkeit findet im Kontext des Betriebs von Windenergie- und PV-Anlagen durch verschiedene Dienstleistungen statt.

Im Zuge der Energiewende steigt auch der Investitionsbedarf in die Übertragungs- und Verteilnetze. Das Marktsegment Intelligente Energiesysteme und Netze vereint knapp 100.000 Erwerbstätige. Da der Anteil der Erneuerbaren Energien stark steigt, erhöhen sich die damit verbundenen Aktivitäten des Netzbetriebs.

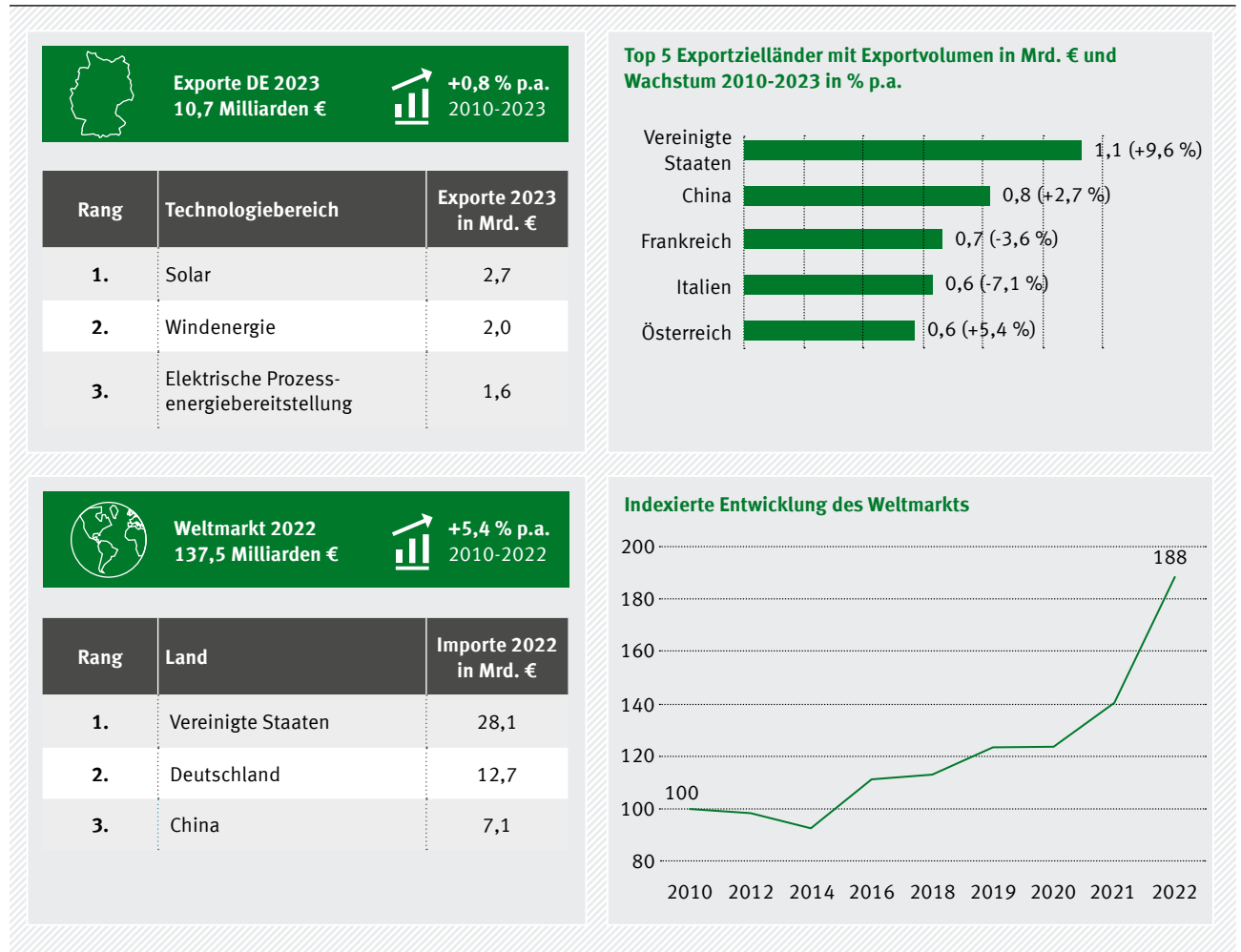
Eine geringe Bedeutung haben bisher die Marktsegmente Elektrifizierung der Industrie, sowie Speichertechnologien. Hier zeichnet sich jedoch ein deutliches Wachstum ab. Die installierte Leistung von Heimspeichern stieg innerhalb von zwei Jahren von 3,0 GW auf 10,1 GW im April 2025 an. Zusätzlich sind im deutschen Stromsystem gegenwärtig etwa 1,9 GW an Großspeicheranlagen angeschlossen.³⁷ Laut den Übertragungsnetzunternehmen liegen Anschlussanfragen für 226 GW vor.³⁸ Auch wenn diese Projekte noch nicht umgesetzt sind und teilweise Mehrfachanfragen vorliegen dürften, ist klar: in den kommenden Jahren wird die Speicherleistung massiv zunehmen.

³⁷ RWTH Aachen (2025). *Battery Charts*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://battery-charts.rwth-aachen.de/>

³⁸ Enkhardt, S. (2025). *Übertragungsnetzbetreibern liegen zum Jahreswechsel 650 Anschlussanfragen für große Batteriespeicher mit 226 Gigawatt vor*. PV-Magazin. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.pv-magazine.de/2025/01/13/uebertragungsnetzbetreibern-liegen-zum-jahreswechsel-650-anschlussanfragen-fuer-grosse-batteriespeicher-mit-226-gigawatt-vor/>

Abbildung 31

Übersicht über die wichtigsten Kennzahlen des deutschen Außenhandels und des Weltmarkts für den Leitmarkt Erneuerbare Energiesysteme, nominale Werte



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Deutschland ist Netto-Importeur von Green-Tech für Erneuerbare Energiesysteme

Die Entwicklung der deutschen Exporte ist gezeichnet von den fundamentalen Umbrüchen der Branche. Im Jahr 2010 deckten die deutschen Exporte des Leitmarktes Erneuerbare Energiesysteme ca. 13 % der weltweiten Nachfrage. Im Jahr 2022 waren es weniger als 8 %. Der drastische Verlust an Marktanteilen basiert auf einer auseinanderklaffenden Entwicklung der deutschen Exporte vis á vis der globalen Nachfrage. Die deutschen Exporte im Leitmarkt entwickelten sich seit 2010 mit einer Wachstumsrate von 0,8 % p.a. kaum, während sich die Nachfrageentwicklung auf dem Weltmarkt mit 5,4 % p.a. seit 2010 nahezu verdoppelte (188 %).

Die USA sind das wichtigste deutsche Exportziel für Erneuerbare Energiesysteme, mit fast 10 % jährlichem Wachstum und 1,1 Milliarden Euro Exportvolumen in 2023. Im Jahr 2010 lagen die Exporte mit Ziel USA noch auf Rang 8 und die wichtigsten Exportländer für Deutschland waren allesamt europäische Nachbarländer. Teilweise gingen die Exporte in diese wesentlich zurück, z. B. nach Italien (-7 % p.a.) oder Dänemark (-11 % p.a.). Für andere Nachbarländer wie Österreich und Polen, stieg der Export deutlich an.

Die wichtigsten Exportprodukte sind Solar- und Windenergieanlagen. Zusammen mit anderen Technologien des Marktsegments Erneuerbare Energien machen sie über 50 % der Exporte aus. Im Jahr 2010 lag der

Anteil mit ca. 70 % allerdings noch deutlich höher. Besonders die Solar-Technologien nahmen ab, während andere Marktsegmente des Leitmarktes starke Zuwachsraten verzeichneten, etwa die Intelligenten Energiesysteme und Netze sowie Speichertechnologien.

Im globalen Wettbewerb nimmt China eine Schlüsselrolle bei der Herstellung von Erneuerbarer Energien-Technologien ein, insbesondere bei Solarmodulen. Seit 2010 wurden dort über 50 Milliarden US-Dollar in Produktionskapazitäten für Solarmodule investiert, zehnmal mehr als in Europa. Entlang sämtlicher Produktionsschritte kontrolliert China heute über 80 % der weltweiten Kapazitäten und plant einen weiteren Zubau von Fabriken.³⁹ Chinesische Hersteller erzielten erhebliche Skaleneffekte und senkten darüber den Preis eines PV-Moduls deutlich.

Die globale Nachfrage wird von zwei Technologiebereichen dominiert: Solarenergie und Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) für Energiesysteme. Solartechnologien nehmen mit 50 Milliarden Euro 36 % der Leitmarktnachfrage ein, der Bereich IKT für Energiesysteme weitere 21 %. Die globale Import-Nachfrage dominierte 2023 die USA, gefolgt von Deutschland. China hingegen deckt den stark steigenden Bedarf an Erneuerbarer-Energien-Anlagen durch eigene Produktionskapazitäten, entsprechend gingen die Importe seit 2010 zurück. Die USA dagegen steigerten ihre Importe kontinuierlich und verzeichneten allein 2022 einen Zuwachs um 10 Milliarden Euro auf 28 Milliarden Euro. Deutschlands Nachfragevolumen steigerte sich auf fast 13 Milliarden Euro.

Windenergie löst PV als deutschen Innovationstreiber ab

Deutschland ist in der Forschung und Entwicklung in allen Bereichen des Leitmarktes Erneuerbarer Energiesysteme gut aufgestellt. So befinden sich die drei Marktsegmente⁴⁰ Erneuerbare Energien, Intelligente Energiesysteme und Netze und Speichertechnologie unter den innovationsstärksten fünf der gesamten deutschen GreenTech-Branche.

Auch global tut sich Deutschland als Innovationstreiber des Marktsegmentes Erneuerbare Energien hervor. 23 % der Patente des Technologiebereichs Windenergie kommen aus der Bundesrepublik. Damit liegt Deutschland fast gleichauf mit dem innovationsstärksten Dänemark und verantwortet fast doppelt so viele Patente wie die USA. Auch in dem noch größeren Marktsegment Solar-Technologien ist Deutschland auf Platz 2 hinter den USA platziert.

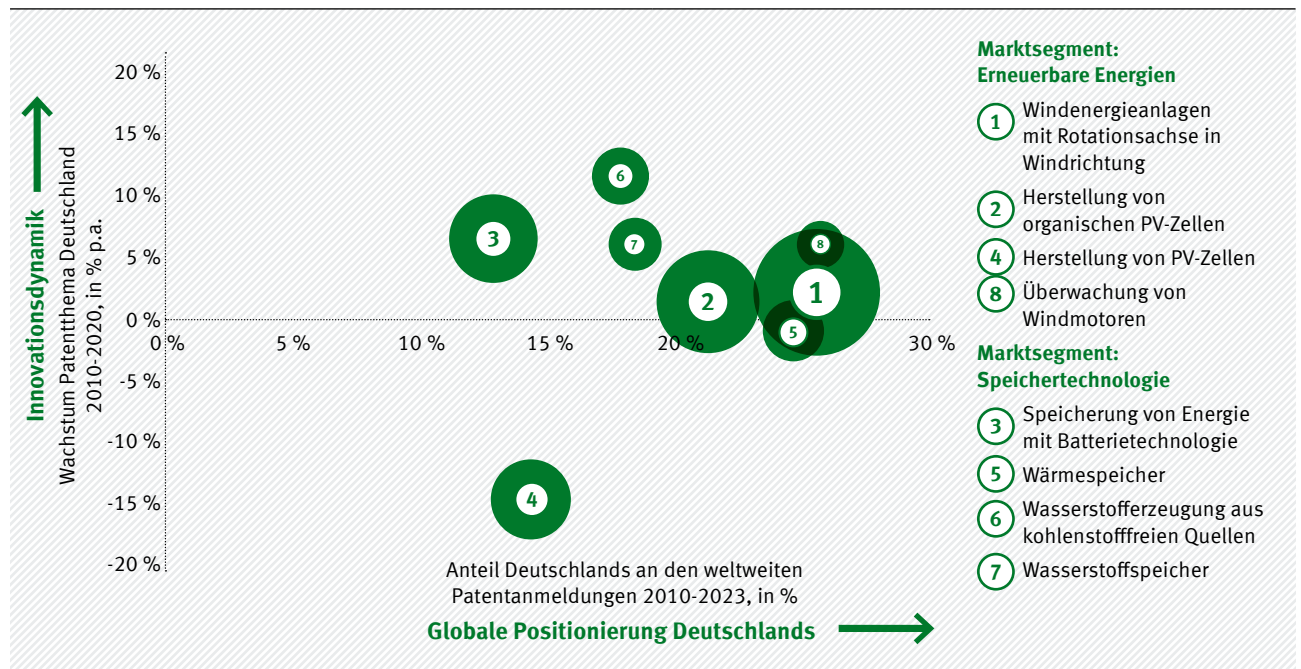
Hinter den scheinbar ähnlichen Ergebnissen für die beiden Schlüsseltechnologien Erneuerbarer Energien verbergen sich jedoch unterschiedliche Dynamiken. Die Innovationskraft der deutschen Windenergiebranche ging zwar 2014 zurück, erlebte aber seit 2017 wieder einen signifikanten Aufschwung. Auch die Patente im Solar-Technologiebereich brachen 2014 ein, erholten sich von diesem Rückgang aber nie wieder. Ein wesentlicher Grund war die abrupte Kürzung der EEG-Förderung von 2013, wodurch die Technologie für deutsche Unternehmen schlagartig unattraktiv wurde. Gleichzeitig wuchs die Innovativität des Solar-Technologiebereichs in China konstant. Während China im Laufe des Jahres 2010 erst knapp ein Fünftel der deutschen Patente dieses Technologiebereichs anmeldete, schloss es 2020 fast vollständig zu Deutschland auf.

39 International Energy Agency (2022). *Solar PV Global Supply Chains*. Executive Summary. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains/executive-summary>

40 Anders als für die wirtschaftlichen Kennzahlen kann das Marktsegment Elektrifizierung in der Industrie nicht in der Innovationsanalyse abgedeckt werden. Deshalb handelt es sich in diesem Kapitel nur um 3 Marktsegmente des Leitmarkts.

Abbildung 32

Innovationsdynamik und globale Positionierung bei den Top 8 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Erneuerbare Energiesysteme

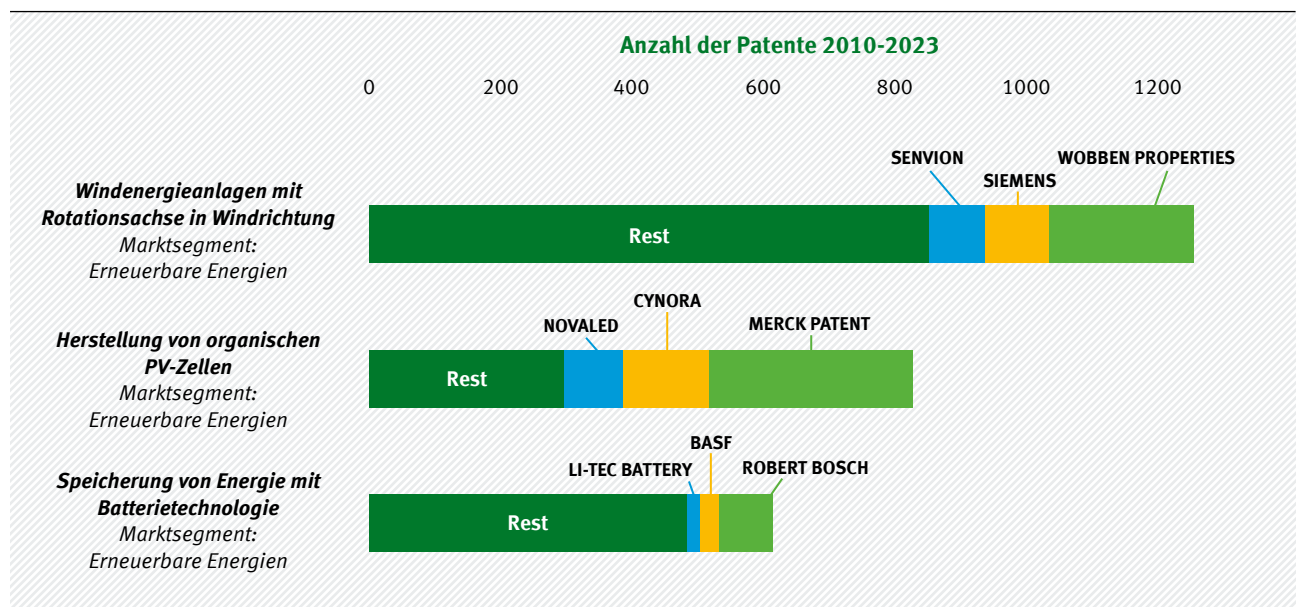


Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Dargestellt sind die wichtigsten acht deutschen Patentthemen im Leitmarkt. Die Blasengröße symbolisiert die absolute Zahl der in Deutschland angemeldeten Patente im Zeitraum 2010-2023. Die x-Achse stellt für jedes Thema anhand des Anteils an den weltweiten Patentanmeldungen im Zeitraum 2010-2023 die globale Positionierung Deutschlands im Innovationswettbewerb dar. Die y-Achse zeigt anhand des Wachstums der Patentanmeldungen zwischen 2010 und 2020* die Innovationsdynamik der Themen auf (*Für die Beurteilung der Entwicklung im Zeitverlauf werden die drei verfügbaren Jahre 2021-2023 ausgeklammert, um Verzerrungen auf Grund noch nicht abgeschlossener Patentanmeldungen zu vermeiden.)

Abbildung 33

Top 3 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Erneuerbare Energiesysteme mit Verteilung auf die bedeutendsten Innovationsakteure



Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Zu sehen sind die drei patentstärksten Themen des Leitmarktes in Deutschland. Die Länge der Balken repräsentiert die absolute Zahl der zwischen 2010-2023 in Deutschland angemeldeten Patente. Farblich hervorgehoben sind die drei Unternehmen, welche in Deutschland die meisten Patente zum jeweiligen Thema angemeldet haben. Bei den Anmeldern*innen kann es sich neben Unternehmen oder Forschungseinrichtungen auch um Privatpersonen oder beauftragte Kanzleien handeln. Wobben Properties verwaltet Patente und Markenrechte des Enercon-Konzerns.



Das wichtigste Patentthema im deutschen GreenTech-Leitmarkt Erneuerbarer Energiesysteme sind Weiterentwicklungen der klassischen Windenergieanlage. Deutschland erreicht hier einen beachtlichen Weltmarktanteil von 26 % (Abbildung 32). Zentral sind vor allem Onshore-Windenergieanlagen. So ist Enercon als einer der größten Hersteller von solchen Windenergieanlagen der mit Abstand größte Innovator des Technologiebereichs in Deutschland. Allerdings meldete Enercon global 40 % weniger Patente im Zeitraum 2010-2023 an, als das weltweit größte Unternehmen dieses Sektors, Vestas.

Bei dem nach den *Windenergieanlagen* nächststärksten deutschen Patentthema des Leitmarkts, *Organische Solarzellen*, stammen 21 % der globalen Patente aus Deutschland. Bei organischen Solarzellen handelt es sich um eine recht neuartige Technologie, die verspricht, Herstellungs- und Installationskosten zu senken sowie auf kritische Materialien zu verzichten. Damit etablierte sich Deutschland auf einem Zukunftsmarkt als wichtiger Innovator, in dem sonst nur Japan und Korea nennenswerte Präsenz haben. Das ist insbesondere der Aktivität des pharmazeutisch-chemischen Unternehmens Merck zuzuschreiben: Mit 311 Patenten ist es das innovationsstärkste deutsche Unternehmen des gesamten Leitmarkts.

Speichertechnologie ist das zweitstärkste Marktsegment der gesamten deutschen GreenTech-Branche.

Besonders innovativ ist Deutschland im Technologiebereich Elektrochemische Speicherung von Energie: Über ein Viertel aller deutschen Patente im Leitmarkt Erneuerbare Energiesysteme entfällt hierauf. Allerdings sind mehrere Industrienationen, insbesondere Japan, Südkorea und die USA noch stärker auf diese Technologie spezialisiert. Daher kann sich Deutschland nur in der Nische des Patentthemas *Wärmespeicherung* mit einem Weltmarktanteil von 25 % deutlich von der internationalen Konkurrenz abheben.

Mit einer jährlichen Wachstumsrate von 6 % zwischen 2010 und 2020 sind *Wasserstoffspeicher* eines der dynamischsten unter den Top-8 Patentthemen des Leitmarkts. Zentrale deutsche Unternehmen hinter diesen Patenten sind Linde und BMW. Beide sind strategisch auf die parallele Nutzung von Wasserstoff und Strom als Energiequelle ausgerichtet und machen sich insbesondere im Rahmen des Hydrogen Council gegenüber der Politik für einen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur stark.

Beim Marktsegment Intelligente Energiesysteme und Netze handelt es sich zwar um das kleinste, aber auch dynamischste Marktsegment des Leitmarkts. Getrieben ist diese Entwicklung durch die wachsende Anzahl an Innovationen im Technologiebereich Netzausbau und -betrieb. Während 2010 noch 13 % der Patente im deutschen Leitmarkt auf diese Technologie zurückgingen, waren es 2020 schon 23 %.

Einblicke in das Innovations- geschehen zum Patentthema Windenergieanlagen

1200+

Patente
2010-2023

Und damit **zweitinnovativstes Thema**
der deutschen Green-Tech-Branche

Die Weiterverwertung von Kunststoff und Gummi ist ein wichtiger Hebel, um Ressourcen zu schonen und das Klima zu schützen. In diesem Abschnitt wird beleuchtet, welche Innovationen aus Deutschland die starke Dynamik dieses Patentthemas der letzten Jahre getrieben hat. Dafür haben wir Abstracts der Patenttexte und Unternehmensberichte der wichtigsten deutschen Akteure untersucht.

DEEP DIVE

Konstruktion der Windenergieanlagen

Die grundlegende Technologie für die Windenergieanlagen ist bereits seit längerem im Einsatz. In den letzten Jahren konnten jedoch nochmals erstaunliche Fortschritte bei Energieausbeute und Langlebigkeit erreicht werden.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Mehr Effizienz und Schutz vor Überlastung durch Einstellbarkeit des Rotorblattwinkels und Regulierung der Motorlast
- ▶ Aerodynamische Vorrichtungen an Rotorblättern: Durchlässige Klappen und drehbare Flossen
- ▶ Stabilere und langlebigere Türme
- ▶ Temperaturmanagement kritischer Komponenten zur Steigerung der Haltbarkeit



Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Analyse der Umgebungsparameter: Turbulenzintensität, Luftdichte, Lufttemperatur und Scherung
- ▶ Methoden zur exakteren Vorhersage der Windbedingungen
- ▶ Technologien zur Regelung von Drehzahl und Blattwinkel

Steuerung und Optimierung

Die zentrale Steuerung von Windenergieanlagen ermöglicht einen zuverlässigen und konstanten Beitrag zum Energienetz. Notwendig sind dafür sowohl Systeme zur Auswertung von Umweltbedingungen als auch zur effizienten Steuerung der Windräder.

Power-to-X

Damit überschüssige Windenergie, die nicht in das Stromnetz eingespeist werden kann, nicht verloren geht, kann diese in andere Energieträger umgewandelt werden. Bei der notwendigen Integration von Power-to-X handelt es sich durch die Anforderung der vernetzten Kommunikation mit bestehenden Systemen um ein komplexes Unterfangen.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Verfahren zur Herstellung von synthetischem Brennstoff durch Windkraft
- ▶ Integration von Power-to-Gas in bestehende und neue Windkraftanlagen



4.4. Minderungs- und Schutztechnologien: Erhalt von Böden und Luft – sowie gesellschaftlich relevante Infrastrukturen

Der Leitmarkt umfasst Güter und Dienstleistungen, die negative Umweltauswirkungen an Böden und Luft reduzieren, sowie Schallemissionen senken.

Darüber hinaus gewinnt Klimaanpassung an Bedeutung aufgrund der sich verändernden Klimabedingungen. Entsprechend müssen schon heute Infrastrukturen angepasst werden, etwa durch einen verbesserten Hochwasserschutz.

Die Analyse gliedert Minderungs- und Schutztechnologien in die folgenden Marktsegmente und Technologiebereiche:

Abbildung 34

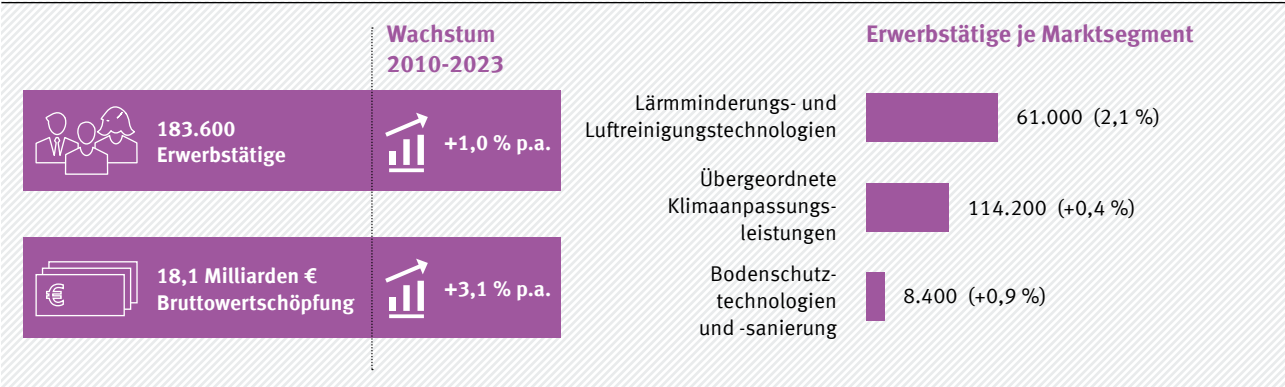
Marktsegmente Minderungs- und Schutztechnologien

Bodenschutztechnologien und -sanierung	Lärmminderungs- und Luftreinigungstechnologien	Übergeordnete Klimaanpassungsleistungen
▶ Bodensanierung ▶ Bodenschutztechnologien	▶ Abgasrückführungssysteme ▶ Filtertechnik und Katalysatoren ▶ Lärmschutz in Gebäuden ▶ Messtechnik und Dienstleistungen ▶ Verkehrlicher Lärmschutz	▶ Übergeordnete Klimaanpassungsleistungen

Quelle: Prognos AG 2025

Abbildung 35

Anzahl Erwerbstätige im Leitmarkt Minderungs- und Schutztechnologien und nach Marktsegmenten in 2023 (in Klammern Wachstum p.a. seit 2010) und Bruttowertschöpfung (preisbereinigt)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamts
Angestellte Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Marktsegment Klimaanpassung wird zukünftig erheblich wachsen

Der Leitmarkt zeigt mit etwa 1 % Wachstum p.a. eine langsame Entwicklung bei der Zahl der Erwerbstätigen. Mit gut 180.000 Erwerbstätigen ist der Leitmarkt der kleinste der gesamten GreenTech-Branche. Gleiches gilt mit etwa 18 Milliarden Euro auch für die Bruttowertschöpfung.

Das leichte Wachstum des Leitmarktes in Hinblick auf Beschäftigung wird insbesondere durch Lärmminderungs- und Luftreinhaltungstechnologien geprägt, die um 2,1 % p.a. wuchsen. Hier stieg zum Beispiel die Zahl der Beschäftigten, die Baudienstleistungen zum Schallschutz erbringen signifikant an.

Im Unterschied dazu zeigt das Marktsegment der Übergeordneten Klimaanpassungsleistungen zwar eine relevante Zahl an Erwerbstätigen, das jährliche Wachstum fiel jedoch mit 0,4 % deutlich geringer aus. Erfasst werden zum Beispiel Architekturdienstleistungen, die klimawandelangepasste Infrastrukturen planen. In den kommenden Jahren werden die Leistungen dieses Marktsegments deutlich an Bedeu-

tung gewinnen, um zu erwartende Schäden durch den Klimawandel zu begrenzen bzw. auszugleichen.⁴¹

Globale Nachfrage nach Minderungstechnologien sehr dynamisch

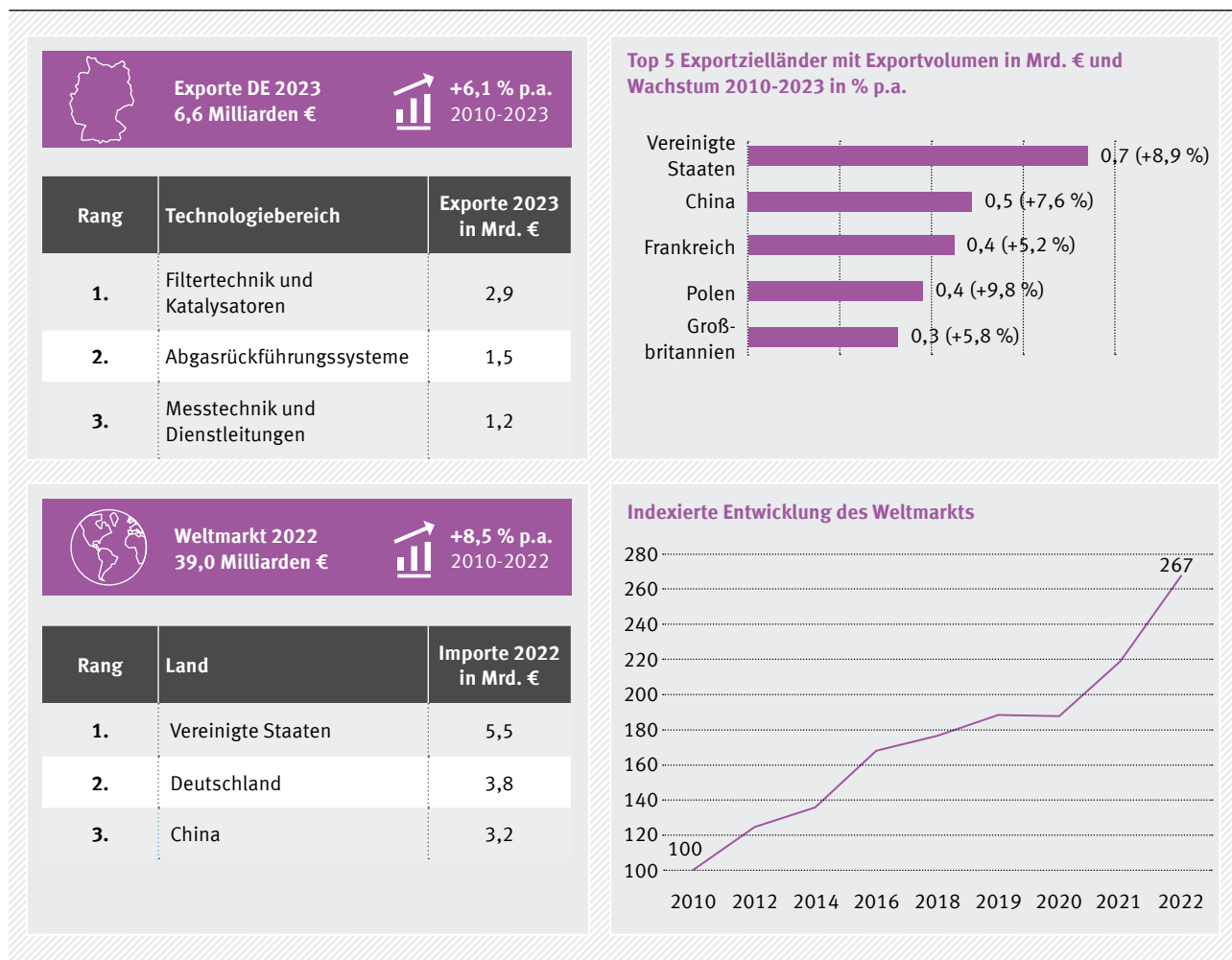
Der Außenhandel mit Minderungs- und Schutztechnologien zeigt sich sowohl für die deutschen Exporte als auch den Weltmarkt überdurchschnittlich dynamisch. Fast 17 % der weltweiten Nachfrage deckten 2022 die deutschen Exporte. Die weltweite Nachfrage erreichte mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 8,5 % ein Niveau von fast 270 % im Vergleich zu 2010. Besondere Treiber dieser Dynamik waren die Technologiebereiche Filtertechnik und Katalysatoren sowie Messtechnik und Dienstleistungen, die sich jeweils verdreifachten. Gleichzeitig stellen die beiden Bereiche zusammen mit den Abgasrückführungssystemen auch für Deutschland die wichtigsten Exportprodukte dar (Abbildung 36). Bei Filtertechnik und Katalysatoren wuchsen die deutschen Exporte fast gleichauf mit dem Weltmarkt um 8,1 % p.a. Auch in den Jahren der COVID-19-Pandemie wuchsen die deutschen Exporte kontinuierlich an, was insbesondere auf den gestiegenen Bedarf an Filtertechnik zurückzuführen ist.

⁴¹ Das IPCC liefert verschiedene Szenarien des Anstiegs der mittleren globalen Temperatur auf Basis der bereits verursachten und zukünftigen Treibhausgas-Emissionen, sowie damit verbundener Schadenswahrscheinlichkeiten. Siehe IPCC, 2023: *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>. Bereits für die bis heute verursachten Treibhausgas-Emissionen schätzen Wissenschaftler*innen eine durchschnittliche Einkommensreduktion in Europa von 11 % innerhalb der nächsten 26 Jahre. Siehe Kotz, M., Levermann, A., Wenz, L. (2024). *The economic commitment of climate change*. Nature 628, 551–557. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>



Abbildung 36

Übersicht über die wichtigsten Kennzahlen des deutschen Außenhandels und des Weltmarkts für den Leitmarkt Minderungs- und Schutztechnologien, nominale Werte



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes
Angewandene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Die USA sind der wichtigste Abnehmermarkt für deutsche Exportprodukte und zeigen zudem ein sehr dynamisches Wachstum: mit fast 9 % p.a. übertrifft die Entwicklung der US-Importe aus Deutschland sogar das globale Nachfrageplus der USA in diesem Leitmarkt. Darüber hinaus sind Frankreich und China für diesen Leitmarkt konstant starke Abnehmermärkte. Die Nachfrage nach Produkten deutscher Firmen übertreffen die chinesischen Bestrebungen, heimische Produzenten zu stärken. Polen fällt auf Rang 4 der Abnehmermärkte mit einem hohen Wachstum von fast 10 % p.a. auf.

Die Nachfrage auf dem Weltmarkt wird angeführt von den USA, Deutschland und China. Auffallend ist Mexiko mit ca. 1,75 Milliarden Euro auf Rang 4 der größten

Märkte. Die mexikanischen Importe wuchsen bereits bis 2021 stetig an und nahmen 2022 explosionsartig um mehr als 70 % zu. Aus deutscher Exportperspektive wuchsen die Ausfuhren nach Mexiko zwar mit jährlich 10 % ebenfalls überdurchschnittlich stark, befinden sich aber noch auf Rang 21.

Für den größten Technologiebereich des Leitmarktes, Filtertechnik und Katalysatoren stieg die Nachfrage in den USA besonders 2020 und 2021 deutlich. China auf der anderen Seite importierte 2022 im Vergleich zu 2019 sogar etwas weniger Güter dieses Technologiebereichs. Durch eine Verdopplung der Nachfrage im Vergleich zu 2021 lag Mexiko 2022 vor China als dritt-wichtigster Abnehmer.



Starke deutsche Spezialisierung auf Luftreinigungstechnik auf dem Weltmarkt

Innerhalb des Leitmarktes der Minderungs- und Schutztechnologie nimmt das Marktsegment Luftreinigung hinsichtlich der Patentanmeldungen eine dominante Rolle ein: Es macht 90 % des Leitmarkts aus. Damit erreicht Deutschland international hinter den USA und Japan mit einem Weltpatentanteil von 18 % Platz 3. Patente stammen wiederum fast ausschließlich aus dem Technologiebereich Filtertechnik und Katalysatoren.

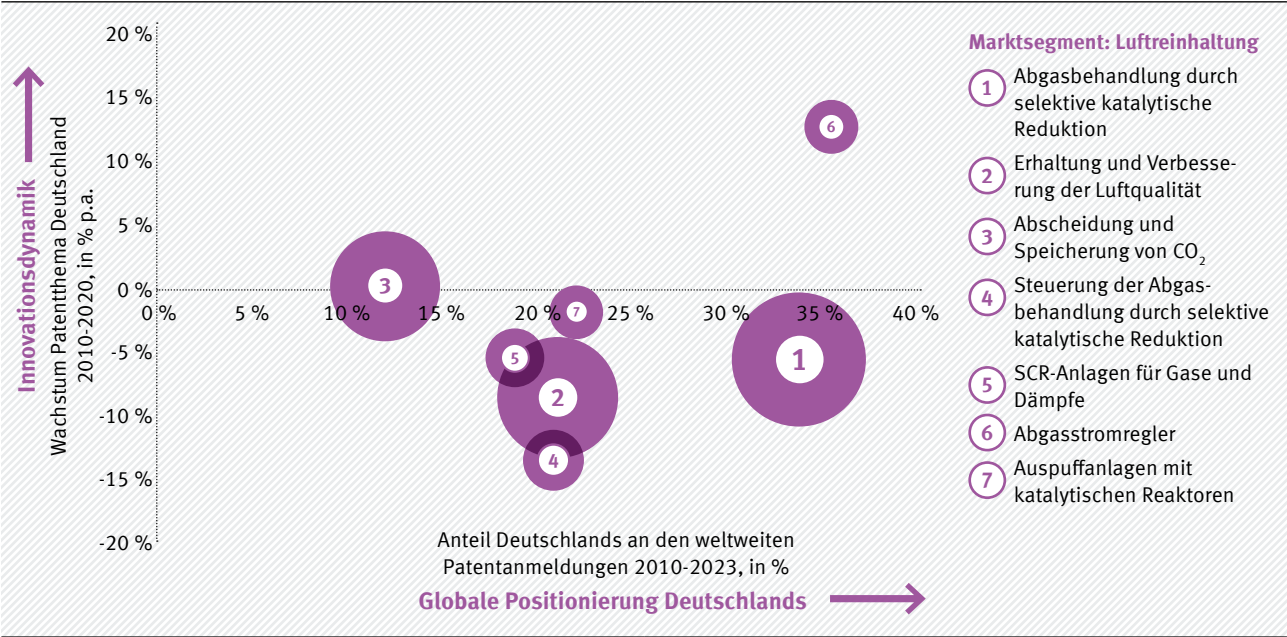
Als zentrales Patentthema der Luftreinigung sticht die *Abgasbehandlung durch selektive katalytische Reduktion* hervor, also eine Technologie zur Stickoxid-Reduktion. Deutschland meldete hier im Zeitraum 2010-2023 mehr als doppelt so viele Patente wie das zweitplatzierte Japan an. Auch beim thematisch stark angrenzenden Thema *Erhaltung und Verbesserung der Luftqualität* nimmt Deutschland mit 21 % der globalen Patente die Spitzenposition ein. Bosch ist bei beiden Themen sowohl innerhalb der deutschen GreenTech-Branche als auch global das patentstärkste Unternehmen.

Zusätzlich nimmt die *Abscheidung und Speicherung von CO₂* (auch Carbon Capture, Use and Carbon Capture and Storage – CCU/CCS), insbesondere unvermeidlicher Treibhausgas-Emissionen z. B. in der Stahl- und Zementproduktion, als drittstärkstes Patentthema im Leitmarkt eine wichtige Rolle ein. Besonders aktiv ist hier das Unternehmen Linde, das fast ein Viertel der deutschen Patente zum Patentthema im Beobachtungszeitraum anmeldete. Außerdem kann Deutschland in dem eng verwandten und mit 13 % Wachstum p.a. sehr dynamischen Patentthema *Abgasstromregler* – also Regelungsbauteile, die das Volumen von Abgasen drosseln können – einen Weltpatentanteil von 36 % und die Spitzenposition einnehmen.

Von den verbleibenden Marktsegmenten wird in Deutschland vor allem Lärmschutz- und Minderung bespielt. Es macht fast vollständig die verbleibenden 10 % der Patente des Leitmarkts aus. In dieser Nische etablierte sich Deutschland mit einem Weltpatentanteil von 20 % deutlich vor Frankreich und den USA als Innovationführer.

Abbildung 37

Innovationsdynamik und globale Positionierung bei den Top 8 Patentthemen Deutschlands im
Leitmarkt Minderungs- und Schutztechnologien

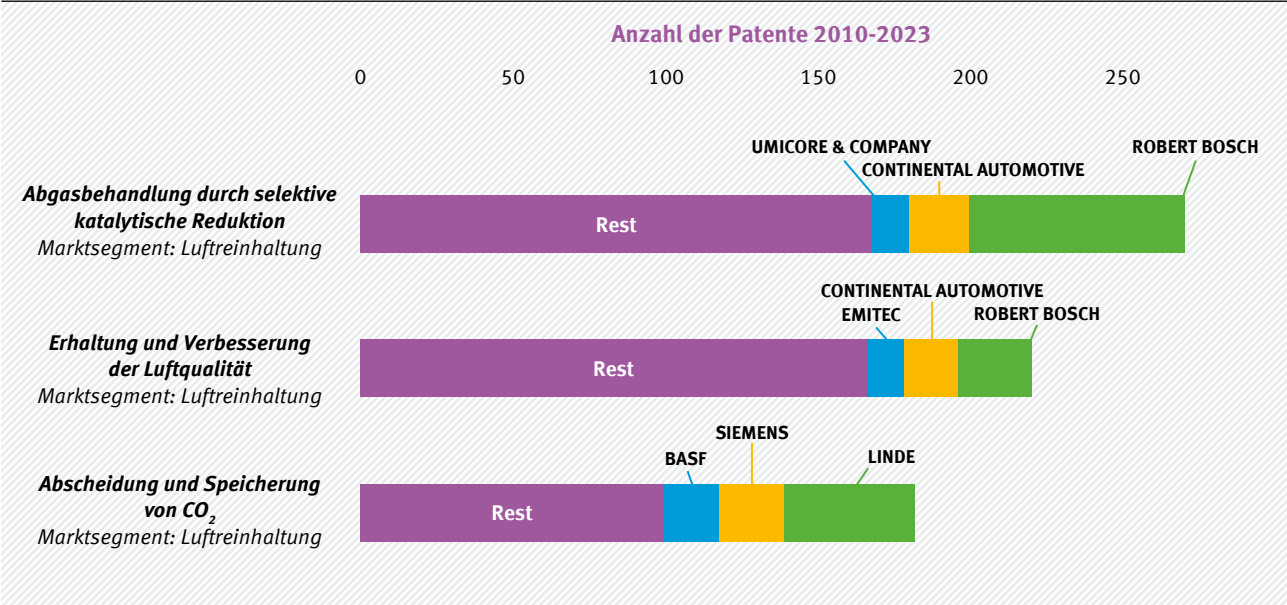


Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Dargestellt sind die wichtigsten sieben deutschen Patentthemen im Leitmarkt. Die Blasengröße symbolisiert die absolute Zahl der in Deutschland angemeldeten Patente im Zeitraum 2010-2023. Die x-Achse stellt für jedes Thema anhand des Anteils an den weltweiten Patentanmeldungen im Zeitraum 2010-2023 die globale Positionierung Deutschlands im Innovationswettbewerb dar. Die y-Achse zeigt anhand des Wachstums der Patentanmeldungen zwischen 2010 und 2020* die Innovationsdynamik der Themen auf. (*Für die Beurteilung der Entwicklung im Zeitverlauf werden die drei verfügbaren Jahre 2021-2023 ausgeklammert, um Verzerrungen auf Grund noch nicht abgeschlossener Patentanmeldungen zu vermeiden.)

Abbildung 38

Top 3 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Minderungs- und Schutztechnologien mit Verteilung auf die
bedeutendsten Innovationsakteure



Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Zu sehen sind die drei patentstärksten Themen des Leitmarktes in Deutschland. Die Länge der Balken repräsentiert die absolute Zahl der zwischen 2010-2023 in Deutschland angemeldeten Patente. Farblich hervorgehoben sind die drei Unternehmen, welche in Deutschland die meisten Patente zum jeweiligen Thema angemeldet haben. Bei den Anmelder*innen kann es sich neben Unternehmen oder Forschungseinrichtungen auch um Privatpersonen oder beauftragte Kanzleien handeln.

4.5. Nachhaltige Forst- und Landwirtschaft: Stärkung der Regenerationsfähigkeit ökologischer Systeme

Die nachhaltige Forst- und Landwirtschaft beinhaltet ressourcenschonende Praktiken, die die langfristige

Produktivität agrarischer und forstlicher Systeme fördert. Entlang von sechs Marktsegmenten erfasst die Analyse umweltfreundliche Praktiken in der Landwirtschaft, sowie den Anteil der FSC-zertifizierten Forstwirtschaft⁴² und die Bereitstellung von Werkstoffen aus Holz:

Abbildung 39

Marktsegmente Nachhaltige Land und Forstwirtschaft

Holzbearbeitung und Holzwerkstoffe	Nachhaltige Forstwirtschaft	Nachwachsende Holzbaustoffe	Naturschutz-orientierte Bewirtschaftung	Nachhaltige Landwirtschaft	Umweltfreundliche Technologien für die Landwirtschaft
► Sägeindustrie ► Holzwerkstoffe	► Forstwirtschaft	► Holzbaustoffe	► Naturschutz-orientierte Bewirtschaftung	► Nachhaltige Landwirtschaft	► Grüne Agrartechnologien ► Neue Formen der Landwirtschaft

Quelle: Prognos AG 2025

42 Neben dem FSC-Siegel bestehen mit der PEFC und Naturland Zertifizierung zwei weitere Systeme zur Bewertung nachhaltiger Waldbewirtschaftung. Im Rahmen der vorliegenden Analyse wurde lediglich die FSC-Zertifizierung als Kriterium der Nachhaltigkeit herangezogen. Vgl. Umweltbundesamt (2024b). *Nachhaltige Waldwirtschaft*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/nachhaltige-waldwirtschaft#die-vielfaltigen-funktionen-des-waldes>





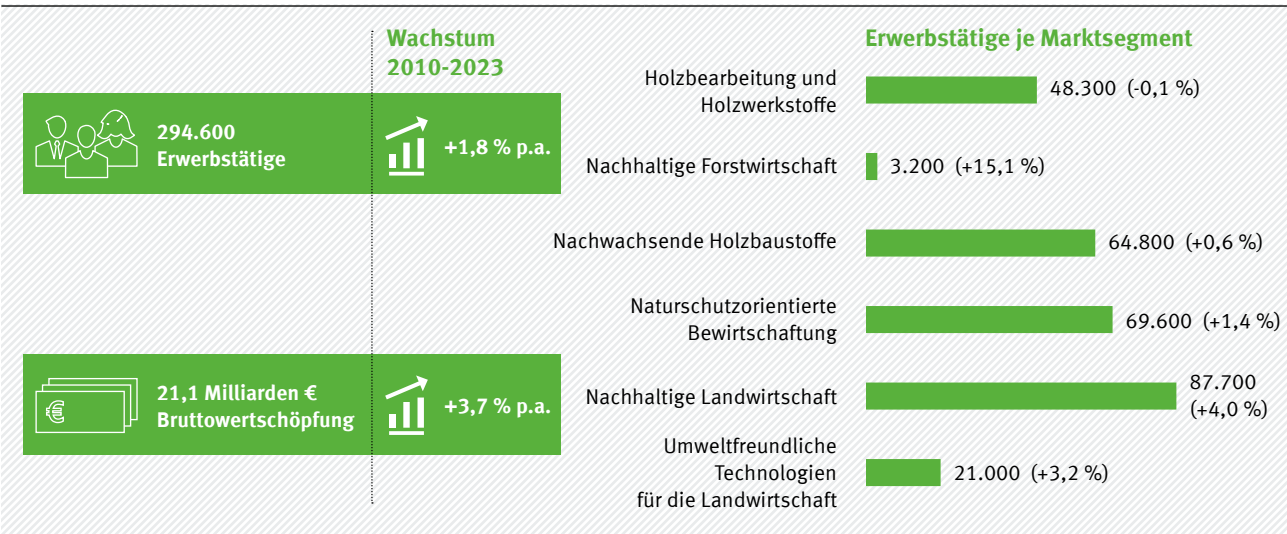
Die nachhaltige Landwirtschaft gewinnt an Bedeutung

Fast 300.000 Erwerbstätige sind im Leitmarkt Nachhaltige Forst- und Landwirtschaft beschäftigt. Der

Leitmarkt zeigt ein stabiles Wachstum, so nahm etwa die reale Bruttowertschöpfung um 3,7 % p.a. zu.

Abbildung 40

Anzahl Erwerbstätige im Leitmarkt Nachhaltige Land und Forstwirtschaft und nach Marktsegmenten in 2023
(in Klammern Wachstum p.a. seit 2010) und Bruttowertschöpfung (preisbereinigt)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamts
Angestellte Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Unsere Analyse zeigt entlang der sechs Marktsegmente unterschiedliche Trends. Mit fast 90.000 direkten Erwerbstätigen in den landwirtschaftlichen Betrieben und einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 4 % wurde das Marktsegment Nachhaltige Landwirtschaft in den zurückliegenden Jahren zu einer treibenden Kraft des Leitmarkts.⁴³ Die ökologisch bewirtschaftete landwirtschaftliche Nutzfläche verdoppelte sich in Deutschland seit 2010 in etwa.⁴⁴ Das Wachstum der Branche dürfte sich in den kommenden Jahren fortsetzen. Im Marktsegment Umweltfreundliche Technologien für die Landwirtschaft arbeiten rund 21.000 Erwerbstätige, das entspricht einem jährlichen Wachstum seit 2010 von 3,2 %.

Der zweite zentrale Bereich des Leitmarktes ist die Forstwirtschaft und die Holzverarbeitende Industrie. Das Marktsegment Nachhaltige Forstwirtschaft entwickelt sich besonders dynamisch. Seit 2010 stieg der Anteil der Waldflächen, die FSC-zertifiziert sind, kontinuierlich auf zuletzt knapp 15 %. Aufgrund der geringen Personalintensität werden jedoch nur 3.200 Erwerbstätige erfasst. Deutlich mehr

Erwerbstätige (113.000) vereinen Holzbearbeitung und Holzwerkstoffe und Nachwachsende Holzbaustoffe auf sich (für eine Aufschlüsselung der erfassten Leistungen siehe Methodenanhang). Allerdings zeigt die Erwerbstätigkeit der nachwachsenden Holzbaustoffe nahezu kein Wachstum über die vergangenen Jahre. In Zukunft erwarten Unternehmen laut dem Zentralverband Deutsches Baugewerbe jedoch eine deutliche Zunahme von Holzbauleistungen.⁴⁵

Die USA importieren stetig mehr deutsche Holzbaustoffe

Der internationale Handel mit Produkten der Nachhaltigen Forst- und Landwirtschaft lag 2022 bei fast 130 Milliarden Euro. Die Entwicklung des Weltmarkts verlief in Schüben (Abbildung 41). Diese Entwicklung ist in leicht abgeschwächtem Ausmaß auch für die deutschen Ausfuhren in dem Leitmarkt zu beobachten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dafür weniger eine Zunahme der gehandelten Menge, sondern vor allem Preissteigerungen in der Holzwirtschaft verantwortlich sind.

⁴³ Im Rahmen der statistischen Auswertung werden keine vor- oder nachgelagerten Aktivitäten wie zum Beispiel der Handel mit ökologisch produzierten Produkten erfasst.

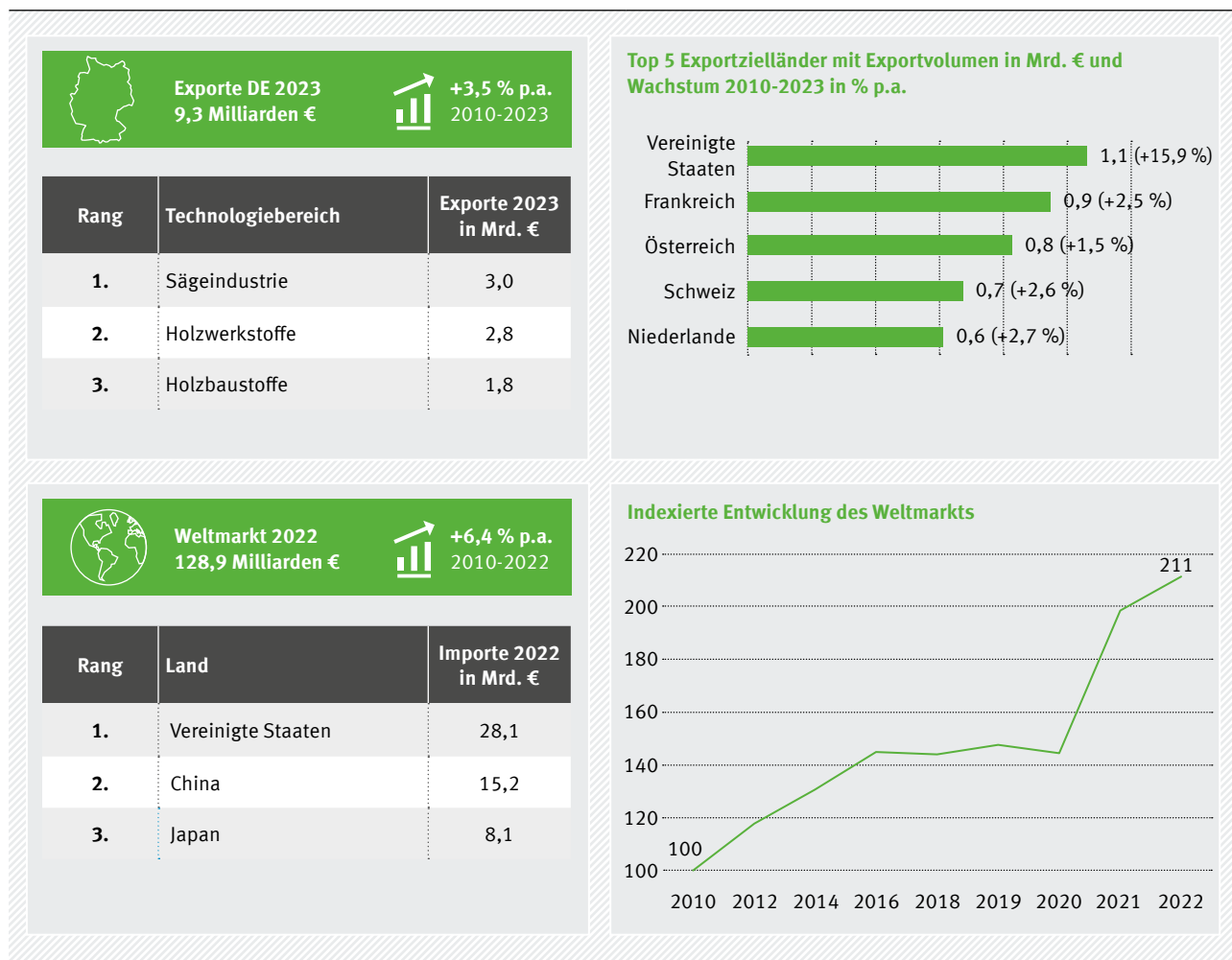
⁴⁴ Umweltbundesamt (2024a). *Ökologischer Landbau*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/oekologischer-landbau#okolandbau-in-deutschland>

⁴⁵ Zentralverband Deutsches Baugewerbe (2023). *Holzbau entwickelt sich trotz rückläufiger Baugenehmigungen gut*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.zdb.de/meldungen/holzbau-entwickelt-sich-trotz-ruecklaeufiger-baugenehmigungen-gut>



Abbildung 41

Übersicht über die wichtigsten Kennzahlen des deutschen Außenhandels und des Weltmarkts für den Leitmarkt Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft, nominale Werte



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Die Dominanz der Holzwirtschaft im Leitmarkt zeigt sich auch in den wichtigsten Export-Technologiebereichen des Leitmarkts in Deutschland (Abbildung 41). Bei den drei wichtigsten Technologiebereichen handelt es sich um Holzprodukte der Sägeindustrie sowie die Technologiebereiche Holzwerkstoffe und Holzbaustoffe. Kombiniert nehmen sie knapp 82 % der Exporte des Leitmarkts ein.

Das wichtigste Abnehmerland war im Jahr 2023 die USA mit Importen aus Deutschland von über einer Milliarde Euro und einem jährlichen Wachstum von fast 16 %. Weitere wichtige Abnehmerländer sind vor allem Nachbarländer, was für Volumengüter erwartbar ist. In diesen Abnehmerländern erzielten die

deutschen Unternehmen allerdings keine dynamischen Wachstumsraten. Nach China gehen weniger als halb so viele Exporte wie in die USA, aber auch in die Volksrepublik nahmen die Exporte besonders stark mit fast 15 % p.a. zu.

Auf dem Weltmarkt ist, neben den USA und China, Japan das drittwichtigste Importland. Anders als der chinesische Markt, der seit 2018 keine große Zunahme der Nachfrage mehr verzeichnete, nahm der amerikanische Markt genau in dieser Zeit besonders stark zu und verdreifachte sich nahezu. Das Marktsegment Holzbearbeitung und Holzwerkstoffe dominiert die weltweite Nachfrage ebenfalls klar mit ca. 75 % des Leitmarktvolumens.

Die Holzverarbeitung als Vorzeigebbranche

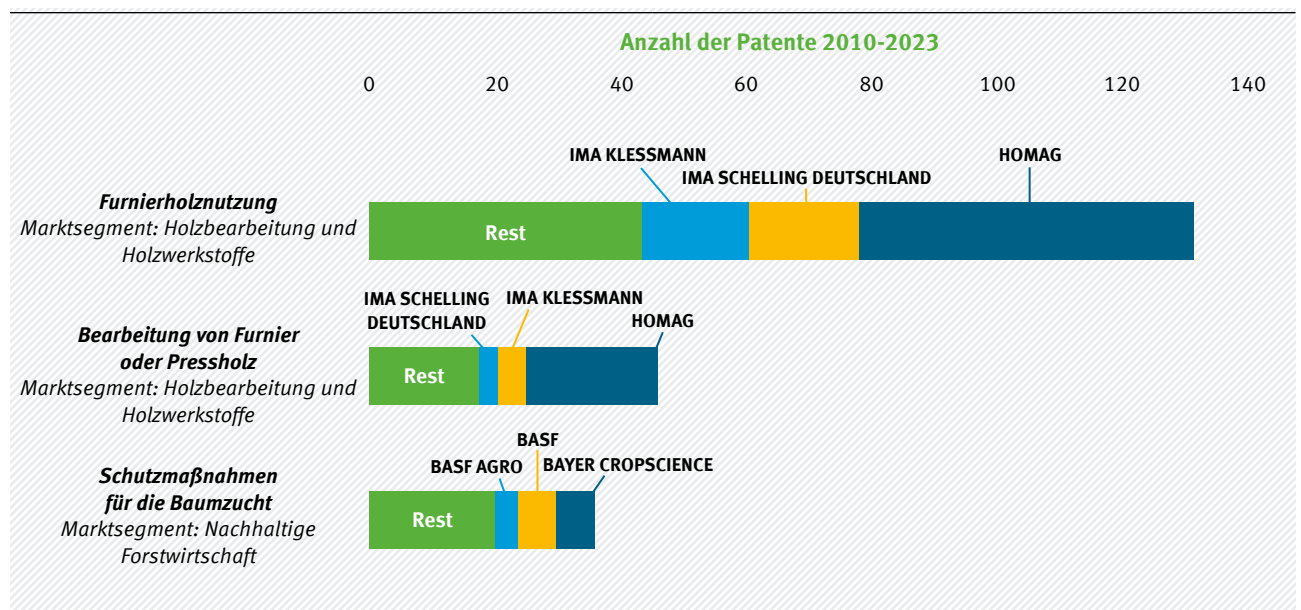
Obwohl der Leitmarkt Nachhaltige Forst- und Landwirtschaft ein weniger patentstarker Markt ist, hat Deutschland hier eine im internationalen Vergleich große Anzahl an Patenten vorzuweisen. Insbesondere bei dem für diesen Leitmarkt zentralen Marktsegment Holzbearbeitung und Holzwerkstoffe kann Deutschland sich mit 36 % der weltweiten Innovationen so deutlich von den nächsten Konkurrenten abheben wie in keinem anderen Marktsegment der GreenTech-Branche. Der Patentoutput macht mit 71 % den Großteil des Leitmarkts Nachhaltige Forst- und Landwirtschaft aus.

Im Technologiebereich Holzwerkstoffe meldete Deutschland viermal so viele Patente zwischen 2010 und 2023 an wie im zweitplatzierten Italien. 74 % der Innovationen im Patentthema *Furnierholz-*

nutzung und 62 % im zweitwichtigsten Patentthema *Bearbeitung von Furnier- und Pressholz* gehen auf deutsche Unternehmen zurück. Dabei gewann das Patentthema der Furnier- und Pressholzbearbeitung erst in jüngerer Vergangenheit weltweit an Relevanz. Die Patentanmeldungen lagen 2020 im Vergleich zu 2010 um 42 % höher. Dabei nimmt die Firma HOMAG als Hersteller von Maschinen den Platz eines Hidden Champions der GreenTech-Branche ein: Mit einem Anteil von 30 % der global angemeldeten Patente zur Furnierholznutzung ist HOMAG mit weitem Abstand das innovativste Unternehmen in diesem Patentthema. Die globale Spitzenposition Deutschlands in diesem Patentthema wird davon untermalt, dass auch die beiden weiteren globalen Top-3 Unternehmen IMA Schelling und IMA Klessmann (beide zur IMA Schelling Group gehörig) aus Deutschland kommen.

Abbildung 42 ⁴⁶

Top 3 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft mit Verteilung auf die bedeutendsten Innovationsakteure



Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Zu sehen sind die drei patentstärksten Themen des Leitmarktes in Deutschland. Die Länge der Balken repräsentiert die absolute Zahl der zwischen 2010-2023 in Deutschland angemeldeten Patente. Farblich hervorgehoben sind die drei Unternehmen, welche in Deutschland die meisten Patente zum jeweiligen Thema angemeldet haben. Bei den Anmelder*innen kann es sich neben Unternehmen oder Forschungseinrichtungen auch um Privatpersonen oder beauftragte Kanzleien handeln.

⁴⁶ Im Unterschied zu anderen Leitmärkten fehlt in diesem Leitmarkt die Bubble-Chart zur Innovationsdynamik und globalen Positionierung bei den Top-Patenthemen Deutschlands. Der Grund ist, dass es nicht genug Patentthemen mit einer ausreichend hohen Patentzahl zur robusten Bestimmung einer Wachstumsrate zwischen 2010 und 2020 gibt.

4.6. Umweltfreundliche Mobilität: Boden gutgemacht

Im Verkehrssektor zeichnet sich die steigende Bedeutung grüner Technologien und Dienstleistungen

ab. Im Jahr 2023 wurden bereits 18 % vollelektrische PKW (E-PKW) angemeldet, weitere 30 % der Neuzulassungen waren Hybridfahrzeuge.⁴⁷ Neben der Elektromobilität gewinnen auch andere umweltfreundliche Mobilitätslösungen an Bedeutung, etwa die Fahrradwirtschaft oder der öffentliche Personenverkehr.

Abbildung 43

Marktsegmente Umweltfreundliche Mobilität

Fahrradwirtschaft	Umweltfreundliche Mobilitäts- und Antriebstechnologien	Intelligente Verkehrsmanagementsysteme und Infrastruktur	Umweltfreundliche Logistik- und Mobilitätsdienstleistungen
- Fahrräder, Fahrradkomponenten und -zubehör - Fahrradinfrastruktur	- Alternative Fahrzeuge - Antriebstechnologien - Fahrzeugtechnologien	- Umweltfreundliche Verkehrsinfrastruktur - Verkehrsmanagement	- Öffentlicher Personenverkehr und Sharing-Systeme - Umweltfreundliche Logistik

Quelle: Prognos AG 2025

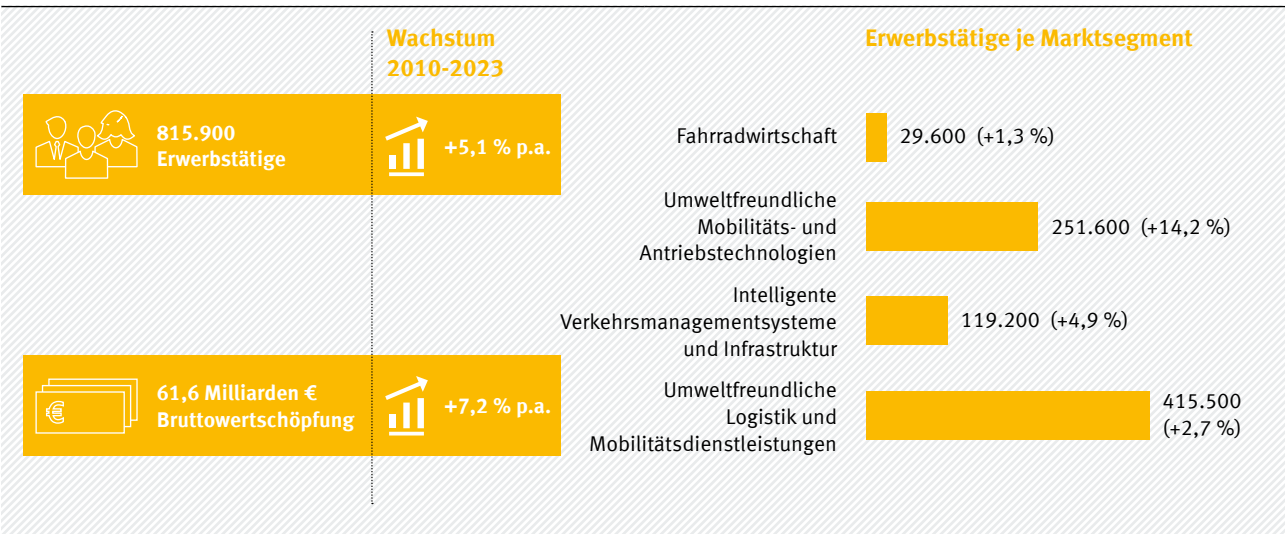
Elektromobilität – Wachstumstreiber der GreenTech-Branche

Die Umweltfreundliche Mobilität ist nach der Circular Economy der zweitgrößte Leitmarkt der deutschen GreenTech-Branche, sowohl mit Blick auf die Er-

werbstätigkeit als auch auf die Wertschöpfung. Über 800.000 Personen arbeiten im Leitmarkt und erzielen seit 2010 ein jährliches Wachstum von durchschnittlich 5,1 %. Kein anderer Leitmarkt ist so dynamisch.

Abbildung 44

Anzahl Erwerbstätige im Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität und nach Marktsegmenten in 2023 (in Klammern Wachstum p.a. seit 2010) und Bruttowertschöpfung (preisbereinigt)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamts
Angewandene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

47 Kraftfahrt-Bundesamt (2024). Jahresbilanz 2023. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassungen/2023/2023_n_jahresbilanz_generische.html

Besonders viele Erwerbstätige verzeichnet das Marktsegment Umweltfreundliche Logistik- und Mobilitätsdienstleistungen mit rund 416.000 Erwerbstätigen. Dazu gehört die Personenbeförderung im Nah- und Fernverkehr mit Bahn und Bus sowie der Gütertransport mit Bahn und Schiff. Auch Kurierservices mittels Fahrrads werden abgebildet. Ein Großteil entfällt dabei auf den Personenverkehr, der etwa 366.000 Erwerbstätige ausmacht und zum Beispiel Bus- und Bahnfahrer*innen umfasst.

Zweitgrößtes Marktsegment ist die Herstellung Umweltfreundlicher Mobilitäts- und Antriebstechnologien, das seit 2010 jährlich um 14,2 % wuchs. Allen voran die Herstellung von Vollelektrischen- und Hybridfahrzeugen gewann in den vergangenen Jahren erheblich an Dynamik. Im Zuge dieses Trends gewinnt auch die Fertigung von Batterien für Elektromotoren an Bedeutung, hier verzehnfachte sich die Zahl der Erwerbstätigen in etwa. Aber auch in der Herstellung klassischer Verkehrsgüter, zum Beispiel Lokomotiven, Waggons oder Straßenbahnen, zeigt sich ein dynamisches Wachstum. Um diese Technologien einsetzen zu können, bedarf es der Leistungen des Marktsegments Intelligente Verkehrsmanagementsys-

teme und Infrastruktur. Insbesondere die Bereitstellung von Schieneninfrastruktur stellt mit über 70.000 Erwerbstätigen eine relevante Aktivität dar.

Elektroautos sind das wichtigste Exportgut der deutschen GreenTech-Branche

Bei den Exporten der GreenTech-Branche nimmt der Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität eine besonders zentrale Rolle ein. Mit einem Anteil von 41 % an den gesamten GreenTech-Exporten Deutschlands im Jahr 2023 ist der Leitmarkt mit Abstand der wichtigste der Branche. Im Jahr 2010 lag der Leitmarkt noch bei ca. 11 Milliarden Euro an Exporten, legte aber bis 2023 durchschnittlich um fast 13 % p.a. zu und erreichte damit über 54 Milliarden Euro Exportvolumen (Abbildung 45). Mit großem Abstand wichtigstes Einzelprodukt sind E-PKW im Technologiebereich Antriebstechnologien. Hier wurden deutsche Unternehmen nach einem im internationalen Vergleich zunächst eher langsamen Start vor allem seit 2019 sehr aktiv. Seitdem verzeichnet der Technologiebereich jährlich ca. 80 % Wachstum. 2022 deckten deutsche Exporte fast 22 % der gesamten weltweiten Nachfrage des Technologiebereichs ab.

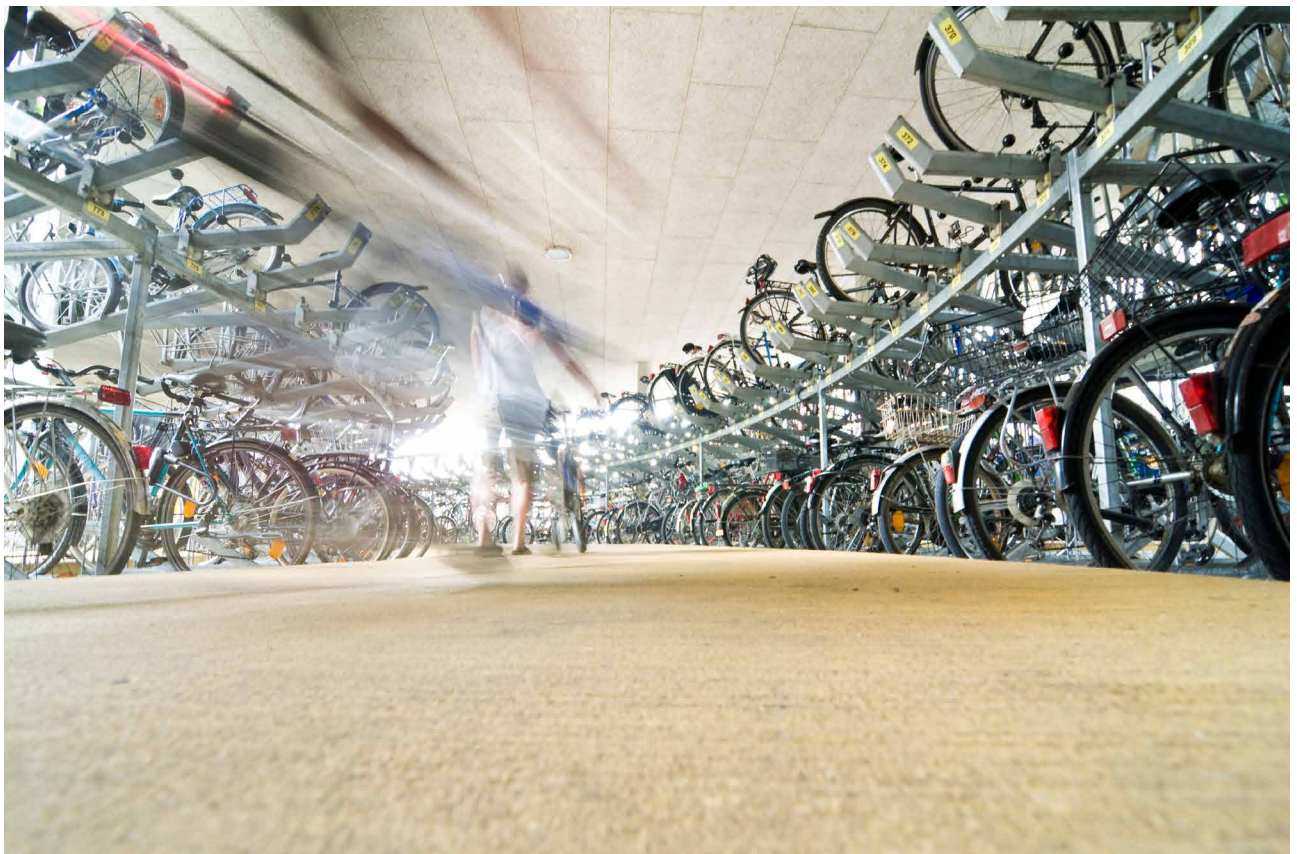
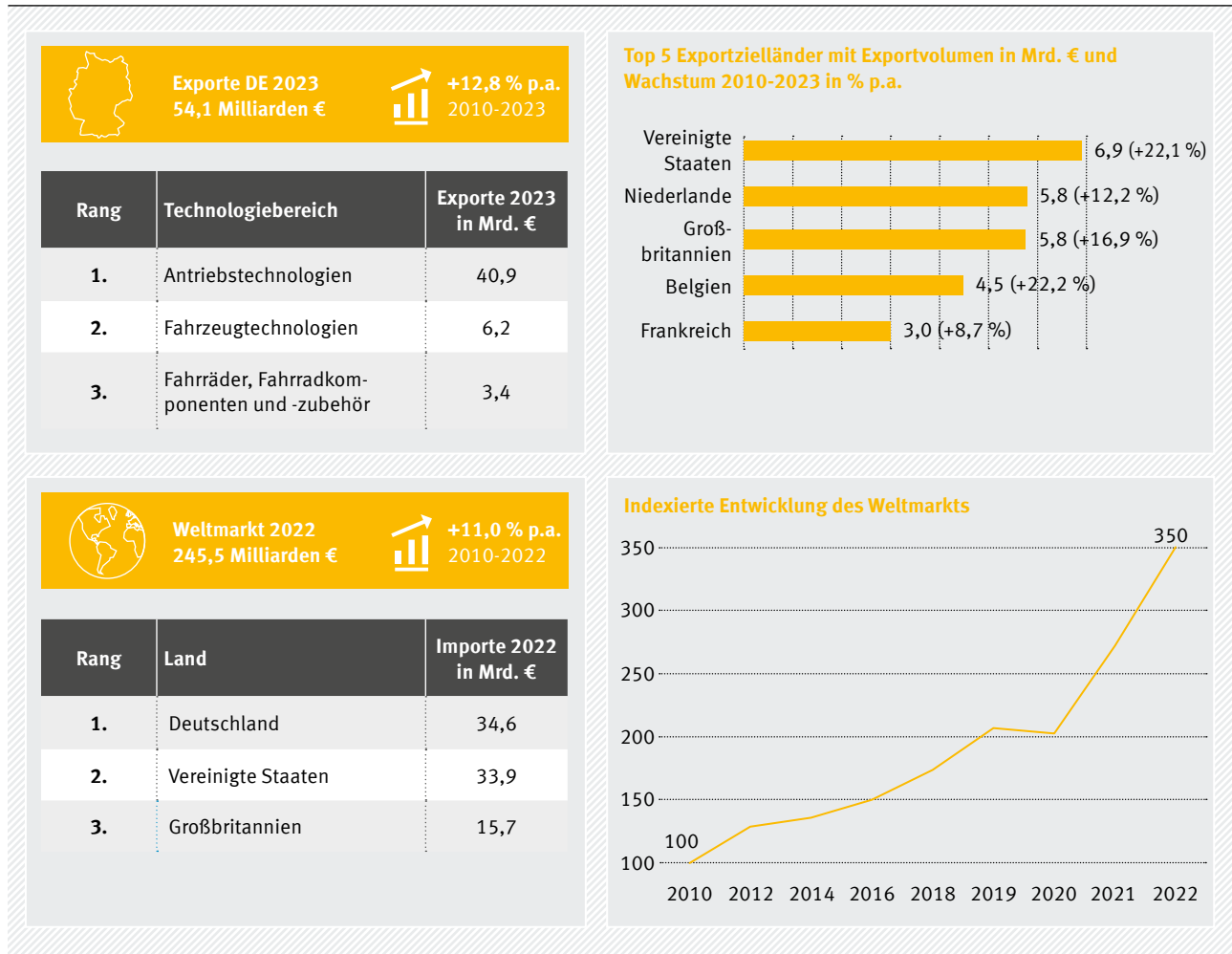


Abbildung 45

Übersicht über die wichtigsten Kennzahlen des deutschen Außenhandels und des Weltmarkts für den Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität, nominale Werte



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

Auch die internationale Nachfrage im Leitmarkt der Umweltfreundlichen Mobilität zog in den vergangenen Jahren stark an und erreicht im Jahr 2022 knapp 250 Milliarden Euro. Seit 2010 hat der internationale Handel damit das 3,5-fache Volumen erreicht, ein Wachstum von durchschnittlich 11 % jährlich (Abbildung 45). International wird die Nachfrage im Leitmarkt ebenfalls vom Technologiebereich Antriebstechnologien, u. a. den E-PKWs, dominiert, der über die Hälfte des Weltmarktes ausmacht. Bei den deutschen Exporten beträgt der Anteil dieses Technologiebereichs sogar knapp 80 %. Des Weiteren ist der Technologiebereich Fahrzeugtechnologien relevant für den Export. In diesem Technologiebereich sind verschiedene Produkte zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen im gesamten Mobilitätssektor vereint.

Immer wichtiger für die deutschen Exporte wird zudem der Technologiebereich Fahrräder, Fahrradkomponenten und -zubehör. Seit 2010 nahmen die Ausfuhren jährlich um ca. 11 % zu.

Wichtigste Abnehmerländer für den Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität sind neben den USA westeuropäische Industrienationen. Die USA und Belgien weisen dabei mit jeweils über 22 % jährlichem Wachstum bei den Importen aus Deutschland ausgesprochen hohe Wachstumsraten auf. Die Exporte nach China wuchsen mit ca. 8,5 % p.a. allerdings unterdurchschnittlich für diesen Leitmarkt. Die größte Wachstumsrate unter den 30 wichtigsten Exportzielländern für Deutschland zeigt Kanada mit fast 29 % p.a.

Wichtigster globaler Importmarkt war 2022 Deutschland selbst mit über 34 Milliarden Euro. Die Rolle als wichtigster Importeur und zweitwichtigster globaler Exporteur nach China unterstreicht die Position der deutschen Autoindustrie. Knapp hinter Deutschland sind die USA der zweitwichtigste internationale Markt. Auffallend ist die überdurchschnittlich wichtige Rolle des norwegischen Importmarkts, der mit fast 8 Milliarden Euro sogar größer als der chinesische Markt ist. Norwegen legt wie kein anderes Land den Fokus für klimafreundlichen Verkehr auf die Elektromobilität, was sich in den Importen widerspiegelt. China setzt verstärkt auf die eigene Produktion im Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität. Mit weniger als 7 Milliarden Euro ist China ganz anders als in anderen Leitmärkten nur 11.-wichtigster Abnehmer.

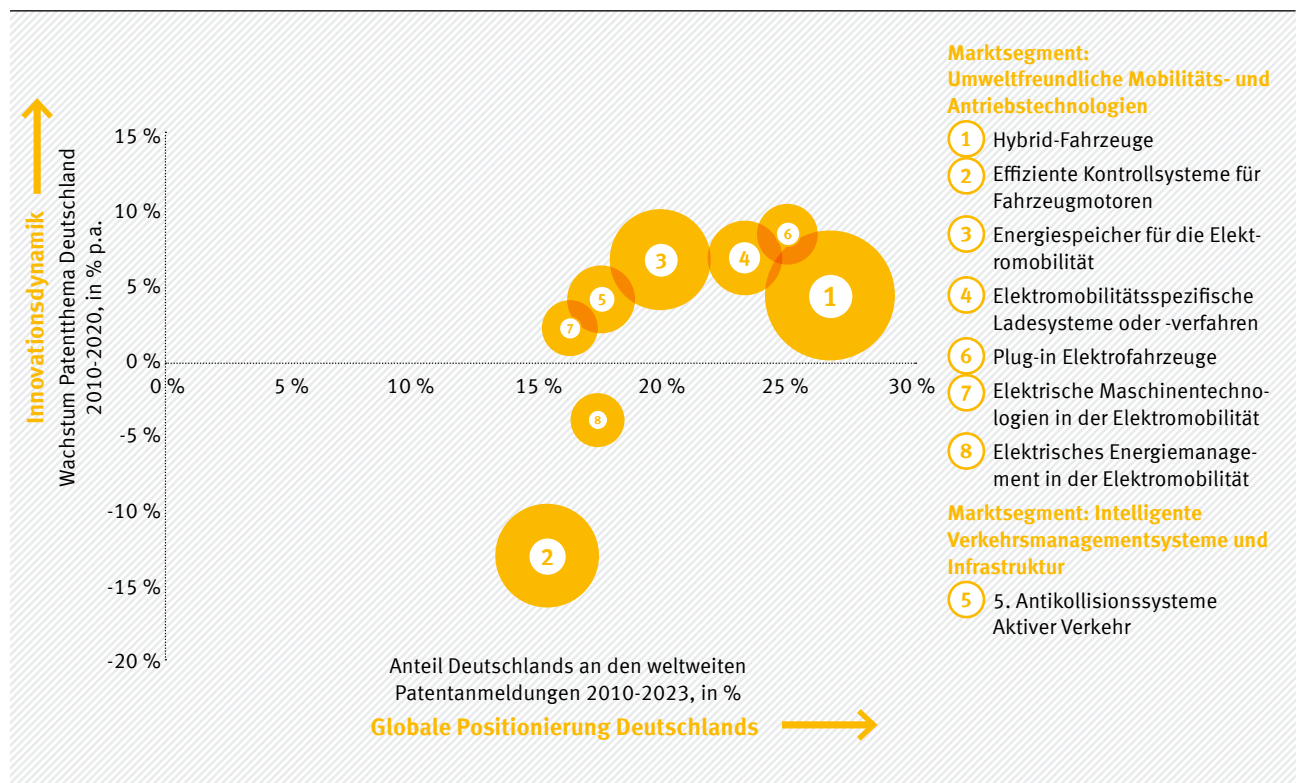
Elektromobilität als Antriebstechnologie der Zukunft

Die Umweltfreundliche Mobilität zeigt sich als der Leitmarkt, in dem Deutschland die größte Innova-

tionsdynamik unter allen Leitmärkten der Green-Tech-Branche aufweist. In den Jahren 2019 und 2020 meldeten deutsche Unternehmen jeweils ca. 50 % mehr Patente als im Bezugsjahr 2010 an. In diesem Leitmarkt fokussiert sich Deutschland insbesondere auf Innovationen im Marktsegment Umweltfreundliche Mobilitäts- und Antriebstechnologien. Über die gesamte GreenTech-Branche hinweg liegt das Marktsegment im Innovationsranking auf Platz 3. Besonders innovativ sind dabei die Technologiebereiche Antriebstechnologien und Fahrzeugtechnologien mit einem Anteil von 45 % und 9 % an den Patentanmeldungen des gesamten Leitmarkts. Hier drückt sich der Wandel zur Elektromobilität aus, der besonders unter den Zulieferern der großen Automobilkonzerne zu Innovationen geführt hat. Obwohl die Konkurrenz durch andere Top-Innovationsländer in diesem Marktsegment groß ist, erreicht Deutschland aktuell im internationalen Vergleich mit einem Anteil von 21 % der globalen Patente den zweiten Platz nach Japan.

Abbildung 46

Innovationsdynamik und globale Positionierung bei den Top 8 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Energieeffizienz

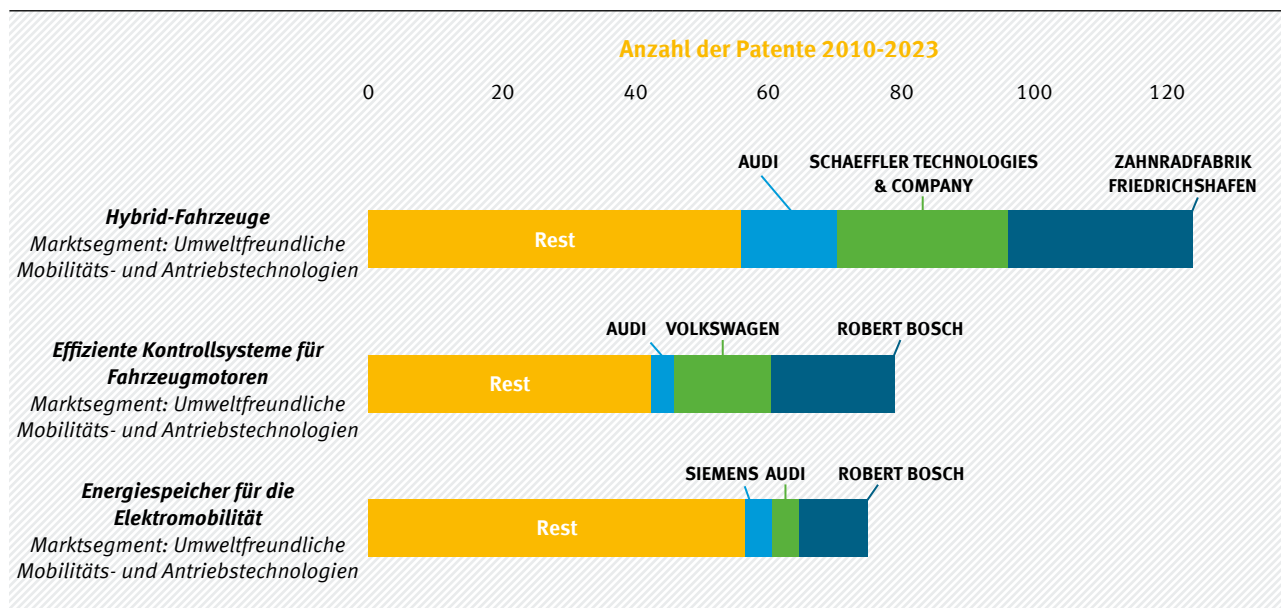


Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Dargestellt sind die wichtigsten acht deutschen Patentthemen im Leitmarkt. Die Blasengröße symbolisiert die absolute Zahl der in Deutschland angemeldeten Patente im Zeitraum 2010-2023. Die x-Achse stellt für jedes Thema anhand des Anteils an den weltweiten Patentanmeldungen im Zeitraum 2010-2023 die globale Positionierung Deutschlands im Innovationswettbewerb dar. Die y-Achse zeigt anhand des Wachstums der Patentanmeldungen zwischen 2010 und 2020* die Innovationsdynamik der Themen auf. (*Für die Beurteilung der Entwicklung im Zeitverlauf werden die drei verfügbaren Jahre 2021-2023 ausgeklammert, um Verzerrungen auf Grund noch nicht abgeschlossener Patentanmeldungen zu vermeiden.)

Abbildung 47

Top 3 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Umweltfreundliche Mobilität mit Verteilung auf die bedeutendsten Innovationsakteure



Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Zu sehen sind die drei patentstärksten Themen des Leitmarktes in Deutschland. Die Länge der Balken repräsentiert die absolute Zahl der zwischen 2010-2023 in Deutschland angemeldeten Patente. Farblich hervorgehoben sind die drei Unternehmen, welche in Deutschland die meisten Patente zum jeweiligen Thema angemeldet haben. Bei den Anmelder*innen kann es sich neben Unternehmen oder Forschungseinrichtungen auch um Privatpersonen oder beauftragte Kanzleien handeln.

Deutschland kann sich mit 27 % der Patente beim Patentthema *Hybrid-Fahrzeuge* deutlich von Konkurrenten wie China und Frankreich absetzen und ist fast gleichauf mit Japan. Diese Stellung ist insbesondere dem Unternehmen ZF Friedrichshafen zu verdanken, dem zweitgrößten deutschen Automobilzulieferer. Das Unternehmen fokussiert sich bei der Elektromobilität strategisch auf die Ergänzung von Verbrennern bei z. B. Lastkraftfahrzeugen. Erst 2024 beschloss das Unternehmen eine umfassende Umstrukturierung in Richtung Elektromobilität.

Auch beim Patentthema der *Energiespeicher für die Elektromobilität* kann Deutschland sich international deutlich profilieren. Obwohl China bei diesem Thema ebenfalls einen Innovationsschwerpunkt hat, meldete Deutschland im Vergleich mehr als doppelt so viele Patente an. Leidglich Japan ist hier noch

innovativer. Als führendes Unternehmen profiliert sich Bosch mit seiner Erfahrung in der Herstellung von Kontroll- und Steuerungskomponenten in Autos. Die besondere Innovativität des Unternehmens ist durch die Entwicklung von Batterietechnologie zu erklären, die über die eigentlichen Zellen hinausgeht und beispielsweise Effizienz erhöht.

Im Marktsegment Intelligente Verkehrsmanagementsysteme und Infrastruktur ist die deutsche GreenTech-Branche im Technologienbereich Verkehrsmanagement gut vertreten: Der Technologiebereich macht ungefähr ein Fünftel der Patente des Leitmarkts aus. Dabei ist der Technologiebereich Verkehrsmanagement bemerkenswert dynamisch: Zwischen 2010 und 2020 verdoppelte sich der jährliche deutsche Patent-Output.

Einblicke in das Innovationsgeschehen zum Patentthema Energiespeicher für die Elektromobilität

20%

der Patente weltweit
2010-2023
stammen **aus
Deutschland**

Energiespeicher nehmen eine Schlüsselrolle für die Verkehrswende ein, insbesondere der Wandel der Automobilindustrie zu Elektromobilität hängt von ihnen ab. Um die konkreten Entwicklungen der deutschen Industrie zu untersuchen, wurden Abstracts der Patenttexte und Unternehmensberichte ausgewertet.

DEEP DIVE

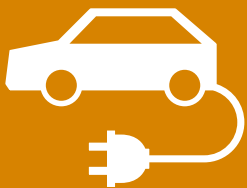


Batterietechnologie

Der Umstieg auf erneuerbare Energien rückt auch in der Mobilität Batterien in den Fokus. So sind Elektroautos insbesondere in ihrer Reichweite durch die Kapazität der Batterie beschränkt. Weitere Herausforderungen stellen sich hinsichtlich der Nachhaltigkeit und Sicherheit der Batteriesysteme.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Stationäre Energiespeicher die sowohl zum Laden als auch Entladen von Elektroautos genutzt werden können. Dadurch wird die Integration in Stromnetze ermöglicht
- ▶ Steckbare Energiespeichermodule



Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Nutzung von Schwerkraft und Fahrzeugbewegung zur Energiegewinnung
- ▶ Technologien zur effizienteren Verteilung elektrischer und thermischer Energie auf Batterie, Antrieb und Klimaanlage

Effiziente Energienutzung

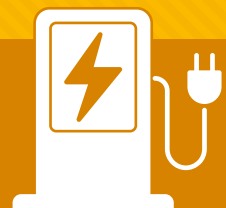
Elektromotoren haben in der Regel einen höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren. Trotzdem gehen auch bei Elektroautos erhebliche Teile der Energie bei Beschleunigung und Bremsen verloren. Diese Energie kann zurückgewonnen und wieder effizient genutzt werden.

Ladeinfrastruktur

Der flächendeckende Ausbau der Ladeinfrastruktur bleibt eine Herausforderung. Gleichzeitig ist es das Ziel die Ladezeiten insbesondere beim Schnellladen zu verkürzen.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Kürzere Ladezeiten durch Nutzung von 800-Volt Technologie
- ▶ Verknüpfung Batterie- und Thermomanagement ermöglicht optimale Temperatur beim Laden



4.7. Wasserwirtschaft: Schutz der essentiellen Ressource

Die Wasserwirtschaft stellt einen klassischen Bereich der GreenTech-Branche dar. Im Zuge des fortschreitenden Klimawandels gewinnt die Wasserwirtschaft weiter an Bedeutung und stellt einen wichtigen Baustein für eine klimaresiliente Gesellschaft dar. Mit der neuen Kommunalabwasserrichtlinie zielt die EU

auf zusätzliche Verbesserungen der Wasserqualität ab, etwa durch die Einführung einer vierten Reinigungsstufe, um Schadstoffe aus Arzneimitteln oder Kosmetika zurückzuführen. Ebenfalls wird die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe, wie etwa Phosphor, bedeutsamer.⁴⁸

Entsprechend wird die Bedeutung des Leitmarktes Wasserwirtschaft entlang von drei Marktsegmenten untersucht:

Abbildung 48

Marktsegment Wasserwirtschaft

Infrastrukturen für Wasser, Abwasser und Überflutungsschutz	Monitoring und Analyseverfahren, Wasser- und Abwassermanagement	Wassergewinnung, -aufbereitung und Abwasserbehandlung
▶ Effiziente Wassernutzung ▶ Wasser- und Abwassernetz	▶ Wasserwirtschaft 4.0 (Messen, Analysieren, Steuern, Regeln)	▶ Abwasserbehandlung ▶ Wassergewinnung und -aufbereitung

Quelle: Prognos AG 2025

Wasserwirtschaft: etablierter Leitmarkt in Deutschland

Mit gut 320.000 Erwerbstätigen ist der Leitmarkt zwar von relevanter Größe, zeigt aber mit 1,3 % Wachstum eine unterdurchschnittliche Entwicklung seit 2010. Etwas dynamischer entwickelt sich die Bruttowertschöpfung mit einem Wachstum von 3,8 %.

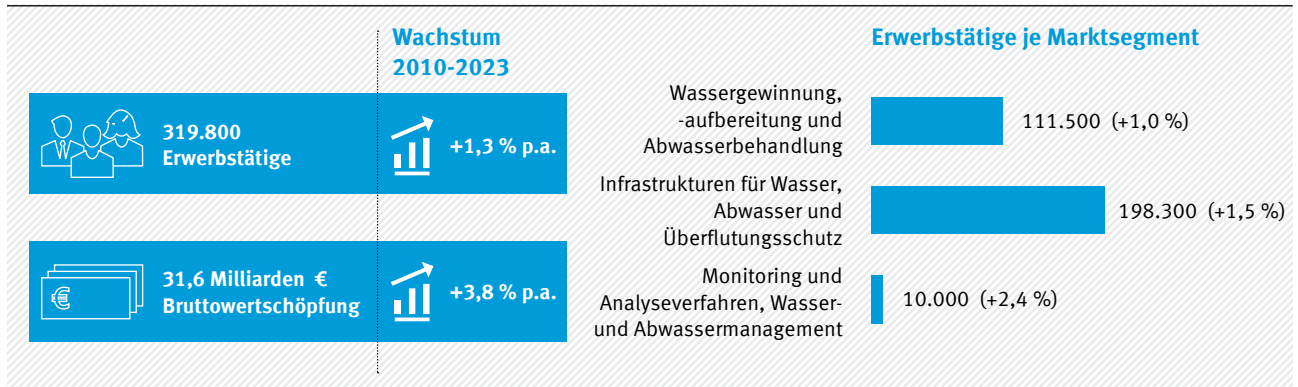
Das Marktsegment Infrastrukturen für Wasser, Abwasser und Überflutungsschutz erfasst z. B. Wasserversorgungstechnik und beschäftigt knapp 200.000 Personen. Auf der Basis dieser Infrastrukturen stellen

rund 112.000 Erwerbstätige im Marktsegment Wassergewinnung, -aufbereitung und Abwasserbehandlung die tatsächlichen Wasserdienstleistungen bereit. Etwa die Gewinnung von Trinkwasser aus Grundwasser, Uferfiltrat oder Oberflächenwasser (darunter Talsperren). Erfasst sind in diesem Marktsegment auch Maßnahmen der Renaturierung, die in den zurückliegenden Jahren an Bedeutung gewannen. Vergleichsweise gering fällt die Erwerbstätigenzahl des Marktsegments Monitoring und Analyseverfahren, Wasser- und Abwassermanagement aus.

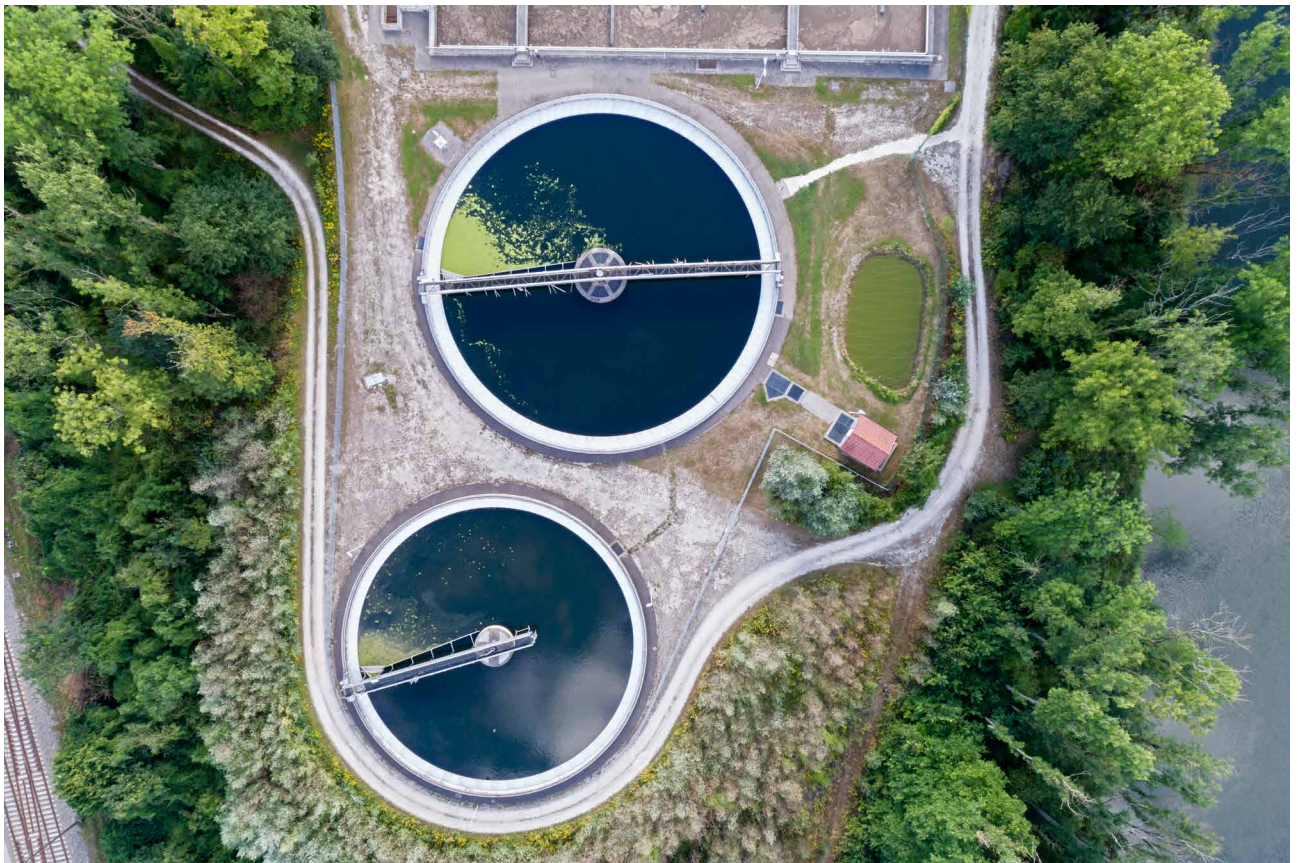
48 Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2024). *EU führt Innovationen bei der Behandlung kommunalen Abwassers ein*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/eu-fuehrt-innovationen-bei-der-behandlung-kommunalen-abwassers-ein>

Abbildung 49

Anzahl Erwerbstätige im Leitmarkt Wasserwirtschaft und nach Marktsegmenten in 2023
(in Klammern Wachstum p.a. seit 2010) und Bruttowertschöpfung (preisbereinigt)



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten der Bundesagentur für Arbeit und des Statistischen Bundesamts.
Angewandene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.



Steigende Nachfrage in Schwellen- und Entwicklungsländern

Der hohe Weltmarktanteil der deutschen Exporte von ca. 15 % im Jahr 2022 steht für eine starke Marktposition. Die globale Wachstumsrate liegt höher als die der deutschen Exporte. Die zukünftigen Wachstumspotenziale liegen vor allem in den Entwicklungsländern außerhalb von Europa, auf denen deutsche Unternehmen eine geringere Präsenz haben, weshalb hier bislang nicht das volle Wachstum genutzt wird. Die deutschen Exporte konzentrieren sich vor allem auf Produkte für das Wasser- und Abwassernetz und die Abwasserbehandlung. Die größte Dynamik ist für die Technologien der Abwasserbehandlung zu beobachten mit 4,7 % Wachstum im Jahr.

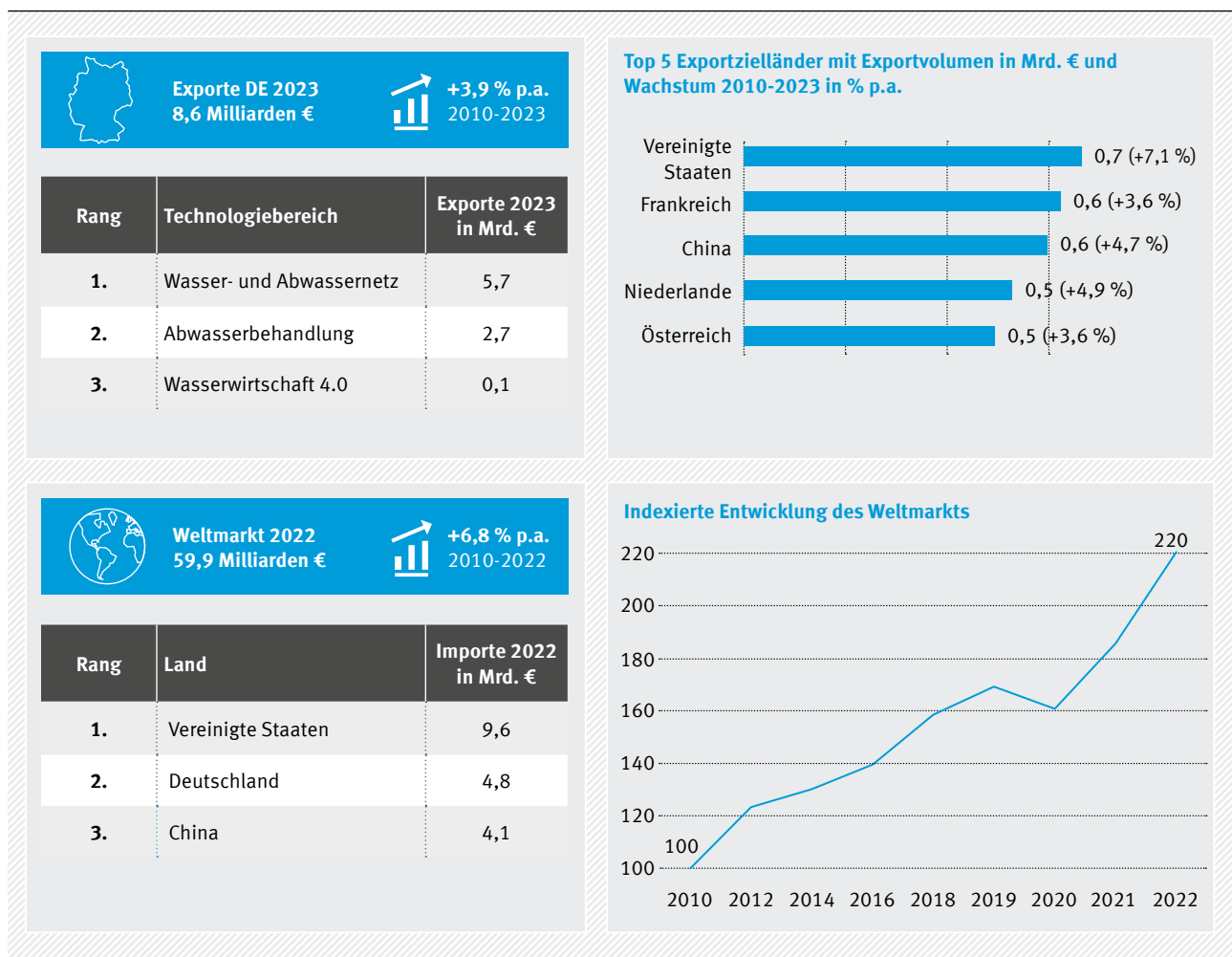
Auch in der Wasserwirtschaft stellen die USA, China und die europäischen Nachbarländer die größten

Märkte für deutsche Produkte dar. Vor allem die USA, der wichtigste Abnehmer mit über 7 % p.a., und Mexiko, auf Rang 20 mit über 9 % p.a., entwickeln sich dynamisch. Insgesamt verteilt sich in diesem Leitmarkt die aktuelle globale Nachfrage etwas stärker auf Industrie- und Schwellenländer. Vor allem durch die Bevölkerungsentwicklungen und die steigende Bedeutung entwickelter Wasserinfrastrukturen u. a. durch den Klimawandel dürfte die Nachfrage insbesondere in den Schwellen- und Entwicklungsländern in Zukunft noch weiter steigen.

Der Technologiebereich Wassergewinnung- und aufbereitung spielt auf dem Weltmarkt eine größere Rolle als bei den deutschen Exporten. Trotzdem stellt der Technologiebereich nur ca. 3 % des gesamten globalen Nachfragevolumens des Leitmarkts. Der Rest ist ähnlich wie bei den deutschen Exporten vor allem in

Abbildung 50

Übersicht über die wichtigsten Kennzahlen des deutschen Außenhandels und des Weltmarkts für den Leitmarkt Wasserwirtschaft, nominale Werte



Quelle: Prognos AG 2025, auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes
 Angegebene Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet.

der Wasserinfrastruktur und der Abwasserbehandlung zu verorten.

Konstante Innovativität in der Abwasserbehandlung und -aufbereitung

Mit 64 % der Patentanmeldungen zwischen 2010 und 2023 ist das Marktsegment Wassergewinnung, -aufbereitung und Abwasserbehandlung das innovativste der Wasserwirtschaft. Das ist insbesondere auf den Technologiebereich der Abwasserbehandlung zurückzuführen. Deutschland macht bei der Abwasserbehandlung 13 % der globalen Patente aus und wird damit nur von den USA an Innovationskraft übertroffen. Die deutschen Wasserwirtschafts-Unternehmen meldeten im internationalen Vergleich die meisten Patente zum Patentthema *Biologische Abwasserbehandlung* an. Auf einem im GreenTech-Vergleich wenig konzentrierten Weltmarkt erreicht Deutschland mit 16 % Anteil die Rolle des Weltpatentführers vor den USA.

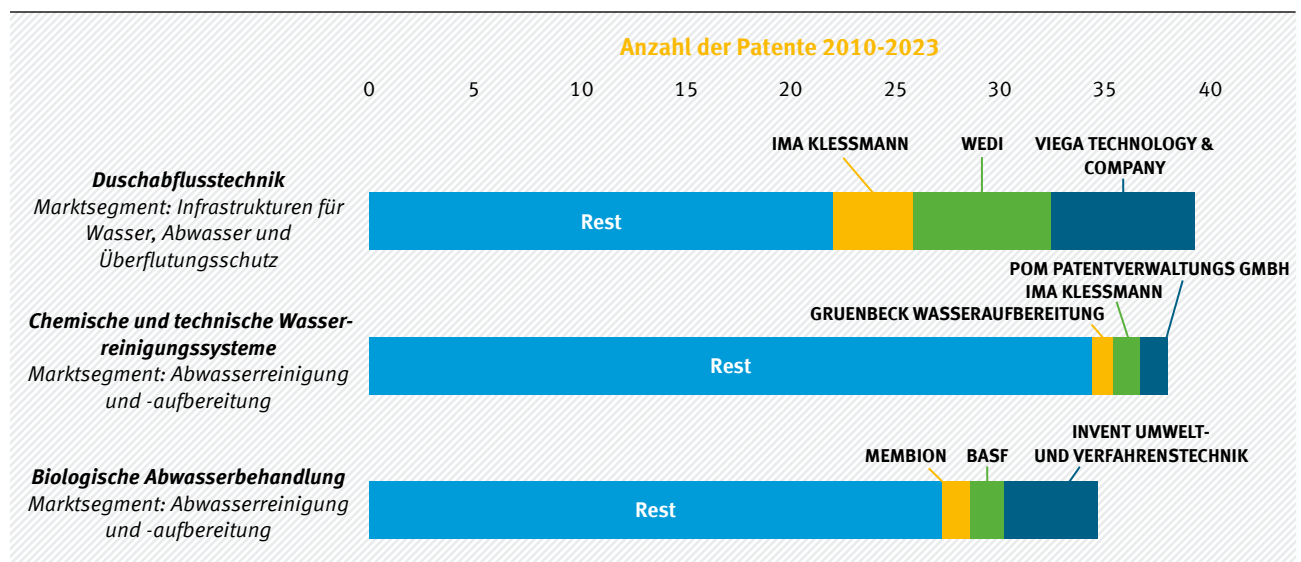
Im kleineren Technologiebereich Wassergewinnung und -aufbereitung lässt sich ein klarer Wachstumspfad feststellen: Während 2010 Deutschland noch 40 % weniger Patente als der Innovationsführer an-

meldete, so übertraf Deutschland 2020 die USA zum ersten Mal in dieser Technologie. Der thematische Schwerpunkt der deutschen Wasserwirtschaft liegt auf *Chemischen und technische Wasserreinigungssystemen*. Mit einem Weltpatentanteil von 20 % ist Deutschland hier gemeinsam mit den USA die einzige Nation mit einem derart hohen Innovationsanteil.

Das zweitwichtigste Marktsegment des Leitmarkts sind Infrastrukturen für Wasser, Abwasser und Überflutungsschutz. Hier hat Deutschland mit 30 % der globalen Innovationen im Untersuchungszeitraum eine prominente internationale Rolle bei den Patenten. Mit einem Anteil von 90 % am Marktsegment ist diese Relevanz insbesondere auf den Technologiebereich Wasser- und Abwassernetz-Technik zurückzuführen. Die Innovationen in diesem Technologiebereich betreffen vor allem Sanitäranlagen z. B. das patentstärkste Thema *Duschabflusstechnik*. Mit einem Weltpatentanteil von 34 % führt Deutschland bei diesem Patentthema den globalen Markt an. Die beiden patentstärksten Unternehmen Viega und Wedi sind stark spezialisierte mittelgroße Unternehmen mit einem Schwerpunkt auf Sanitärtechnik.

Abbildung 51 ⁴⁹

Top 3 Patentthemen Deutschlands im Leitmarkt Wasserwirtschaft mit Verteilung auf die bedeutendsten Innovationsakteure



Quelle: Prognos AG 2025, eigene Berechnung auf Basis von PATSTAT

Lesehilfe: Zu sehen sind die drei patentstärksten Themen des Leitmarktes in Deutschland. Die Länge der Balken repräsentiert die absolute Zahl der zwischen 2010-2023 in Deutschland angemeldeten Patente. Farblich hervorgehoben sind die drei Unternehmen, welche in Deutschland die meisten Patente zum jeweiligen Thema angemeldet haben. Bei den Anmelder*innen kann es sich neben Unternehmen oder Forschungseinrichtungen auch um Privatpersonen oder beauftragte Kanzleien handeln.

⁴⁹ Im Unterschied zu anderen Leitmärkten fehlt in diesem Leitmarkt die Bubble-Chart zur Innovationsdynamik und globalen Positionierung bei den Top-Patentthemen Deutschlands. Der Grund ist, dass es nicht genug Patentthemen mit einer ausreichend hohen Patentzahl zur robusten Bestimmung einer Wachstumsrate zwischen 2010 und 2020 gibt.

Einblicke zum Innovationsgeschehen im Patentthema Chemische und technische Wasserreinigung

Sauberes Wasser ist in Deutschland zwar für nahezu jeden verfügbar, global hatten 2022 jedoch noch immer über zwei Mrd. Menschen keinen Zugang dazu. Aber auch in Deutschland steht die Trinkwasserversorgung vielerorts unter Druck. Die deutschen Beiträge zu Innovationen in diesem Patentthema wurden mit Hilfe von Abstracts der Patenttexte und Unternehmensberichte der wichtigsten deutschen Akteure ausgewertet.

20%

der Patente weltweit
2010-2023

stammen **von Akteuren aus Deutschland**

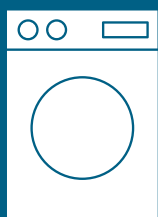


Chemische Wasserreinigungstechnologien

Die effiziente Entfernung/Reduzierung von Schadstoffen und Keimen aus dem Trinkwasser, aber auch aus Wasser für industrielle Zwecke ist essenziell für die Wasserwirtschaft. Es kommen verschiedenste Stoffe und Technologien zum Einsatz. Sog. Ewigkeitschemikalien oder die Halbleiterproduktion setzen neue Anforderungen an Wasseraufbereitung oder Wasserdesinfektion.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Nutzung von chemisch angepassten Grafit-Schichten zur besseren Filtration
- ▶ Regulierung von Dechlorination durch Oxidationskontrolle
- ▶ Abwasserreinigung durch multiple Anwendungen für effizientere Pathogen-Abtötung



Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Systeme zur dynamischen Desinfektion von Trinkwassertanks in Fahrzeugen
- ▶ Extern anbringbare Desinfektionsmodule für Geschirrspülautomaten
- ▶ Katastrophenhilfe

Wasserreinigung in Systemen

Wasserreinigung und Desinfektion muss nicht nur durch zentrale Wasserversorger oder Unternehmen erfolgen, sondern ist auch in Systemen im Verkehr oder in Haushaltsgeräten notwendig. Deutsche Unternehmen sind spezialisiert auf solche integrierten und spezialisierten Lösungen.

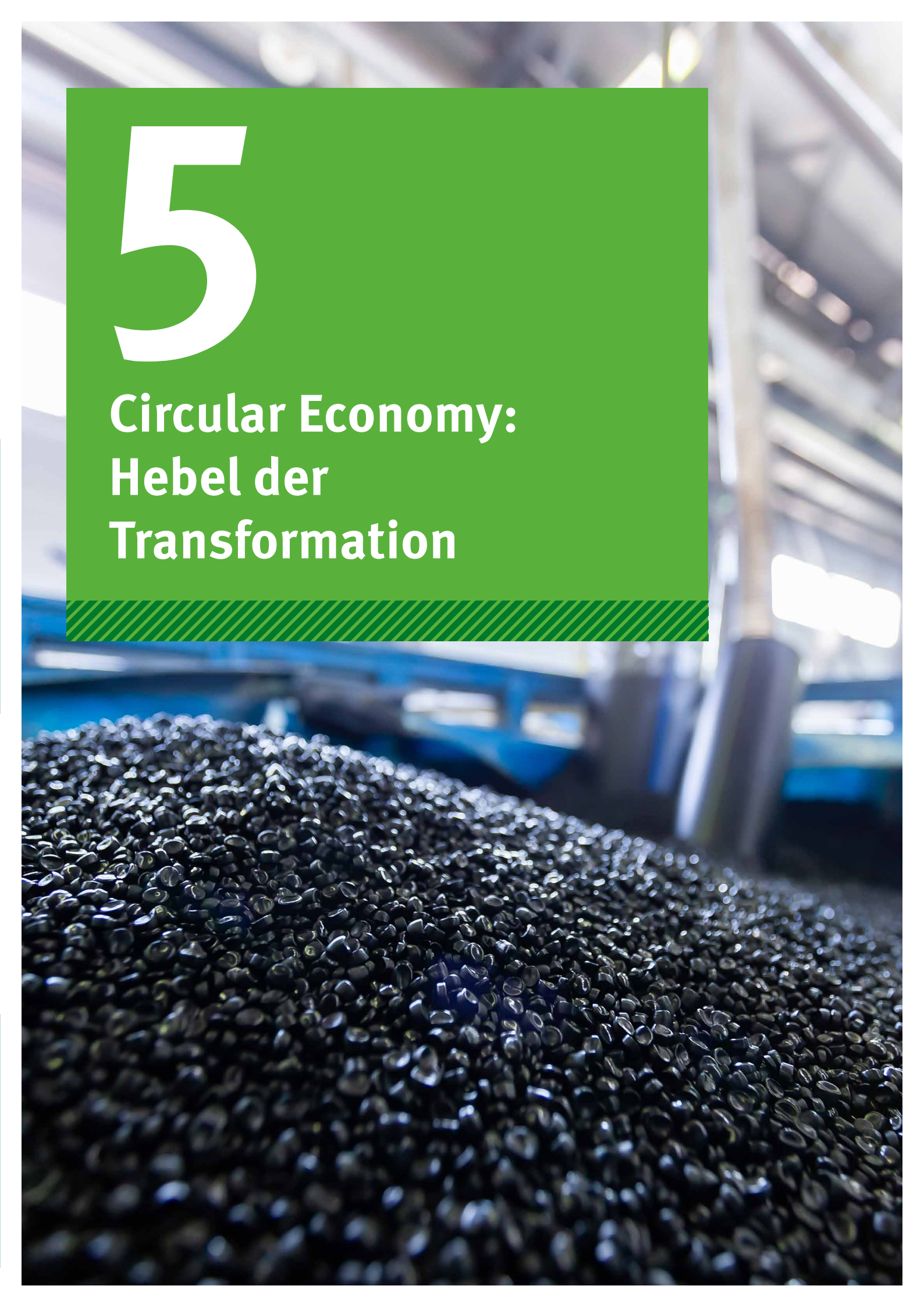
Monitoring und Kontroll-Systeme

Für die sichere Reinigung von Wasser werden komplexe Monitoring- und Kontrollinstrumente inkl. verschiedener Sensoren gebraucht. Diese Systeme sind immer stärker vernetzt und digitalisiert. Sie sind wichtige Komponenten für erfolgreiche Exportprodukte der Wasserreinigung.

Konkrete Lösungen aus Deutschland:

- ▶ Kontrollsysteme für UV- und Chlor-Desinfektion
- ▶ Technologien für Messungen und Kontrollen von Schadstoffen in Trinkwassernetzen
- ▶ Legionellen-Schutzsysteme bei der industriellen Wassererhitzung





5

**Circular Economy:
Hebel der
Transformation**

Die Circular Economy ist neben dem Erreichen der Netto-Treibhausgasneutralität ein zentrales Element der Transformation des Wirtschaftssystems in Deutschland. Ziel ist es, Produkte und Materialien über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg in Kreisläufen zu führen und die Abhängigkeit von Rohstoffimporten zu minimieren. Die GreenTech-Branche spielt eine wichtige Rolle für die Circular Economy. Das Leistungsversprechen der Branche ist es, ressourcen-, klima- und umweltschonende Güter und Dienstleistungen anzubieten.

5.1. Regulatorische Rahmenbedingungen: Auf EU- und Bundesebene wird die Circular Economy gezielt gefördert

Regulatorisch wird die Circular Economy sowohl auf EU- als auch auf Bundesebene durch Verordnungen, Richtlinien und Programme vorangetrieben (vgl. Abbildung 1). Sowohl im European Green Deal als auch dem Clean Industrial Deal der EU wird ein besonderes Augenmerk auf die Circular Economy gelegt. Zentraler Baustein der europäischen Bemühungen ist der Circular Economy Action Plan (CEAP).⁵⁰ Im Rahmen der Umsetzung des CEAP wurden auf europäischer Ebene eine Vielzahl an spezifischen Richtlinien und Verordnungen angestoßen. Diese sind größtenteils bereits im Rahmen des europäischen Gesetzgebungsprozesses beschlossen.

Deutschland setzt dabei neben der Implementierung europäischer Vorgaben eigene Akzente. Das zentrale nationale Regelungswerk stellt das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz dar. Darüber hinaus wurde mit der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) eine eigene Strategie zur Etablierung einer Circular Economy entwickelt. Zentrale Punkte der Strategie sind dabei:

- Die Senkung des Verbrauches an Primärrohstoffen
- Das Schließen von Stoffkreisläufen durch Erhöhung der Sekundärrohstoffquote
- Die Stärkung der Unabhängigkeit von Rohstoffimporten

Die Umsetzung der NKWS erfordert umfassende Maßnahmen zur Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus, einschließlich verbesserter Produktgestaltung und ressourcenschonender Prozesse, unterstützt durch Standards und Quoten, während ein breiter Stakeholder-Beteiligungsprozess zur Strategieentwicklung fortgeführt wird.

5.2. Circular Economy: Leitbild eines ganzheitlichen Wirtschaftsmodells

Um eine Circular Economy zu erreichen, muss entlang aller Wertschöpfungsprozesse in Kreisläufen gedacht werden. Die Circular Economy kann dazu beitragen, die Versorgungssicherheit des stetig steigenden Rohstoffbedarfs zu sichern und somit die Resilienz der Wirtschaft zu stärken. Im Zuge geopolitischer Konflikte steigt der Druck auf eine gesicherte Rohstoffversorgung, insbesondere für sogenannte kritische Rohstoffe wie Lithium und Kobalt. Auch für viele grüne Technologien z. B. in der Energiewirtschaft und Elektromobilität ist die Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe von hoher Bedeutung. Ein umfassendes Verständnis der Circular Economy umfasst alle Wertschöpfungsprozesse von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Wiederverwertung von Materialien. Entlang der Wertschöpfungsphasen von Herstellung über Nutzung bis Verwertung bestehen vielfältige Möglichkeiten für eine umfassende Kreislaufführung. Als handlungsorientierte Konkretisierung des Konzepts der Circular Economy gelten die sogenannten R-Strategien. Dabei lassen sich die R-Strategien grundsätzlich verschiedenen Phasen eines Produktzyklus zuordnen:

⁵⁰ Europäische Kommission (2023). *Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses zu der „Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über einen überarbeiteten Überwachungsrahmen für die Kreislaufwirtschaft“ (COM(2023) 306 final)*. Official Journal, C 889, ELI: <http://data.europa.eu/eli/C/2024/889/oj>

Pre-Nutzungsphase – Rohstoffentnahme und Herstellung: Refuse (Ablehnen), Rethink (Überdenken) und Reduce (Reduzieren) stehen im Vordergrund, um unnötige Produkte zu vermeiden und langlebige, reparierbare Produkte zu fördern.

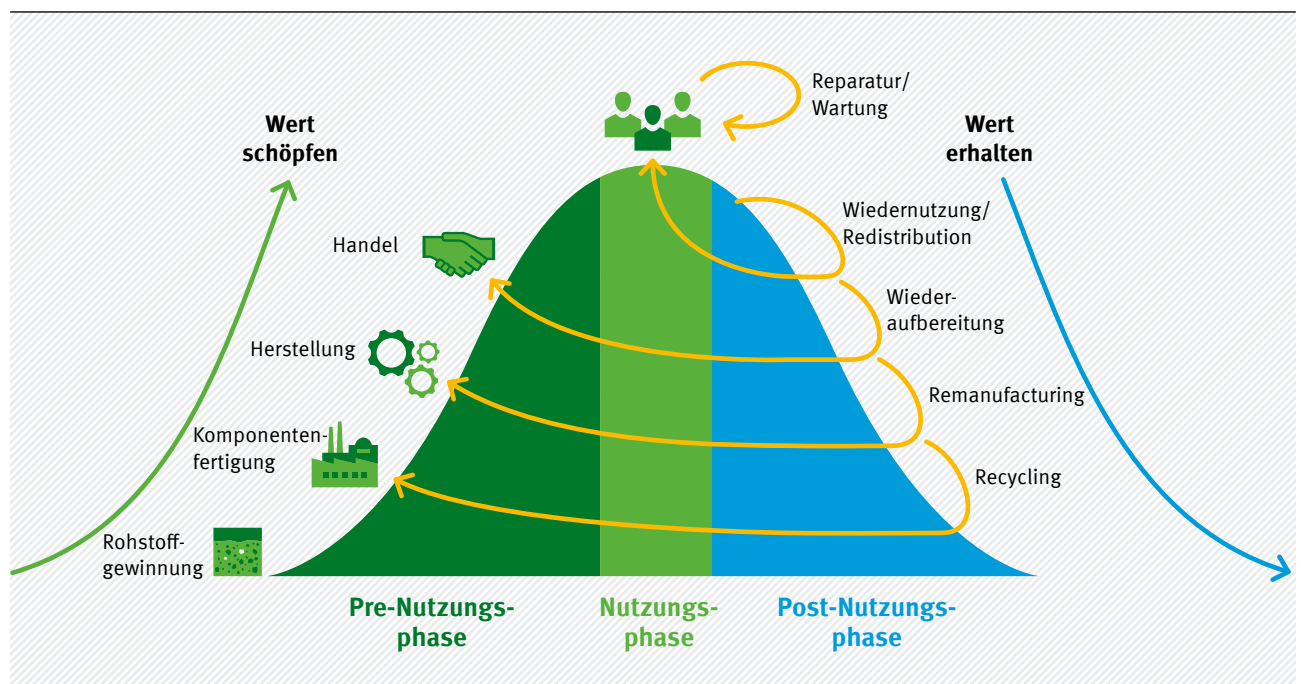
Nutzungsphase: Reuse (Wiederverwenden), Repair (Reparieren), Refurbish (Wiederaufarbeiten), Remanufacture (Wiederherstellen) und Repurpose (Umfunktionieren) sind zentral, um den Ressourcenverbrauch zu minimieren und die Lebensdauer von Produkten zu verlängern.

Post-Nutzungsphase – Nutzungsende und Verwertung: Recycle (Recyceln) und Recover (Rückgewinnen) zielen darauf ab, Produkte und Materialien in den Wertschöpfungsprozess zurückzuführen und den Materialkreislauf zu schließen beziehungsweise Energie aus Abfällen zu gewinnen.

Nachfolgend werden konkrete Chancen und Herausforderungen der Circular Economy im Kontext der GreenTech-Branche am Beispiel von Windenergie- und PV-Anlagen beleuchtet. In diesem Bereich ist im Zuge der Energiewende ein besonderer Handlungsbedarf zu erwarten. Aufgrund der steigenden Nachfrage sind umfassende Investitionen in Windenergie- und PV-Anlagen erforderlich. Gleichzeitig werden Anlagen am Ende ihrer Lebensdauer rückgebaut oder durch leistungstärkere ersetzt (Repowering). Diese Anlagen veranschaulichen, wie Produkte in Kreisläufen gedacht werden können.

Abbildung 52

Konzeptionelles Zielbild der Kreislaufwirtschaft: der „Circular Value Hill“



Quelle: Prognos 2025, basierend auf Circle Economy (2016)

5.3. Die Kreislaufführung von PV-Anlagen

Eine PV-Anlage umfasst eine Reihe verschiedener Komponenten und Rohstoffe. Der zentrale Kern der Anlagen sind dabei die PV-Module, die aus Solarzellen, einer umgebenden transparenten Kunststoffschicht, geringen Mengen Silber sowie Glasscheiben zum Schutz gegen Verschmutzung und Hagel bestehen. Außerdem werden die Module meist von einem Profilrahmen, in der Regel aus Aluminium, eingefasst. Neben Modulen sind Wechselrichter, Verkabelung und je nach Anlagengröße und -typ noch Fernüberwachungs- und Rundfunksteuergeräte Teil der Anlage.⁵¹

Produktinnovationen senken den Rohstoff- und Materialbedarf von PV-Modulen

Der globale Markt der PV-Produktionskapazitäten wird mit Anteilen von über 80 % entlang der gesamten Wertschöpfungskette von China dominiert. Das schränkt die direkten Einflussmöglichkeiten in Deutschland zur Stärkung der Circular Economy in der Modulproduktion ein. Dies betrifft insbesondere das Produktdesign, etwa durch die Entwicklung leicht recycelbarer Module, oder einen verringerten Rohstoff- und Materialeinsatz. Denkbar wäre hier eine regulatorische Anpassung auf europäischer Ebene, die Anforderungen an eine verbesserte Recyclingfähigkeit von PV-Modulen stellt. Darüber könnte zumindest indirekt auf das Produktdesign Einfluss genommen werden.

Trotz der hohen Dominanz Chinas bei der Modulproduktion zeigen Unternehmen wichtige Lösungen auf. So arbeitet zum Beispiel Meyer Burger an Modulen, die mit weniger Rohstoffen auskommen.

Neben Maßnahmen die den Rohstoffverbrauch bereits in der Herstellungsphase (im Sinne der R-Strategien

Rethink: Änderungen im Produktdesign für mehr Circular Economy

Verschiedene Hersteller im PV-Bereich arbeiten an Anpassungen im Produktdesign, um die Kreislauffähigkeit ihrer Produkte zu stärken. So setzt beispielsweise der Hersteller Meyer Burger im Aufbau seiner Wafer auf eine Minimierung der Dicke und erzielt damit eine Reduktion des Rohstoffbedarfs.

Die Recyclingfähigkeit der Module verbessern viele Hersteller durch den Einsatz von Glas-Glas-Modulen. Dabei besteht die Rückseite des Moduls aus Glas anstelle von Folie. Letztere ist schwer vom Glas zu lösen und zu recyceln. Dies erschwert die hochwertige stoffliche Verwertung der Materialfraktionen. Deshalb wird die Kunststoffolie gegenwärtig der energetischen Verwertung zugeführt. Durch die Substitution der Folie durch eine weitere Glasscheibe kann auch die Glasfraktion einfacher hochwertig recycelt werden.

Rethink und Reduce) reduzieren, ist es auch wichtig, Maßnahmen im Sinne nachrangiger R-Strategien zu stärken. Ein Aspekt ist dabei eine Informationsbereitstellung entlang der Wertschöpfungskette, um das Recycling zu erleichtern oder erst zu ermöglichen. Eine Möglichkeit dies umzusetzen ist ein digitaler Produktpass, der die Produktzusammensetzung und Rohstoffinformationen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg abrufbar macht.

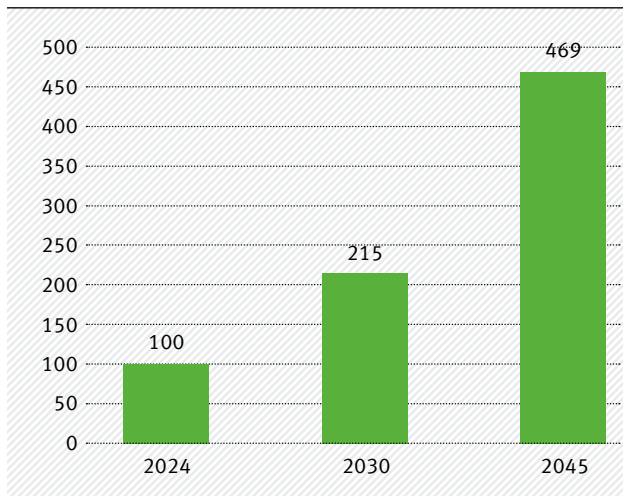
R-Strategien der Nutzungsphase von PV-Anlagen gewinnen an Bedeutung

Die Umsetzung von Maßnahmen auf Basis des deutschen Ausbauplans würde bis zum Jahr 2045 zu einer Versechsfachung der installierten PV-Kapazitäten führen (Abbildung 53).

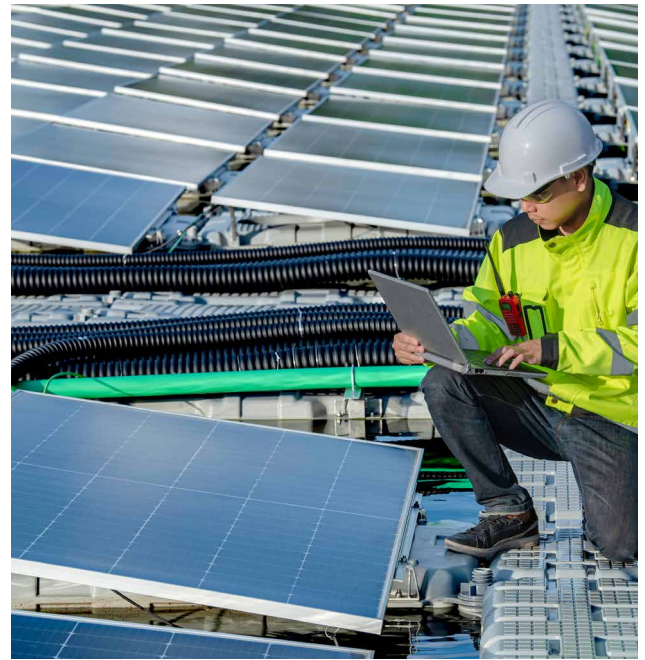
⁵¹ Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023). *Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045*. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität – Langfassung. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf

Abbildung 53

Installierte Leistung PV (2024) und Ausbaupfad bis zum Jahr 2045 in GW



Quelle: Prognos/ Agora Energiewende (2024) und Umweltbundesamt (2025)



Der steile Markthochlauf wirkt sich auch auf die Kreislaufführung von PV-Anlagen aus. Der Bedarf an PV-Modulen wird in Zukunft mit steigendem Kapazitätsaufbau stark zunehmen und mit entsprechenden Rohstoffeinsätzen einhergehen. So nimmt die durch den deutschen Kapazitätsaufbau bedingte Menge des jährlichen Einsatzes von Silizium zunächst stark zu, geht in den Folgejahren ausgehend von technologischen Innovationen jedoch zurück. Grund hierfür ist eine sinkende Materialintensität.⁵² Die insgesamt eingesetzte jährliche Rohstoffmenge, die benötigt wird, um deutsche Bedarfe zu decken, verbleibt jedoch auch langfristig auf hohem Niveau. Durch die im Bestand befindlichen Rohstoffmengen steigt die Relevanz der Produktlebensdauer und des anschließenden Recyclings.

Produktlebensdauer von PV-Anlagen gewinnt an Bedeutung

Die potenzielle Lebensdauer eines PV-Moduls liegt bei etwa 20-30 Jahren. Moderne Solarmodule verlieren nur circa 0,3 % bis 0,6 % der Nennleistung pro Jahr. Somit ergeben sich die Rückbaumengen,

zumindest bei privaten Haushalten, größtenteils aus den Kapazitäten nach ca. 30 Jahren Nutzung. Entsprechend würde ab den 2040er Jahren der Rücklauf defekter oder ausgedienter PV-Module deutlich zunehmen. Es gibt jedoch Faktoren, die bereits früher zu einem Ansteigen der dem Recycling zugeführten Mengen führen könnten. Bei industriellen Anlagen könnte die EEG-Gesetzesanpassung vom 01. Januar 2023 dazu führen, dass aus ökonomischen Gründen Anlagen nicht nur deutlich vor der möglichen Lebensdauer, sondern bereits vor dem Ablauf der EEG-Förderung dem Recycling zugeführt werden.⁵³ Das Repowering von Freiflächenanlagen wurde Anfang 2023 dahingehend vereinfacht, dass ein vergütungserhaltendes Repowering möglich ist.⁵⁴

Neben der Verlängerung der Lebensdauer von PV-Modulen könnten theoretisch auch andere R-Strategien in der Nutzungsphase eine entscheidende Rolle spielen. Für die Wiederverwendung von PV-Modulen sind die steigende Effizienz pro Fläche von Modulgeneration zu Modulgeneration sowie ein sehr starker Preisverfall für neue PV-Module (insbesondere durch

⁵² Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023). *Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045*. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität – Langfassung. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.stiftung-klimateilnahme.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf

⁵³ Clearingstelle EEG/KWKG (2025). *Kann ich meine PV-Anlage zu früher gültigen Vergütungssätzen erweitern oder „repowern“?* Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/haeufige-rechtsfrage/100>.

⁵⁴ Im Rahmen der Erhöhung der installierten Leistung durch das Repowering besteht bis zur bisherigen installierten Leistung ein Vergütungsanspruch durch das EEG. Für die erweiterte Leistung, die über die bisherige Leistung hinausgeht, besteht kein Zahlungsanspruch.

günstige PV-Module aus China) allerdings Faktoren, die ökonomisch die Wiederverwendung stark begrenzen.⁵⁵ Auch das Remanufacturing und Refurbishing spielen aufgrund der niedrigen Modulpreise keine Rolle.

Nicht alle defekten PV-Anlagen werden in Deutschland verwertet

Seit Oktober 2015 werden PV-Module von der Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE-Richtlinie – Waste of Electrical and Electronic Equipment) erfasst. Diese Richtlinie wird durch das nationale Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) umgesetzt. Dabei sind auch PV-Module durch Besitzer*innen⁵⁶ einer vom Haushaltsabfall getrennten Sammlung zuzuführen.

Nach Informationen aus der Branche werden trotz der bestehenden Rückgabemöglichkeiten (u. a. auf Wertstoffhöfen oder bei Händlern) nicht alle defekten Abfall-Module ordnungsgemäß erfasst und der Verwertung zugeführt. Es scheint Anreize zu geben alte PV-Anlagen nicht fachgerecht zu entsorgen, sondern

auf anderen Wegen (zu exportieren und) zu verwerten, die nicht klar erfasst und definiert sind.

Ein Kernproblem: Es gibt einen gewissen Spielraum, ob beispielsweise bei Solarparks die abgebauten PV-Module noch als Produkt (Gebrauchtgerät) angesehen werden, das einer Zweitverwendung zugeführt werden kann, oder als Abfall, der einer Erstbehandlung und Verwertung zuzuführen ist. Hier muss sichergestellt werden, dass abgebaute PV-Module tatsächlich nur als Produkt angesehen und verkauft werden, wenn deren Abfalleigenschaft noch nicht eingetreten ist.

Innovative Lösungen, um Rohstoffe zurückzugewinnen

Nach der ordnungsgemäßen Sammlung und Rücknahme von alten PV-Modulen durch die öffentlichen Entsorger, die Vertreiber oder die Hersteller, müssen die Altmodule einer Erstbehandlung zugeführt werden. Diese ist gesetzlich verpflichtend und wird in zertifizierten Erstbehandlungsanlagen durchgeführt. Vor der Erstbehandlung ist zu prüfen,

Produkt für Zweitverwertung oder Abfall?

In Interviews mit den PV-Recyclingunternehmen wurde deutlich, dass es für Solarparkbetreiber einen klaren finanziellen Anreiz gibt, Solarmodule bei der Erneuerung von Solarparks noch als Produkt aufzufassen und weiterzuverkaufen, obwohl diese nicht mehr für eine Wiederverwendung geeignet sind. Dieser Anreiz lässt sich anhand des folgenden Rechenbeispiels verdeutlichen: Der Verkaufspreis liegt bei einem Solarpark mit PV-Modulmengen im vierstelligen Tonnenbereich meist im Bereich von etwa einem 1 Euro pro Modul. Wenn man für ein Modul circa 20 kg Gewicht annimmt, entspricht eine Tonne PV-Module 50 €. Die Kosten für die Entsorgung liegen hingegen bei circa 100 Euro pro Tonne. Dadurch ergibt sich ein klarer monetärer Anreiz für Solarparkbesitzer, die gebrauchten PV-Module als Produkt aufzufassen und dem „Graumarkt“ zuzuführen.

Bei einem Solarpark mit 250.000 Modulen ständen dann circa 500.000 Euro an Entsorgungskosten potenziellen Einnahmen von 250.000 € bei einem Weiterverkauf der gebrauchten Module auf dem Graumarkt gegenüber. Wichtig ist hierbei hervorzuheben, dass die Kosten für das Recycling – ausgehend von der bestehenden Produktverantwortung – seit dem 24.10.2015 grundsätzlich durch die Hersteller zu tragen und für die Betreiber – soweit es keine abweichende vertragliche Einigung gibt – kostenlos wären.

⁵⁵ Diese Faktoren führen dazu, dass es sehr schwierig ist, für die Wiederverwendung von funktionstüchtigen PV-Modulen einen Markt zu finden, insbesondere da auch noch Transport- und Prüfkosten zu berücksichtigen sind. Ein potenzielles Anwendungsfeld könnten Hausbesitzer sein, die nur eine begrenzte Leistung benötigen und bei denen sich die günstigeren Anschaffungskosten von gebrauchten PV-Modulen aufgrund der höheren Kostenstrukturen für neue PV-Module ggfs. rechnen.

⁵⁶ gemäß § 10 Absatz 1 Satz 1 ElektroG

ob das Altmodul einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden kann. Diese Prüfung ist durchzuführen, soweit sie technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist. Bei der Vorbereitung zur Wiederverwendung als ein Verfahren der Erstbehandlung werden die Altmodule repariert und Ersatzteile ausgetauscht, um sie anschließend erneut auf dem Markt bereitstellen zu können. Altgeräte, die nicht für eine Vorbereitung zur Wiederverwendung geeignet sind, werden im Rahmen der weiteren Erstbehandlung in verschiedenen Behandlungsstufen zerkleinert, von Schadstoffen befreit und in Material- und Wertstofffraktionen getrennt (z. B. Glas, Metall, Kunststoff, Mischfraktionen).

Für die Behandlung und die Verwertung von PV-Modulen existieren in Deutschland mehrere Anlagen bzw. Unternehmen mit unterschiedlichen Behandlungsverfahren für die verschiedenen Modultypen (Abbildung 54). Dabei unterscheiden sich die Verfahren sowohl hinsichtlich des Aufbereitungsprozesses

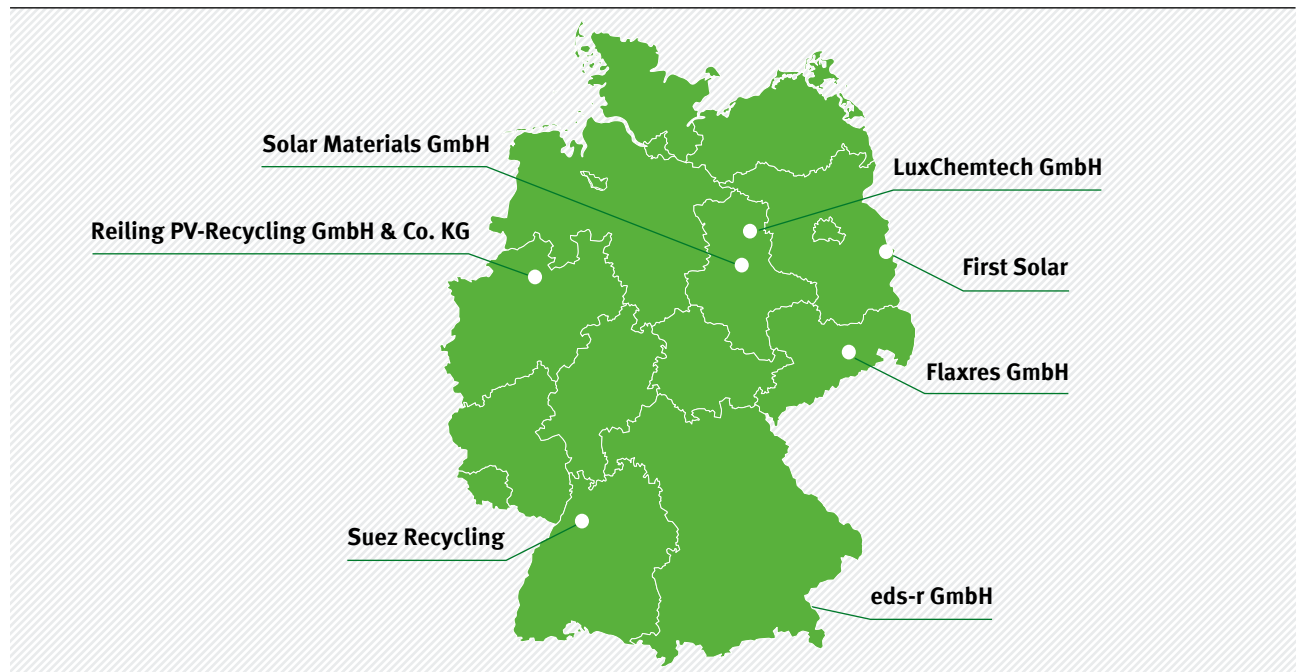
(mechanischer Aufbereitungsprozess vs. händischer Sortierungsprozess), als auch dahingehend, ob eine Behandlung mobil oder an festen Orten erfolgt.

Zurzeit existiert für die Verwertung von PV-Modulen eine Reihe möglicher Behandlungsverfahren.⁵⁷ Die Behandlung der Altmodule konzentriert sich dabei aktuell zumeist noch auf die Rückgewinnung der Wertstoffe Aluminium, Glas und Kupfer. Perspektivisch stellen jedoch die Silizium- und Silberrückgewinnung entscheidende Hebel für ein ökonomisches Recycling von Solaranlagen dar. Bei hochgradiger Rückgewinnung dieser beiden Wertstoffe bietet das Recycling von PV-Anlagen angesichts des Markthochlaufs an PV-Modulen und steigender Recyclingnachfrage hohes Potenzial und Wachstumschancen für die GreenTech-Branche.

Die Unternehmen Reiling und SolarMaterials nutzen unterschiedliche innovative Recyclingprozesse.

Abbildung 54

Beispielfirmen für das PV-Modul-Recycling



Quelle: Prognos AG 2025

⁵⁷ EU Recycling Magazin (2022). Photovoltaikanlagen: Das Recycling entwickelt sich. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://eu-recycling.com/Archive/34578>

Zwei unterschiedliche Best-Practice-Verfahren für das Recycling von kristallinen Silizium-Solarmodulen

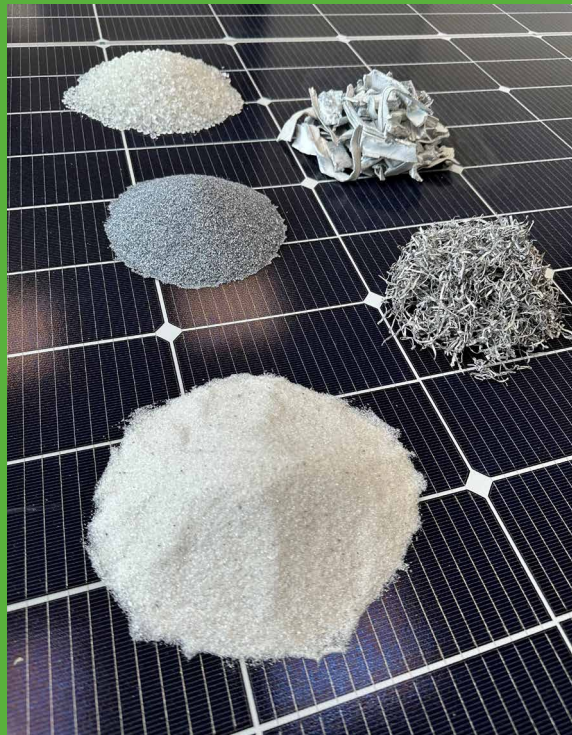
Die Firma Reiling ist einer der größten Recyclingspezialisten in Deutschland und hat im Jahr 2023 das Kompetenzzentrum PV-Recycling in Münster mit einer Recyclingkapazität von 50.000 Tonnen im Jahr eröffnet. Dort werden siliziumbasierte PV-Module gesammelt, auf Vorbereitung zur Wiederverwendung geprüft und – falls dies nicht möglich ist – recycelt. Dafür wurde ein dreistufiger mechanischer Recyclingprozess entwickelt, um Verbundwerkstoffe und Materialien wie Glas, Aluminium, Silizium und Leiterbahnen (verzinnertes Kupfer) aus PV-Altmodulen zurückzugewinnen und Wertstoffkreisläufe nachhaltig zu schließen.

Die Firma SolarMaterials aus Magdeburg betreibt seit dem Jahr 2021 eine vollautomatisierte Recyclinglinie und setzt auf ein thermomechanisches Verfahren. Die Recyclingkapazitäten sollen dabei aufgrund hoher Nachfrage⁵⁸ von 3.000 Tonnen im Jahr 2024 auf circa 10.000 Tonnen im Jahr 2025 steigen. Bis Ende 2026 ist in einer zweiten Ausbaustufe geplant, die Kapazitäten auf 24.000 Tonnen auszubauen.

Dabei unterscheiden sich die beiden Prozessverfahren wesentlich:

Bei Reiling werden die Module zuerst nach der Technologie der Module sortiert. So bleiben ausschließlich siliziumbasierte Module im Prozess und werden mittels eines Radladers in die Recyclinganlage aufgegeben und im ersten Prozessschritt zerkleinert, um den festen Materialverbund aufzulösen. Anschließend werden die einzelnen Materialien mithilfe ihrer physikalischen Eigenschaften separiert und ausgeschleust. Der Aluminiumrahmen und die Kupferkabel können dabei hochwertig recycelt werden. Bei der Glasfraktion werden die organischen Stoffe und Metalle abgetrennt und im Anschluss optische Störstoffe aussortiert. Dadurch erhält man sehr hochwertiges Glas bzw. Glasgranulatfraktionen. In einer Fraktion reichert sich dabei das Silizium an (diese Fraktion wird über die Leitfähigkeit sortiert), so dass diese Siliziumfraktion einem geeigneten Weiterverarbeitungsprozess zugeführt werden kann.

Solar Materials setzt hingegen ein thermo-mechanisches Verfahren ein. Dabei werden zunächst die kupferhaltigen Kabel und die Anschlussdose mechanisch abgetrennt sowie der Aluminiumrahmen entfernt. Anschließend wird Prozesswärme genutzt, um die Kunststoffolie, die auf der Vorderseite des Solarmoduls das Glas und die Solarzellen verbindet, weich zu machen und ein Lösen des Glases zu ermöglichen. Dadurch ist eine Delaminierung möglich, d. h. das Glas lässt sich anschließend von den Silizium-Solarzellen herunterschieben und man erhält ein sehr sauberes Glas sowie die Solarzellen. Im anschließenden Silbergewinnungsprozess werden über 70 % des eingesetzten Silbers mechanisch zurückgewonnen und im Anschluss durch Scheideanstalten zu Feinsilber aufbereitet. Das verbleibende Laminat, bestehend aus der Kunststoffrückseite, Folien und Siliziumzellen, wird durch eine mit Partnern entwickelte Technologie in seine Fraktionen getrennt und als recyceltes metallurgisches Silizium verkauft.



58 Im Herbst 2024 wurden circa 6.000 Tonnen an PV-Modulen am Standort Magdeburg gelagert, um recycelt zu werden.

Der aktuelle Stand zur Rückgewinnung und Wiederverwendung von den verschiedenen Materialien beziehungsweise Fraktionen ist dabei bei beiden Recyclingverfahren wie folgt:

- ▶ Die Kupferkabel sowie der Aluminiumrahmen dienen jeweils als vollwertiger Rohstoff für die Kupfer- bzw. Aluminiumindustrie und die Rückgewinnungsquote liegt bei über 98 % bei beiden Firmen. Mengenmäßig ist der Aluminiumanteil mit circa 15 % bis 20 % am Gesamtgewicht dabei weitaus bedeutender als der Kupferanteil mit circa 1 %.
- ▶ Der Kunststoff, der u. a. in der Rückseitenfolie, dem Kabel und der Ummantelung enthalten ist, macht circa 10 % der Gesamtmasse aus und wird aufgrund der fehlenden Kunststoffrecyclinglösungen jeweils der energetischen Verwertung zugeführt.
- ▶ Das Glas hat mit 65 % bis 70 % den größten Gewichtsanteil am PV-Modul. Es wird als sortenreines Recyclingglas bei SolarMaterials für hochwertige Verpackungen eingesetzt. Bei Reiling entsteht ebenfalls ein hochwertiges Material, das für Behälter- und Flachglas sowie in der Dämmindustrie genutzt werden kann. Die Rückgewinnungsquote liegt bei beiden Verfahren bei mindestens 85 %.
- ▶ Beim Silizium ergibt sich aus dem hohen Rohstoffwert trotz circa 4 % Masseanteil sowie der Tatsache, dass die Veredelung von Siliziumoxid zu elementarem Silizium sehr energieintensiv ist, ein sehr hoher Anreiz für die Kreislaufführung. Die Kreislaufführung war bisher allerdings in einem Massenprozess nicht möglich. Im Prozess von Reiling kann ein nennenswerter Anteil Silizium zurückgewonnen werden. Aktuell wird geprüft, welche Anwendungen mit der dabei gewonnenen Reinheit möglich sind. Die Spanne der möglichen Siliziumanwendungen reicht dabei von einem Einsatz in der Metallurgie bis zur Anwendung in PV-Modulen oder Halbleitern. SolarMaterials kann mit seinen Verfahren zwischen 70 % und 85 % des Siliziums rückgewinnen und für eine Vielzahl von

Anwendungen von Legierungen über chemische Produkte bis zu Solarzellen einsetzen.

- ▶ Die Silberrückgewinnung ist zentral für die Wirtschaftlichkeit des Recyclings von PV-Modulen. Obwohl der mengenmäßige Anteil in einem PV-Modul bei unter 0,1 % liegt, kann aktuell laut SolarMaterials fast die Hälfte des Recyclingwertes dem Silber zugeschrieben werden.⁵⁹ Dies liegt daran, dass SolarMaterials aktuell circa 80 % des Silbers zurückgewinnen kann. Bei Reiling wird das am Silizium haftende Silber komplett an spezialisierte Partnerunternehmen zur Rückgewinnung weitergereicht.

Damit zeigen die Recyclingverfahren beider Firmen große Fortschritte, was die Rückgewinnung von Silber und Silizium angeht. Aufgrund der hohen zukünftig zu erwartenden PV-Abfallmengen kann die Rückgewinnung beider Materialien auch strategisch eine große Rolle spielen. Die Solarindustrie verarbeitet circa 15 % des weltweit abgebauten Silbers.⁶⁰ Bei einer Rückgewinnung der in Deutschland und Europa in den Solarmodulen verbauten Silbermengen würde die europäische Recyclingindustrie ab den 2030er Jahren zu einer relevanten Größe auf dem Weltmarkt werden. Angesichts dieser Potenziale erlangen Investitionen in die europäische Recyclingindustrie auch geopolitisch-strategisch an Bedeutung. Ungewiss ist nach aktuellem Stand, ob das recycelte Silber und die anderen aus dem Recycling gewonnen Rohstoffe dann auch in Europa wiederverwendet werden. Nach Angaben des Geschäftsführers von SolarMaterials sind asiatische Hersteller aktuell viel stärker daran interessiert, sich die Rohstoffe (gerade das wertvolle Silber und Silizium) aus dem Recycling zu sichern und sich frühzeitig strategisch in diesem zukünftig wachsenden Markt zu positionieren. Besonders die mögliche Vermarktung recycelter Rohstoffe als „Made-in-Europe“ stellt einen Anreiz dar. Damit tragen die ökonomischen und strategischen Anreize der asiatischen Hersteller aktuell durch deren Investitionen dazu bei, eine europäische Recyclingindustrie mitaufzubauen und eine Kreislaufwirtschaft zu forcieren.

⁵⁹ Laut SolarMaterials sind es 47 % (Quelle: Unternehmenspräsentation)

⁶⁰ Fraunhofer ISE (2022). *Kupfer statt Silber: Neuer Schub für die Solarzellen-Produktion*. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2022/september-2022/kupfer-statt-silber-neuer-schub-fuer-solarzellen.html>



5.4. Circular Economy für Windenergieanlagen

Windenergieanlagen sind komplexe Anlagen, die aus mehreren Tausend Komponenten bestehen. Zentrale Komponenten sind dabei der Rotor mit der Nabe und den Rotorblättern, mit denen aus der kinetischen Energie des Windes Bewegungsenergie generiert wird, sowie der Generator, der diese Bewegungsenergie in elektrischen Strom umwandelt. Der Generator besteht aus Kupferspulen sowie einem Elektro- oder Permanentmagneten. Manche Windenergieanlagen verfügen außerdem zusätzlich über ein Getriebe, das sich zwischen Rotor und Generator befindet und die langsame Energie des Rotors in schnellere Drehbewegungen umwandelt.⁶¹ Außerdem sind Turm, Fundament und Netzanschluss weitere Bestandteile einer Windenergieanlage.

Herausforderung: Die Bedeutung von Seltenen Erden steigt

Mengenmäßig macht Beton durchschnittlich circa 60 % bis 65 % und Stahl 30 % bis 35 % einer Windenergieanlage aus. Sofern der Turm ebenfalls aus Beton anstelle von Stahl besteht, kann der Anteil von Beton bis zu 90 % betragen.⁶² Die Rotorblätter sind aus leichten, aber robusten Faserverbundstoffen (2 % bis 3 % der Gesamtmasse) gefertigt. Dabei werden zwei Verbundstoffarten angewendet: glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sowie in geringerem Maße kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK).

Es gibt vier verschiedene Typen von Windenergieanlagen, die sich vordergründig hinsichtlich ihres verwendeten Generortyps und des Einsatzes von Getrieben unterscheiden⁶³:

61 Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023). *Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045*. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität – Langfassung. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf

62 Bundesverband WindEnergie e.V. (2023). *Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf

63 International Energy Agency (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

- Permanentmagnet-Generatoren mit Getriebe stellen rund 75 % der Offshore-Anlagen und 20 % der Onshore-Anlagen.
- Permanentmagnet-Generatoren ohne Getriebe werden bei rund 20 % der Offshore-Anlagen und rund 5 % der Onshore-Anlagen verwendet.
- Etwa 70 % der Onshore-Anlagen nutzen Induktionsgeneratoren mit Getriebe.
- Elektromagnetisch erregte Synchrongeneratoren ohne Getriebe werden als Nischenprodukt für rund 5 % der Onshore-Anlagen eingesetzt.

Der wesentliche Unterschied zwischen den verschiedenen Windenergieanlagentypen liegt somit im Aufbau des Magnetfeldes im Generator. Die ersten beiden Anlagentypen benötigen auf Seltenen Erden beruhende Permanentmagnete. Induktionsgeneratoren und elektromagnetische Synchrongeneratoren nutzen Elektromagnete oder elektromagnetisch induzierte Magnetfelder, die zwar ebenfalls Seltene Erden benötigen, jedoch in deutlich geringerem Umfang.⁶⁴ Der Einsatz von Permanentmagneten ermöglicht dabei hohe Wirkungsgrade und eine effiziente Energieumwandlung. Die internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass bis 2040 die Bedeutung von Permanentmagnet-Generatoren sowohl für Offshore- als auch Onshore-Windenergieanlagen weiter zunimmt. Entsprechend wird auch der Bedarf an Seltenen Erden steigen.

Wettbewerbsfähige Windbranche in Deutschland entwickelt innovative Lösungen

Die deutsche Windindustrie umfasst zahlreiche Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, die von der Rohstoffbeschaffung bis hin zur Produktion und Wartung der Windenergieanlagen tätig sind. Die Mehrheit sind mittelständische Unter-

nehmen, die sich auf spezifische Segmente wie beispielsweise die Produktion von Rotorblättern spezialisiert haben. Diese breite, in Deutschland befindliche Wertschöpfungsbasis in der Produktion bietet beteiligten Unternehmen die Möglichkeit, viel aktiver als bei PV-Anlagen darauf Einfluss zu nehmen, wie und was produziert wird.

Trotz einer im Vergleich zur PV breiter aufgestellten Produktion in Deutschland und Europa bestehen auch bei der Herstellung von Windenergieanlagen in einigen Bereichen der Lieferkette starke Abhängigkeiten von ausländischen Zulieferern⁶⁵, z. B. bei zentralen Komponenten wie Rotorblättern, Getrieben und Türmen. Besonders ausgeprägt ist die Abhängigkeit dabei bei den Permanentmagneten und den dafür genutzten Seltenen Erden. Insgesamt haben chinesische Firmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette bei der Herstellung von Permanentmagneten – von der Rohstoffförderung der Seltenen Erden, der Rohstoffweiterverarbeitung bis zur Produktion der Permanentmagnete – einen dominierenden Marktanteil von über 90 %.⁶⁶

Durch verschiedene Maßnahmen in der Produktion können die Rahmenbedingungen für das Recycling aktiv mitgestaltet werden, beispielsweise beim Produktdesign. Mit dem „RecyclableBlade“ hat Siemens Gamesa ein komplett recyclingfähiges Rotorblatt auf den Markt gebracht. Durch den Einsatz eines neuen Harzes können die einzelnen Komponenten und verwendeten Verbundwerkstoffe wie Harz, Glas- und Kohlefasern deutlich besser recycelt werden und stehen nach dem Recycling für die Nutzung in anderen Branchen zur Verfügung. Erste Windparkbetreiber setzen diese neuen Rotorblätter trotz höherer Kosten bereits ein, wie z. B. RWE mit dem erfolgreich errichteten Offshore Windpark Kaskai in der Nordsee und einem zukünftigen Windpark in Sofia.⁶⁷

64 Seltene Erden werden als kritisch für die EU-Wirtschaft und als strategisch für die grünen und digitalen Transformation klassifiziert

65 von der Rohstoffbeschaffung bis hin zum Bau von Windrädern und Windparks durch Original Equipment Manufacturers (O-EMs).

66 Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023). *Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045*. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität – Langfassung. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung_2.pdf

67 Nachdem der Einsatz dieser neuen Technologie der recycelbaren Rotorblätter erfolgreich am deutschen Offshore-Windpark Kaskai getestet wurde, setzt RWE die recycelbaren Rotorblätter von Siemens Gamesa jetzt im größten RWE-Bauprojekt vor der britischen Nordseeküste im Offshore-Windpark Sofia ein. Dabei werden 44 der 100 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 1,4 GW mit insgesamt 132 recycelbaren Rotorblättern ausgestattet, was das Maximum angesichts der aktuellen Marktkapazitäten dieser Technologie ist. Zusätzliche Informationen unter <https://www.rwe.com/presse/rwe-offshore-wind-gmbh/2023-03-09-rwe-nutzt-recyclebare-rotorblaetter-fuer-offshore-windpark-sofia/>

RecyclableBlade: Recyclingfähige Rotorblätter

Windturbinenblätter werden aus Glas- und Kohlenstofffasern, einem Kernmaterial wie Holz oder PET-Schaum und Harz gegossen. Nach der Außerbetriebnahme der Windenergieanlage besteht die Herausforderung darin, das Harz von den anderen Materialien zu trennen, um die Komponenten zu recyceln. Dies ist bisher in der Regel nicht in einem Maße möglich, das die Gewinnung hochwertiger Materialströme erlaubt, sodass die Rotorblätter überwiegend zur thermischen Verwertung genutzt werden.

Eine innovative Lösung stellt hier das Recyclable-Blade des Herstellers Siemens Gamesa dar. Es wird auf die gleiche Weise hergestellt wie ein Standardblatt. Der Unterschied besteht in der Verwendung eines neuartigen Harzes, das eine effiziente Trennung von den anderen Komponenten am Ende der Nutzungsdauer des Rotorblattes ermöglicht. Dabei wird das Rotorblatt in eine erhitzte saure Lösung eingetaucht, die das Harz von den Glasfasern, dem Kunststoff, dem Holz und den Metallen trennt. Die abgetrennten Materialien können aus der Lösung zurückgewonnen und in neuen Produkten verwendet werden, die den technischen Eigenschaften der Materialien entsprechen, z. B. in der Automobilindustrie oder in Konsumgütern wie Reisetaschen und Flachbildschirmgehäusen.



Repowering führt bereits kurzfristig zu steigenden Recyclingmengen

Bei der Nutzung von Windenergieanlagen wird es in den nächsten Jahren voraussichtlich zu einer massiven Erhöhung der Kapazitäten kommen. Windenergie spielt beim Ausbau der Erneuerbaren eine zentrale Rolle. Bis 2030 wird sich die installierte Off- und Onshore Leistung mit 124 GW fast verdoppeln. Bis 2045 wird mit einer Vervierfachung der Leistung auf 253 GW gerechnet.⁶⁸

Der dynamische Markthochlauf wirkt sich bei den Windenergieanlagen, wie auch bei PV, auf zwei Ebenen auf die Stärkung der Kreislaufführung aus. Zum einen nimmt der Bedarf an Windenergieanlagen und den darin enthaltenen Schlüsselrohstoffen stark zu, etwa der Bedarf für Seltene Erden.

Zum anderen nimmt im Zuge des Markthochlaufs die Bedeutung der Produktlebensdauer und der Frage, wie lange die Windenergieanlagen genutzt werden können, an Bedeutung zu. Dabei spielt die Zunahme des Repowering eine wichtige Rolle.⁶⁹ Anpassungen im EEG 2023 können dazu führen, dass aus wirtschaftlichen Gründen mehr industrielle Windenergieanlagen vor dem Ende der technischen Lebensdauer und sogar vor dem Ablauf der EEG-Förderung ersetzt und somit früher dem Recycling zugeführt werden. Laut dem Bundesverband Windenergie wurden im ersten Halbjahr 2024 bereits 29 % der neuen Onshore-Windenergieanlagen im Zuge von Repowering-Projekten installiert.⁷⁰

Das Recycling von Windenergieanlagen birgt große Potenziale – etwa um Seltene Erden zu gewinnen

Das Recycling von Windenergieanlagen bietet mittel- und langfristig die Möglichkeit, Materialien im Kreis

zu führen und Stoffkreisläufe zu schließen. Aktuell sind bereits zwischen 80 % und 90 % der Gesamtmasse der Anlagen in etablierten Recyclingkreisläufen wieder verwertbar.⁷¹ Insbesondere Materialien wie Stahl, Kupfer, Aluminium und Beton lassen sich hochwertig wiederverwerten.

Eine Hauptherausforderung des Recyclings ist die Verwertung der Rotorblätter aus glasfaserverstärkten- oder carbonfaserverstärkten Kunststoffen (GFK und CFK).⁷² Für diese Materialien bestehen noch keine Recyclingstrukturen, die eine umfassende und hochwertige Rückgewinnung der Materialien ermöglichen. Daher werden ausgediente Rotorblätter aus faserverstärkten Kunststoffen überwiegend thermisch verwertet oder als Substitute zum Beispiel bei der Zementherstellung beigemischt. Die thermische Verwertung stellt im Zielbild einer Circular Economy eine suboptimale Endverwertung von potenziell langlebigen Faserverbundstoffen dar. Zudem werden durch die thermische Verwertung erhebliche Treibhausgas-Emissionen freigesetzt. Hieraus ergibt sich ein klarer Bedarf zur Entwicklung von skalierbaren Konzepten für die Verlängerung der Produktnutzungsdauer von Rotorblättern, wie das Reuse und Remanufacturing oder die Entwicklung besserer Recyclingverfahren, die eine Kreislaufführung der Stoffströme ermöglichen.

Neben den fehlenden Recyclingprozessen ist der Wiedereinsatz der recycelten und der zu erwartende Umfang für benötigte Recyclingkapazitäten für faserverstärkte Kunststoffe noch ungeklärt.⁷³ Die nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie schlägt die Einführung eines digitalen Produktpasses für Windenergieanlagen oder Rotorblätter vor.⁷⁴ Dies würde Abfallprognosen sowohl quantitativ als auch qualitativ erheblich verbessern und es Recyclingunternehmen besser

68 Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023). *Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045*. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität – Langfassung. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf

69 Repowering beschreibt den Austausch alter Windenergieanlagen durch neue leistungsstärkere Windenergieanlagen, wodurch auf gleicher Fläche mehr Strom produziert werden kann.

70 Bundesverband WindEnergie e.V. (2025). *Repowering: Mehr Leistung auf weniger Fläche*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/repowering/>

71 Fachagentur Wind und Solar e.V. (2024). *Rückbau und Recycling*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.fachagentur-windenergie.de/themen/rueckbau-und-recycling/>

72 Bundesverband WindEnergie e.V. (2023). *Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf

73 Kühne, C., Stapf, D., Holz, P., Baumann, W., Mühlhopt, S., Wexler, M., Hauser, M., Kalkreuth, J., Mahl, J., Zeller, M., Yogish, S., Gehrmann, H., Stapf, D., Volk, R., Stallkamp, C., Steffl, S., Schultmann, F., Schweppe, R., Pico, D., ..., Beckmann, M. (2022). *Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter: Aufbereitung von Rotorblättern*. Umweltbundesamt (Hrsg.). Texte 92/2022. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau-_und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf

74 Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2024). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). Rahmenbedingungen für eine zirkuläre Wirtschaft*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bmv.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaftsstrategie>

ermöglichen, notwendige Aufbereitungs- und Entsorgungskapazitäten frühzeitiger anzupassen.

Für den Recyclingprozess der Rotorblätter selbst stellt die Trennung des verwendeten Harzes von den anderen Materialien eine zentrale Herausforderung dar. Das Beispiel RecyclableBlade von Siemens Gamesa zeigt, dass es hier Ansätze gibt, die es erlauben bei zukünftig gebauten Windenergieanlagen eine deutlich hochwertige Rückführung der Materialien zu gewährleisten. Allerdings werden diese Innovationen des Produktdesigns erst in 20 bis 30 Jahren nennenswerte Auswirkungen auf die recycelten Mengen haben. Dementsprechend kommt innovativen und skalierbaren Konzepten des Repurpose für bereits verbaute Rotorblätter eine wichtige Bedeutung zu. Ein Beispiel ist das vom Bundeswirtschaftsministerium finanzierte Forschungsvorhaben BladeReUse. Das Projekt untersucht mögliche Anwendungsfelder für den Einsatz der Rotorblätter im Infrastrukturbereich und konzentriert sich dabei auf den Einsatz in Lärmschutzwänden an Autobahnen.⁷⁵ Lärmschutzwände aus Rotorblattsegmenten müssen mindestens die gleichen Anforderungen an die Lebensdauer und technischen Aspekte wie existierende Produkte er-

füllen. Hinsichtlich der wirtschaftlichen Perspektive betonen die interviewten Forscher*innen, dass die Möglichkeit eines Green Public Procurement, bei dem der Zweitnutzung von Materialien ein gewisser Wert zugeschrieben wird und der Preis nicht das einzige Entscheidungskriterium ist, eine entscheidende Unterstützung sein kann, um die Wiederverwendung der Rotorblätter voranzutreiben. Im Clean Industrial Deal der EU werden solche Regelungen für die öffentliche Beschaffung ebenfalls gefordert.

Es gibt eine Reihe weiterer Verfahren, die sich mit der Weiterverwertung von Rotorblattsegmenten beschäftigen, wie beispielsweise das Aachener Projekt rethink*rotor, das Konzepte entwickelt, um ausran- gierte Rotorblätter gewinnbringend in der Bauwirtschaft einzusetzen (z. B. bei Stadionbauten).

Neben den Rotorblättern kommt auch dem Recycling von Permanentmagneten aus den Generatoren eine wichtige Bedeutung zu. Permanentmagnete spielen auch für weitere Technologien der Energie- und Mobilitätswende, vor allem für Elektromotoren eine wichtige Rolle, sodass die Entwicklung eines Recyclingprozesses technologieübergreifend voran-

BladeReUse: Einsatz von Rotorblättern im Infrastrukturbereich

Das Forschungsvorhaben BladeReUse entwickelt eine Methode, um unter anderem Rotorblätter im Autobahnbau für Lärmschutzwände einzusetzen.⁷⁶ Dabei werden die Bauteile in größtmöglicher Abmessung verwendet, d. h. möglichst große Segmente aus den Rotorblättern herausgeschnitten und für die Lärmschutzwände genutzt. Das Projekt untersucht dabei, ob diese Wiederverwendung aus technischer und wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist. Aus technischer Sicht wird die hohe mechanische Festigkeit der Rotorblätter genutzt. Die Lärmschutzwand muss an jeder Stelle ausreichend tragfähig sein sowie genug Schall absorbieren. Hierbei stellt die saubere Herstellung und Abdichtung der Kanten der einzelnen Wandelemente eine Kernherausforderung dar. Außerdem muss das Herstellungsverfahren aus wirtschaftlicher Sicht konkurrenzfähig zum aktuellen Verfahren sein. Hierbei ist auch zu klären, wer die technische Verantwortung für das Produkt übernimmt.

Das Projekt läuft bis 2026. Nach Projektabschluss sollen mit diesem Ansatz in 15 Jahren bis zu 60 % der außer Betrieb genommenen Rotorblätter für Lärmschutzwände eingesetzt und bis zu 650.000 Tonnen CO₂ eingespart werden.

⁷⁵ Weitere mögliche Anwendungsfelder sind Fassadenelemente, die Überdachung für Haltestellen, oder als Stützmasse von Gebäuden in Baugruben.

⁷⁶ Karlsruhe Institut für Technologie (2023). *Entwicklung einer Methode zur ressourceneinsparenden und CO₂-reduzierenden Weiterverwendung von Rotorblättern im Infrastrukturbereich (BladeReUse)*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://stahl.vka.kit.edu/forschung_2004.php

getrieben werden kann.⁷⁷ Um dieser Notwendigkeit Rechnung zu tragen, gibt es im EU Critical Raw Materials Act (CRMA) Regeln zum Recycling von Permanentmagneten.⁷⁸

Bei Windenergieanlagen sind die Magnete deutlich größer als bei anderen Anwendungen. So beträgt die mittlere Magnetmasse bei Windenergieanlagen mit Getriebe 160 kg pro MW, im Vergleich zu etwa 2,5 kg in Elektrofahrzeugen.⁷⁹ Deshalb lohnt es sich bereits heute beim Rückbau von Windenergieanlagen, die enthaltenen Magnete gezielt zu sammeln. Allerdings schränken auch beim Recycling der Generatoren der Windenergieanlagen die komplexen und kostenintensiven Recyclingverfahren die wirtschaftliche Effizienz des Recyclingprozesses ein. Aktuell werden Permanentmagnete nur in Japan oder China im großindustriellen Maßstab recycelt. In Europa werden bisher nur Pilotprojekte durchgeführt. Dies hat sowohl wirtschaftliche, technologische als auch mengen-

bezogene Gründe. Windenergieanlagen mit Permanentmagneten werden erst seit etwa 2014 (größtenteils Offshore) verwendet. Dementsprechend stehen voraussichtlich erst ab Mitte 2030 nennenswerte Mengen für das Recycling zur Verfügung. Bis dahin sollte das Recycling von Permanentmagneten auch in Europa wirtschaftlich rentabel gemacht werden. Die Europäische Kommission versucht dies im Critical Raw Material Act durch stufenweise steigende Anforderungen an die Inverkehrbringung von Permanentmagneten zu unterstützen und somit das Angebot von wie auch die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen zu steigern sowie die Kosten zu senken.⁸⁰ In der Industrie gibt es unterschiedliche Einschätzungen zur Vorgabe, da das Zieljahr 2032 einerseits einen Anreiz setzt, entsprechende Recyclingprozesse aufzubauen, andererseits bis dahin die notwendigen Mengen aus Abfallströmen zur Verfügung stehen müssen (vgl. Artikel 5, 28 und 29, CRMA).⁸¹

77 Schönfeldt, M., Diehl, O., Gassmann, J. (2024): *Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland*. DERA Rohstoffinformationen 60: 45 S., Berlin. <https://doi.org/10.25928/s7mb-e986>

78 Europäische Union (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020 (Text with EEA relevance)*. (2024). Official Journal, L 1252, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>

79 Reimer, M. V., Schenk-Mathes, H. Y., Hoffmann, M. F., & Elwert, T. (2018). *Recycling decisions in 2020, 2030, and 2040—when can substantial NdFeB extraction be expected in the EU?* Metals, 8(11), 867. <https://doi.org/10.3390/met8110867>

80 Simon, F. (2023). *Seltene Erden: EU möchte Windräder und Co. für Dauermagneten recyceln*. Euractiv. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/seltene-erden-eu-moechte-windraeder-und-co-fuer-dauermagneten-recyceln/>

81 Europäische Union (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020 (Text with EEA relevance)*. (2024). Official Journal, L 1252, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>



Quellen

- Agora Think Tanks (2024). *Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf
- Alex, B. (2022). *Branche hofft auf frischen Wind durch Offshore-Projekte*. Abgerufen am 26. Mai 2025 von <https://www.gtai.de/de/trade/indien-wirtschaft/windenergie>
- Bernoth, K. & Meyer, J. (2023). *US-Investitionspaket Inflation Reduction Act erfordert schnelles strategisches Handeln der EU*. Wochenbericht Nr. 6/2023. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. https://doi.org/10.18723/diw_wb:2023-6-1
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (2023). *Neues Monitoring soll die Lebensdauer von Onshore-Anlagen verlängern*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bam.de/Content/DE/Pressemitteilungen/2023/Energie/2023-06-15-monitoring-onshore-windenergieanlagen.html>
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2025). *Merkblatt für das Energieeffizienzgesetz (EnEFG)*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_merkblatt_energieeffizienzgesetz.pdf
- Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2024). *EU führt Innovationen bei der Behandlung kommunalen Abwassers ein*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bmu.de/pressemitteilung/eu-fuehrt-innovationen-bei-der-behandlung-kommunalen-abwassers-ein>
- Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2024). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). Rahmenbedingungen für eine zirkuläre Wirtschaft*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bmu.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaftsstrategie>
- Bundesnetzagentur (2024). *Szenariorahmenentwurf zum Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/NEP/DL_Szenariorahmen/SR_Entwurf2025Strom.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bundesverband Deutsche Startups e.V. (2024). *Green Tech Monitor 2025*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://startupverband.de/fileadmin/startupverband/mediaarchiv/research/green_tech_monitor/GreenTech_Monitor_2025_.pdf
- Bundesverband WindEnergie e.V. (2023). *Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20230801_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf
- Bundesverband WindEnergie e.V. (2025). *Repowering: Mehr Leistung aufweniger Fläche*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/repowering/>
- Clean Investment Monitor (2025). *Clean investment by quarter*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.cleaninvestmentmonitor.org/>
- Clearingstelle EEG|KWKG (2025). *Kann ich meine PV-Anlage zu früher gültigen Vergütungssätzen erweitern oder „repowern“?*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.clearingstelle-eegekwwg.de/haeufige-rechtsfrage/100>
- Deutsche Industrie- und Handelskammer (2024). *Kreislaufwirtschaft als Chance: DIHK Umfrage zur Circular Economy*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.dihk.de/resource/blob/117788/4847632a7db7d7cdf922f1dc55e6ac8a/dihk-circular-economy-report-2024-v3-data.pdf>
- Enkhardt, S. (2025). *Übertragungsnetzbetreibern liegen zum Jahreswechsel 650 Anschlussanfragen für große Batteriespeicher mit 226 Gigawatt vor*. PV-Magazin. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.pv-magazine.de/2025/01/13/uebertragungsnetzbetreibern-liegen-zum-jahreswechsel-650-anschlussanfragen-fuer-grosse-batteriespeicher-mit-226-gigawatt-vor/>
- EU Recycling Magazin (2022). *Photovoltaikanlagen: Das Recycling entwickelt sich*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://eu-recycling.com/Archive/34578>
- Europäische Kommission (2023). *Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses zu der „Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über einen überarbeiteten Überwachungsrahmen für die Kreislaufwirtschaft“ (COM(2023) 306 final)*. Official Journal, C 889, ELI: <http://data.europa.eu/eli/C/2024/889/oj>
- Europäische Kommission (2024). *The Draghi report on EU competitiveness*. Abgerufen am 26. Mai 2025 von https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en
- Europäische Kommission (2025a). *Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES zur Schaffung eines Rahmens für Maßnahmen zur Stärkung des europäischen Ökosystems der Fertigung von Netto-Null-Technologieprodukten (Netto-Null-Industrie-Verordnung)*. (COM/2023/161 final). Dokument 52023PC0161. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/113794e9-07a8-11ef-a251-01aa75ed71a1/language-en>
- Europäische Kommission (2025b). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions: The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation*. (COM(2025) 85 final). Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en
- Europäische Kommission (2025c). *Remarks by Executive Vice-Presidents Ribera and Séjourné and Commissioner Hoekstra at the press conference on the Clean Industrial Deal*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_25_630
- Europäische Union (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020 (Text with EEA relevance)*. (2024). Official Journal, L 1252, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>

E2 (2024). *Clean Jobs America 2024. IRA drives clean economy job surge*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://cleanjobsamerica.e2.org/wp-content/uploads/2024/09/E2-2024-Clean-Jobs-America-Report_September-17-2024.pdf

Fachagentur Wind und Solar e. V. (2024). *Rückbau und Recycling*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.fachagentur-windenergie.de/themen/rueckbau-und-recycling/>

Fraunhofer ISE (2022). *Kupfer statt Silber: Neuer Schub für die Solarzellen-Produktion*. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2022/september-2022/kupfer-statt-silber-neuer-schub-fuer-solarzellen.html>

Fluchs, S., Neligan, A., Schleicher, C., Schmitz, E. (2022). *Zirkuläre Geschäftsmodelle. Wie zirkulär sind Unternehmen?*. IW-Report 27/2022. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2022/IW-Report_2022-Zirkul%C3%A4re-Gesch%C3%A4ftsmodelle.pdf

Gramke, K., Jank, K., Posch, D., Spuck, J. (2023). *Green tech made in Germany: how fit for the future are we?*. Bertelsmann Stiftung (Hrsg.). <https://doi.org/10.11586/2024001>

He, A. (2021). *What Do China's High Patent Numbers Really Mean?*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.cigionline.org/articles/what-do-chinas-high-patent-numbers-really-mean/>

International Energy Agency (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

International Energy Agency (2022). *Solar PV Global Supply Chains. Executive Summary*. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains/executive-summary>

Ifo Institut (2024). *ifo Geschäftsklimaindex gesunken*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.ifo.de/fakten/2024-12-17/ifo-geschaeftsklimaindex-gesunken-dezember-2024>

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.

Karlsruhe Institut für Technologie (2023). *Entwicklung einer Methode zur ressourceneinsparenden und CO₂-reduzierenden Weiterverwendung von Rotorblättern im Infrastrukturbereich (BladeReUse)*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://stahl.vaka.kit.edu/forschung_2004.php

Kotz, M., Levermann, A., Wenz, L. (2024). *The economic commitment of climate change*. *Nature* 628, 551–557. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>

Kraftfahrt-Bundesamt (2024). *Jahresbilanz 2023*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassungen/2023/2023_n_jahresbilanz_generische.html

Kunze, F. & Windels, T. (2018). »Made in China 2025«: Technologietransfer und Investitionen in ausländische Hochtechnologie-firmen. Ifo Schnelldienst, 71, Nr 14. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.ifo.de/publikationen/2018/aufsatz-zeitschrift/made-china-2025-technologietransfer-und-investitionen>

Kühne, C., Stapf, D., Holz, P., Baumann, W., Mülhopt, S., Wexler, M., Hauser, M., Kalkreuth, J., Mahl, J., Zeller, M., Yogish, S., Gehrmann, H., Stapf, D., Volk, R., Stallkamp, C., Steffl, S., Schultmann, F., Schweppe, R., Pico, D., ..., Beckmann, M. (2022). *Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter: Aufbereitung von Rotorblättern*. Umweltbundesamt (Hrsg.). Texte 92/2022. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau-_und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf

Maier, T., Kalinowski, M., Schur, A., Zika, G., Schneemann, C., Mönnig, A., & Wolter, M. I. (2024). *Weniger Arbeitskraft, weniger Wachstum: Ergebnisse der achten Welle der BIBB-IAB-Qualifikations- und Berufsprojektionen bis zum Jahr 2040 (BIBB Report 1)*. Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB). Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bibb.de/dienst/publikationen/de/19940>

Pasimeni, F., Fiorini, A., & Georgakaki, A. (2021). *International landscape of the inventive activity on climate change mitigation technologies. A patent analysis*. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100677. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100677>

Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023). *Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045*. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität – Langfassung. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf

Prognos AG (2024). *Defossilisierung und Klimaneutralität. Fachkräftebedarf und Fachkräftegewinnung in der Transformation*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.dihk.de/resource/blob/125844/fb44e61c7128505cae35eac05f57d0b6/dihk-prognos-studie-fachkra-fte-fu-r-die-defossilisierung-data.pdf>

Prognos AG (2024b). *Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2024*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/wp-content/uploads/2024/01/Statusbericht_2024_25012024_opt.pdf

RWTH Aachen (2025). *Battery Charts*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://battery-charts.rwth-aachen.de/>

Reimer, M. V., Schenk-Mathes, H. Y., Hoffmann, M. F., & Elwert, T. (2018). *Recycling decisions in 2020, 2030, and 2040—when can substantial NdFeB extraction be expected in the EU?*. *Metals*, 8(11), 867. <https://doi.org/10.3390/met8110867>

Schönfeldt, M., Diehl, O., Gassmann, J. (2024): *Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland*. DERA Rohstoffinformationen 60: 45 S., Berlin. <https://doi.org/10.25928/s7mb-e986>

Simon, F. (2023). *Seltene Erden: EU möchte Windräder und Co. für Dauermagneten recyceln*. Euractiv. Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/seltene-erden-eu-moechte-windraeder-und-co-fuer-dauermagneten-recyceln/>

Thobe, I., Eckermann, F., Maier, T. (2023). *Das „Recht auf Reparatur“ – mögliche Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt*. In: BWP 52 4, S. 12-16. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.bwp-zeitschrift.de/dienst/publikationen/de/19251>

Umweltbundesamt (2024a). *Ökologischer Landbau*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/oekologischer-landbau#okolandbau-in-deutschland>

Umweltbundesamt (2024b). *Nachhaltige Waldwirtschaft*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/nachhaltige-waldwirtschaft#die-vielfaltigen-funktionen-des-waldes>

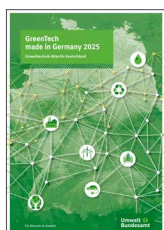
Umweltbundesamt (2025a). *Erneuerbare Energien in Zahlen*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen/>

Umweltbundesamt (2025b). *Monatsbericht zur Entwicklung der erneuerbaren Stromerzeugung und Leistung in Deutschland*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/monatsbericht-zur-entwicklung-der-erneuerbaren>

Weaver, J. F. (2023). BloombergNEF: *Photovoltaik-Zubau weltweit steigt 2023 um 58 Prozent auf 413 Gigawatt*. PV-Magazin. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.pv-magazine.de/2023/11/29/bloombergnef-photovoltaik-zubau-weltweit-steigt-2023-um-58-prozent-auf-413-gigawatt/>

Zentralverband Deutsches Baugewerbe (2023). *Holzbau entwickelt sich trotz rückläufiger Baugenehmigungen gut*. Abgerufen am 23. Mai 2025 von <https://www.zdb.de/meldungen/holzbau-entwickelt-sich-trotz-ruecklaeufiger-baugenehmigungen-gut>

Zika, G., Kalinowski, M., Krinitz, J., Maier, T., Mönnig, A., Schneemann, C., Schur, A., Wolter, M. I., & Zenk, J. (2024). *Fachkräftemonitoring für das BMAS – Mittelfristprognose bis 2028*. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS). Abgerufen am 23. Mai 2025 <https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Forschungsberichte/fb-647-fachkraefte-monitoring-bmas-mittelfristprognose-bis-2028.pdf>



► **Unsere Broschüren als Download**

Kurzlink:
www.uba.de/greentech-atlas

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/