



Studie

Industrielle Resilienz und strategische Souveränität Deutschlands

Im Auftrag des Netzwerk Zukunft der Industrie e.V.

Autorenteam

Michael Astor

Paul Möhlmann

Tim Bichlmeier

Jakobus Kai Jaspersen

Leonard Krampe

Bianca Derya Neumann

Helena Seide

Miguel Wahle

Inhalt

5	Vorbemerkung
8	Resilienz - Thematische Einführung
36	Batteriefertigung für die Elektromobilität
80	Wertschöpfungsketten der Halbleiterfertigung
124	Windkraftanlagen
150	Titan in der Verteidigungswirtschaft
196	Handlungsempfehlungen
210	Literaturverzeichnis

Das Unternehmen im Überblick

Prognos – wir geben Orientierung.

Die Prognos AG ist eines der ältesten Wirtschaftsforschungsunternehmen Europas. An der Universität Basel gegründet, forschen Prognos-Expertinnen und -Experten seit 1959 für verschiedenste Auftraggeber aus dem öffentlichen und privaten Sektor – politisch unabhängig, wissenschaftlich fundiert. Die bewährten Modelle der Prognos AG liefern die Basis für belastbare Prognosen und Szenarien. Mit über 200 Expertinnen und Experten ist das Unternehmen an zehn Standorten vertreten: Basel, Berlin, Bremen, Brüssel, Düsseldorf, Freiburg, Hamburg, München, Stuttgart und Wien. In Wien sitzt die Prognos Europe GmbH, unsere Tochtergesellschaft in Österreich. Die Projektteams arbeiten interdisziplinär, verbinden Theorie und Praxis, Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

Geschäftsführer

Christian Böllhoff

Präsident des Verwaltungsrates

Dr. Jan Giller

Handelsregisternummer

Berlin HRB 87447 B

Umsatzsteuer-Identifikationsnummer

DE 122787052

Rechtsform

Aktiengesellschaft nach schweizerischem Recht;
Sitz der Gesellschaft: Basel-Stadt

Weitere Standorte der Prognos AG in Deutschland:

Prognos AG

Goethestr. 85
10623 Berlin

Prognos AG

Domshof 21
28195 Bremen

Prognos AG

Werdener Straße 4
40227 Düsseldorf

Prognos AG

Heinrich-von-Stephan-Str. 17
79100 Freiburg

Prognos AG

Rödingsmarkt 9
(c/o Mindspace | 2. Etage)
20459 Hamburg

Handelsregisternummer

CH-270.3.003.262-6

Gründungsjahr

1959

Arbeitssprachen

Deutsch, Englisch, Französisch

Hauptsitz der Prognos AG in der Schweiz:

Prognos AG
St. Alban-Vorstadt 24
4052 Basel

Prognos AG

Nymphenburger Str. 14
80335 München

Prognos AG

Eberhardstr. 12
70173 Stuttgart

Standort der Prognos AG in Belgien:

Prognos AG

Résidence Palace, Block C
Rue de la Loi 155
1040 Brüssel

Tochtergesellschaft in Österreich:

Prognos Europe GmbH

Walcherstraße 11
1020 Wien

Vorbemerkung

Die Studie „Industrielle Resilienz und strategische Souveränität Deutschlands“ wurde im Frühjahr 2024 beauftragt, vier Jahre nach dem Beginn der COVID-19-Pandemie, die die Verletzlichkeit unserer Handelsbeziehungen und Logistik aufzeigte, und zwei Jahre nach dem Einmarsch Russlands in die Ukraine, der von den westlichen Staaten u. a. mit Sanktionen gegenüber Russland beantwortet wurde. Der schwelende Konflikt um die wirtschaftliche und technologische Vormachtstellung zwischen den USA und der Volksrepublik China und die Frage, wie Menschenrechtsverletzungen in China und anderen autoritären Regimen zu begegnen sei, boten ebenfalls Anlass zu einer grundlegenden Analyse der Abhängigkeiten einzelner Industrien von Zulieferungen aus autoritären Staaten. Mit der zweiten Präsidentschaft Donald Trumps in den USA zeichnet sich eine disruptive Gestaltung der US-amerikanischen Wirtschafts- und Sicherheitspolitik ab. Die Frage, ob die USA mittelfristig zum Kreis der autoritär regierten Staaten gezählt werden müssen, denen man ein schwer kalkulierbares Verhalten in Bezug auf die Verlässlichkeit und Berechenbarkeit der wirtschaftlichen Beziehungen mit Deutschland und Europa unterstellen muss, wird in den kommenden Monaten neu beantwortet werden müssen.

Ein herzliches Dankeschön gilt den Kolleginnen und den Kollegen des Netzwerk Zukunft der Industrie e. V., die unsere Arbeit kritisch begleitet haben, Expertinnen und Experten für Gespräche vermittelt haben und uns zahlreiche Hinweise auf die laufenden fachpolitischen Debatten gaben. Ebenso bedanken wir uns bei allen, mit denen wir im Rahmen von Fachgesprächen zu Branchen- und Technologiefragen Aspekte der Resilienz diskutieren konnten.

Das Team der Prognos AG bleibt verantwortlich für die Inhalte und Analysen, die sich neben den Fachgesprächen vor allem auf Literatur- und Datenauswertungen stützen.

Executive Summary

Die Studie „Industrielle Resilienz und strategische Souveränität Deutschlands“ analysiert anhand von vier konkreten Beispielen die Lieferbeziehungen und die Lieferabhängigkeiten der deutschen Industrie. Im Fokus stehen insbesondere Rohstoffe, Vorprodukte und Technologien, die in einem hohen Umfang und z. T. fast schon exklusiv in autoritären Staaten gefördert, verarbeitet oder produziert werden. Anhand der Beispiele aus Elektromobilität, Mikroelektronik, Windkraft und Verteidigungsindustrie analysieren wir die Abhängigkeiten und daraus resultierende Konsequenzen. Wir stellen dar, wie aktuelle unternehmerische und wirtschaftspolitische Strategien diesen Herausforderungen bereits begegnen und zeigen Handlungsoptionen auf. Das Netzwerk Zukunft der Industrie e. V. beauftragte im Frühjahr 2024 die Prognos AG mit der Durchführung der Studie.

Ergebnisse im Überblick

Abhängigkeiten bestehen auf unterschiedlichen Stufen der Wertschöpfungskette. Es sind nicht nur die Rohstoffe und deren Erschließung und Förderung, die als kritisch anzusehen sind. Ebenso kritisch sind Vorprodukte und Technologien wie das Anoden- und Kathodenmaterial für Batterien, einzelne Klassen von Halbleitern, die ausschließlich in Südostasien hergestellt werden, Permanentmagnete in der Windkraft sowie Titanschwämme für Verteidigungsgüter.

Den Unternehmen und wirtschaftspolitischen Akteuren sind viele dieser Beispiele bekannt. Angesichts preissensitiver Wettbewerbsbedingungen, in der Vergangenheit zumeist stabiler Lieferbeziehungen und fehlender Handlungsalternativen werden diese Abhängigkeiten zumeist in Kauf genommen. Gerade größere Unternehmen, aber auch viele Mittelständler haben Werkzeuge der Risikoanalyse etabliert, die komplette Wertschöpfungskette gerät dabei jedoch nur selten in den Blick.

Politische Initiativen der Beobachtung und Koordination von Aktivitäten, ob national oder europäisch, orientieren sich häufig noch an den Rohstoffen. Gerade auf europäischer Ebene liegen mit dem Critical Raw Materials Act (CRMA), dem Net-Zero Industry Act (NZIA) und mit der Strategie für wirtschaftliche Sicherheit bereits Instrumente vor, mit denen spezifische Problemlagen erfasst, Zielsetzungen formuliert und z. T. konkretisierende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden konnten.

Die nationale Resilienzstrategie fokussiert vor allem auf die Funktionsfähigkeit von Staat und Gesellschaft und betont insbesondere den Schutz kritischer Infrastrukturen als wesentliches Element der Krisenbewältigung. Für die Resilienzstärkung von Unternehmen und weiteren wirtschaftlichen Akteuren fehlt es bisher an einer einheitlichen Strategie und Koordinierung auf nationaler Ebene.

Schlussfolgerungen

Die Handlungsfähigkeit westlicher Staaten und damit auch der deutschen Industrie baut in einem hohen Maße auf die Verlässlichkeit der etablierten Lieferbeziehungen zu Rohstoff- und Vorleistungsproduzenten auf. Erfahrungen wie in der Photovoltaikindustrie zeigen, dass hiermit auch der Verlust nahezu der gesamten Marktposition einhergehen kann. Wenn einzelne (Vorleistungs-) Produzenten ihre Rolle nutzen, um Preise

jenseits der Produktionskosten zu setzen, und ihre Marktpolitik auf die Beherrschung von Märkten ausrichten, fehlt es bislang an Antworten und Instrumenten in Europa. Die Rolle Chinas bei Permanentmagneten und auch Anoden- und Kathodenmaterialien lässt eine vergleichbare Perspektive befürchten: den Verlust der Fertigungs- und Anlagenkompetenz für Schlüsselprodukte der Energiewende (Windkraftanlagen) bzw. der deutschen Wirtschaft (Automobile).

Das Beispiel der Photovoltaik zeigt, dass Resilienzfördernde Maßnahmen eingebettet sein müssen in eine übergeordnete Wettbewerbsstrategie. Die Entwicklungen an den Weltmärkten, die (exklusive) Erschließung von Rohstoffvorkommen, monopolistische Strukturen in Kapazitäten und Kompetenzen zur Verarbeitung von Rohstoffen und die Besetzung von Schlüsselpositionen in der Wertschöpfungskette lassen sich nicht mit singulären Maßnahmen kompensieren. Koordination ist hierbei ebenso erforderlich wie ein strategischer Handlungsrahmen bei Unternehmen, der Bundesregierung und der Europäischen Kommission.

Empfehlungen

Der Instrumentenkasten zur Verringerung von Resilienzrisiken enthält eine Vielzahl von Handlungsoptionen, die zu einem großen Teil auch ihren Einsatz finden (Diversifizierung, Lagerhaltung, Friendshoring, strategische Partnerschaften, Stärkung von Forschung und Kreislaufwirtschaft et al.). Zwei Aspekte sind an dieser Stelle zu benennen, die deutlich größere Aufmerksamkeit erfahren sollten:

Das Risikomanagement bildet die Grundlage für jedes Handeln. Nur wenn entlang der Lieferkette deutlich wird, wo und in welchem Umfang einseitige Abhängigkeiten bestehen, können unterschiedliche Handlungsoptionen entwickelt und geprüft werden. Transparenz ist somit die Voraussetzung, um Resilienz ein angemessenes Gewicht in unternehmerischen und politischen Entscheidungsprozessen einzuräumen. Zu betonen ist, dass Risikomanagement einerseits Ressourcen erfordert, andererseits nur dann sinnvoll ist, wenn die Erkenntnisse in unternehmerischen und politischen Entscheidungen Berücksichtigung finden. Idealerweise lassen sich entsprechende Aufgaben bündeln und für einzelne Rohstoffe, Technologien, Produkte und Branchen auf einer übergeordneten Ebene beantworten. Hier können Staat, aber auch Unternehmerverbände und Gewerkschaften entsprechende Aktivitäten unterstützen und diese auf Plattformen konzentrieren, die auch einen schnellen Informationstransfer gewährleisten. Koordination und Kooperation der Akteure auf nationaler und internationaler Ebene bilden die zweite Säule des Handelns (und hier vor allem auf der europäischen Ebene). In einem geopolitischen Feld, in dem nationale Interessen offenkundig immer konfrontativer umgesetzt werden, sind einzelne Unternehmen, Branchenorganisationen, Verbände und selbst Nationalstaaten nicht mehr stark genug, um die eigenen Interessen erfolgreich zu vertreten. Hierbei müssen auch Fragen aufgegriffen werden, denen Unternehmen und Staaten aufgrund der globalen Arbeitsteilung und spezifischer Vorteile anderer Wettbewerber aus dem Weg gegangen sind.

Zu nennen sind hier z. B. Aspekte der verstärkten Erschließung und Förderung von Rohstoffen in Europa, der Raffinade und der Weiterverarbeitung auf den frühen Wertschöpfungsstufen. Angesichts ungleicher Wettbewerbsbedingungen (Energiepreise, Arbeitskosten, Umwelt- und Nachhaltigkeitsstandards) muss Europa hier Antworten finden, wenn es seine Position behaupten und zugleich der Verpflichtung zur Berücksichtigung von ESG-Standards nachkommen will. Insofern ist ein europäisches Handeln zur Herstellung eines Level Playing Field von höchster Bedeutung.



Hintergrund

Resilienz - Thematische Einführung



Autorenteam

Michael Astor

Tim Bichlmeier

Bianca Derya Neumann

Jakobus Kai Jaspersen

Inhalt Dossier

12

Einleitung

14

Die Bedeutung kritischer Abhängigkeiten von Rohstoffen und Vorleistungen für die deutsche Industrie

18

Status Quo der Kritikalitätsbewertung

23

Branchen im Fokus: Mobilität, Digitalisierung, Clean Tech und Verteidigung

24

Erster Überblick zu strategischen Maßnahmen zur Stärkung der Lieferkettenresilienz

32

Anhang

1

Einleitung

Die Pandemie, der von Russland initiierte Krieg in der Ukraine, aber auch singuläre Ereignisse, wie die Havarie des Containerschiffs „Ever Given“ im Suez-Kanal, zeigen: unsere globalen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke sind äußerst verletzlich. Schnell steigende Preise für Energie, weitere Rohstoffe und Vorprodukte sind frühe Indikatoren für Störungen in diesen Netzwerken, kurzfristige Produktionsausfälle eine unmittelbare Folge. Gleichzeitig sorgen das Streben der Weltmächte USA und der Volksrepublik China nach einer ökonomischen Vormachtstellung und nach Technological Supremacy für deutlich veränderte Rahmenbedingungen. Die Stärkung der nationalen Wertschöpfung durch gezielte Markteingriffe (USA: Inflation Reduction Act, IRA, mit Start der Trump-Präsidentschaft: Handelsbeschränkungen durch Zollpolitik) und die Eroberung einer dominierenden Marktstellung in Bereichen, wie z.B. der Mikroelektronik oder wesentlicher Technologien der Energiewende, durch Subventionen (China) fordern alle anderen Marktteilnehmer heraus. Dies gilt sowohl auf einer industriepolitischen Ebene (national und europäisch) als auch für einzelne Unternehmen und Branchen.

Die deutsche Wirtschaft hat in vielen Bereichen von der internationalen Vernetzung der Märkte und der globalen Arbeitsteilung profitiert. Der technologische Fortschritt erhöht jedoch nicht nur die Leistungsfähigkeit von Produkten, sondern auch den Bedarf an einer Vielzahl hochspezialisierter Vorprodukte und Rohstoffe. Da Deutschland und Europa nicht über ausreichende eigene Vorkommen verfügen bzw. diese Vorkommen bislang nicht wirtschaftlich erschlossen werden können, sind die Unternehmen in vielen Bereichen von internationalen Rohstoffimporten abhängig.¹ Dies betrifft Metalle und Erze (u.a. Seltene Erden, Kupfer und Aluminium), Industriemineralien (u.a. Graphit und Silizium), Baumaterialien sowie Chemikalien und Düngemittel.² Auch die Lieferungen von wichtigen Vorleistungen, z.B. Wirkstoffen für die pharmazeutische Produktion oder Photovoltaikzellen, sind eng in den internationalen Handel eingebunden. Daraus resultieren teilweise lange, komplexe und intransparente Lieferketten, die mit einer hohen geographischen Konzentration ausländischer Handelspartner einhergehen.³

Die Konsequenzen dieser Verflechtungen führen zu Abhängigkeiten, die sich an zwei Beispielen illustrieren lassen: Bereits in den späten 2000er Jahren führte die fast vollständige Importabhängigkeit von Seltenen Erden aus China zu einer wirtschaftlichen Krise, da China Exportrestriktionen verordnete und es aufgrund fehlender Alternativen zu massiven Anstiegen der Preise kam. Auch deutsche Industriebetriebe wurden von den Preisexplosionen für Seltene Erden überrascht, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Produktion.⁴ Diese Krise führte jedoch bisher nicht zu erkennbaren politischen und unternehmerischen Konsequenzen im Hinblick auf die Gestaltung von widerstandsfähigeren Lieferketten.

Mit Beginn der Corona-Pandemie konnten Halbleiter bzw. Mikrochips nicht mehr in ausreichenden Mengen und Geschwindigkeiten aus Ostasien nach Europa geliefert werden.⁵ Der Mangel dieser Bauteile führte z.B. zu einer Drosselung der Produktion deutscher Automobilhersteller. Schätzungen zufolge konnten in Deutschland Hunderttausende und global Millionen von Fahrzeugen aufgrund dieses Mangels nicht gebaut werden.⁶ Somit fügten die Lieferkettenprobleme der Automobilindustrie erheblichen wirtschaftlichen Schaden zu.⁷

Die Abhängigkeit der deutschen Industrie von einzelnen Rohstoffen und Vorleistungen lässt sich anhand unterschiedlicher Faktoren differenzieren:

Bezieht diese sich auf einen einzelnen Standort / Staat oder auf mehrere Anbieter?

Haben diese Anbieter sich auf einen offenen Handel verständigt, sodass lediglich die aktuelle Marktdynamik als Faktor zu berücksichtigen ist?

Welche Optionen zur Substitution bestehen und wie kurzfristig können diese in einer Krisensituation mobilisiert werden?

Wie ist die Schadenshöhe (Produktionsausfälle, Konsequenzen für den Arbeitsmarkt und politische Zielsetzungen, wie z.B. die Energiewende, aber auch Sicherheitslage) zu bewerten?

Liegen die Risiken eher auf der Seite der Rohstoffförderung bzw. der Produktion von Vorleistungen oder in der Stabilität der Lieferketten?

Besteht das Risiko, dass Marktteilnehmer mit einer beherrschenden Stellung diese nutzen, um weitere (geopolitische) Zielsetzungen zu erreichen?

Insbesondere in Bezug auf den letzten Punkt rückt die Rolle autoritärer Regime als Lieferanten von Rohstoffen und Produkten für Deutschland in den Fokus der Analyse. Die globalen Verflechtungen bedeuten aber auch, dass diese Staaten als Absatz- und Investitionsmärkte eine herausragende Rolle spielen können. Dies zeigt sich insbesondere im Verhältnis zu China, das nicht nur als Lieferant von Rohstoffen und Vorprodukten eine große Bedeutung für die deutsche Wirtschaft besitzt, sondern auch als Zielmarkt sowie als Produktionsstandort: Zugleich steht das Land bei Direktinvestitionen in Drittstaaten mit deutschen, europäischen und anderen Investoren im Wettbewerb. Dies kann wiederum die Verlässlichkeit von Lieferketten auch außerhalb des chinesischen Staatsgebiets maßgeblich beeinflussen. Die vorliegende Studie soll einen Beitrag zur Schärfung des Problembewusstseins darstellen und untersucht zu diesem Zweck Abhängigkeiten insbesondere für Rohstoffe und Vorprodukte aus autoritären Regimen. Zunächst wird dafür die Ausgangslage zur Bedeutung kritischer Rohstoff- und Vorleistungslieferungen für die deutsche Industrie beschrieben. Anschließend benennen wir die Rohstoffe und Vorleistungen, die konkret als kritisch einzustufen sind. Im folgenden Kapitel werden vier Industriebereiche, nämlich Clean Tech, Mobilität, Digitalisierung und Verteidigung betrachtet. Das fünfte Kapitel nimmt abschließend Maßnahmen in den Blick, sowohl auf politisch-regulatorischer als auch auf unternehmerischer Ebene.

2

Die Bedeutung kritischer Abhängigkeiten von Rohstoffen und Vorleistungen für die deutsche Industrie

Die gesamte Materialverwendung Deutschlands betrug im Jahr 2022 rund 1,5 Milliarden Tonnen. Davon wird der überwiegende Anteil, 935 Mio. Tonnen, durch den heimischen Abbau von Massenrohstoffen gedeckt, zum Beispiel Sande oder Kiese, die vorwiegend in der Baubranche verwendet werden. Deutschland importierte im Jahr 2022 insgesamt 286 Mio. Tonnen an Rohstoffen, etwa fossile Energieträger, Erze, Steine, Erden und Industriemineralien, die unterschiedliche ökonomische Verwendungen finden. Während fossile Energieträger in der Regel als Brennstoff zum Einsatz kommen, werden Erze, Erden oder Industriemineralien zur Güterproduktion benötigt. Weitere 270 Millionen Materialtonnen entfallen auf den Import von Halb- und Fertigwaren, die entweder in Form von Vorleistungen in weitere Wertschöpfungsaktivitäten eingehen oder direkt konsumiert werden. D.h. deutlich mehr als ein Drittel aller Materialien werden aus dem Ausland bezogen.⁸

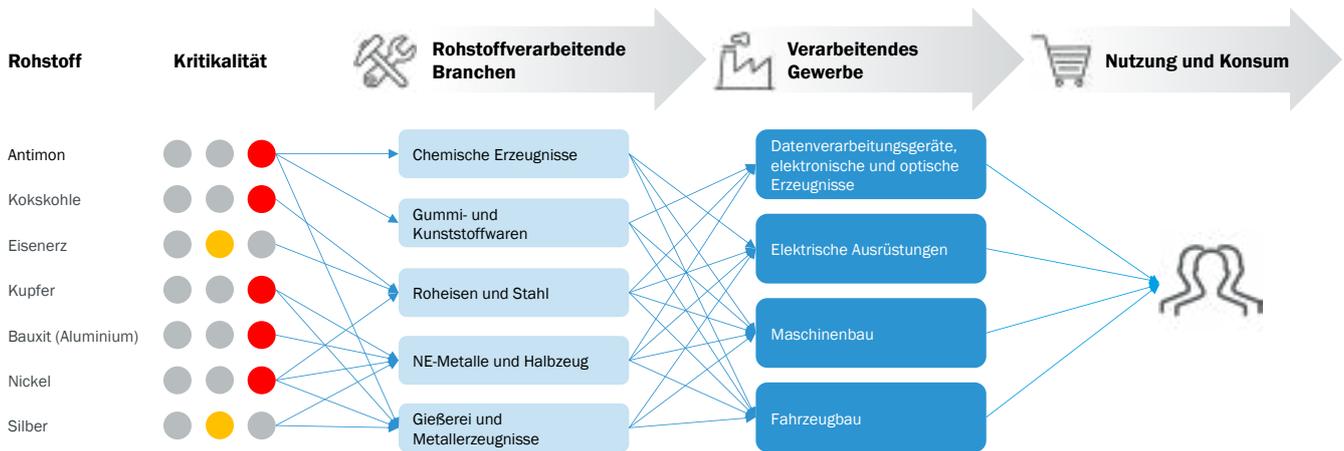
Der russische Angriffskrieg führte 2022 zu einer Verknappung fossiler Rohstoffe, insbesondere von Gas, mit massiven Preiseffekten für die Energieerzeugung. Die gestiegenen Energiepreise wirkten anschließend entlang verschiedener Produktionsketten und Dienstleistungsaktivitäten und führten zu einem deutlichen Anstieg des Inflationsniveaus in Deutschland. Insbesondere mit Blick auf mineralische Rohstoffe zeigt sich, dass das Risiko für eine sichere Versorgung in den vergangenen Jahren gestiegen ist und entsprechende Effekte entlang der Wertschöpfungsketten drohen.

Kritische Rohstoffe

Die Förderung mineralischer Rohstoffe steht am Anfang der industriellen Wertschöpfungskette und bildet die Grundlage sämtlicher nachgelagerter Aktivitäten. Abbildung 1 zeigt exemplarisch sieben Rohstoffe, die teilweise als kritisch gelten und als Input der rohstoffverarbeitenden Branchen in Deutschland bezogen werden. Diese fertigen daraus Zwischenprodukte, wie etwa Eisen und Stahl, woraus das Verarbeitende Gewerbe wiederum verschiedene Güter und Produkte herstellt, die dann konsumiert werden.

Abbildung 1:

Exemplarischer Einsatz von Rohstoffen entlang von Wertschöpfungsketten



Quelle: Eigene Darstellung. Legende: Kritikalität rot: Rohstoff steht auf der EU-Liste kritischer Rohstoffe, Kritikalität gelb: Rohstoff steht nicht auf der EU-Liste kritischer Rohstoffe, Deutschland ist in einem hohen Ausmaß auf den Import angewiesen.

Der Fahrzeugbau stellt eine Schlüsselindustrie für die deutsche Volkswirtschaft dar und verarbeitet eine Vielzahl verschiedener Vorleistungen in Form von Komponenten und weiterverarbeiteten Rohstoffen. Zum Beispiel werden die Produkte der Eisen- und Stahlindustrie benötigt, um Karosserien und Motorelemente zu bauen. Die Herstellung von Eisen wiederum erfolgt gegenwärtig durch das Hochofenverfahren. Dabei werden Eisenerze durch Reduktions- und Schmelzprozesse zu Roheisen weiterverarbeitet. Der Rohstoff Eisenerz wird gegenwärtig nicht als kritisch eingestuft, unter anderem aufgrund einer gelungenen Diversifizierung des Imports in Folge des russischen Angriffskrieges. Der deutsche Import aus Russland reduzierte sich zwischen 2021 und 2023 um etwa 72 %.⁹ Dies kann als Indiz dafür gelten, dass für die Industrie Gestaltungsoptionen bestehen, wenn Risiken erkannt werden. Wichtigste Handelspartner sind Australien und Brasilien, die weltweit etwa die Hälfte des gesamten Eisenerzes abbauen.¹⁰ Für das Hochofenverfahren wird neben Eisenerz auch Kokskohle benötigt, ein Rohstoff der wiederum als kritisch gilt. China hat seinen Anteil an der globalen Bergwerksförderung von Kokskohle in den vergangenen Jahren kontinuierlich erhöht. Rund 55 % der globalen Produktion fand im Jahr 2023 in China statt.¹¹ Neben Eisen und Stahl verwendet der deutsche Fahrzeugbau relevante Mengen weiterer Metalle, wie zum Beispiel Aluminium und Kupfer. Der Rohstoff Bauxit, der für die Aluminiumherstellung benötigt wird, ist von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft, gleiches gilt für Kupfer.¹²

Der Maschinenbau nutzt ebenso eine Vielzahl von Vorprodukten aus den rohstoffverarbeitenden Branchen, darunter die eben genannten Eisen und Stahl sowie Aluminium und Kupfer. Auch chemische Erzeugnisse sowie Gummi und Kunststoffwaren, die teilweise ihrerseits kritische Rohstoffe benötigen, spielen eine wichtige Rolle sowohl im Maschinenbau als auch im Fahrzeugbau. Zum Beispiel gilt das Flammenschutzadditiv Antimon als kritisch. Rund 63 % des europäischen Imports kommen aus der Türkei.¹³ Global dominiert China das Angebot von Antimon, mit einem Marktanteil von etwa 68 % aller Exporte.¹⁴

Die Beispiele machen deutlich, dass Schlüsselbranchen der deutschen Industrie von einer sicheren Rohstoffbeschaffung abhängig sind. Reißt die Lieferkette und kritische Rohstoffe stehen nicht mehr zur Verfügung, drohen negative Effekte entlang der gesamten nachgelagerten Liefer- und Wertschöpfungsketten.

Kritische Vorleistungen und Güter

Die deutsche Industrie benötigt neben Rohstoffen in erheblichem Maße bereits weiterverarbeitete Güter und Vorleistungen. Auch mit Blick auf die Importe dieser Waren können sich potenziell kritische Abhängigkeiten ergeben.

Rund 46 % der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes bezogen laut einer Befragung 2022 Vorleistungen aus China. Dabei unterschied sich der Anteil deutlich je nach Branche. Während in der Automobilbranche 75 % der Unternehmen Vorleistungen aus China bezogen, lag die Branche für Metallerzeugnisse bei etwa 29 %.¹⁵ In Summe kamen etwa 11 % der importierten Vorleistungsprodukte 2022 aus China.¹⁶

Der bloße Bezug von Vorleistungen aus China stellt jedoch noch keine kritische Abhängigkeit dar. Um die Kritikalität des Vorleistungsbezugs zu bewerten, wird in der Literatur üblicherweise auf jene Produkte fokussiert, die im Falle eines Lieferausfalls nur schwer substituiert werden könnten und gegenwärtig von nur wenigen Anbietern bezogen werden. Für diese Güter zeigt sich im Jahr 2019, dass nur etwa 3 % aus China importiert wurden.¹⁷

Die verfügbaren Analysen der deutsch-chinesischen Handelsbeziehungen kommen zum Schluss, dass die sichere Beschaffung von Vorleistungen nicht im gleichen Maße kritisch ist wie die von Rohstoffen. Viele Vorleistungen und Güter können im Falle eines Lieferausfalls von anderen Handelspartnern eingekauft werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass Handelsanalysen auf der Basis von Klassifikationssystemen (z.B. die kombinierte Nomenklatur der Europäischen Union) erfolgen, die aggregierte Gütergruppen betrachten. Damit können einzelne, sehr spezifische Güter, nur teilweise trennscharf abgebildet werden. Für die deutschen Unternehmen können einseitige Abhängigkeiten bestehen, die in den bisherigen Untersuchungen nur unzureichend abgebildet sind.

Im Zuge der Umsetzung der deutschen Klimaziele drohen zukünftig einseitige Lieferabhängigkeiten von China zu entstehen, insbesondere in Bezug auf Photovoltaikanlagen. China ist sowohl bei den Modulen als auch bei den Komponenten führend, sodass sich im globalen Wettbewerb kaum bzw. keine Alternativen finden, die unabhängig von China sind (siehe Abbildung 2). Gleichzeitig verfolgt China die Strategie, sich diese beherrschende Marktposition durch gezielte politische Maßnahmen zu erkaufen.

Abbildung 2:

Globale Produktionsanteile an der Photovoltaikwertschöpfungskette

		Größte Produktionskapazität	Zweitgrößte Produktionskapazität	Drittgrößte Produktionskapazität	Europa	
Rohstoff (verarbeitet)	Polysilizium	China 79,4%	Deutschland 8,0%	Asien-Pazifik 6,0%	Deutschland 8,0%	Restliches Europa -
	Ingots/Wafer	China 96,8%	Asien-Pazifik 2,5%	Europa 0,5%	Deutschland -	Restliches Europa 0,5%
Teil-komponenten	Solarzelle	China 85,2%	Asien-Pazifik 12,2%	Indien 1,2%	Deutschland 0,2%	Restliches Europa 0,4%
	PV-Modul	China 74,6%	Asien-Pazifik 15,3%	Indien 10,0%	Deutschland 0,4%	Restliches Europa 2,4%
Komponenten	Wechselrichter	China 73,0%	Europa 15,7%	RoW 11,8%	Deutschland 6,0%	Restliches Europa 9,8%

Quelle: Stiftung Klimaneutralität. (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045.

3

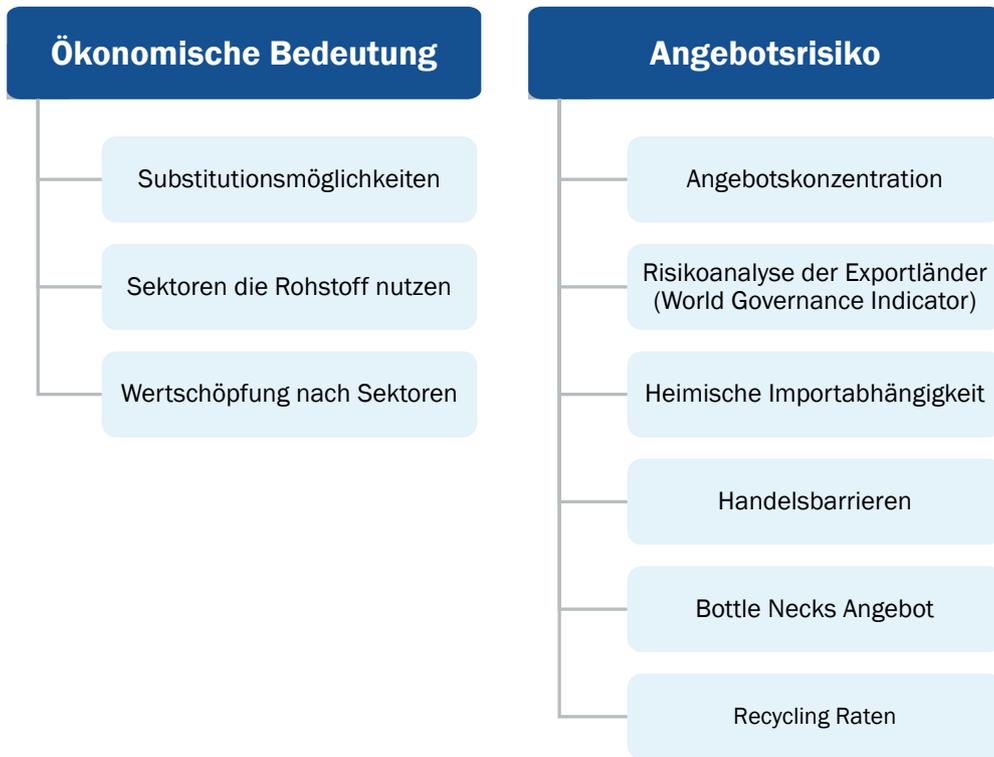
Status Quo der Kritikalitätsbewertung

Die Analyse von kritischen Abhängigkeiten der Rohstoffversorgung ist kein neues Thema. Im Jahr 2011 veröffentlichte die Europäische Kommission die erste „Critical Raw Materials List“, in der für 14 Rohstoffe eine besonders kritische Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern festgestellt wurde. Die Liste der kritischen Rohstoffe wurde seitdem fortlaufend überarbeitet, die aktuelle Version veröffentlichte die Europäische Kommission 2023. Insgesamt 34 Rohstoffe gelten demnach als kritisch, darunter schwere und leichte Seltene Erden, Lithium, Kupfer oder Nickel.¹⁸

Kriterien der Kritikalität und Verwendung der Rohstoffe

Um die Kritikalität in der Versorgung mit einem Rohstoff zu bewerten, bedient sich die Europäische Kommission zweier Schlüsselkriterien: zum einen wird die ökonomische Bedeutung des jeweiligen Rohstoffs untersucht, wobei technische Substitutionspotenziale sowie die Anzahl und Bedeutung der Sektoren, die den Rohstoff verwenden, berücksichtigt werden. Mit Blick auf die Bedeutung der Sektoren wird betrachtet, wie viel sie zur Wertschöpfung beitragen. Zum anderen werden die Angebotsrisiken in den Blick genommen und gefragt, ob die Beschaffung langfristigen Ausfallrisiken unterliegt. Grundlage dieser Bewertung sind weitere Unter-Kriterien, darunter die Angebotskonzentration, die den Grad anzeigt, zu dem sich der Bezug eines Rohstoffes auf wenige Staaten oder sogar nur ein Land konzentriert. Darüber hinaus werden länderspezifische Risikoanalysen durchgeführt und bestehende Handelsbarrieren evaluiert. Grundlage hierfür ist unter anderem der „Worldwide Governance Indicator“ der Weltbank, der unter anderem die politische Stabilität eines Landes oder die Rechtsstaatlichkeit misst.¹⁹ Abbildung 3 bietet einen Überblick der verschiedenen Kriterien, die in die Risikoanalyse einfließen.

Abbildung 3: Kriterien der Kritikalität



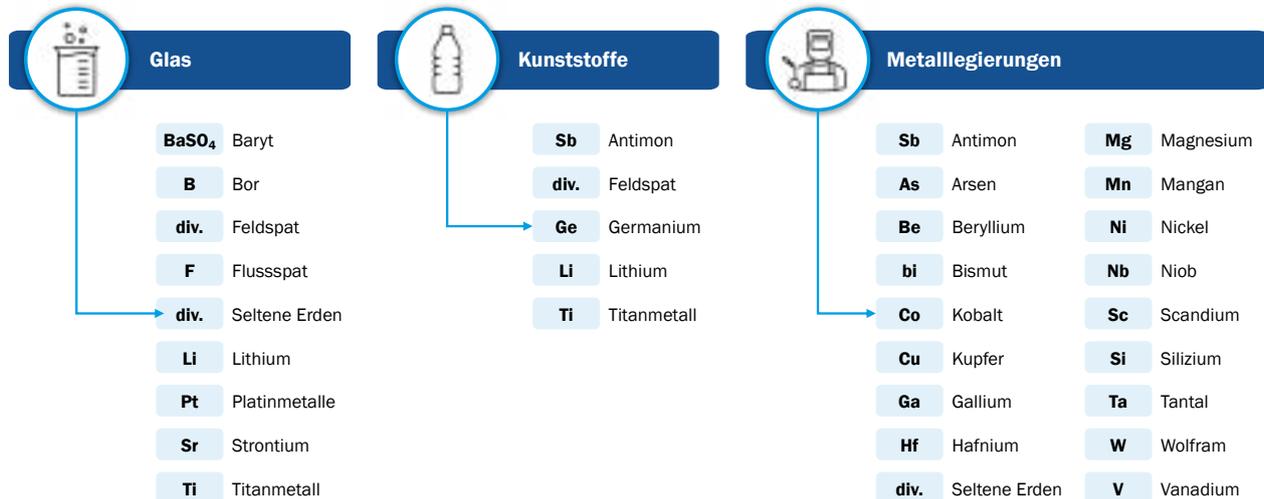
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der EU Critical Raw Materials List.

Neben der Europäischen Kommission stellt auch die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) eine umfassende Risikoanalyse der deutschen Rohstoffbeschaffung bereit. Dabei werden ebenfalls zwei Schlüsselkriterien angesetzt. Zum einen wird erneut die Angebotskonzentration untersucht. Zum anderen werden sogenannte „gewichtete Länderrisiken“ erstellt, die unter anderem auf Kriterien wie dem Grad der Meinungs-, Presse- und Versammlungsfreiheit, der Gefahr politischer Destabilisierung, oder der Einhaltung rechtsstaatlicher Prinzipien basieren. Insgesamt werden 221 gehandelte Produkte untersucht, darunter Bergwerks- und Raffinadeprodukte, sowie bereits weiterverarbeitete Handelsgüter. Für 98 dieser gehandelten Güter weist die DERA ein hohes Beschaffungsrisiko aus, darunter 22 Bergwerksprodukte und 20 Raffinadeprodukte. Von den insgesamt 98 Gütern mit einem hohen Risiko ist China bei 31 Gütern größter Nettoexporteur.²⁰

Die von Europäischer Kommission und DERA als kritisch eingestuft Rohstoffe kommen in zahlreichen Gütern zum Einsatz. Die nachfolgende Grafik zeigt exemplarisch für die Produktion von Glas, Kunststoffen sowie verschiedene Metalllegierungen einzelne kritische Rohstoffe, die jeweils zum Einsatz kommen. Darüber hinaus wird im Anhang für jeden Rohstoff der EU-Liste dargestellt, welche Verwendungszwecke es jeweils gibt (Tabelle 3).

Abbildung 4:

Beispiele des Einsatzes Kritischer Rohstoffe



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der EU Critical Raw Materials List 2023, DERA-Rohstoffliste 2023.

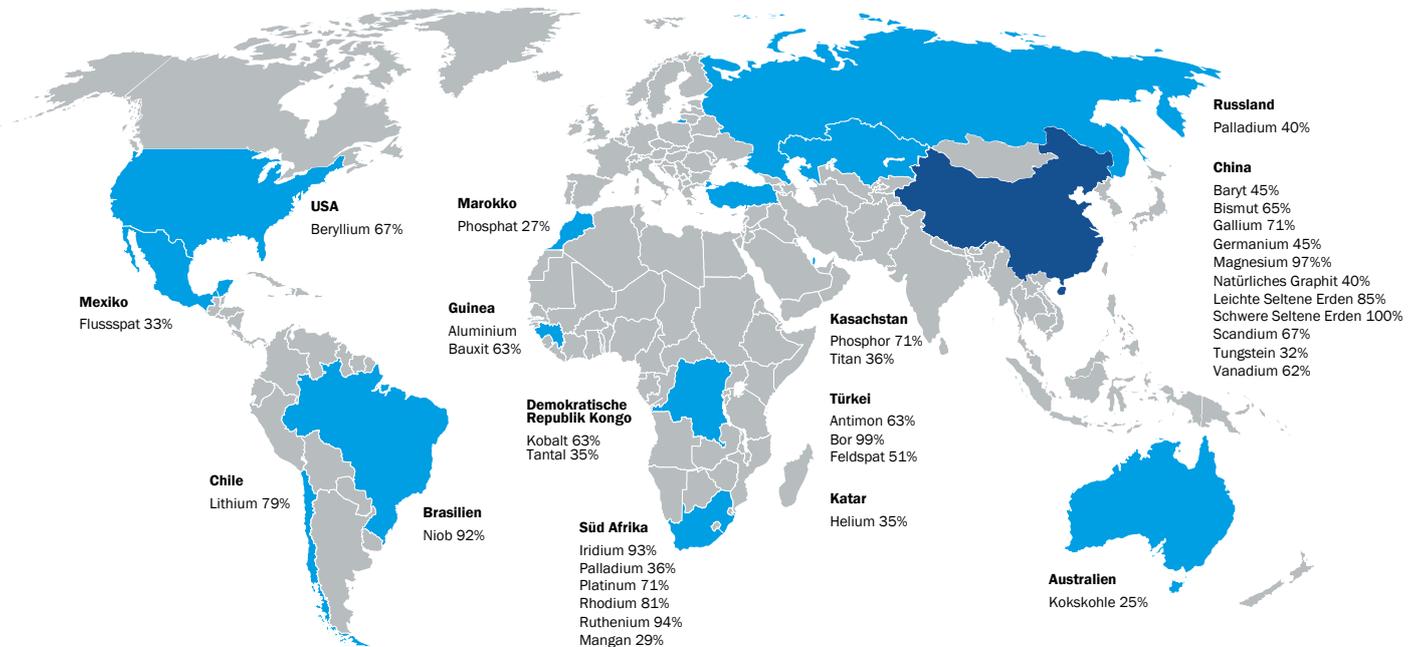
Handel mit kritischen Rohstoffen

Die Länder der Europäischen Union benötigen große Mengen kritischer Rohstoffe, verfügen jedoch nur über geringe natürliche Vorkommen. Zentral für verschiedene Technologien sind zum Beispiel leichte und schwere Seltene Erden. Im Jahr 2022 wurden global etwa 300.000 Tonnen abgebaut, davon etwa zwei Drittel in China.²¹ In Europa fand im gleichen Zeitraum kein signifikanter Abbau statt. Zwar wurden jüngst Vorkommen von Seltenen Erden in Schweden entdeckt.²² Die Erschließung wird voraussichtlich mehrere Jahre erfordern. Auch mit Blick auf andere Rohstoffe, zum Beispiel Lithium, sind die EU-Staaten dauerhaft auf ausländische Importe angewiesen, da es in Europa kaum Vorkommen gibt und selbst die prognostizierten Recyclingmengen nicht ausreichen werden, um den Bedarf zu decken.²³

Mit Blick auf die globale Bereitstellung kritischer Rohstoffe zeigt sich, dass China in den vergangenen Jahrzehnten zu dem mit Abstand wichtigsten Produzenten geworden ist. Für Bismuth, Gallium, Germanium, Magnesium, Natürliches Grafit, Phosphor, Scandium oder Silizium beispielsweise stellt China teilweise deutlich über 60 % des globalen Angebots bereit.²⁴ Zu beachten ist, dass China nicht nur bei der Förderung bestimmter Rohstoffvorkommen, sondern auch bei der Raffinerie über teilweise marktbeherrschende Kapazitäten verfügt. Ein Beispiel ist Aluminium. Das Ausgangsmaterial Bauxit wurde 2021 zwar nur zu 16,2 % in China gefördert. Die Herstellung von Aluminium jedoch fand 2020 zu 56,7 % in China statt, mit steigender Tendenz.²⁵

Entsprechend hoch ist der Anteil der Rohstoffmengen, den die EU aus China bezieht. Abbildung 5 zeigt die relevantesten Importbeziehungen der Europäischen Union mit Blick auf kritische Rohstoffe. Neben China wird auch die Bedeutung weiterer Handelspartner deutlich. Zum Beispiel kommen rund 93 % des Bedarfs an Iridium aus Südafrika. Der Rohstoff wird für die Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse in den kommenden Jahren erheblich an Bedeutung gewinnen.²⁶ Chile ist der mit Abstand relevanteste Lieferant von Lithium, das unter anderem in der Elektromobilität eine Schlüsselrolle einnimmt. In der Landwirtschaft werden große Mengen Phosphor benötigt, der überwiegend aus Kasachstan bezogen wird.

Abbildung 5:
Relevanteste Lieferländer der EU für kritische Rohstoffe



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der EU Critical Raw Materials List 2023. Die Prozentzahlen beziehen sich jeweils auf den höheren Wert: entweder dem der Abbauebene oder dem der Verarbeitungsebene des Rohstoffs.

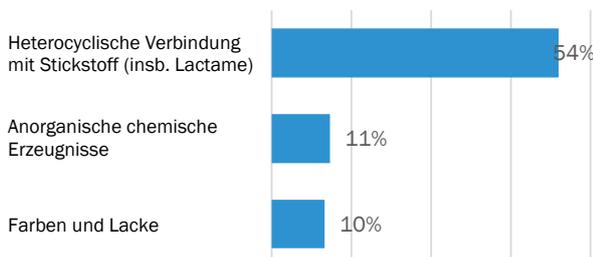
Handel mit Vorleistungen

Für den Import von Vorleistungen gibt es keine Kritikalitätsliste, wie sie von der Europäischen Kommission für Rohstoffe bereitgestellt wird. Dennoch finden sich Untersuchungen, die eine Risikoanalyse vornehmen.

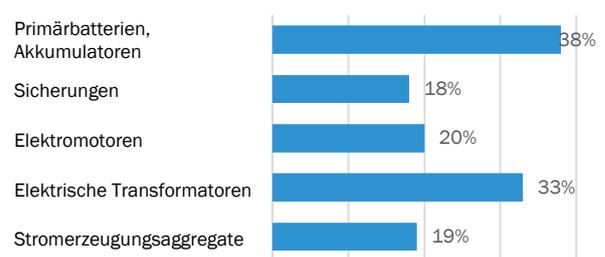
Ähnlich den Rohstoffen gilt auch für Vorleistungen, dass China ein zentraler Handelspartner für Deutschland ist. Nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die Anteile Chinas am deutschen Import spezifischer Vorleistungen für verschiedene Branchen. In der Chemischen Industrie beziehen die deutschen Unternehmen rund 54 % der benötigten heterocyclischen Verbindungen aus China. Batterien und Akkumulatoren für Elektrische Ausrüstungen kommen zu 38 % aus China. Ein weiteres Beispiel kritischer Abhängigkeiten, das in der Tabelle nicht dargestellt wird, ist der Bezug von Permanentmagneten, die in Windkraftanlagen oder elektrischen PKW zum Einsatz kommen. Rund 94 % der wichtigen Komponente kommen aus China.²⁷

Abbildung 6: Anteile Chinas am deutschen Import von Vorleistungen in Beispielbranchen

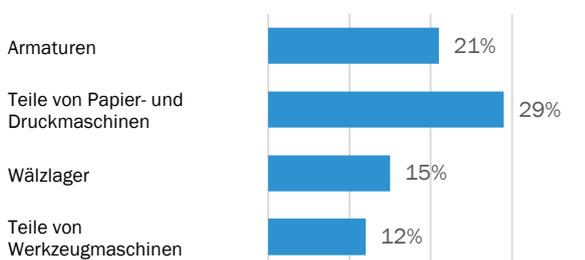
Importanteil China: Chemische Vorleistung



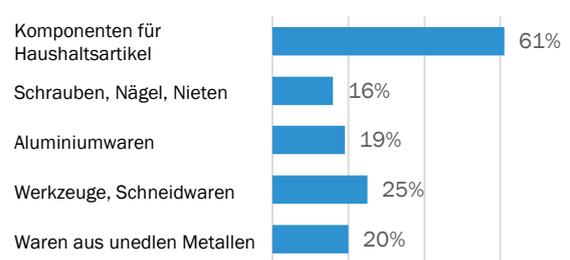
Importanteil China: Elektrische Ausrüstung



Importanteil China: Maschinenbau



Importanteil China: Metallerzeugnisse



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von vbw (2023): Neue Beschaffungsmärkte für die bayerische Wirtschaft.

Über die verschiedenen Branchen hinweg wird deutlich, dass sich die Kritikalität zwischen den verschiedenen Gütern unterscheidet. Für viele Vorleistungen scheinen im Falle von Lieferausfällen Möglichkeiten zu bestehen, aus anderen Ländern zu importieren. Nichtsdestotrotz können für einzelne Vorleistungen drastische Abhängigkeiten bestehen, die nur unzureichend in den bisherigen Analysen erfasst wurden. Darüber hinaus können indirekte Abhängigkeiten existieren, etwa wenn Vorleistungen aus unterschiedlichen Ländern bezogen werden, diese aber wiederum auf chinesische Rohstoffe oder Vorleistungen zurückgreifen.

4

Branchen im Fokus: Mobilität, Digitalisierung, Clean Tech und Verteidigung

Die deutsche Industrie ist je nach Branche, Unternehmensgröße, Exportorientierung, um nur wenige Faktoren zu nennen, in unterschiedlichem Ausmaß von den hier skizzierten Entwicklungen betroffen. Die Analysen werden in vier Branchen bzw. Technologiefeldern vertieft durchgeführt. Dabei werden wir sowohl die unterschiedlichen Abhängigkeiten und Verflechtungen beleuchten als auch Beispiele konkreter unternehmerischer Strategien identifizieren. Im Vordergrund stehen dabei die Möglichkeiten, Lösungen zu finden und ggf. Impulse für eine Nachahmung bzw. zu einem koordinierten Vorgehen zu setzen.

Die Auswahl der Felder berücksichtigte unterschiedliche Parameter:

Stichwort „technological supremacy“: Wo beobachten wir aktuell Tendenzen, in denen große Marktteilnehmer gezielt nach einer strategischen Dominanz streben? Hier bietet sich das Feld Clean Tech an, in dem, wie schon skizziert, China und die USA unter Einsatz hoher finanzieller Mittel eine langfristige Dominanz auf dem Weltmarkt begründen wollen.

Stichwort „Schadenshöhe“: In welchen Bereichen ist mit besonders negativen Konsequenzen zu rechnen, wenn Lieferanten von Rohstoffen und Vorprodukten ihre Marktposition politisch ausspielen? Ausgewählt wurden hier einerseits die Verteidigungsindustrie, die bei bestimmten Rohstoffen (Titan) in Konkurrenz zu anderen Branchen steht und unter einer sicherheitspolitischen Bewertung („Zeitenwende“) von besonderer Bedeutung ist. Andererseits betrachten wir deshalb den Mobilitätsbereich und die Transformation zur E-Mobilität, da hier der ökonomische Schaden und Arbeitsplatzverluste als besonders schwerwiegend einzuordnen sind.

Stichwort „Substitutionsmöglichkeiten“: Wo fehlen aktuell Alternativen, sodass disruptive Veränderungen in den Lieferketten unmittelbar zu Produktionseinschränkungen führen würden? Hier fokussieren wir uns auf die Digitalbranche und die Importabhängigkeit von Halbleitern und Mikrochips, die aber auch in anderen Branchen, wie der Automobilindustrie, unmittelbar wirksam wird.

Stichwort „Zukunftstechnologie“: Welche Technologien und Branchen sind zukunftsweisend und unerlässlich, damit Deutschland seine Wettbewerbsfähigkeit und seinen Platz an der Spitze des technischen Fortschritts behalten kann? Clean Tech, Mobilität und Digitalisierung sind Felder, die unter diesem Gesichtspunkt besondere Aufmerksamkeit verdienen.

5

Erster Überblick zu strategischen Maßnahmen zur Stärkung der Lieferkettenresilienz

Das Instrumentarium zur Stärkung der Resilienz der deutschen Industrie ist breit gefächert und in vielen Fällen, gerade auf der Unternehmensebene auch etabliert. An dieser Stelle geben wir einen kurzen Überblick über die Handlungsoptionen.

Einblicke in die Umsetzung: Lieferkettenstrategien deutscher Unternehmen

Unternehmen können zur Erhöhung der Resilienz ihrer Lieferketten eine Reihe verschiedener Strategien verfolgen. Hierzu gehören:²⁸

Diversifizierung der Lieferanten: das Beziehen von Waren und Dienstleistungen von mehreren verschiedenen Lieferanten im Idealfall aus unterschiedlichen Ländern und Regionen, anstatt sich auf wenige oder nur einen einzigen zu verlassen.

Near-Shoring: Die Verlagerung der Produktion näher ans Heimatland, oft in benachbarte Länder.

Re-Shoring: Die Rückverlagerung der Produktion ins eigene Land.

Friend-Shoring: Die Verlagerung der Produktion in Länder, die als diplomatisch und wirtschaftlich freundlich betrachtet werden.

Optimierung der Lagerbestände: Lagerung größerer Bestände von kritischen Rohstoffen, Vor- und Zwischenprodukten.

Während die EU einen Mix aus Diversifizierung der Lieferketten, Re-shoring und Near-shoring empfiehlt,²⁹ bewerten andere Studien³⁰ vor allem Re-shoring u.a. wegen ungünstiger Ressourcenallokation und geringem Wettbewerb als weniger effizient. Doch es gibt keine „beste“ Strategie, die für jedes Unternehmen zu einem guten Ergebnis führt. Vielmehr ist es nötig, die Vor- und Nachteile jeder Strategie (siehe Tabelle 1) für jeden Einzelfall abzuwägen.

Tabelle 1:

Tabellarische Übersicht der Vor- und Nachteile der verschiedenen Strategien zur Reduzierung der Risiken in globalen Wertschöpfungsketten

Strategie	Vorteile	Nachteile
Diversifizierung der Lieferanten	<ul style="list-style-type: none"> ■ Reduziert Abhängigkeiten von einzelnen Lieferanten ■ Geringe Exposition gegenüber Schocks mit spezifischem geographischem Fokus ■ Kann langfristig die Resilienz erhöhen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Höhere Kosten durch teurere alternative Lieferanten ■ „Sunk costs“ bei Verlagerung eigener Fabriken ■ Verkehrsinfrastrukturabhängig
Near-Shoring	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geringere Transportkosten und -zeiten ■ Reduzierte Einfuhrgebühren ■ Größere regulatorische Angleichung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geringere Kosteneinsparungen im Vergleich zur Diversifizierung ■ Begrenzte Kapazitäten und Infrastrukturen der Nachbarländer ■ Potentielle Erhöhung der Inlandsrisiken
Re-Shoring	<ul style="list-style-type: none"> ■ Potentielle Verringerung der Abhängigkeit von ausländischen Schocks ■ Unterstützung der heimischen Wirtschaft 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hohe Kosten und signifikante Wohlfahrtsverluste ■ Erhöhte Konzentrationsrisiken im Inland
Friend-Shoring	<ul style="list-style-type: none"> ■ Größere regulatorische Angleichung ■ Minimierung geopolitischer Risiken 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Unsicherheit bei der Definition von „Freunden“ ■ Zusätzliche Kosten durch Trennung des Welthandels in Blöcke ■ Risiko von Wohlfahrtsverlusten durch fehlenden komparativen Vorteil
Optimierung der Lagerbestände	<ul style="list-style-type: none"> ■ Lagerkosten sind produktabhängig ■ Schnelle Reaktion auf Nachfrageänderungen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hohe Kosten und lange Dauer für den Aufbau von Lagerkapazitäten bei Schüttgütern ■ Gefahr der Verschwendung und Ineffizienz ■ Abhängigkeit von korrekter Identifikation kritischer Materialien

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von OECD (2023): Risks and opportunities of reshaping global value chains.

Doch welche Strategien haben die deutschen Unternehmen in den letzten Jahren verfolgt? Eine ifo-Studie (2024)³¹ ergab, dass deutsche Unternehmen ihre Bemühungen zur Verringerung des Risikos von Lieferkettenstörungen im Jahr 2023 auf ähnlich hohem Niveau gehalten haben wie bereits im Vorjahr und ihre Aktivitäten hierzu nur geringfügig verringerten. Sowohl Unternehmen, die unter Materialengpässen gelitten haben, als auch solche ohne Materialengpässe arbeiten daran, ihre Lieferketten resilienter zu gestalten. Zu den im Jahr 2023 durchgeführten Maßnahmen in dieser Hinsicht gehörten vor allem die Diversifikation in der Beschaffung und die Einbindung neuer Lieferanten (58 %), verstärkte Lagerhaltung (45 %), bessere Überwachung der Lieferketten (44 %) und Umschichtungen zwischen bestehenden Lieferverhältnissen (34 %). Tabelle 2 (Mehrfachantworten möglich) zeigt, dass die Verteilung der getroffenen Maßnahmen von Branche zu Branche variiert. Beispielsweise setzte das Gewerbe der elektronischen und optischen Erzeugung mit 91,5 % verhältnismäßig stark auf die Diversifikation in der Beschaffung. In der Automobilbranche hingegen waren mit 33,1 % fast doppelt so häufig Insourcing-Strategien vertreten wie im Durchschnitt. Neben der Branche stellte auch die Unternehmensgröße einen Faktor für die Auswahl strategischer Optionen dar. Große Unternehmen konnten leichter ihre Lieferketten diversifizieren. Kleinere Unternehmen hingegen erhöhten öfter ihre Lagerbestände. Es ist wichtig anzumerken, dass die Studie Hinweise auf die Strategien der befragten Unternehmen liefert, jedoch weder den Umfang noch den Erfolg dieser Strategien untersucht.

Tabelle 2:

Maßnahmen zur Verringerung des Risikos von Lieferkettenstörungen nach Branchen, Angaben in Prozent

	Maßnahmen ergriffen	Diversifikation der Beschaffung	Umschichtung zwischen bestehenden Lieferverhältnissen	Insourcing	Verstärkte Lagerhaltung	Bessere Überwachung	Sonstiges
Chemie, Pharmazie	76,8	57,3	37,2	12,3	25,6	47,0	5,1
Gummi- und Kunststoffwaren	68,5	48,6	29,6	8,4	41,4	47,8	1,6
Glas, Keramik, Verarb. v. Steinen u. Erden	65,5	50,6	14,2	3,5	45,4	28,8	0,0
Metallerz. und -bearbeitung	66,2	50,9	19,1	10,6	22,0	29,3	5,4
Herstellung von Metallzeugnissen	60,7	44,7	23,9	15,9	32,0	35,0	1,7
DV-Geräte, elektr. u. optische Erz.	91,5	79,6	40,5	22,9	79,4	65,9	1,3
Elektr. Ausrüstungen	80,5	61,5	31,4	21,2	52,1	48,1	4,5
Maschinenbau	85,0	70,6	45,2	25,4	53,5	48,1	5,1
Kraftwagen, Kraftwagenteile	82,8	62,3	51,5	33,1	45,4	62,3	4,1
Verarbeitendes Gewerbe insgesamt	75,4	58,3	34,2	17,3	44,7	43,5	3,2

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Ifo Schnelldienst Digital (2024): Lieferketten nach Corona: Welche Prioritäten setzen deutsche Unternehmen?³²

Eine Studie von Deloitte (2023) untersuchte die Hindernisse, mit denen Unternehmen aus den Branchen Maschinenbau/Industriegüter, Automobil, Chemie, Bauwesen sowie Transport und Logistik bei der Umsetzung von Resilienzmaßnahmen konfrontiert sind.³³ Am häufigsten genannt wurden:

Fehlende Kapazitäten/Mitarbeitende (52 %),

regulatorische Rahmenbedingungen (50 %),

schwankende Bedürfnisse der Endkunden (47 %),

Mangel an geeigneten Partnern (38 %),

mangelnde Transparenz (30 %),

fehlende finanzielle Mittel (27 %),

mangelnde Skills (intern und extern) (24 %) sowie

abweichende bzw. konkurrierende Schwerpunktsetzung im Unternehmen (23 %).

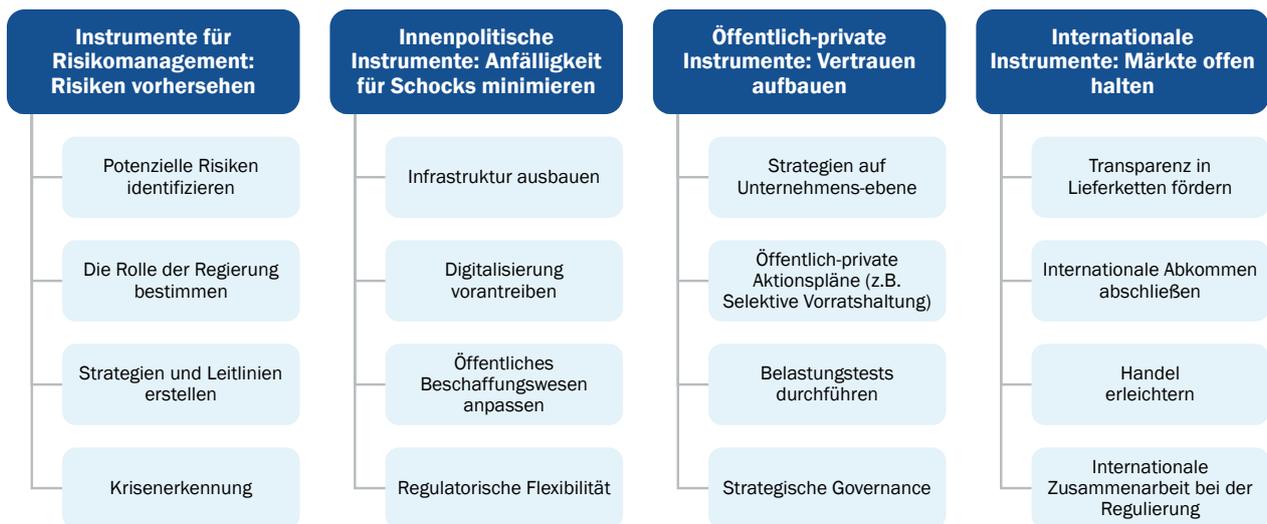
Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen bieten wertvolle Einblicke in die Herausforderungen, mit denen Unternehmen konfrontiert sind, wenn sie ihre Lieferketten stärken möchten. Es bleibt entscheidend, dass Unternehmen ihre Strategien kontinuierlich überprüfen und anpassen, um ihre Widerstandsfähigkeit langfristig zu gewährleisten. Aus den Studien geht allerdings auch hervor, dass die Unternehmen von spezifischen Rahmenbedingungen und der Unterstützung der Politik profitieren können.

Einblicke in die Umsetzung: Resilienzstrategien europäischer und deutscher Politik

Die Stärkung der Resilienz stellt sowohl eine unternehmerische als auch eine politische Aufgabe dar. Generell kann die Politik auf unterschiedliche Maßnahmen und Instrumenten zurückgreifen, die zu einer Erhöhung der Resilienz führen können. Abbildung 7 stellt die von der OECD³⁴ empfohlenen politischen Instrumente dar, durch die unternehmerische Maßnahmen durch Politik ergänzt werden können.

Abbildung 7:

Übersicht unterschiedlicher politischer Instrumente zur Erhöhung der Resilienz von Lieferketten



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von OECD (2024): Keys to resilient supply chains.

Doch welche Maßnahmen haben die europäische und deutsche Politik in den vergangenen Jahren ergriffen? Eine maßgebliche Maßnahme ist der Critical Raw Materials Act (CRMA)³⁵, der insbesondere die Produktionsrisiken in der Rohstoffförderung senken soll. Der Vorschlag beinhaltet verschiedene Maßnahmen, wie Subventionen für heimische Rohstoffprojekte, freiwillige Ziele zur Steigerung der heimischen Kapazität und Diversifizierung sowie ein Monitoring der Lagerung strategischer Rohstoffe. Außerdem soll ein neues Genehmigungssystem für Bergbau- und Verarbeitungsanlagen implementiert werden, das bestimmte Projekte als "strategisch" einstuft und in diesen Fällen einen beschleunigten Genehmigungsprozess sowie spezielle Finanzierungsmöglichkeiten für Unternehmen ermöglicht.

Um ihre Verhandlungsposition zu stärken, wird die EU ein System für gemeinschaftliche Beschaffung einführen. Dieses wird die Nachfrage bündeln, um im Namen der Käufer weltweit mit Verkäufern zu verhandeln. Außerdem wurden strategische Rohstoffe definiert, die besonders wichtig für den Energie- und digitalen Wandel sowie für Verteidigungs- und Raumfahrtanwendungen sind.³⁶ Der CRMA sieht vor, dass der EU-Bedarf dieser strategischen Rohstoffe bis 2030

1. zu mindestens 10 % durch heimischen Abbau,
2. zu mindestens 40 % durch heimische Verarbeitung,
3. zu mindestens 25 % durch Recycling gedeckt wird und
4. nicht mehr als 65 % jedes strategischen Rohstoffs in einer relevanten Stufe der Verarbeitung aus einem einzigen Drittland stammen.

Der CRMA unterstützt somit die heimische Gewinnung von Rohstoffen, was entscheidend für die Resilienz in der Rohstoffförderung ist. Außerdem wird verlangt, dass große Unternehmen (<500 Mitarbeitende) alle zwei Jahre eine Lieferkettenprüfung durchführen, einschließlich einer Bewertung der Rohstoffherkunft und -verarbeitung sowie eines Belastungstests für mögliche Unterbrechungsszenarien. Verkäufer von kritischen Rohstoffen könnten zudem verpflichtet werden, ihren ökologischen Fußabdruck offenzulegen, was insgesamt zu einer erhöhten Transparenz führen soll.

Auf EU-Ebene wurden weitere Förderprogramme mit unterschiedlichen Foki initiiert. Der vorgeschlagene Net-Zero-Industry-Act (NZIA) von 2023 zielt auf eine Erhöhung der Produktion strategischer Clean Technologies wie Photovoltaik, Batterien, Windturbinen, Wärmepumpen und Technologien zur Kohlenstoffbindung auf 40 % des Installationsbedarfs in der EU ab.³⁷ Der European Chips Act (2023) strebt an, die Halbleiterproduktion in Europa bis 2030 zu verdoppeln und investiert in neue Fabriken sowie Forschungszentren.³⁸ Der Internal Market Emergency and Resilience Act (IMERA) soll den EU-Binnenmarkt auch in Krisenzeiten aufrechterhalten und ermöglicht eine bessere Koordination zwischen Mitgliedstaaten, um Engpässe in der Lieferkette zu erkennen und zu beheben. Zudem kann die EU unter bestimmten Bedingungen Unternehmen anweisen, kritische Güter zu priorisieren und Exporte vorübergehend zu beschränken, um die Versorgung innerhalb der EU zu gewährleisten.³⁹

Auf nationaler Ebene sind parallel komplementäre Maßnahmen verabschiedet worden. Dazu gehört die Resilienzstrategie der Bundesregierung von 2022. Sie zielt darauf ab, Menschen und ihre Lebensgrundlagen besser zu schützen sowie die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit des Gemeinwesens gegenüber Katastrophen zu stärken. Sie umfasst alle Phasen des Risiko- und Krisenmanagementzyklus – Prävention, Vorsorge, Bewältigung und Nachbereitung. Die Strategie richtet sich branchenübergreifend auf durch geopolitische und andere Krisen ausgelöste Schocks. In fünf Handlungsfeldern - dem Katastrophenrisikoverständnis, der Stärkung von Institutionen zur Katastrophenrisikosteuerung, der Investition in Katastrophenvorsorge, Steigerung der Wiederaufbaukapazitäten sowie der Förderung internationaler Zusammenarbeit – soll damit die Resilienz Deutschlands insgesamt gesteigert werden. Sie weist außerdem Schnittstellen zu verwandten Themen wie Nachhaltigkeit und Klimawandelanpassung auf.⁴⁰

Die Rohstoffstrategie der deutschen Bundesregierung von 2019 konzentriert sich darauf, die Versorgungssicherheit mit mineralischen und metallischen Rohstoffen für die deutsche Wirtschaft zu gewährleisten, indem sie die Diversifizierung der Bezugsquellen durch Erschließung neuer Lieferanten und internationaler Partnerschaften fördert. Außerdem unterstützt sie den Ausbau nationaler Recyclingprozesse und der Kreislaufwirtschaft, um die Abhängigkeit von Primärrohstoffen zu verringern. Zudem werden Forschung und Innovation im Bereich der Rohstoffgewinnung, -nutzung und -verarbeitung gefördert, um die Effizienz zu steigern und neue Materialien zu erschließen. Auch hier wird die internationale Zusammenarbeit gestärkt, um politische Dialoge mit rohstoffreichen Ländern zu fördern und Entwicklungsländer beim Aufbau nachhaltiger Rohstoffsektoren zu unterstützen.

Die hier exemplarisch dargelegten Maßnahmen stellen nicht die Gesamtheit der politischen Initiativen auf EU-, nationaler und föderaler Ebene dar, sondern zeigen, dass die Politik mit unterschiedlichen Herangehensweisen die Resilienz der europäischen und deutschen Industrie fördert.

6 Anhang

Tabelle 3: Liste der kritischen Rohstoffe und Verwendung

Antimon	Flammschutzadditiv für Kunststoffe, Gummi, Textilien und Farben; Antimon-Blei-Legierungen u. a. für Blei-Säure-Batterien; Katalysator in der chemischen Industrie; Stabilisator; Läuterungsmittel (Glasindustrie); Pigmente
Arsen	Halbmetall; Bleilegierungen; Halbleiter; Hochfrequenzbauelemente (Integrierte Schaltkreise, Leuchtdioden, Laserdioden)
Bauxit	Leichtmetall und Legierungen u. a. für den Flugzeug-, Schifffahrt- und Fahrzeugbau; Verpackungen und Behälter; Elektrotechnik; Optik und Lichttechnik; Aluminiumoxide/-salze u. a. für Drogerie- und Medizinartikel, Feuerfesterzeugnisse, Keramik, Füllstoffe, Flammenschutz, Katalyse, Sorptionsmittel, Schleif- und Poliermitte
Baryt	Bohrspülung, Füllstoff (für Papier, Farben etc.), Herstellung von Barium-Chemikalien, Zuschlagstoff bei der Glasherstellung; Schwerbetonzuschlag, Röntgenkontrastmittel
Beryllium	Beryllium-Kupfer-Legierungen, Berylliumoxidkeramik und Berylliummetall u.a. für elektrische Ausrüstungen (Steckverbindungen, Kontakte, Anschlüsse, Schalter, Relais etc.); Lager; Gehäuse; Drähte; Scheibenbremsen; nichtmagnetische Stähle; Bohrkronen; Fenster für Röntgenröhren
Bismut	Legierungen; Optische Gläser; Keramik; Kosmetik
Bor	Glas; Glaswolle; Glasfasergewebe; Keramik; Emaille; Düngemittel; Wasch- und Reinigungsmittel (Bleichmittel); Metallurgie (z. B. Flussmittel; Läutermittel; Ferrobor); Flammhemmstoff; Kosmetik
Kobalt	Batterien; Superlegierungen; Hartmetalle; Katalysatoren; Magnete; Pigmente; Spezialchemikalien (z. B. Kobaltcarboxylate für die Reifenherstellung); hochwärmefeste Stähle, Oberflächenbeschichtung, Magnetbänder
Kokskohle	Reduktionsmittel und Energieträger bei der Eisen- und Stahlproduktion
Kupfer	Kupfermetall und Kupferlegierungen (Messing; Bronze; Neusilber) für Rohre, Kabel, Drähte, Leitungen, Bleche etc. im Bauwesen; Transportwesen; Elektrotechnik; Maschinenbau; Münzen
Feldspat	Keramik; Glas; Glasuren; Emailen; Schleifmittel; Füllstoff (Lacke, Farben, Klebstoffe, Gummi, Kunststoffe, Seifen- und Reinigungspasten); Flussmittel; Kosmetik
Flussspat (Fluorit <97GHT)	Fluorwasserstoff(-säure); Fluorchemikalien u. a. für Beschichtungsmaterialien, Antihafbeschichtungen, Imprägniermittel, atmungsaktive Membranen, Implantate, Kältemittel, Reiniger, Holzschutzmittel, Ätzmittel etc.; synthetischer Kryolith; Aluminiumfluorid (für die Aluminiumgewinnung); Flussmittel (Stahl-, Gusseisenerzeugung); Fluss- und Trübungsmittel (Herstellung von Fritten, Emailen, Glasuren); optische Gläser
Gallium	Halbleiter für integrierte Schaltungen (z. B. Smartphones) und optoelektronische Geräte (LEDs, Laserdioden, Photodioden, Solarzellen etc.); niedrigschmelzende Legierungen; Quecksilberersatz für Thermometerfüllungen
Germanium	Optische Fasern (z. B. Glasfaserkabel); Infrarottechnik (z. B. Nachtsichtgeräte für militärische Anwendungen); Katalysator für die Herstellung von Kunststoffen; Elektronik (Halbleiter); Solarzellen
Hafnium	Kerntechnik; militärische Anwendungen (Atom-U-Boote); Legierungen
Helium	Kühlmittel; Stirlingmotoren; Atemgas

Fortsetzung Tabelle 3

Quelle: EU Critical Raw Materials List 2023, DERA-Rohstoffliste 2023

leichte/ schwere Sel- tene Erden	Magnete (Nd-Fe-B, Sm-Co); Legierungen (u. a. für NiMH-Batterien); Chemie- und Erdölkatalysatoren; Poliermittel (CeO ₂); Leuchtmittel; Spezialgläser; Keramik (Y-stabilisierte ZrO ₂ -Keramik, Glasuren)
Lithium	Keramik und Glas; Batterien; Schmiermittel; Luftaufbereitung; Strangguss; primäre Aluminiumproduktion; Arzneimittel; Kunststoffe
Magnesium	Magnesiummetall (Druckguss) und Legierungen u. a. für den Flugzeug-, Fahrzeug- und Maschinenbau; Stahl-Entschwefelung; Reduktionsmittel in der Metallurgie; Kugelgraphitguss; chemische Industrie; Düngemittel
Mangan	Stahlveredler; Mangan-Legierungen zur Desoxidation in der Eisen- und Stahlindustrie; Widerstandslegierungen; Batterien; oxidkeramische Magnetwerkstoffe; Pigment; Oxidationsmittel; Chemikalien; Zinkelektrolyse; Düngemittel
Natürlicher Grafit	Feuerfesterzeugnisse und Schmelztiegel; Guss- und Stahlerzeugung (z. B. Kugelgraphit); elektrisch leitende Formkörper (z. B. Kohlebürsten); Batterien; Bremsbeläge; Schmiermittel; Pulvermetallurgie; Bleistiftminen; Schweißelektroden; Additiv- und Dispersionsmittel
Nickel – Bat- teriequalität	Stahlveredler (korrosionsbeständiger Stahl); Legierungen; Superlegierungen; Gasturbinen; Raketentriebwerke; Metallüberzüge; Münzen; Katalysatoren; Batterien
Niob	Stahlveredler (Edelstähle); Legierungen; Superlegierungen (Flugzeugturbinen); Elektrolytkondensatoren; Katalysator
Phosphorit / Phosphor	Dünge-, Nahrungs-, Futtermittel; industrielle Anwendungen (u. a. Reinigungs-, Korrosionsschutz-, Flammschutzmittel)
Metalle der Platingruppe	Autokatalysatoren; Schmuck; Investment; chemische Industrie; Glas; Medizin- und Biotechnik; Elektrotechnik; Erdölindustrie
Scandium	Beleuchtung; Magnetische Datenspeicher; Legierungszusatz
Siliziummetall	Chemikalien (Silicone für Form- und Dichtungsmaterialien, Lacke, Farben); Halbleiter; Mikrochips; Solarzellen; Veredlung von Aluminium (Legierung)
Strontium	Pyrotechnik; Glas (z. B. Herstellung von LCD- und Plasmabildschirmen, Spezialgläser, Kathodenstrahlröhren); Keramik; Ferrite (Magnete); chemische Industrie; Zinkelektrolyse; Aluminiumindustrie
Tantal	Mikrokondensatoren (Elektrolytkondensatoren in Fahrzeugelektronik, Computern, Mobiltelefonen, Raum- und Luftfahrtindustrie etc.); Legierungen (karbidhaltige Werkzeug- und Schneidstähle, Superlegierungen, Komponenten in der chemischen Prozessindustrie, Nuklearreaktoren, Raketenteile, Implantate etc.); Spezialgläser
Titanmetall	TiO ₂ -Pigmente in Farben, Lacken, Kunststoffen, Papier, Glas, Keramik etc.; Titanmetall für Stahl, Legierungen, Superlegierungen in Luft- und Raumfahrt, medizinische Implantate, chemischer Apparatebau, Petrochemie, Automobilindustrie, Desoxidation von Stahl; Ummantelung von Schweißstäben
Wolfram	Hartmetall; Wolframmetall; Stähle; Wolframlegierungen und Superlegierungen für Werkzeugstähle; hitzebeständige Stähle; Walzmaschinen; Schneidwerkzeuge; Bohrkronen; Inserts; Gussformen; Turbinen; Glühdrähte; elektrische Kontakte; Elektroden; Kathoden; Dünnschichttransistoren etc.; Chemikalien; Schmiermittel
Vanadium	Legierungen (Werkzeugstähle, chirurgische Instrumente); Vanadiumverbindungen (zur Herstellung von Akkumulatoren)

Endnoten

- 1 Statista. (2024). Deutschlands Rohstoffimporte.
- 2 Statistisches Bundesamt. (2023). Verwertete inländische Rohstoffentnahme, Ein- und Ausfuhr von Gütern (Inländerkonzept): Deutschland, Jahre, Materialgrad und Rohstoffarten. Statistisches Bundesamt Deutschland - GENESIS-Online: Ergebnis 85131-0004.
- 3 DERA (2021). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. DERA Rohstoffinformationen, 50, 366 S., Berlin.
- 4 Kullik, Jakob (2020). Verlorenes Jahrzehnt der Rohstoffsicherheit.
- 5 Bolte, M., & Weckmann, H. (2022). Halbleiterkrise in der Automobilindustrie – Wo stehen wir heute und wo geht die Reise hin? AlixPartners. Boranova, V., Huidrom, R., Ozturk, E., Stepanyan, A., Opalova, P., & Zhan, S. (2022). Cars in Europe: Supply chains and spillovers during COVID-19 times. IMF Working Paper, 9-13, 16, 25f.
- 6 Brinley, S. (2023). The semiconductor shortage is – mostly – over for the auto industry. S&P Global Mobility Blog; Fromm, T. (2021). Der Chipmangel trifft die Autoindustrie mit voller Wucht. Süddeutsche Zeitung, 23. September 2021. Abgerufen am 3. Mai 2024; Kleinfeld, M. (2021). Der Chipmangel führt weltweit zu 3,9 Millionen weniger produzierten Fahrzeugen im Jahr 2022. AlixPartners, 14. Mai 2021. Abgerufen am 3. Mai 2024.
- 7 BMW Group. (2021): BMW Group Bericht 2021. S. 73; BMW Group. (2023): BMW Group Bericht 2023. S. 70; Jahresabschluss Volkswagen Aktiengesellschaft zum 31. Dezember 2021 S. 5, Volkswagen Group Geschäftsbericht 2022 S. 28.
- 8 Statistisches Bundesamt (2024): Statistisches Bundesamt - Gesamtwirtschaftliches Materialkonto
- 9 BGR. (2024). DERA untersucht deutsche Metallimporte aus Russland.
- 10 DERA. (2023). Rohstoffliste. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken
- 11 DERA. (2023). Rohstoffliste. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken.
- 12 European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. Publications Office of the European Union.
- 13 ebd.
- 14 DERA. (2023). Rohstoffliste. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken.
- 15 Baur, A., & Flach, L. (2022). Deutsch-chinesische Handelsbeziehungen: Wie abhängig ist Deutschland vom Reich der Mitte? Ifo Schnelldienst, 75(04), 56-65.
- 16 vbw. (2023). Neue Beschaffungsmärkte für die bayerische Wirtschaft.
- 17 Ifo Institut. (2023). Internationale Wertschöpfungsketten – Reformbedarf und Möglichkeiten.
- 18 European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. Publications Office of the European Union.
- 19 The World Bank. (2024). Worldwide Governance Indicators.
- 20 DERA. (2023). Rohstoffliste. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken.
- 21 USGS. (2023). Mineral Commodity Summaries.
- 22 LKAB. (2024). Europe's largest deposit of rare earth metals located in Kiruna area.
- 23 Gauß et. al. (2021). Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance. Berlin.

- 24 European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. Publications Office of the European Union.
- 25 IFP. (2021). Aluminium in the energy transition: What lies ahead for this indispensable metal of the modern world?
- 26 Stiftung Klimaneutralität. (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045.
- 27 Stiftung Klimaneutralität. (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045.
- 28 OECD. (2023): Risks and opportunities of reshaping global value chains. (OECD Economics Department Working Papers No. 1762). OECD Publishing.
- 29 European Commission. (2021): Shaping and securing the EU's open strategic autonomy by 2040 and beyond.
- 30 Ifo Zentrum für Außenwirtschaft. (2021): Internationale Wertschöpfungsketten – Reformbedarf und Möglichkeiten.
- 31 Ifo Schnelldienst Digital. (2024): Lieferketten nach Corona: Welche Prioritäten setzen deutsche Unternehmen?
- 32 Weitere befragte Gewerbe, die in die Berechnung „Verarbeitendes Gewerbe insgesamt“ miteinfließen: Nahrungsmittel und Getränke; Bekleidung, Textilien und Lederwaren; Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren, Papier und Pappe, Druckerzeugnisse.
- 33 Deloitte. (2023): Supply Chain Pulse Check Herbst 2023.
- 34 OECD (2024): Keys to resilient supply chains.
- 35 European Commission. (2024). Critical Raw Materials Act.
- 36 Darunter Seltene Erden, Lithium, Magnesium und Kobalt; aufgrund ihrer strategischen Relevanz wurden auch die nicht-kritischen Rohstoffe Nickel und Kupfer als strategisch eingestuft.
- 37 European Commission. (2023). Net-Zero Industry Act.
- 38 European Commission. (2023). European Chips Act.
- 39 European Parliament. (2023). Internal Market Emergency and Resilience Act (IMERA).
- 40 Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. (2022). Deutsche Strategie zur Stärkung der Resilienz gegenüber Katastrophen.



Dossier

Batteriefertigung für die Elektromobilität

Lieferabhängigkeiten und Strategien für eine
widerstandsfähige und souveräne deutsche
E-Autoindustrie

2

Autorenteam

Paul Möhlmann

Jakobus K. Jaspersen

Helena Seide

Inhalt Dossier

41

Hintergrund

44

Lithium-Ionen-Batterie: Herausforderungen
und Abhängigkeiten

52

Rahmenbedingungen und Handlungsfelder

58

Strategien der Automobil- und Zulieferindustrie

66

Handlungsempfehlungen zur Stärkung der Batteriefertigung
in Deutschland und Europa

1

Hintergrund

Die Mobilitätswende als Herausforderung und Chance für die deutsche Automobil- und Zuliefererindustrie

Mit dem Wandel zu batterieelektrischen Fahrzeugen und dem Aufstieg der Lithium-Ionen-Batterie als strategisch wichtige Schlüsselkomponente geht eine tiefgreifende Transformation der Automobil- und Zuliefererindustrie einher, welche sich in der gesamten Wertschöpfungskette auf die Produktion von Elektroautos einstellen und umstellen muss. Mit einem erwirtschafteten Umsatz aus der Inlandsproduktion von rund 560 Milliarden Euro und etwa 780.000 beschäftigten Personen im Jahr 2023 ist die Branche ein bedeutender Wirtschafts- und Innovationsmotor und der mit Abstand größte Industriezweig des Landes.¹ Während etwa 30 Prozent des Gesamtumsatzes auf das Geschäft im Inland entfallen, verdeutlichen die Umsatzanteile von rund 30 Prozent in der Eurozone und 40 Prozent außerhalb dieser die große Bedeutung des Export- und Auslandsgeschäfts für die Wertschöpfung der deutschen Automobilindustrie.² Auch zukünftig wird die deutsche Automobilindustrie bei PKW weiterhin als Nettoexporteur agieren.³ Die sehr stark ausdifferenzierte Wertschöpfungskette um die wenigen großen Fahrzeug- und Motorenhersteller in Deutschland ist in besonderem Maße von vielen hochspezialisierten mittelständischen Unternehmen geprägt, die einen großen Teil der Wertschöpfung der Automobilindustrie am Standort Deutschland erwirtschaften. Die Innovationsführerschaft der Industrie und ihre enorme Wertschöpfung fußen bisher wesentlich auf der Herstellung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.

Da ein großer Teil der schädlichen Treibhausgasemissionen – rund 20 Prozent in 2019 – durch den Verkehrssektor verursacht werden, ist die Wende hin zur Elektromobilität ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Klimaneutralität.⁴ Ziel der Bundesregierung ist es, im Jahr 2030 mindestens 15 Millionen vollelektrische E-PKW in Deutschland auf den Straßen zu haben.⁵ Ab 2035 sollen in der Europäischen Union zudem nur noch abgasfreie, de facto elektrisch angetriebene PKW zugelassen werden, ähnliches gilt ab 2040 auch für schwere Nutzfahrzeuge. Im Frühjahr 2024 sind in Deutschland zwar erst rund 3 Prozent der PKW reine Batteriefahrzeuge.⁶ Dennoch ist langfristig vor dem Hintergrund der politischen Vorgaben auch in Europa mit einem rasanten Nachfragerwachstum zu rechnen, dem auch die deutsche Automobilindustrie mit einem wachsenden Angebot an Elektroautos nachkommt. Schätzungen zufolge könnte der globale Markt für den Verkauf von Elektroautos für 2030 etwa 9 Billionen Dollar und 2050 bis zu 63 Billionen Dollar ausmachen.⁷ Im Jahr 2023 wurden in Deutschland etwa 973.000 batteriegetriebene E-PKW produziert, was einem Wachstum um 59,9 % gegenüber dem Vorjahr entspricht, aber immer noch deutlich unter den im selben Zeitraum hergestellten 2,4 Mio. Autos mit Verbrennungsmotor liegt. 786.000 der E-PKW mit einem Gesamtwert von 36 Mrd. Euro wurden ins Ausland exportiert.⁸ Insgesamt entfielen 2023 knapp 10 % der globalen Produktion von batteriegetriebene E-PKW auf Deutschland.⁸ Dass der chinesische Hersteller BYD und der amerikanische Hersteller Tesla weltweit bei der Produktion und dem Absatz ihrer Elektroautos einen großen Vorsprung vor den deutschen Automobilherstellern haben, ist ein großes Wettbewerbsrisiko beim Hochlauf der Elektromobilität.

Antriebsbatterie als Schlüsseltechnologie und Abhängigkeitsfaktor in der E-Mobilitätsindustrie

Im batterieelektrischen Auto bilden neben dem Elektromotor vor allem die leistungsstarken Antriebsbatterien, sogenannte Traktionsbatterien, die zentrale Schlüsseltechnologie. Sie werden zukünftig den wertmäßig größten Kostenfaktor im Automobil ausmachen.¹⁰ Als aktuell leistungs-, serien- und wettbewerbsfähigste Batterietechnologie hat sich die Lithium-Ionen-Batterie durchgesetzt, da sie eine hohe Energiedichte mit einer Reihe weiterer vorteilhafter Eigenschaften beim Laden und Entladen vereint. Die Lithium-Ionen-Batterie wird in den kommenden Jahren den Markt dominieren. Parallel wird die Nachfrage nach Batteriekapazität im Verkehrssektor einen starken Anstieg um etwa das 14-fache zwischen 2020 und 2030 erleben.¹¹ Weltweit soll die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien in Elektrofahrzeugen bis 2030 auf 2 Terawattstunden steigen und zwei Drittel der sektorübergreifenden Nachfrage nach Batteriekapazitäten abbilden.¹²

Bisher beziehen die deutschen Automobilhersteller ihre Lithium-Ionen-Batterien für den weltweiten und europäischen Markt zu beträchtlichen Teilen aus Asien, insbesondere aus China.¹³ Neben der Verringerung und grundlegenden Veränderung der Komponenten im Antriebsstrang nimmt für die Transformation der deutschen Automobil- und Zuliefererindustrie der Aufbau einer wettbewerbsfähigen Batteriezellfertigung mit einer resilienten Wertschöpfungskette eine Schlüsselrolle ein. Perspektivisch bleibt die Industrie jedoch in der Lieferkette für die Lithium-Ionen-Batterie in hohem Maße abhängig von importierten Rohstoffen und Vorprodukten aus China. Somit findet ein zentraler Teil der vorgelagerten Wertschöpfung eines deutschen Elektroautos im Ausland statt. Diese Abhängigkeiten bergen wirtschaftliche und strategische Risiken. Denn geopolitische Veränderungen, Handelshemmnisse und Lokalisierungsbestrebungen von wichtigen Bezugs- und Zielmarktländern erschweren zunehmend den Zugang der deutschen Automobilindustrie zu wichtigen Rohstoffen und Vorprodukten, aber auch zu offenen und fairen Märkten. Darüber hinaus können Handels- und Subventionspraktiken autoritärer Staaten wie China insbesondere bei der Elektromobilität den internationalen Wettbewerb verzerren.¹⁴ Die erneute Wahl von Donald Trump zum Präsidenten der Vereinigten Staaten könnte diese geo- und handelspolitischen Unsicherheiten weiter verschärfen und birgt für Europa größere Risiken als zuvor.

Untersuchung kritischer Abhängigkeiten und Wege zu strategischer Souveränität und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobil- und Zuliefererindustrie

Dieses Dossier schafft einen systematischen Überblick über die konkreten Abhängigkeiten der deutschen Automobilindustrie in der Wertschöpfungskette der Batteriezellfertigung und ordnet diese vor dem Hintergrund des Fertigungsaufbaus in Deutschland (und Europa) ein. Auf dieser Basis werden Unterstützungsbedarfe der deutschen Automobilindustrie auf Ebene der Batteriezellfertigung identifiziert und Handlungsempfehlungen ausgearbeitet.

Neben Fachliteratur, Studien, Analysen und Berichten sind in die folgenden Darstellungen und Auswertungen auch Informationen und Einschätzungen von Experten und Expertinnen aus der Industrie und Fachverbänden eingeflossen, die in einer Reihe von Interviews zu dem Thema befragt wurden.



Zentrale Fragestellungen des Dossiers

Welche Risiken bestehen beim Ausbau der Batteriezellfertigung und vorgelagerter Wertschöpfungsstufen aufgrund der Abhängigkeit der deutschen Industrie von Rohstoffen, Vor- und Zwischenprodukten, die aus autoritären Staaten bezogen werden?

Welche Strategien werden von staatlicher und unternehmerischer Seite bei der Batteriefertigung verfolgt, um diese Risiken und Abhängigkeiten zu reduzieren, eine widerstandsfähige Wertschöpfungskette aufzubauen und abzusichern?

Welche politischen Maßnahmen auf europäischer und nationaler Ebene und welche unternehmerischen Maßnahmen können die Abhängigkeiten verringern?

2

Lithium-Ionen-Batterie: Status Quo der Herausforderungen

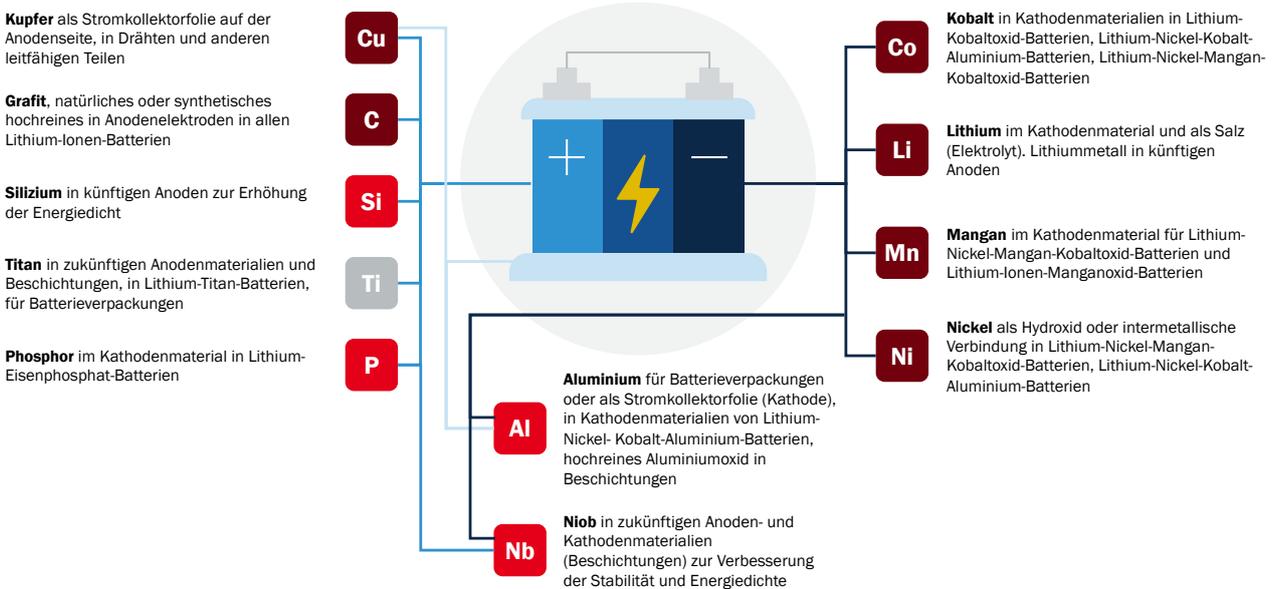
Die Fertigung von Antriebsbatterien für Elektroautos befindet sich in Deutschland und Europa im Aufbau. Im letzten Jahr wurde knapp die Hälfte der für E-Autos verwendeten Lithium-Ionen-Batterien aus Asien, insbesondere China importiert. Der Rest wurde fast vollständig aus Europa bezogen.¹⁵ Während das industrielle und öffentliche Bewusstsein über die Rohstoffabhängigkeiten bereits vergleichsweise stark ausgeprägt und in einer breiten Studienlage dokumentiert ist, trifft dies nicht auf die Herausforderungen der Batteriezellfertigung und ihrer vorgelagerten Wertschöpfungsstufen zu.

Lithium-Ionen-Batterien als dominierende Energiespeicher für die Elektromobilität – Kritische Rohstoffe als Kernbestandteile der Technologie

Für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien für Elektroautos werden überwiegend Rohstoffe benötigt, über die Deutschland nicht verfügt oder die momentan nicht gefördert werden. Daraus ergeben sich tief in die Wertschöpfungskette reichende Abhängigkeiten für die deutsche Automobil- und Zulieferindustrie, die bis dato selbst wenig Batteriekapazitäten produziert. Der Markt für die Antriebsbatterien wird von Lithium-Ionen-Batterien dominiert. Die Batteriezelle und damit das Kernelement der Lithium-Ionen-Batterie besteht größtenteils aus Rohstoffen, die auf der Liste der EU-Kommission als strategische kritische Rohstoffe eingestuft wurden. Dies sind für die Batterie insbesondere Lithium, Graphit, Kobalt, Nickel, Mangan und Kupfer. Darüber hinaus sind auch kritische, aber nicht strategische Rohstoffe enthalten (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1:

Rohmaterialien einer Lithium-Ionen-Batterie



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Carrara, S. et. al. (2023): Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study.

Hellrot markierte Rohstoffe sind von der EU als kritisch eingestuft, dunkelrot markierte als strategisch.

Aluminium und Kupfer dienen der Batterie als Trägermaterial des Kathoden- und Anodenaktivmaterials, welche mit Lithium-Metall und Graphit beschichtet sind. Es gibt vereinfacht zwei Typen von Lithium-Ionen-Batterien, die in der Anwendung dominieren: Solche mit einer Kathode aus Nickel, Mangan und Kobalt (NCM oder NMC) und solche mit einem Kathodenaktivmaterial aus Nickel, Kobalt und Aluminium (NCA) – ohne Mangan. Darüber hinaus finden Kathoden auf Basis von Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) und Lithium-Mangan-Oxid (LMO) Anwendung in Elektroautos.¹⁶

Durch Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung verändern sich die Zusammensetzung und der Umfang der eingesetzten Rohstoffe stetig. Die Technologieentwicklung bei der Lithium-Ionen-Batterie ist somit ebenso wie im Bereich Feststoffzellen und bei perspektivischen Alternativen wie der Natrium-Ionen-Batterie hochdynamisch. Einschätzungen der befragten Expertinnen und Experten gehen davon aus, dass die Lithium-Ionen-Batterie mit den genannten Rohstoffen in unterschiedlichen Zusammensetzungen mindestens noch im kommenden Jahrzehnt den Markt dominieren werden.

Rohstoffproduktion und -verarbeitung für die Lithium-Ionen-Batterie - Kritische Abhängigkeiten und globale Verfügbarkeit

Da die Herstellung von Batterien rohstoffintensiv ist und ein beträchtlicher Teil des Wertes einer Batterie in den Rohstoffen steckt,¹⁷ geht im Bereich Batterie von der Rohstoffebene ein besonderes Preisrisiko aus, weshalb dortige Abhängigkeiten besonders schwerwiegen. Deutschlands kritische Abhängigkeiten bei der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung umfassen insbesondere Lithium, Kobalt, Mangan, Nickel und Graphit. Nach all diesen Rohstoffen wird die Nachfrage steigen. Ob das Angebot mit dem Anstieg der Nachfrage Schritt halten kann, wird in den verschiedenen Prognosen unterschiedlich eingeschätzt. Es wird insbesondere davon abhängen, ob alle geplanten Förderprojekte realisiert werden und ob die Nachfrage bis zu einem Umfang, der zur Erreichung der UN Sustainable Development Goals benötigt wird, ansteigt.¹⁸ Bei einer Verknappung stellt sich darüber hinaus die Frage, für wen diese Rohstoffe zu welchem Preis verfügbar sein werden. Ob Rohstoffe, Komponenten und Güter als kritisch einzustufen sind, ist von zwei Faktoren abhängig. Zum einen müssen sie eine hohe ökonomische Bedeutung haben. Zum anderen muss eine Gefährdung der Versorgungssicherheit vorliegen oder absehbar sein.¹⁹ Die genannten Rohstoffe werden bisher wenig in Europa exploriert und gefördert, was die deutsche Industrie anfällig für Lieferengpässe und Preisschwankungen macht und potenziell die Möglichkeiten einer unabhängigeren Versorgung einschränkt.

Viele Rohstoffvorkommen sind auf wenige Länder konzentriert oder werden nur von wenigen Unternehmen abgebaut oder weiterverarbeitet. Laut United States Geological Survey (USGS) spielten im Jahr 2021 27 Länder wie Australien und Chile (Lithium), Indonesien und die Philippinen (Nickel) sowie die Demokratische Republik Kongo (Kobalt) eine hervorgehobene Rolle.²⁰

Aufgrund des Wachstums der Elektromobilität wird erwartet, dass sich der globale Bedarf an Lithium bis 2030 im Vergleich zu 2020 verfünffachen wird.²¹ Die Lithiumversorgung wird als sehr kritisch eingestuft: 91 % des weltweiten Bergbaus lagen 2021 nach Angaben des United States Geological Survey in Chile, Australien und China, es wird ein kurz- bzw. mittelfristiger Nachfrageüberhang erwartet.²² Auch die letzte DERA Rohstoffrisikobewertung für Lithium aus dem Jahr 2023 geht tendenziell von einer Unterversorgung des Lithiummarktes aus. Selbst bei einer eher unwahrscheinlichen Deckung des steigenden Bedarfs werden neue Projekte kaum die hohe Angebotskonzentration verringern können.²³ Deutschland bezieht 77 % seines Lithiums aus Chile und ist dadurch zu einem mittleren Grad kritisch abhängig.²⁴

Es besteht das Potenzial, die Lithiumgewinnung in Teilen über einen europäischen Bezug zu diversifizieren. Die Nutzung geothermischer Ressourcen im Oberrheingraben bietet in Deutschland besonders günstige Bedingungen für die Extraktion von Lithium. Diese Region, die bereits über eine etablierte Geothermieinfrastruktur verfügt, ermöglicht es, Lithium auf nachhaltige und kostengünstige Weise zu gewinnen. Mehrere Unternehmen arbeiten derzeit daran, die notwendigen Lizenzen zu erhalten, um die Lithiumverarbeitung in Europa weiter auszubauen. Ein bedeutender Schritt in diese Richtung wurde im September 2024 mit der Eröffnung der ersten Lithiumraffinerie in Wolfen-Bitterfeld gemacht. Wenn alle bestehenden Geothermieranlagen in Deutschland mit Lithiumextraktionssystemen ausgestattet würden, könnte dies einen Anteil von zwei bis 13 Prozent des für die Batterieproduktion in Deutschland benötigten Lithiums abdecken. Allerdings birgt dieses Vorhaben noch große technische und wirtschaftliche Unsicherheiten, die die Realisierung und Rentabilität solcher Projekte erheblich beeinflussen können.²⁵

Als weitere Strategie zur Gewinnung von Lithium spielt das Recycling eine bedeutende Rolle. Allerdings kann es strategische Abhängigkeiten allein nicht auflösen. Die Recyclingkapazitäten müssen auf die Produktionskapazitäten abgestimmt werden, sowohl in Bezug auf die Rückgewinnung aus Endprodukten als auch auf Produktionsabfälle. Dennoch ist die Förderung im Upstream-Bereich entscheidend für die Resilienz, da die Recyclingkapazität ansonsten durch Materialengpässe limitiert wäre. Ebenso werden fortlaufende Fortschritte und Investitionen in Forschung und Entwicklung erforderlich sein, um die Recyclingfähigkeit weiter zu verbessern.

Kobalt weist aktuell die höchsten Beschaffungsrisiken aller Batterierohstoffe auf. Dies liegt vor allem an der erwarteten dynamischen Nachfrage. Besonders die Dominanz der Demokratischen Republik Kongo als mit Abstand größtem Förderland (72 % des deutschen Bezugs) trägt zu diesen erheblichen Risiken bei.²⁶ Seit über zehn Jahren dominiert die Kobaltförderung aus den kongolesischen Kupferbergwerken den Weltmarkt, und diese Dominanz wird voraussichtlich in absehbarer Zukunft bestehen bleiben. Außerhalb von Zentralafrika wird Kobalt hauptsächlich als Beiprodukt aus Nickel- oder Nickel-Kupfer-Bergwerken gewonnen, dadurch hängt das Angebot an Kobalt auch von den Entwicklungen auf den Kupfer- und Nickelmärkten ab. Aufgrund des zuletzt niedrigen Nickelpreises wurde die Förderung in den Bergwerken Ambatovy (Madagaskar) und Goro (Neukaledonien) vorerst eingestellt.²⁷ Darüber hinaus haben viele der derzeit betriebenen Kupferminen ihren Höhepunkt erreicht – bedingt durch abnehmende Erzqualität, erschöpfte Reserven sowie zunehmenden Klima- und Wasserstress in Förderregionen wie Südamerika und Australien. Bei Nickel stellt sich die Herausforderung, dass eine Versorgung entweder sehr kosten- oder emissionsintensiv ist, wobei der Indo-Pazifische Raum, insbesondere Indonesien und die Philippinen, an Bedeutung gewinnt.

Ferner ist zu beachten, dass die Bedeutung ESG-konformer Lieferketten zunehmen wird, da der Kobaltabbau stark vom handwerklichen Kleinbergbau geprägt ist und somit besonders anfällig für sozialen Druck ist. Ein nachhaltiger Abbau wird daher für eine stabile Versorgung immer wichtiger.²⁸ Graphit ist mengenmäßig der bedeutendste Bestandteil moderner Lithium-Ionen-Batterien. Daher wird der Bedarf in den nächsten Jahren stark ansteigen. Ein erhebliches Risiko stellt die enorm hohe Angebotskonzentration dar, da China von der Rohstoffförderung über die Rohstoffverarbeitung nahezu die gesamte Wertschöpfung kontrolliert. In Europa findet bisher keine nennenswerte Förderung von Graphit in Batteriequalität statt. Eine Reihe von Rohstoffförderprojekten in dem Bereich befinden sich allerdings sowohl weltweit als auch in Europa in unterschiedlichen Stadien der Entwicklung. Z. B. arbeitet die australische Talga Group im Vittangi Graphite Project in Nordschweden daran, das größte bekannte Vorkommen von natürlichem Graphit in Europa abzubauen und zu Anodenaktivmaterial zu verarbeiten. 2023 fanden erste Pilotabbauoperationen statt. Verstärkter Abbau von natürlichem Graphit in Europa wird einen Resilienzgewinn mit sich bringen, aber nicht den geplanten Bedarf decken können.²⁹ Schätzungen zufolge könnte so maximal ein Fünftel der Nachfrage nach Graphit in Batteriequalität bedient werden.³⁰ Auch in den USA, wo es noch bis 2023 keine inländische Produktion gab,³¹ werden trotz überschaubarer Vorkommen inzwischen fünf Graphit-Bergbauprojekte angestoßen, gefördert im Zuge des Inflation Reduction Acts. Größere Mengen Graphit werden zukünftig aber eher außerhalb der USA abgebaut werden.³² Kasachstan hat das Potential sich zu einem wichtigen globalen Lieferanten auf dem Graphitmarkt zu entwickeln. Die Europäische Bank für Wiederaufbau und Entwicklung investiert dort 3 Millionen Euro in das Bergbauunternehmen Sarytogan Graphite mit dem Ziel, eine nachhaltige Graphitproduktion in Batteriequalität für die europäische Industrie zu entwickeln.³³ In den kommenden Jahren könnten sich durch die Ausweitung der Bergbaukapazitäten, auch in Regionen wie Ostafrika, Kanada und Australien, neue Möglichkeiten ergeben, die dazu beitragen, die geografische Konzentration von natürlichem Graphit zu verringern.³⁴

Weitere Rohstoffe, die für Lithium-Ionen-Batterien benötigt werden, sind Mangan und Nickel, Mangan stammt zu 36 % aus Südafrika. Dadurch entsteht eine mäßig kritische Abhängigkeit aufgrund der Konzentration und Marktmacht von Südafrika. Auch von Indonesien ist Deutschland indirekt mittelkritisch abhängig, da 38% des Nickels von dort bezogen werden.³⁵ Die Nickel- und Manganförderung in Europa würde theoretisch ausreichen, um den Bedarf der europäischen Zellfertigung zu decken. Allerdings fließt ein Großteil der lokalen Nickelförderung in die Stahlindustrie und steht daher der Batterieindustrie nicht zur Verfügung.³⁶

Die Abhängigkeiten werden indirekt dadurch verstärkt, dass neben amerikanischen vor allem chinesische Firmen massiv in Rohstoffprojekte auf anderen Kontinenten investiert sind und die Ressourcen über Importe an sich binden.³⁷ Dies erfolgt sowohl durch Direktinvestitionen als auch durch Chinas Position als der größte Importeur von Rohstoffen. Besonders in Australien haben chinesische Unternehmen erheblich in den Bergbausektor investiert, insbesondere in die Erschließung kritischer Mineralien wie Seltene Erden. Von 2006 bis 2023 flossen insgesamt 50,8 Milliarden US-Dollar chinesischer Investitionen in den australischen Rohstoffsektor, 73 % der Investitionen entfielen auf den Bergbau.³⁸ Trotz eines jüngsten Rückgangs dieser Investitionen bleibt Chinas Einfluss durch umfangreiche Importe australischer Rohstoffe groß, insbesondere von Eisenerz, das 2022 etwa 87 % der chinesischen Gesamtimporte aus Australien ausmachte.³⁹ Zudem hat China seine Rohstoffbeschaffungsstrategie durch Investitionen in Bergbau- und Verarbeitungsunternehmen in anderen Regionen, insbesondere Indonesien und Malaysia, diversifiziert, um eine stabile Versorgung sicherzustellen.⁴⁰ China übt deshalb Einfluss weit über seine Grenzen hinaus aus.⁴¹ Auch bei den nächsten Schritten der Verarbeitung der Rohstoffe zu verwendbaren Materialien dominiert China: Es produziert global 55 % des Nickels, 75 % des Kobalts, 95 % des Mangans, 56 % des Lithiums und 100 % des sphärischen Graphits. Daraus ergeben sich mittlere bis sehr kritische Abhängigkeiten.^{42,43} Zwar ist das Risiko eines Versorgungsengpasses für verarbeitetes Lithium geringer als für unverarbeitetes und damit nur mittel kritisch, aber auch hier besteht ein kurz- bis mittelfristiger Nachfrageüberhang u. a. aufgrund seiner Verwendung in strategisch wichtigen und konkurrierenden Schlüsseltechnologien.

China hat seine Weiterverarbeitungskapazitäten in den letzten zwei Jahren stetig ausgebaut und dominiert insbesondere die Raffinade-Produktion von Kobalt-Chemikalien. Auch europäische Unternehmen haben ihre Weiterverarbeitungskapazitäten neu strukturiert und werden diese weiter ausbauen, um insbesondere die europäische Nachfrage und Wertschöpfungskette in der Batteriezell- und Komponentenfertigung in Zukunft besser bedienen zu können.⁴⁴ Hürden beim Aufbau von Raffineriekapazitäten in Europa sind beispielsweise die langen Fristen, die für die Prüfung, Validierung und Genehmigung von Batteriekomponenten erforderlich sind, bevor Aufträge in großen Stückzahlen erteilt werden können sowie die hohen Energiekosten. Darüber hinaus sind erhebliche Investitionen erforderlich. Aufgrund der starken globalen Konkurrenz sind die wirtschaftlichen Risiken hoch.⁴⁵ Umweltauflagen und geringe öffentliche Akzeptanz für Chemikalienverarbeitung erschweren den Aufbau von Raffineriekapazitäten in Europa zusätzlich.⁴⁶

Anoden- und Kathodenaktivmaterial: Kritische Abhängigkeiten in der Komponentenfertigung für die Batteriezele

Auch in der Fertigung der Vorprodukte und Schlüsselkomponenten der Batteriezele, die künftig in Deutschlands und Europas Gigafabriken produziert werden sollen, bestehen aktuell und perspektivisch hohe Importabhängigkeiten aus Asien, insbesondere aus China. Nach Recherchen der Prognos AG, des Öko-Instituts und des Wuppertal Instituts aus dem Jahr 2023 stammt das Kathodenaktivmaterial in aktuellen Lithium-Ionen-Batteriezellen zu 71 % und das Anodenaktivmaterial sogar zu 91 % aus China.⁴⁷

Beim Blick über die Lieferländer hinaus zur Unternehmensbeteiligung dominieren chinesische Unternehmen den Markt für Anodenaktivmaterialien mit einem Anteil von über 70 Prozent, basierend auf Daten des Fraunhofer Instituts ISI aus dem Jahr 2022. Der verbleibende Markt wird von japanischen und südkoreanischen Firmen abgedeckt. Ebenso führen chinesische Unternehmen den Markt bei den Kathodenaktivmaterialien an, jedoch mit einem etwas niedrigeren Anteil von über 65 Prozent. Südkoreanische Unternehmen halten fast 20 Prozent des Marktes, gefolgt von japanischen Firmen mit etwa sieben Prozent. Europa, insbesondere vertreten durch Umicore mit Sitz in Belgien, nimmt mit etwas über sechs Prozent Marktanteil einen vierten Platz ein.⁴⁸

Umicore hat Ende 2022 seine erste Produktion von Kathodenaktivmaterialien für Antriebsbatterien in Polen gestartet. Die Produktion von Kathodenaktivmaterial wird derzeit unabhängig voneinander von Umicore in Polen und von BASF in Deutschland hochgefahren.⁴⁹ Darüber hinaus ist das Joint Venture Ionway zwischen Umicore und PowerCo, dem Batterieunternehmen des Volkswagen Konzerns, ein Beispiel zur Stärkung der Souveränität in der Batterieproduktion und Elektromobilität. Die Kooperation zielt darauf ab, die Produktion von Vor- und Kathodenaktivmaterialien in Europa zu etablieren.⁵⁰ Ab 2025 wird Ionway die europäischen Batteriezellfabriken von PowerCo mit entscheidenden Schlüsselmaterialien versorgen. Kathodenaktivmaterialien sind nicht nur technologisch kritisch für die Batterieleistung, sondern auch der größte Kostenfaktor in der Batterieproduktion. Bis 2030 soll eine jährliche Produktionskapazität von 160 GWh erreicht werden, genug, um 2,2 Millionen batterieelektrische Fahrzeuge zu versorgen.⁵¹

Anders als bei der Kathodenaktivmaterialproduktion liegen zur Fertigung von Anodenaktivmaterial kaum Planungen und Aufbauperspektiven der deutschen und europäischen Industrie vor. In der EU existiert derzeit noch keine industrielle Produktion von Anodenaktivmaterialien für Antriebsbatterien.⁵⁴ Betrachtet man eine Übersicht über die europäischen geplanten und bereits realisierten Industrieprojekte zur Herstellung von Batteriematerialien und verarbeiteten Rohstoffen, wird die geringe Konzentration insbesondere im Bereich der Anodenaktivmaterialien deutlich.⁵⁵ Die Gründe für das Zögern bei Investitionen sind vielfältig. Neben einer energieintensiven Produktion besteht das Anodenaktivmaterial hauptsächlich aus Graphit, welches fast ausschließlich aus China bezogen wird und vermehrt Handels- und Ausfuhrbeschränkungen unterliegt. Somit bliebe bei einer europäischen Produktion eine hohe Rohstoffabhängigkeit bestehen.



Pläne für Kathodenproduktion von BASF in Finnland

Zur Versorgung europäischer Batteriezellenhersteller mit regional hergestellten Kathodenaktivmaterialien wollte der deutsche Chemiekonzern BASF 2018 eine Produktionsanlage für Batteriematerialien in Finnland errichten.⁵² Die Gesamtinvestitionen für diese Pläne sollten 400 Millionen € betragen. Aufgrund eines komplexen Genehmigungsverfahrens steht noch aus, ob BASF die Anlage in Harjavalta, Finnland erbauen kann. Allerdings wäre diese europäische Versorgungslösung potenziell abhängig von kritischen Zulieferländern. Denn die Nickel- und Kobalt-Raffinerie in Harjavalta ist im Besitz des russischen Bergbauunternehmens Norilsk Nickel (Nornickel).⁵³

Abhängigkeiten bei Maschinen, Anlagen und Ausrüstungen für die Batteriezellfertigung

China ist auch führend in der Produktion von Fertigungsanlagen und Ausrüstungen für die Batteriezellherstellung. Chinesische Anbieter können im Gegensatz zu Wettbewerbern günstige Anlagen in großem Umfang schnell liefern. Zudem können sie große Aufträge mit einem Volumen von bis zu einer Mrd. € bewältigen. Schließlich können chinesische Hersteller als bisher einzige komplette große Fertigungsstraßen für Zellfabriken anbieten. Dies ist besonders relevant, da im Moment OEM noch wenig Erfahrung mit dem Thema Batterie haben und deshalb Komplettlösungen bevorzugen.

Stimmen aus der Industrie bemängeln zudem, dass die umfangreichen spezifischen Anforderungen der OEM in den knapp bemessenen Fristen nur schwer zu erfüllen seien. Dies gelte auch für Anbieter aus China, die aber aufgrund ihrer anderen Herangehensweise und größeren Marktmacht die Aufträge trotzdem zugeteilt bekommen würden. Weiterhin trifft der deutsche Maschinen- und Anlagenbau mit den Zellfabriken auf eine ungewohnte Art von Projekt, die u. a. mehr Schleifen, Neuorientierungen und flexibleres Projektmanagement verlangt. Die Beziehung zwischen OEM und deutschen Maschinen- und Anlagenbauern, aber auch verschiedenen Maschinen- und Anlagenbauern untereinander leidet zudem unter schlechter Kommunikation, die aus der Notwendigkeit zur Zusammenarbeit mit unvertrauten Partnern erwächst. Aus den genannten Gründen wurden Zellfabriken in Europa wie z. B. von PowerCo aber auch Zellfabriken in den USA bisher größtenteils mit Anlagen aus China ausgerüstet.⁵⁶

Batteriezellen: Deutsche Importabhängigkeiten und Fertigungsaufbau

Automobil- und Zulieferindustrie investieren seit Jahren massiv in den Ausbau der Batteriezellfertigung. Um der langfristig prognostizierten Nachfrage an Elektroautos gerecht zu werden, sollen die Batteriezellen in spezialisierten „Giga-Factories“ mit sehr hohen Produktionskapazitäten gefertigt werden, die für deutsche und europäische Industriestrukturen eher unüblich sind. Allerdings sind gegenwärtig (Januar 2025) mehr als die Hälfte der geplanten Gigafabriken in Europa von Verzögerungen oder Stornierungen betroffen. Die europäische Batteriezellproduktion kämpft vor allem mit einer fehlenden Finanzierung, geopolitischer Konkurrenz durch China und attraktiveren Standortbedingungen in anderen Märkten (z. B. durch Steuererleichterungen in den USA).

Aktuell besteht beim Import fertiger Batteriezellen für die deutsche Automobilindustrie eine hohe Abhängigkeit von China.⁵⁷ Weitere Batterieimporte stammen aus Asien und Europa, wobei die europäischen Importe (10,7 Mrd. €) die asiatischen (9,4 Mrd. €) inzwischen leicht überholt haben. Außer aus China (8,5 Mrd. €) importiert Deutschland Zellen und Batterien auch aus Polen (4,7 Mrd. €), Ungarn (3,9 Mrd. €), Tschechien (1,3 Mrd. €), Südkorea (0,58 Mrd. €) und Japan (0,12 Mrd. €).⁵⁸ Die größte Produktionskapazität für Batteriezellen hat China mit etwa 77 % Marktanteil der globalen Batterieverkäufe, gefolgt von Polen und den USA mit jeweils 6 % der Produktionskapazität.⁵⁹

Im Jahr 2023 stieg der Lithium-Ionen-Batterieimport nach Deutschland auf 20,3 Milliarden Euro. Damit hat er um 47 % zugenommen.⁶⁰ Dieses Wachstum wird vor allem durch Anwendungen im Elektroauto angetrieben. Es wird geschätzt, dass der Anteil an der jährlichen weltweiten Nachfrage bis 2025 auf ca. 835 GWh (86 %) ansteigen und im Jahr 2030 min. 1.746 GWh bis max. 3.389 GWh (86 - 95 %) erreichen wird.⁶¹

An dieser Stelle gilt es, über den Fertigungsstandort hinauszuschauen. Beim massiven Ausbau der Batteriezellfertigung in Deutschland und Europa sind auch asiatische Zellenhersteller aus China (CATL), Korea (LG Chem) und Japan (Panasonic) beteiligt, wodurch indirekte Abhängigkeiten vom asiatischen Markt bestehen bleiben (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Batteriezellproduktion für Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland und Europa

Ausführendes Unternehmen	Geplantes Jahr	Ort	Maximal möglicher jährlicher Output in GWh
Deutschland			
CustomCells	20XX	Deutschland	X
Leclanché	2020	Willstätt	4,5
PowerCo	2026	Salzgitter	20
CellForce	202X	Reutlingen	20
CATL	202X	Erfurt	14
Tesla	202X	Grünheide	X
EAS	202X	Nordhausen	0,5
Northvolt*	2029	Heide	60
UniverCell	2029	Flintbek	8
Europa			
Verschiedene Unternehmen	Verschiedene Jahre	Viele europäische Länder, insbesondere Frankreich, Ungarn, Spanien, Großbritannien	Insgesamt 1.297,1 + X

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Bockey / Heimes (2024).

*Das Großprojekt von Northvolt ist angesichts der schwierigen Lage des Konzerns nicht ganz sicher. Viele der Projekte in Deutschland sind bereits reduziert worden.

3

Rahmenbedingungen und Handlungsfelder

Ein wesentlicher Teil der Resilienzstrategie europäischer Politik und Industrie ist der Auf- und Ausbau von Produktionskapazitäten für kritische Rohstoffe sowie Vor- und Endprodukte in Europa selbst. Vorhaben in diesem Kontext kollidieren mit den teilweise widrigen Rahmenbedingungen in Europa und Deutschland für die Industrie, wovon das kürzlich eingeleitete Insolvenzverfahren von Northvolt trotz vieler weiterer Einflussfaktoren erneut Zeugnis ablegt.⁶²

Bestehende Rahmenbedingungen für die industrielle Batteriewertschöpfung

Die komplexen und langwierigen Genehmigungsverfahren am Standort Deutschland sind für den möglichst schnellen Aufbau einer resilienten Batteriewertschöpfungskette ein bedeutsames Hindernis für die Industrie. Gleiches gilt für die lange Zeit, die von der Beantragung bis zur Auszahlung staatlicher Unterstützung vergehen kann. Zudem sorgen bei großen Projekten in Europa häufig Einsprüche lokaler Akteure, die langwierige Dialog- und Klärungsprozesse nach sich ziehen, für Rückzüge, Verzögerungen und Verteuerungen. Insbesondere bei Rohstoffabbau- und Verarbeitungsprojekten gilt es die gesellschaftliche Akzeptanz zu verbessern, um wirtschaftliche Investitionen und planmäßige Zeitrahmen sicherzustellen.⁶³ Zu den Herausforderungen kommt die fehlende Erfahrung von Unternehmen, Finanzierungsinstitutionen und Behörden mit Rohstoffprojekten, da diese frühen Produktions- und Verarbeitungsschritte in den vergangenen Dekaden ins Ausland ausgelagert wurden bzw. abgewandert sind. Diese mangelnde Praxiserfahrung hemmt die effiziente Entwicklung solcher Projekte, weil Wissen, Vertrauen und eingespielte Abläufe fehlen.

Die Attraktivität von Investitionen in Rohstoffprojekte wird zudem gemindert durch die stabilen oder sogar sinkenden Rohstoffpreise auf dem Weltmarkt wie z. B. bei Lithium. Und auch in späteren Verarbeitungsschritten mindern niedrige Preise für Batteriematerialien die wirtschaftliche Attraktivität von Projekten in der Rohstoffverarbeitung oder der Batteriematerialproduktion. Das große Angebot aus China spielt in diesem Zusammenhang eine bedeutende Rolle. Experten gehen davon aus, dass dies das Ergebnis jahrelanger strategischer Handels-, Industrie- und Subventionspolitik mit dem Ziel globaler Marktbeherrschung sei.⁶⁴ Auch die USA mit ihrer neuen subventionsintensiven Industriepolitik stellen im Wettbewerb der Standorte eine große Konkurrenz für den Aufbau einer Batteriewertschöpfungskette in Europa dar. Mit der Präsidentschaft von Donald Trump verschärft sich zudem das Risiko, dass sich die USA verstärkt auf eine protektionistische und transaktionale Handelspolitik ausrichten, die Europa

mehr als weiteren Rivalen, denn als engen Handelspartner wahrnimmt. Maßnahmen unter der ersten Präsidentschaft Trumps, aber auch unter seinem Vorgänger zeigten eine Tendenz zur Implementierung von Zöllen und handelspolitischen Barrieren gegenüber China. Bereits diese belasten die internationalen Wertschöpfungsketten der europäischen und deutschen Automobilindustrie. Zölle gegenüber der EU und Deutschland, wie Trump sie angekündigt hat, könnten gravierende Auswirkungen haben, vor allem in Bezug auf den Zugang zum US-amerikanischen Absatzmarkt.

Die komplexe und strenge Regulatorik in Europa stellt bereits im Status Quo eine Herausforderung für Unternehmen dar und treibt Compliance-Kosten in die Höhe. In diesem Kontext werden auf EU-Ebene einige laufende regulatorische Vorhaben als besondere Risiken für die Wettbewerbsfähigkeit der Batterieindustrie in Deutschland wahrgenommen: Zum Beispiel sollen per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) weitgehend verboten werden. Diese finden an verschiedenen Stellen in Batterien Verwendung und können vor allem als Kathoden-Bindematerial momentan nicht ohne erhebliche Einbußen in Leistungsfähigkeit und Lebensdauer substituiert werden. Ob und in welcher Form es Ausnahmen für die Batteriefertigung geben wird, ist noch unklar.⁶⁵ Ein weiteres regulatorisches Vorhaben, welches besonders die deutsche Batteriefertigung bedroht, betrifft eine Umstellung der Regeln für die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks einer Batterie. Statt des tatsächlich in der Fabrikation verwendeten Strommixes soll künftig der Strommix des Landes herangezogen werden. Dies bedeutet, dass z. B. mit Windenergie betriebene Fabriken in Norddeutschland am Strommix Deutschlands gemessen werden mit entsprechenden Folgen für die CO₂-Bepreisung.⁶⁶

Batterieprojekte der Industrie begegnen in Deutschland und Europa vergleichsweise hohen Lohnkosten gepaart mit einer knappen Verfügbarkeit an Fachkräften in den relevanten Bereichen. Es stehen relativ wenig technische Fachkräfte mit Spezialisierung in den elektrochemischen Kompetenzfeldern zur Verfügung, die für die Batterieforschung, -entwicklung und -fertigung elementar sind.⁶⁷ Die Streichung der Batterieforschungsförderung verschärft diesen Umstand indirekt weiter, da u. a. über die Forschungsarbeit hochqualifizierte Fachkräfte in diesen Bereichen entwickelt werden und danach nicht selten in die Industrie wechseln. Insbesondere für eine noch im Aufbau befindliche und forschungsintensive Industrie wie die Batteriefertigung stellt die Forschung im öffentlichen Sektor ein wichtiges Fachkräftereservoir dar.⁶⁸

Auch die hohen Energiekosten in Europa und besonders in Deutschland sind ein bedeutender Standortnachteil: In Deutschland kostet die Kilowattstunde 32,8 Eurocent, in den USA 16,95, in China 7,04 (Stand Juli 2024).⁶⁹ Die Energiekosten fallen besonders bei den energieintensiven Industrien ins Gewicht, wozu u. a. die rohstoffverarbeitende Industrie und die Batteriezellfertigung gehört. Zwar wird sich der Energieverbrauch zumindest in der Batteriezellfertigung durch technische Innovationen senken lassen,⁷⁰ doch er wird auf absehbare Zeit ein signifikanter Kostenfaktor und damit Wettbewerbsnachteil für den Standort Deutschland bleiben.

Auf der anderen Seite verfügen Europa und Deutschland auch über Wettbewerbsvorteile. Dazu gehört eine gut ausgebaute Infrastruktur, funktionierende staatliche Institutionen und Rechtssicherheit, politische Stabilität, Kundennähe, ein allgemein hohes Ausbildungsniveau und besonders in Deutschland eine hervorragende Forschungslandschaft im Bereich Batterie. Letztere ist dabei allerdings von massiven Kürzungen staatlicher Zuschüsse in Folge der Haushaltsentwicklung bedroht. Dies hätte, neben den bereits erwähnten Auswirkungen auf die Fachkräftesituation, starke und langfristige negative Auswirkungen auf den Forschungsoutput in einem hochinnovativen Zukunftsfeld mit entsprechenden Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit.⁷¹

Politische Programme und Maßnahmen zur Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Aufbau einer resilienten Batteriewertschöpfungskette in Europa und Deutschland

Die Politik arbeitet sowohl auf deutscher als auch auf EU-Ebene aktiv daran, die Rahmenbedingungen für den Aufbau einer resilienten Batterie-Wertschöpfungskette in Deutschland und Europa zu verbessern. 2018 verabschiedete die Europäische Kommission den EU Strategic Action Plan on Batteries, in welchem das Ziel formuliert wurde, die Batteriewertschöpfungskette in der EU zu stärken mit einem besonderen Augenmerk auf Nachhaltigkeit, aber auch Wettbewerbsfähigkeit und Integration von Wertschöpfungsketten.⁷² Das Temporary Crisis and Transition Framework und der Green Deal Industrial Plan sind wichtige Bausteine im Bemühen der EU, die Energiewende voranzutreiben und dazugehörig den EU Strategic Action Plan on Batteries zu implementieren. U. a. wird Mitgliedstaaten erlaubt, relevante Schlüsselindustrien, zu denen die Batterieindustrie gehört, direkt finanziell zu unterstützen.⁷³ Dies erlaubt z. B. Deutschland über Haushaltsrestriktionen und strenge Beihilferegeln hinaus ungefähr eine halbe Milliarde Euro aus dem Klima- und Transformationsfonds flexibel für batteriebezogene Projekte zur Verfügung zu stellen und strategische Projekte zu priorisieren.⁷⁴

Die Rohstoffstrategie der Bundesregierung gibt einen Überblick darüber, welche Ziele die Bundesregierung auf der Rohstoffebene verfolgt und welche Maßnahmen sie in diesem Kontext umsetzt.⁷⁵ In Deutschland existiert in Form der Garantien für Ungebundene Finanzkredite (UFK-Garantien) bereits länger ein Instrument, welches unter bestimmten Bedingungen Kredite für Rohstoffprojekte absichert. Das Instrument wurde erweitert auf Klima-Transformationsprojekte, was u. a. Batteriezellprojekte einschließt, von denen im Moment drei Unterstützung dieser Art erhalten. In diesem Kontext relevante Rohstoffprojekte erhalten ebenfalls Förderung, das Volumen belief sich Ende 2023 auf 8,7 Mrd. €. ⁷⁶

Ergänzt werden soll das Instrument durch den eine Milliarde € umfassenden Rohstofffond, welcher in Rohstoffprojekte entlang der gesamten Wertschöpfungskette investieren soll. Dies könnte nach Ansicht einiger Expertinnen und Experten eine große Hebelwirkung entfalten, indem insbesondere die risikoreiche Explorationsphase erleichtert würde. Allerdings wird auch die vergleichsweise geringe finanzielle Ausstattung kritisch gesehen, welche gemessen an den hohen Investitionen für Rohstoffprojekte nur einen geringen Beitrag leisten können wird. Zudem ist die politische Zukunft des Fonds nicht sicher.⁷⁷ Als positives Vorbild in diesem Bereich wird häufig Japan genannt. Die dortige Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC) vereinigt verschiedene staatliche Maßnahmen zur Resilienzsteigerung unter einem Dach. U. a. fördert sie in enger Zusammenarbeit mit Unternehmen Rohstoffprojekte auf verschiedenen Entwicklungsstufen, aber auch Lagerhaltung, Recycling und Substitution. Auf diesem Wege ist es Japan seit 2010 gelungen, seine Abhängigkeiten bei Seltenen Erden von China nahezu zu halbieren. Auch bei Batterierohstoffen wie Lithium ist Japan sehr aktiv um Diversifizierung bemüht.⁷⁸

Auf europäischer Ebene stellt der Aufbau einer Batteriewertschöpfungskette ein „Important Project of Common European Interest“ dar (IPCEI), in dessen Rahmen Projekte mit mehreren Milliarden Euro gefördert werden können.⁷⁹ Kritische Stimmen aus der Industrie beurteilen das Instrument als geeignet für die Anschubförderung von großvolumigen Projekten, doch bemängeln sie fehlende Anschlussförderung. Für Unternehmen, die nicht zu den finanzstärksten gehören, sind insbesondere in der Wertschöpfungskette der Batterieproduktion die Kosten für den Betrieb, vor allem die Rohstoffkosten, sowie die Skalierung prohibitiv hoch. Diese Markteintritts- und Scale-Up-Hürde wird nicht durch das IPCEI-Programm und kaum durch andere EU-Förderprogramme adressiert.

Mit dem von der EU im Mai 2024 verabschiedeten Critical Raw Materials Act (CRMA) existiert zudem ein umfangreiches Programm, welches die Rohstoffversorgung der EU resilienter gestalten soll. Dazu gehört die Erstellung und Pflege der Liste kritischer Rohstoffe sowie das Setzen von Zielvorgaben für heimische Rohstoffproduktion und -verarbeitung sowie Recycling. Große Unternehmen sind zu Stress-tests verpflichtet worden, Forschung und Innovation werden vorangetrieben, internationale Kooperation angestrebt und die Kreislaufwirtschaft unterstützt.⁸⁰ Darüber hinaus ermöglicht der CRMA strategischen Rohstoffprojekten beschleunigte Zulassungsverfahren und einen leichteren Zugang zu Finanzmitteln.⁸¹ Kritisiert wird jedoch, dass auch dieses Verfahren in der praktischen Umsetzung vor Ort von bürokratischen Hürden und langsamen Prozessen gehemmt ist. Im Gegensatz zum US-amerikanischen Inflation Reduction Act (IRA) gehen mit einer Qualifizierung zum strategischen Projekt im Rahmen des CRMA zudem nicht automatisch Fördergelder einher. Im Rahmen des CRMA sollen auch weitere Rohstoffkooperationen mit anderen Ländern abgeschlossen und vertieft werden. Im Moment hat die EU mit 14 Ländern solche Rohstoffpartnerschaften vereinbart, darunter z. B. mit der Demokratischen Republik Kongo, Hauptproduktionsland von Kobalt, und mit Chile, dem Land mit den größten Lithium-Reserven.⁸² Auch über die Rohstoffebene hinaus können staatliche Kooperationen, Memoranden, Handels- und Investitionsabkommen Unternehmen zusätzliche Möglichkeiten zur Diversifizierung ihrer Lieferketten eröffnen und so die Versorgungssicherheit der heimischen Industrie stärken.

Beispiel

Abkommen zwischen EU und Serbien vom 19.07.2024

Am 19.07.2024 unterzeichneten die EU und Serbien ein Abkommen, welches die Zusammenarbeit auf den Gebieten Rohstoffe, Batterie-Wertschöpfungskette und E-Mobilität stärken und entwickeln soll. Zu diesem Zweck sollen verschiedene Stakeholder zusammengebracht werden. Durch die Mobilisierung von Finanzmitteln und Stärkung der Zusammenarbeit sollen Projekte auf den genannten Feldern vorangetrieben werden. Auch im Bereich Forschung und Innovation sind engere Kooperationen geplant.⁸³

Der CRMA insgesamt wird vielerorts als richtungsweisende Absichtserklärung und weniger als schlagkräftiges Instrument mit entsprechenden Werkzeugen wahrgenommen. Es mangelt an konkreten begleitenden Maßnahmen und Programmen sowie an Koordination mit anderen EU-Projekten und -Regularien.⁸⁴ In Deutschland z. B. ist eine Novellierung des Bundesberggesetzes angedacht, um den einheimischen Abbau von Rohstoffen zu befördern, was notwendig ist, um die diesbezüglichen Ziele im CRMA zu erreichen. Doch in den Stellungnahmen aus der Konsultation zeigt sich erneut, wie schwierig es ist, die disparaten Ziele des Umwelt- und Landschaftsschutzes, der Sozialverträglichkeit und der Erleichterung wirtschaftlicher Tätigkeit auszutariieren.⁸⁵ Deutlich wird auch an dieser Stelle, dass die Öffentlichkeit, insbesondere von Anwohnern und Anwohnerinnen, einen bedeutenden Faktor bei der Realisierung heimischer Rohstoffprojekte darstellt.

Neben bilateralen Rohstoffpartnerschaften existiert seit 2022 auch die transnationale Minerals Security Partnership (MSP), in der neben der EU und der USA viele westlich orientierte Staaten wie u. a. Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Australien, Kanada, Japan, Südkorea aber auch Indien organisiert sind. Ziel ist die Förderung von stabilen, diversifizierten und nachhaltigen Lieferketten im Bereich kritischer Mineralien besonders in Bezug auf die Energiewende. Zu diesem Zweck werden Partnerschaften mit rohstofffördernden Ländern angestrebt.⁸⁶ Kürzlich wurde das Minerals Security Partnership Finance Network aus der Taufe gehoben, um Finanzierungsinstitutionen und Rohstoffprojekte enger zusammenzubringen.⁸⁷ Einigkeit besteht darin, dass die MSP einen Beitrag zur Resilienzsteigerung leisten kann. Wie groß er sein wird, wird von dem Willen aller beteiligten Länder abhängen, die Partnerschaft mit Leben zu füllen.⁸⁸ Speziell für den Bereich Batterie ist auch die im August 2023 in Kraft getretene neue EU-Batterieverordnung der Europäischen Kommission relevant. Diese zielt vor allem darauf, die Kreislaufwirtschaft zu unterstützen, u. a. durch das Setzen anspruchsvoller Recycling-Zielvorgaben.⁸⁹ Die Verordnung schreibt zur Erhöhung der Lieferkettentransparenz zudem ab 2027 einen digitalen Batteriepass vor, der Auskunft über eine Reihe von Informationen geben soll, u. a. zur Herkunft von Materialien und zur CO₂-Intensität der Herstellungsverfahren.⁹⁰ Solche Transparenzvorgaben sind ein zweischneidiges Schwert, weil sie zwar Transparenz schaffen können, aber natürlich auch zu Aufwand und Bürokratie auf Seiten der Unternehmen führen, was die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Europa mindert und den Aufwand für eine flexible Umgestaltung von Lieferketten erhöht.⁹¹ Auf der anderen Seite kann der Batteriepass auch positive wettbewerbliche Konsequenzen für Anbieter haben, die die Einhaltung verpflichtender ökologischer Vorgaben nachweisen können, während konkurrierende Anbieter dies nicht können.⁹²

Auf handelspolitischer Ebene hat die EU in diesem Jahr provisorische Einfuhrzölle auf elektrische Fahrzeuge erhoben, um unfairen Wettbewerbspraktiken wie den übermäßigen Subventionen chinesischer Automobilhersteller zu begegnen. Dies erleichtert europäischen Automobilherstellern, sich chinesischem Wettbewerbsdruck zu widersetzen, doch verbessert dies nicht die Lage der Batteriehersteller.⁹³

Die 2017 gegründete, von der EU kofinanzierte und von InnoEnergy gemanagte European Battery Alliance (EBA) zielt darauf, die Schaffung einer wettbewerbsfähigen, nachhaltigen und resilienten Batteriewertschöpfungskette in Europa voranzutreiben. Zu diesem Zweck wurde u. a. ein breites europäisches Netzwerk etabliert, eine Investitionsplattform geschaffen und ein projektbasiertes Industrieentwicklungsprogramm aufgesetzt.⁹⁴

Trotz der Vielzahl von Initiativen und Programmen v. a. auf EU-Ebene fehlt eine Strategie für den Aufbau einer resilienten Batteriewertschöpfungskette in Europa, die die disparaten Fäden der Regulatorik und Förderlandschaft zusammenführt und realistische Ziele mit geeigneten Maßnahmen sowie entsprechenden Mitteln und Instrumenten verknüpft. Gegenwärtig bestehen vielfältige und teilweise konkurrierende Ansätze sowie Interessen auf EU-Ebene, welche mit einer unzureichenden ressortübergreifenden Zusammenarbeit und Koordination über Generaldirektionen hinweg einhergehen. Langfristig stabile, kohärente Leitbilder und Ziele sind aus Sicht der Fach-Community notwendig, um Investitionssicherheit zu schaffen. Als Positivbeispiel wird häufig der IRA in den USA thematisiert, der gegenüber den bisherigen europäischen Bemühungen Probleme ganzheitlicher angeht, sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite, und zudem gezielt Förderung bereitstellt. Für die EU stellt der IRA zunächst eine wettbewerbliche Herausforderung dar. Doch darüber hinaus lassen sich – und dieser Prozess hat bereits begonnen – Lektionen von jenseits des Atlantiks lernen.⁹⁵

Unsicherheiten beim Aufbau einer regionalisierten Batteriewertschöpfungskette in Europa

Die Hürden beim Auf- und Ausbau einer Batteriewertschöpfungskette in Deutschland und Europa treffen nicht jeden Teil der Wertschöpfungskette gleichermaßen. Die Vielzahl an Unterstützungsmaßnahmen auf nationaler und auf EU-Ebene waren insofern erfolgreich, als dass viele Projekte der Batteriewertschöpfungskette in Deutschland und Europa beschlossen und teilweise bereits umgesetzt worden sind. Dabei allerdings lässt sich eine klare Konzentration am obersten Ende der Wertschöpfungskette beobachten. Ob die Ziele der EU, bis 2030 10 % des jährlichen Rohstoffverbrauchs aus heimischer Förderung decken zu können und 40 % der benötigten Rohstoffverarbeitung in der EU stattfinden zu lassen,⁹⁶ erreicht werden können, ist umstritten. Für viele kritische Batterierohstoffe sind in der EU keine bedeutenden Reserven bekannt. Und auch in Fällen, in denen Reserven vorhanden sind, ist die Umsetzung von Abbauprojekten nicht einfach. Ähnliches gilt für Rohstoffverarbeitungsprojekte. Die Rohstoffabhängigkeiten von China und anderen Staaten werden deshalb perspektivisch nicht völlig beseitigt werden können.⁹⁷

Die größere Chance für eine regionalisierte Wertschöpfung bietet sich für die Lithium-Ionen-Batterie in den nachgelagerten Produktionsschritten. Doch der Aufbau der Batterieproduktion in Deutschland und Europa bietet ein ambivalentes Bild. Der Eindruck einer positiven Gesamtentwicklung hat sich in diesem Jahr eingetrübt durch eine Reihe von Projekten, die abgebrochen, verschoben oder herunterkaliert worden sind. Als Gründe führen Expertinnen und Experten die hinter den Erwartungen zurückbleibende Entwicklung der E-Auto-Nachfrage, die Kürzungen der Subventionen in Deutschland, die steigenden Bau- und Energiekosten sowie Unsicherheiten über sowohl die technologische Entwicklung der Antriebsbatterie als auch die Entwicklung der politischen Rahmenbedingungen an.

4

Strategien der Automobil- und Zulieferindustrie

Die Unternehmen aus der Automobil- und Zuliefererindustrie in Deutschland verfolgen verschiedene zukunftsgerichtete Strategien, um Ihre Souveränität zu erhöhen und resiliente Batteriewertschöpfungsketten aufzubauen. Kosten und Nutzen der verfolgten Maßnahmen sind äußerst komplex, schwer messbar und abhängig von der spezifischen Situation des Unternehmens, dem Marktumfeld, staatlich gesetzten Rahmenbedingungen und globalen Entwicklungen. Einige Strategien wie z.B. die Diversifizierung von Zulieferern werden bereits heute grundsätzlich von den meisten Unternehmen verfolgt.⁹⁸

Die Automobil- und Zulieferindustrie sieht sich bei der Batterie einem Trade-Off gegenüber zwischen Nachhaltigkeit, Preis und Sicherheit. Individuelle Prioritäten der Unternehmen entscheiden mit darüber, wo Schwerpunkte gesetzt werden. Grundsätzlich ist eine Steigerung der Resilienz der großen OEMs in Deutschland und Europa mit positiven Externalitäten verbunden, weil die Resilienz eines jeden Automobilherstellers zur Resilienz seiner Zulieferer, Abnehmer und damit des gesamten Sektors bis hin zum Maschinen- und Anlagenbau beiträgt.

Lieferkettenüberwachung und Monitoring als Basisinstrument für mehr Resilienz in der Batteriewertschöpfung

Im Kontext der steigenden geo- und handelspolitischen Risiken und der komplexen Wertschöpfungsketten werden Informationen aus der Untersuchung und Überwachung der Lieferketten immer wichtiger für eine resiliente Automobil- und Zuliefererindustrie – auch als Basis, um Maßnahmen zur Risikominimierung gezielt zu entwickeln.⁹⁹ Vor allem die Digitalisierung und ein wachsendes Dienstleistungsfeld in diesen Bereich bieten Möglichkeiten, die Transparenz von Lieferketten zu erhöhen und die Informationssammlung sowie -verarbeitung zu erleichtern. Das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz macht dies teilweise verbindlich. Dies allerdings hat die Kehrseite, dass es die Diversifizierung von Lieferketten erschwert, weil der Aufwand für das Etablieren neuer Partnerschaften steigt.

Die Untersuchung und Überwachung von Lieferketten ist mit Kosten und Aufwand verbunden, die von größeren Unternehmen eher bewältigt werden können als von kleineren. BMW beispielsweise bündelt seine Bemühungen auf dem Feld mit dem BMW Group RiskHub (siehe Kasten).¹⁰⁰

In der Automobil- und Zulieferindustrie zeigt sich ein gemischtes Bild. In der Automobilindustrie wird im Bereich Batterie auf eine enge Zusammenarbeit mit internationalen Zulieferern gesetzt, um diese Lieferketten zu überwachen. Die großen OEM können über ihre starke Verhandlungsposition im Vergleich zu kleineren Unternehmen sowie ihre Bemühungen zur Rückwärtsintegration in der Wert-



BMW RiskHub

BMW etablierte 2022 einen RiskHub, um das Risikomanagement zu verbessern. Im RiskHub werden Risiken in den Lieferketten identifiziert und bewertet, damit sie in die Entscheidungsfindung u. a. beim Lieferantenmanagement einbezogen werden können. Berücksichtigung finden Aspekte wie die Anfälligkeit für Naturkatastrophen, Finanzrisiken, aber auch geopolitische und ESG-Risiken. Dabei wird nicht nur die aktuelle Situation, sondern auch die zukünftige Entwicklung in den Blick genommen, um drohenden Versorgungsengpässen frühzeitig Rechnung tragen zu können.¹⁰¹

schöpfungskette leichter und tiefgehender Informationen sammeln und Daten überwachen. Zum effektiveren Monitoring ihrer Batterielieferketten ist es für die Automobil- und Zulieferindustrie wichtig, Indikatoren zu identifizieren, die als Frühwarnsysteme dienen können. Staatliche Institutionen liefern für diesen Zweck wertvolle Informationen, so z. B. die Deutsche Rohstoffagentur im Bereich Rohstoffmonitoring. Ein wichtiges Instrument sind Stresstests, die den Blick für Verwundbarkeiten und die Praktikabilität von Notfallplänen schärfen können.¹⁰²

Zulieferermanagement, Lagerhaltung und Diversifizierung im Bereich Batterie

Bei einer momentan in weiten Teilen außereuropäischen und chinesischen Wertschöpfung bei der Lithium-Ionen-Batterie nimmt das Zulieferermanagement eine zentrale Rolle für die Automobil- und Batterieindustrie ein – auch als Instrument zur Resilienzsteigerung. Die gestiegene Bedeutung lässt sich in den Geschäftsberichten der großen Akteure wie z. B. bei BASF nachlesen.¹⁰³ Es werden zum Teil langfristige Lieferverträge geschlossen. Die großen OEM bedienen sich dieser für die Versorgung mit Batteriezellen und wichtigen Batterierohstoffen. Umicore z. B. setzt bei Lithium auf eine langfristig bindende Zusammenarbeit mit dem chinesischen Rohstoffunternehmen Ganfeng sowie für einen kleinen Teil mit dem deutschen Rohstoffhersteller Vulcan, welcher deutsches Lithium fördert und in Batteriequalität verarbeitet.¹⁰⁴ VW nutzt u. a. langfristige Lieferverträge für Lithium, Kobalt und Nickel¹⁰⁵ und auch BASF bedient sich solcher Verträge mit teils dynamischen Preisen für z. B. Strom.¹⁰⁶

Langfristige Lieferverträge sind laut Expertinnen und Experten in vielen Bereichen Standard und werden teilweise vom Bund durch Bürgschaften unterstützt.¹⁰⁷ Sie erhöhen die Bindung von Zulieferern und Absicherung von Lieferkonditionen. Allerdings tragen sie nur in begrenztem Maße zur Resilienz bei, da ein Ausfall eines Zulieferers zum Beispiel durch Sanktionen damit nicht kompensiert werden kann, auch wenn grundsätzlich eine höhere Rechtssicherheit besteht.

Als Lehre vergangener Lieferkettenengpässe oder -abbrüche zum Beispiel durch die COVID-19-Pandemie hat die Industrie zum Teil eine stärkere Lagerhaltung etabliert, um temporäre Versorgungsengpässe abzufedern. Verschiedene Rohstoffe und Vorprodukte für die Batterie sind dabei z. B. aufgrund chemischer oder physikalischer Eigenschaften, Temperaturtoleranzen, Aufwand und Kosten unterschiedlich geeignet für die Lagerhaltung. Rohstoffe, die in großen Mengen verarbeitet werden wie z. B. Lithium, sind aufgrund des Kostenprofils eher ungeeignet für eine strategische Lagerhaltung. In jedem Fall bindet die Lagerung Kapital und ist steuerbilanziell nachteilig. Dies macht sie aus unternehmerischer Sicht gerade für kleinere und mittlere Unternehmen unattraktiv. Längerfristigen Unterbrechungen der Versorgung kann darüber hinaus durch Lagerhaltung nicht begegnet werden, wenn keine alternativen Lieferanten aufgetan werden können.

Zur Risikominimierung rückt daher auch zunehmend die Diversifizierung der Zulieferer für die Batteriewertschöpfungskette in den Fokus und wird von vielen Unternehmen der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie bereits praktiziert.¹⁰⁸ VW beispielsweise setzt auf diversifizierte Lieferketten, Lokalisierung des Zuliefererportfolios und eine Zwei-Lieferantenstrategie, welche sicherstellen soll, dass der Ausfall eines Lieferanten kurzfristig kompensiert werden kann.¹⁰⁹ Diese Strategie schafft mehr Sicherheit, ist jedoch mit höheren Kosten verbunden, da das Zulieferermanagement für die Industrie aufwendiger wird und vor allem für KMU mit höheren Stückkosten zu rechnen ist.¹¹⁰ Im Hinblick auf die Diversifizierung der Batteriezulieferer ist dies umso problematischer, da einige Unternehmen aufgrund ihrer großen Marktanteile, hohen Kapazitäten und niedrigen Preise nur wenig Wettbewerb und Alternativen in großem Maßstab haben aufkeimen lassen. Dies gilt nicht nur für Batterien, Vorprodukte und Rohstoffe, sondern auch für den Maschinen- und Anlagenbau zur Ausrüstung deutscher und europäischer Batteriezellfabriken.

Manche OEM kaufen bestimmte Rohstoffe ein, um diese an ihre Zulieferer weiterzugeben. BMW z. B. kauft seit einigen Jahren Lithium und Kobalt direkt bei der Mine für seine Batterie-zelllieferanten ein.¹¹¹ Dies kann aufgrund der besseren Verhandlungsposition ökonomisch attraktiv sein und verspricht

zudem ein größeres Maß an Kontrolle. Zusätzlich generiert es auch Resilienzgewinne. Die Lieferkette wird transparenter, die Lieferbeziehungen stabiler und eine Diversifizierung leichter. Die Strategie, die Rohstoffbeschaffung der eigenen Lieferanten teilweise in die eigene Hand zu nehmen, ist zunächst großen Unternehmen vorbehalten. Einkaufsgemeinschaften kleinerer Unternehmen könnten ggf. ähnliche Effekte erzielen.

Aufbau oder Verlagerung von Produktionsstätten und Rückwärtsintegration in die Batteriewertschöpfungskette

Um die Souveränität in der Batteriewertschöpfungskette zu steigern, ist die Automobil- und Zulieferindustrie zunehmend in neue und bestehende Projekte eingestiegen. Dabei konzentrierte sie sich auf das obere Ende der Wertschöpfungskette, insbesondere die Zellproduktion. Rohstoffabbau und -verarbeitung sowie die Herstellung der verschiedenen Zwischenprodukte spielen im Vergleich eine untergeordnete Rolle. Die Integration rückwärts in der Wertschöpfungskette dient einerseits der Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und Marktmacht, andererseits stärkt sie die Resilienz der deutschen Automobil- und Zuliefererindustrie.¹¹² Einige deutsche Automobilkonzerne verfolgen eigenen Angaben zufolge langfristig das Ziel, regionale Wertschöpfungsketten aufzubauen, also in Asien für Asien zu produzieren, in Europa für Europa usw., um die eigene Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit zu stärken.¹¹³

Rückwärtsintegration insbesondere im Bereich der Batteriefertigung erfordert hohe Investitionen, ist aufwendig und mit hohen Risiken verbunden, weshalb sie in Europa hauptsächlich den großen Automobilherstellern und Produzenten vorbehalten bleibt. BASF setzt explizit auf eine Strategie der Vorwärts- und Rückwärtsintegration, um die eigene Resilienz zu erhöhen.¹¹⁴ VW hat mit seinem Tochterunternehmen PowerCo und seiner Beteiligung an Northvolt – beides sind Batteriezellhersteller – den wohl größten Schritt in diese Richtung getan, auch wenn die zwischenzeitliche Insolvenz das Engagement bei Northvolt infrage stellt.¹¹⁵ Auch BMW hält Anteile an dem schwedischen Batteriezellhersteller.¹¹⁶ Mercedes hingegen setzt auf Partnerschaften mit Farasis, CATL, ACC und Envision AESC für die Produktion von Batteriezellen.¹¹⁷ Zwar sind die großen OEMs in unterschiedlichen Kooperationsformen wie z.B. durch Joint Ventures oder Unternehmensbeteiligungen allesamt in verschiedene Batteriezellfertigungsprojekte involviert, jedoch kaum in den Rohstoffabbau und die Verarbeitung. In diesen Stufen wird weniger in Projekte investiert, da sie für die deutsche Automobil- und Zulieferindustrie vergleichsweise branchenfremd sind, und die fehlende Erfahrung in diesem Bereich eine sehr große Herausforderung darstellt. Darüber hinaus sind z.B. Bergbauprojekte mit hohen wirtschaftlichen Risiken und Unsicherheiten verbunden, wobei die Projekte in den verschiedensten Abbauländern ohnehin häufig durch Direktinvestitionen chinesischer Unternehmen vor Ort dominiert werden und Markteintritte in diesem Bereich weiter erschweren.

Ein Problem, das zu Unsicherheiten bei Investitionen auf dem europäischen Markt führt und den Produktionsaufbau vor allem auf der Ebene der Zwischenprodukte für die Batterie betrifft, sind die dynamischen technischen Entwicklungen und fehlende einheitliche Standards. Diese erfordern eine hohe Agilität der Unternehmen und verzögern neben anderen Unsicherheiten den Aufbau von Produktionsstätten.¹¹⁸

Forschung und Entwicklung zu alternativen Batterietechnologien, technologische Rohstoffeffizienz und -substitution

Je weniger Primärrohstoffe und Vorprodukte benötigt werden zur Herstellung der Antriebsbatterie, desto weniger exponiert ist die deutsche Automobil- und Zulieferindustrie gegenüber dem Risiko einer Verknappung oder Verteuerung der Primärrohstoffe und Vorprodukte. Der Weg zu einer solchen Verringerung des Bedarfs führt über technologischen Fortschritt und die Weiter- und Neuentwicklung von Antriebsbatterien und Komponenten. Im Bereich der Batterieforschung weist dieser Fortschritt eine enorm hohe Dynamik auf.¹¹⁹

Die Lithium-Ionen-Batterie unterliegt einer kontinuierlichen Weiterentwicklung durch die Industrie und Forschung, welche das Produkt entlang verschiedener Achsen verbessert: höhere Energiedichte, größere Ladung, längere Laufzeit und eben auch höhere Ressourceneffizienz und damit verbundene Resilienzgewinne.¹²⁰ Bei der Forschung und Entwicklung muss die deutsche Industrie Abwägungen zwischen Technologievorteilen, Wirtschaftlichkeit und Resilienz treffen. Beispielhaft kann man Lithium-Ionen-Batterietechnologien nennen, bei denen vereinfacht der Bedarf an besonders kritischem und teurem Kobalt (und Mangan) reduziert werden konnte, um dies mit einer Steigerung des Bedarfs an Lithium und Nickel zu kompensieren.¹²¹

Über Investitionen in Forschung und Entwicklung kann die Industrie an vielen Stellen der Batteriewertschöpfung vielversprechende Impulse setzen. Ob über F&E ein Resilienzgewinn erzielt werden kann, hängt davon ab, welchen konkreten Lösungsbeitrag diese formulieren kann. Dies kann sich z. B. auf die verwendeten Rohstoffe (natürliches oder synthetisches Graphit) oder auf die Materialauswahl für Kathodenaktivmaterial beziehen.¹²² Lithiumeisenphosphat bietet beispielsweise gegenüber anderen Kathodenaktivmaterialien einen Preisvorteil, der mit etwas geringerer Leistung erkaufte wird. Der große Preisdruck und die rasche Weiterentwicklung des Modells hinsichtlich Energiedichte und Leistung lässt diese Art der Batterie auch hierzulande attraktiver erscheinen, was dazu führt, dass einige Hersteller ihre bisher mit anderem Kathodenaktivmaterial geplanten Batteriezellprojekte neu bewerten und aufschieben.¹²³ In der Anode natürliches Graphit (teilweise) durch synthetisches Graphit zu ersetzen, verspricht nicht nur einen Leistungsgewinn, sondern auch eine Reduzierung der extremen Abhängigkeit, die in dieser Hinsicht von China besteht. Hindernisse stellen die hohe Energieintensität der Erzeugung von synthetischem Graphit dar und dessen problematische CO₂-Bilanz. Forschung wird betrieben, teilweise unterstützt im Rahmen des IPCEI der EU, um diese Probleme anzugehen.¹²⁴ Momentan bestehen auch beim synthetischen Graphit große Abhängigkeiten von China, die angesichts des zu erwartenden Nachfrageüberhangs für geraume Zeit bestehen bleiben dürften.¹²⁵

Neben Weiterentwicklungen innerhalb der Lithium-Ionen-Batterie stehen auch fundamentale Änderung der Batterietechnologie im Raum, z. B. Feststoffbatteriezellen. Diese können auf unterschiedlichen Batterie-Typen basieren, u. a. auf der Lithium-Ionen-Technologie. Die Feststoffzelle verspricht eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen Batterien: höhere Energiedichte und Ladefähigkeit, mehr Sicherheit und Reichweite sowie höhere Ressourceneffizienz.¹²⁶ VW in Zusammenarbeit mit Quantumscape (USA), Mercedes mit ProLogium (Taiwan) und BMW Solid Power (USA) haben Milliardeninvestitionen getätigt, sodass erste Prototyp-Fahrzeuge der deutschen Autohersteller in den nächsten Jahren erwartet werden.¹²⁷ Auch Experten sind optimistisch bezüglich Feststoffzellen. Der Bedarf an kritischen Rohstoffen und Vorprodukten wird sich dadurch jedoch nur in Maßen verschieben.

Aus Resilienzperspektive sind für deutsche und europäische Hersteller Batterietypen vielversprechend, die auf Natrium basieren, wie die Natrium-Schwefel-Batterie oder die Natrium-Ionen Batterie, welche ohne Lithium, Kupfer, Kobalt und Nickel auskommen können.¹²⁸ Beide haben gegenüber einer herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterie einige Schwächen hinsichtlich ihres Gewichts, Volumens, ihrer Betriebstemperatur sowie ihrer Energiedichte und einer damit verbundenen geringeren Reichweite im E-Auto. Dem gegenüber steht allerdings ein deutlicher Preis- und Resilienzvorteil, weil ihr Hauptbestandteil Natrium sehr günstig und allgemein verfügbar ist.¹²⁹ Ohne verlässliche Zeitangaben machen zu können, wird eine mehr oder weniger effektive Mitigation der technologischen Nachteile durch Forschung und Entwicklung erwartet.¹³⁰ Doch auch hier scheint China schneller voranzukommen: Dort werden bereits unter maßgeblicher Mitwirkung von VW E-Autos mit Natrium-Ionen-Batterien gebaut und auf dem chinesischen Markt vertrieben. Der chinesische Vorsprung auf dem Gebiet ist u. a. darauf zurückzuführen, dass dort von staatlicher Seite die Entwicklung von Batterietechnologie allgemein und der Natrium-Ionen-Batterie besonders forciert wird. Hinzu kommt, dass die Nachfrage nach preisgünstigeren Autos mit geringerer Reichweite in China höher ist. Zuletzt verspricht die neue Technologie auch China größere Resilienz.¹³¹

Die alternativen Batterietechnologien bieten der Industrie eine Gelegenheit, über resilientere, günstigere oder technologische Vorteile an Wettbewerbsfähigkeit und Souveränität gegenüber der von chinesischer Wertschöpfung dominierten Lithium-Ionen-Batterie zu gewinnen.¹³² Doch selbst wenn die alternativen Technologien es zur Wettbewerbsfähigkeit und Serienproduktion in großem Maßstab bringen, ist davon auszugehen, dass die Abhängigkeit von der Lithium-Ionen-Batterie nur langsam verringert werden kann.¹³³

Recycling von Batterierohstoffen in Deutschland und Europa

Das Recycling von Batteriezellen kann eine bedeutende Rolle in der Zukunft einnehmen. Politisch hat die europäische Batterieverordnung von 2023 eine Reihe ambitionierter Ziele für das Recyceln von Batterien festgesetzt und auch industriell wird das Thema seit Jahren vorangetrieben. Bis 2031 soll gemäß der Verordnung beispielsweise 80 % des Lithiums und 95 % des Kobalts und Kupfers in Batterien recycelt werden.¹³⁴

Das Recycling von Batterien findet in kleinerem Umfang bereits in Deutschland und Europa statt und wird über zahlreiche Projekte in Verbindung mit der Automobil- und Zulieferindustrie entwickelt, wobei Deutschland eine führende Rolle einnimmt (siehe Tabelle 2).¹³⁵ Recycling im Bereich Batterie birgt gewaltiges Potenzial, weil sich die Mengen der jährlich verwendeten und der theoretisch recycelbaren Rohstoffe im Gigatonnenbereich bewegen werden. Hochrechnungen zufolge werden 2035 z. B. 21.000 t Lithium für Neuzulassungen benötigt und 4.900 t Lithium aus Abmeldungen zur Verfügung stehen.¹³⁶ Einen größeren Beitrag zur Verringerung des Bedarfs an Primärrohstoffen wird Recycling allerdings frühestens im nächsten Jahrzehnt spielen können, weil erst dann allmählich größere Mengen an Batterien das Ende ihres Lebenszyklus erreichen werden. Auch dann wird, wie aus den genannten Zahlen ersichtlich, nicht der Großteil des Bedarfs für die Batteriezellen der Elektroautos aus Recycling gedeckt werden können.¹³⁷

Tabelle 2: Recyclingprojekte für Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland und Europa

Ausführendes Unternehmen	Ort	Kapazität in t / Jahr	Geplante Kapazität in t / Jahr (Geplantes Jahr)
Deutschland			
Accurec	Krefeld	4000	
Kyburz	Chemnitz	200	2000 (2025)
Aurubis	Hamburg	X	
BASF	Schwarzheide	0	
Duesenfeld	Wendeburg	3000	
Ecobat	Hettstedt	20.000	
Erlos	Zwickau	3500	
Mercedes	Kuppenheim	2500	
SungEel HiTech	Gera-Cetzschwitz	0	
Redwood Materials	Bremerhaven	10.000	
Roth	Wernberg-Köblitz	9.000	
Cylib	Aachen	120	7.500 (2026)
tozero	München	0	90.000 (2027)
Li-Cycle	Magdeburg	10.000	30.000 (20XX)
Walch	Baudenbach	X	
Primobius	Hilchenbach	20.000	
northvolt	Heide	0	X (20XX)
Nickelhütte Aue	Aue	7.000	10.000 (20XX)
fortum	Kirchartd	3.000	
Re.Lion.Bat	Meppen	20.000	
PureBattery	Hagen	2.500	15.000 (20XX)
Europa			
Verschiedene Unternehmen	Viele europäische Länder, insbesondere Schweden, Belgien, Norwegen	126.880 + X	459.200 + X

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Soldan / Heimes (2024).

Maßnahmen zur Verringerung des Preisrisikos

Die bisher thematisierten Strategien zur Erhöhung der Versorgungssicherheit verringern auch das von Schwankungen ausgehende Preisrisiko. Darüber hinaus existieren einige dezidierte Maßnahmen, die durch rechtliche und finanzielle Instrumente das genannte Risiko mindern. Dabei geht es vor allem um die Ausgestaltung von Verträgen sowohl mit Zulieferern als auch mit Kunden und um das Sicherungsgeschäft, das sogenannte Hedging, gegen die Verteuerung von Rohstoffen. Die genannten Strategien können für individuelle Unternehmen Sinn ergeben, um ihre Exponiertheit gegenüber den Schwankungen von Rohstoffpreisen zu vermindern. Sie stellen jedoch kein probates Mittel dar, sich gegenüber dauerhaften Verschiebungen in der Verfügbarkeit und den Preisen von Rohstoffen und Vorprodukten abzusichern.¹³⁸

5

Handlungsempfehlungen zur Stärkung der Batteriefertigung in Deutschland und Europa

Auf allen Ebenen der Batteriewertschöpfungskette existieren kritische und umfangreiche Abhängigkeiten von China. Die vorliegende Analyse hat verdeutlicht, dass der Aufbau von Batteriezellfabriken in großem Maßstab keine Resilienz und Widerstandsfähigkeit bei der Antriebsbatterie für deutsche Elektroautos bedeutet. Auch zeigt sich, dass die Steigerung der Souveränität der deutschen Industrie bei der Batteriewertschöpfung keine nationale Aufgabe ist, sondern die Bündelung europäischer Lösungen und Kräfte erfordert.

Eine Steigerung der Resilienz erfordert Trade-Offs mit anderen Zielen wie der Wirtschaftlichkeit, trägt aber dazu bei, die Wirtschaft weniger anfällig für Disruptionen zu machen. Im Folgenden werden Maßnahmen für die deutsche Industrie und Politik vorgestellt, um Abhängigkeiten auf den verschiedenen Wertschöpfungsstufen der Batterie zu verringern.

Rohstoffversorgung und -produktion für die Batterie – Vielgleisige Strategien abgestimmt auf spezifische Rohstoffe

Lithiumversorgung und -produktion

Europäische Lithiumquellen erschließen und Versorgungsverträge mit aufkeimenden lokalen Rohstoffproduzenten abschließen.

OEMs und Batterie(material)hersteller sollten verstärkt auf direkte Lieferverträge und vertikale Integration setzen.

Ausbau von Raffineriekapazitäten zur Lithiumverarbeitung in Deutschland.

Zugang zu Fördermitteln durch bedarfsgerechte Programme und effiziente Vergabeprozesse verbessern.

Optimierung der behördlichen Prozesse und Strukturen zur Reduzierung administrativer Hürden und Verzögerungen bei Rohstoffprojekten.

Erhalt und Optimierung der Recyclingkapazitäten durch Investitionen zur Steigerung des Lithiumanteils aus recyceltem Material.

Steigende Lithiumbedarfe für die deutsche Batteriezellfertigung sollten neben dem weiteren Ausbau der Lieferbeziehungen zu sicheren Versorgungsländern wie Australien, Kanada und Chile zu größtmöglichen Teilen durch die Erschließung europäischer Förderquellen und die Zusammenarbeit mit europäischen Abbauprojekten gedeckt werden. In diesem Zusammenhang sollten die durch den CRMA angestoßenen Bemühungen intensiviert und zügig umgesetzt werden. Hierzu gehört die schnellere Implementierung der Prozesse für direkte Gelder und Kredite sowie eine Reduzierung der Komplexität der Verfahren. In Deutschland umfasst dies die geplante Novellierung des Bundesbergrechts. Vorläufige Zulassungen mit nachgelagerter Prüfung könnten eine Option darstellen, um den Zugang zu Fördermitteln zu verbessern und auszubauen sowie die Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zum IRA zu gewährleisten. Hierfür bieten sich auch Rohstofffonds an, bei denen über staatliche Beteiligungen Einfluss auf die Investitionen und Eigentümerstrukturen genommen werden kann. So könnte man sich beispielsweise vor problematischen ausländischen Investitionen schützen.

Langfristige Lieferverträge mit deutschen und europäischen Lithiumproduzenten sollten geschlossen werden, um heimische Lieferketten für kritische Rohstoffe zu stärken. Die Lieferantenstrategien der großen Abnehmer sollten darauf abzielen, einen größer werdenden Anteil der Lithiumbeschaffung in langfristigen Verträgen mit europäischen Zulieferern zu binden. Dies würde das Wachstum der heimischen Abbaubranche für kritische Rohstoffe fördern und so zur Resilienz der heimischen Industrie beitragen.

Als Hürde zeigt sich, dass die Finanzierung von Rohstoffprojekten in Deutschland, u. a. aufgrund der dichten Besiedlung und hohen Nachhaltigkeitsanforderungen, häufig teurer ist als anderswo, was diese Projekte weniger attraktiv macht. Da Investoren deshalb weniger Erfahrung mit solchen Vorhaben in Deutschland haben, gestaltet sich die Kapitalbeschaffung schwieriger. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, müssen sowohl im öffentlichen als auch im privaten Sektor gezielte Lernprozesse angestoßen werden. Die Expertise im europäischen Bergbau sollte wieder aufgebaut werden, und zugleich ist es notwendig, die Kompetenz der Behörden zu stärken, um die relevanten Prozesse und Strukturen effizienter zu gestalten und anzupassen. Dies könnte die Attraktivität, in europäische Rohstoffprojekte zu investieren, deutlich steigern. Darüber hinaus sollten OEM und künftige Batteriezellfertiger in Deutschland auch international verstärkt direkte Lieferverträge mit Abbauprojekten nutzen, um zur Rohstoffsicherung der europäischen Industrie beizutragen. Durch die direkte Beschaffung der Rohstoffe können große Unternehmen der Batteriewertschöpfung und OEMs nicht nur die Kontrolle über die Auswahl der Rohstoffförderquellen gewinnen, sondern auch die Abnahme durch europäische Verarbeiter und Materialhersteller fördern. Die Rohstoffversorgung sollte zudem durch gezielte Investitionen in die vertikale Integration deutscher OEMs und Batteriezellhersteller entlang der Wertschöpfungskette gestärkt werden. Ein erfolgreiches Beispiel hierfür ist die Partnerschaft zwischen Umicore und Volkswagen, die darauf abzielt, die Lithiumversorgung für die Batterieproduktion langfristig abzusichern.

Nicht zuletzt sind auch der Erhalt und der kontinuierliche Ausbau der Recyclingkapazitäten von entscheidender Bedeutung für die Sicherstellung von Lithium.

Graphitversorgung und -produktion

FuE für innovative und effiziente Verarbeitungs- und Herstellungsverfahren für (synthetisches) Graphit strategisch vorantreiben.

Natürliches Graphit wird momentan fast ausschließlich aus China bezogen. Die daraus resultierende Abhängigkeit lässt sich durch einen verstärkten heimischen Abbau mildern, aber nicht lösen. Aufgrund seiner strategischen Bedeutung für die Batterieanode und zunehmender Handelsbeschränkungen durch China sollte die deutsche Rohstoff- und Verarbeitungsindustrie daher innovative Verfahren für den sauberen Abbau und die Aufreinigung von Graphit sowie neue Fertigungstechnologien, -kompetenzen und -kapazitäten bei synthetischem Graphit fokussieren. Dies erfordert verstärkt Investitionen in die strategische Forschung und Entwicklung, zum Beispiel in die Erforschung und Erprobung der Carbon Capture and Utilization (CCU) Technologie. Diese könnte perspektivisch eine nachhaltige Herstellung von Kohlenstoffmaterial für Batterien ermöglichen, befindet sich allerdings noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Die erste Graphitfabrik Europas in Lulea, Schweden, zeigt, dass mit milden Aufreinigungsverfahren und Wasserstrom europäische Graphitvorkommen nachhaltig verwertet werden können, sodass dort potenziell Batterien für etwa eine Million E-Autos produziert werden könnten.

Der Graphitbezug sollte diversifiziert werden. Durch Investitionen in neu entstehende Bergbauprojekte in Kanada und Australien ließe sich dies über sehr verlässliche Partner bewerkstelligen. Auch in Ostafrika und Kasachstan ergeben sich trotz höherer Risiken Chancen, nachhaltige Graphitzulieferer aufzubauen. Über europäische Eigenproduktion, beispielsweise aus Skandinavien oder Grönland ließe sich zusätzlich ein Teil des europäischen Bedarfs decken.

Kobaltversorgung

Erforschung neuer Wege der Kobaltexploration.

Bezugsländer diversifizieren und bilaterale Beziehungen stärken durch gezielte Partnerschaften mit rohstoffreichen Ländern und Förderprojekten.

Umfassende Rohstoffstrategie entwickeln, die Metalle wie Nickel, Kupfer und Kobalt gemeinsam berücksichtigt und neben der Nachhaltigkeit auch Resilienz Aspekte fokussiert.

Anreize zur Rückwärtsintegration setzen, um deutsche und europäische Unternehmen zur Entwicklung eigener Verarbeitungs- und Lieferketten zu ermutigen.

Für Kobalt, von dem ein erheblicher Teil aus der DR Kongo stammt, sollten weitere Rohstoffquellen gefunden und erschlossen werden. Eine Diversifizierung der Kobaltversorgung ist möglich, allerdings variieren die Förderkosten erheblich je nach Bezugsregion. So existierten zwar Förderprojekte in Neukaledonien und Australien, doch mussten sie eingestellt werden, da sie nicht mehr kostendeckend arbeiten konnten. Es sollte eine ganzheitliche und ESG-konforme Rohstoffstrategie entwickelt werden, die Metalle wie Nickel, Kupfer und Kobalt gemeinsam berücksichtigt, insbesondere da die derzeitigen Kupferminen bald erschöpft sein werden. Zudem ist es entscheidend, bilaterale Beziehungen mit den rohstoffreichen Ländern zu pflegen und Unternehmen zur Rückwärtsintegration zu ermutigen. Ein Beispiel dafür ist die chinesische 30-Milliarden-Dollar-Investition in die Lieferkette für indonesisches Nickel nach dem Exportverbot für Nickelerz, um die heimische Verarbeitungsindustrie zu stärken.

Rohstoffverarbeitung – Suchen und Aufbauen von Alternativen

Aufbau von Verarbeitungskapazitäten in Deutschland und Europa fördern durch finanzielle Anreize und Verbesserung regulatorischer Rahmenbedingungen.

Bezugsquellen in alternativen Bezugsländern identifizieren und erschließen.

Partnerschaften und Investitionsbeziehungen mit rohstoffreichen und rohstoffverarbeitenden Ländern auf- und ausbauen.

Der CRMA adressiert bereits Risiken, die sich aus dem Import verarbeiteter Metalle und Rohstoffe ergeben, indem der Ausbau der Weiterverarbeitungskapazitäten in der EU zum Ziel erhoben und gefördert wird. Die Diversifizierung von Importen bei weiterverarbeiteten Rohstoffen, die Ansiedlung von Schmelzhütten und Raffinerien in Europa und der Ausbau von Recycling, die damit einhergehen, sollten auch von der Industrie weiterverfolgt werden. Gleichzeitig ist eine bedarfsdeckende Rohstoffverarbeitung in Deutschland unrealistisch. Daher sollte das Ziel sein, eine eigene Teilversorgung aufzubauen, die Resilienz gegenüber kurzzeitigen Verknappungen bietet sowie kritisches Knowhow sichert.

Bei der Diversifizierung von Zulieferern sollte darauf geachtet werden, dass Ausfallrisiken nicht korrelieren (s. o. in Rohstoffabbauenebene). Der Versuch einer völligen Neugestaltung der Lieferketten erscheint für Deutschland in Anbetracht der Dominanz Chinas zumindest kurzfristig unrealistisch.

Beim Aufbau der Rohstoffverarbeitungskapazitäten sollten sich die Aktivitäten Deutschlands und der EU nicht nur auf den europäischen Raum richten, sondern rohstoffreiche Länder beim Aufbau lokaler Weiterverarbeitungskapazitäten unterstützen. Im Kongo beispielsweise dominiert China nicht nur den Export von Kobalt, sondern auch die Höhe der Direktinvestitionen im Land. Beim Ausbau der Handels- und Investitionsbeziehungen sollte rohstoffreiche Partnerländern ein hoher Stellenwert beigemessen werden, zu nennen sind hier neben dem Kongo z. B. auch Südafrika und Chile. Transnationale Organisationen wie die MSP können und sollten zu diesem Zweck genutzt und gefördert werden.

Zwischenprodukte, insb. Materialproduktion – Produktion, Forschung, Partnerschaften für mehr Resilienz

Aufbau von Produktionskapazitäten in Deutschland und Europa fördern durch Beschleunigung und Vereinfachung von Genehmigungsverfahren und anderen Prozessen, durch die Reduzierung regulatorischer Hürden und durch direkte finanzielle Förderung.

Forschung und Entwicklung zum Anodenaktivmaterial, insbesondere zur Verringerung und Substitution des darin enthaltenen Graphits durch langfristige Förderung stärken.

Mittelfristig Bezugsländer diversifizieren durch langfristige Kooperationen.

Der Aufbau europäischer und teilweise deutscher Produktionskapazitäten und Kompetenzen für Zwischenprodukte insbesondere für Anodenaktivmaterial ist essenziell für eine resiliente Batteriewertschöpfungskette in Europa. Um die Anreize wirksam zu erhöhen und den Aufbau zu beschleunigen, sollten die Standortbedingungen verbessert werden, hierzu gehört z.B. eine Beschleunigung von Genehmigungsverfahren. Auch die direkte Förderung von Investitionen in den Aufbau der Kathoden- und Anodenaktivmaterialfertigung kann Markteintritte ermöglichen.

Parallel kann die Förderung von Forschung und Entwicklung Innovationen und Disruptionen beim Anodenaktivmaterial beflügeln: Zum Beispiel durch die Forschung an Lithium-Metall-Anoden, die ohne Graphit auskommen, oder am Einsatz von synthetischem Graphit.

Es ist auch im Interesse der Batteriezellhersteller, dass in Europa zumindest eine kleine Industrie für die relevanten Zwischenmaterialien existiert, um die Handlungsfähigkeit bei Lieferkettenproblemen zu erhöhen. Unternehmen aus der Automobilindustrie und Batteriezellhersteller können dies durch Rückwärtsintegration (wie z. B. PowerCo, Umicore mit Ionway) erreichen oder durch den Aufbau und die Förderung von Partnerschaften in Europa. Investitionen, Beteiligung und Engagement der OEMs in die Vertikale der neuen Wertschöpfungskette können dabei eine starke Hebelwirkung entfalten.

Zum Ausbau von Kompetenzen beim Anodenaktivmaterial empfehlen wir die Bildung strategischer Partnerschaften, wie z.B. mit dem indischen Batteriematerialhersteller Epsilon und dem auf Graphittechnologien spezialisierten finnischen Unternehmen Grafintec Oy. Diese haben gemeinsam das einzige groß angelegte Fertigungsprojekt für Anoden in Europa für 2025 angekündigt.

Speziell im Bereich der Anode ist es weder wahrscheinlich, dass hiesige Produktionskapazitäten bedarfsdeckend aufgebaut werden können, noch wäre es aus wirtschaftlicher Perspektive wünschenswert. Aktuell existieren speziell im Bereich der Anode geringe Produktionskapazitäten außerhalb von China. Mittelfristig sollte man die Strategie des Produktionsaufbaus durch eine Diversifizierung der Bezugsländer ergänzen und frühzeitig Kooperationen mit Regionen und Ländern aufbauen, wo solche Produktionskapazitäten entstehen. Dies nimmt sowohl Unternehmen als auch die Politik in die Pflicht.

Maschinen- & Anlagenbau – Erfolg durch Kooperation und Weiterentwicklung

Die Attraktivität des Produkts deutscher Anbieter steigern durch kosteneffiziente Lösungen und Zusammenarbeit.

Deutschen Anbietern muss durch Verbesserung der Zusammenarbeit Eintritt in den Markt gelingen.

Die bisherige Abhängigkeit im Maschinen- und Anlagenbau für Zellfabriken können überwunden werden, wenn die genannten zwei Bedingungen erfüllt werden. Um erstens ein attraktives Produkt zu entwickeln, kann durch Zusammenschlüsse und gemeinsame Projekte die Fähigkeit erworben werden, umfangreichere Aufträge zu bewältigen und gewünschte Komplettlösungen anzubieten. Darüber hinaus muss austariert werden, wo die Stärken des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus, passgenaue Speziallösungen hoher Komplexität, ausgespielt werden können und wo man sich besser an der Konkurrenz aus Asien hinsichtlich Massentauglichkeit und Preisfokussierung orientiert.

Zweitens sollten deutsche und europäische Anbieter die Gelegenheit bekommen, sich auf dem Markt zu platzieren, auch um Referenzen, Kontakte und Erfahrung zu sammeln. Den verschiedenen Problemen kann zum Teil von Seiten der Maschinen- und Anlagenbauer begegnet werden durch eine Umorientierung ihres Projektmanagements in Richtung iterativer flexibler Durchführung. Für Betreiber von Zellfabriken kann es aus einer langfristigen Perspektive Sinn ergeben, deutschen und europäischen Anbietern, eine Chance zu geben, weil sie so ihre eigenen Abhängigkeiten verringern und hierzulande verlässliche und hochqualitative Partner aufbauen können. In diesem Zusammenhang muss auch die Kommunikation zwischen Auftraggebern und -nehmern, aber auch Kooperationspartnern verbessert werden, um klar vermitteln zu können, welche präzisen Anforderungen existieren. Dies muss einhergehen mit dem Aufbau von Wissen über die Abläufe des Gegenübers, seine Limitationen und Möglichkeiten. Nur auf diesem Weg lassen sich die Synergieeffekte erzielen, die eine Zusammenarbeit global wettbewerbsfähig machen.

Zusammenschlüsse und Kooperationen unter Konkurrenten können auf einem recht konsolidierten Markt wie dem Maschinen- und Anlagenbau Gefahr laufen, mit dem Kartellrecht in Berührung zu geraten. Der Gesetzgeber muss an dieser Stelle prüfen, ob Konkretisierungen und ggf. Anpassungen sinnvoll sind, um Kooperationsprojekten die nötige Rechtssicherheit zu bieten. Darüber hinaus kann die Politik darauf hinwirken, Auftragsvergaben im Bereich Maschinen- und Anlagenbau ins Inland oder nach Europa zu fördern.

Batteriezellfertigung – Zukunftssicherheit durch Planbarkeit und Forschung

Langfristige Zielvorgaben setzen und mit geeigneten Maßnahmen unterfüttern, Rahmenbedingungen verbessern.

Forschung und Entwicklung langfristig fördern.

Pilotanlagen und Partnerschaften für den Aufbau von Wissen und Kompetenzen schaffen.

Um den auf dieser Stufe bisher beschrittenen Aufbaupfad fortzusetzen, sollte von politischer Seite aus eine möglichst stabile, langfristige Planungssicherheit gewährleistet werden. Zweckdienlich sind in diesem Sinne klare Zielsetzungen und ein durch geeignete Maßnahmen unterfüttertes Verfolgen dieser Ziele, wozu eine Stabilisierung der Nachfrage nach Batterien gehören muss und eine Verbesserung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Der Staat, aber auch die Unternehmen sind außerdem gefordert im Bereich der Forschung und Entwicklung, um im hochdynamischen Feld der Batterieforschung nicht den Anschluss zu verlieren oder vielleicht sogar Wettbewerbsvorteile zu erringen und im Zuge dessen das notwendige Fachpersonal auszubilden. F&E ist nicht nur essenziell für die Wettbewerbsfähigkeit, sondern ihre Erkenntnisse verändern ggf. auch den Rohstoffbedarf und damit die Abhängigkeiten der Batterieindustrie. Natriumbasierte Batterien sowie bestimmte Feststoffzellen sind bei der Verringerung kritischer Rohstoffbestandteile in den Batterien besonders vielversprechend und sollten in der Forschungsförderung berücksichtigt werden. Technologieoffenheit sollte dabei zukünftige Pfadwechsel ermöglichen. Eine langfristige Finanzierung vielversprechender batteriebezogener Forschungsprojekte in Deutschland auch nach 2025 sollte sichergestellt werden.

Technologische Pfadabhängigkeiten sind beim Ausbau hiesiger Produktionskapazitäten mitzubedenken. Das gegenwärtige Zögern vieler Betreiber beim Aufbau ihrer Produktion kann, aus dieser Perspektive betrachtet, sinnvoll sein. Gleichzeitig finden notwendige Lernprozesse im Bereich Zellproduktion nicht statt und Dynamik droht verlorenzugehen. Eine Option für Unternehmen, diese Probleme zu mitigieren, sind Pilotanlagen. Eine andere sind strategische Partnerschaften für den Transfer von Wissen und den Aufbau von Kompetenzen. Auch Unternehmen aus China können dabei eine Rolle spielen.



Organisationen, Netzwerke, Intermediäre im Feld Batterie

In Deutschland und Europa existieren eine Vielzahl von Organisationen, Netzwerke und Initiativen rund um das Thema Batterie. Sinnvoll eingebunden können sie Unternehmen und der Politik Impulse geben und Akteure miteinander vernetzen. Bemängelt wird von der Fach-Community allerdings, dass durch die Vielzahl von Organisationen Parallelstrukturen existieren und die Kommunikation und Verzahnung zwischen diesen verschiedenen Organisationen verbessert werden kann.

Europäische Zusammenarbeit beim Thema Resilienz und Batterie

Zusammenarbeit über Ministerien und Generaldirektionen hinweg beim Thema Rohstoffe verbessern und gemeinsame Ziele bearbeiten.

Eine EU-Strategie schaffen, die Ziele für den Aufbau einer heimischen resilienten Batterie-wertschöpfungskette festlegt und notwendige Maßnahmen koordiniert.

Schnelle Umsetzung der Änderungen im EU-FDI-Screening.

Bei der Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen auf nationaler und EU-Ebene sollten bestehende Ziele, wie die im CRMA formulierten, stärkere Berücksichtigung finden. Um die zur Erreichung dieser Ziele notwendigen Projekte auf Rohstoffabbau- und -verarbeitungsebene erfolgreich entwickeln zu können, sollten die Prozesse zur Genehmigung und staatlichen Förderung von Projekten vereinfacht und beschleunigt werden. Gleichzeitig bedarf es bei der Anpassung des regulatorischen Rahmens Fingerspitzengefühl, um andere Stakeholder, insbesondere die lokal betroffene Bevölkerung, angemessen zu berücksichtigen und einzubeziehen. Wichtig ist es bei Querschnittsthemen wie der Resilienz, über die Grenzen von Ministerien und Generaldirektionen hinweg zusammenzuarbeiten. Geeignete Verfahren und organisatorische Strukturen sind zu diesem Zweck zu finden und zu schaffen.

Auf EU-Ebene sollte unter Einbindungen aller relevanten Stakeholder eine Strategie für den Aufbau einer resilienten europäischen Produktionskette im Bereich Batterie und E-Mobilität erarbeitet werden, welche abgestimmte, klare, messbare, verbindliche Ziele mit geeigneten, abgestimmten Maßnahmen und einer raschen Umsetzung kombiniert. Dabei gilt es zu analysieren, welche Instrumente aus internationalen Best-Practice-Beispielen wie dem IRA in den USA und der JOGMEC in Japan im europäischen Kontext sinnvoll implementiert werden können.

Entscheidend ist, dass diese Strategie in die verschiedenen relevanten regulatorischen und legislativen Vorgänge der EU z. B. im Chemikalienrecht hineinreicht und sie im Sinne der formulierten Ziele koordiniert. Die Strategie sollte institutionell auf eine Art und Weise verankert werden, die die Zusammenarbeit über Generaldirektionen hinweg befördert.

Parallel zur Erhöhung der eigenen Resilienz sollte man sich möglichst auf EU-Ebene für eine Erhaltung des Freihandels einsetzen. Dazu können Anreize für Investitionsbeziehungen und -verflechtungen mit u. a. US-amerikanischen Unternehmen gehören, um die transatlantische Zusammenarbeit trotz potenzieller handelspolitischer Spannungen zu fördern.

Neben den bereits genannten Maßnahmen sollten auch Auslandsinvestitionen in strategische und sicherheitskritische Unternehmen einheitlich geprüft werden. Dies schließt Investitionen von europäischen Unternehmen ein, die von Nicht-EU-Investoren kontrolliert werden. So wird sichergestellt, dass kritische Technologien, schützenswertes Wissen und Kapazitäten nicht unter den direkten oder indirekten Einfluss von Akteuren aus autoritären oder wettbewerbsgefährdenden Staaten geraten. Die geplanten Änderungen im EU-FDI-Screening geben daher einen wichtigen Anstoß, um Abhängigkeiten in Schlüsselbereichen wie Energie, Technologie und Verteidigung EU-weit zu optimieren, bestehende Verfahren zu vereinfachen und die Zusammenarbeit zwischen den Mitgliedstaaten zu verbessern.

Zukunftsperspektiven für die Resilienz der Batteriewertschöpfungskette

Batterien stehen im Zentrum des geoökonomischen Wettbewerbs um strategische Industrien, da ihre Relevanz weit über PKWs hinausgeht. Dies macht Deutschland und Europa besonders verwundbar, da sie in den nächsten Jahren in vielen Teilen der Wertschöpfungskette Batterie in hohem Maße von China abhängig bleiben werden und im Subventionswettbewerb kaum mit China mithalten können. Die erneute Wahl Trumps weckt zudem Befürchtungen einer protektionistischeren Handelspolitik von Seiten der USA, die die globalen Handelsverflechtungen beeinträchtigen kann. Die deutsche und europäische Industrie muss sich auf diese Herausforderungen einstellen. Europa wird in näherer Zukunft insbesondere auf den Ebenen des Rohstoffabbaus und der Rohstoffverarbeitung und speziell bei Graphit und Anodenaktivmaterial von China abhängig bleiben. Gleichzeitig nutzt dieses Land gezielt seine Kontrolle über Rohstoffe und Technologieexporte, um seine Dominanz in der Wertschöpfungskette auszubauen und seine globalen wirtschaftlichen und politischen Interessen durchzusetzen.

Auch wenn die Ausgangsposition Deutschlands und Europas in der Batteriewertschöpfungskette und auf dem Weg zu einer souveränen Mobilitätswende nur wenig positive Bewertungen zulässt, können heute eingeleitete Maßnahmen auf unternehmerischer und staatlicher Ebene die Resilienz der Batteriewertschöpfungskette in Europa bereits mittelfristig deutlich erhöhen und langfristig zur Sicherung einer hinreichenden deutschen und europäischen Souveränität in der Batterie- und damit der E-Autoindustrie beitragen.

Endnoten

- 1 BMWK (o. D.).
- 2 VDA (2024a).
- 3 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 37.
- 4 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 19.
- 5 SPD / Bündnis 90 – Die Grünen / FDP, S. 22.
- 6 Impey.
- 7 Bloomberg NEF (2024).
- 8 Statistisches Bundesamt.
- 9 Fritz.
- 10 DERA, S. 2.
- 11 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 37.
- 12 Bradley et al., Scholle.
- 13 Bernhart et al., S. 9.
- 14 Die Bundesregierung, S. 10f., 25f.
- 15 Large.
- 16 DERA, S.3-6.
- 17 IEA (2023)
- 18 Fluchs, IEA (2021).
- 19 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S.24.
- 20 Ebd.
- 21 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 63.
- 22 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S.24.
- 23 DERA, S. 14.
- 24 BGR, S.151.
- 25 Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren.
- 26 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 69f.
- 27 DERA, S. 10f.
- 28 IEA (2021), S. 133.
- 29 Drought, Hebestreit, Mining Technology.
- 30 Miningscout.2022.
- 31 USGS.
- 32 Miningscout 2024.
- 33 Wolf, Edda (2024b).
- 34 Siebel.
- 35 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S.7.
- 36 Bünting et. al., S. 27.
- 37 Economist (2024a), Economist (2024b), Economist (2024c).
- 38 UNSW / CLMR.
- 39 The University of Sydney.
- 40 Zhang.
- 41 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 24.
- 42 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 7, 69.
- 43 CRMA S.6, 48.
- 44 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 25.
- 45 Fleischmann et. al.

- 46 Fraunhofer ISI.
- 47 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 7.
- 48 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 70.
- 49 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 70.
- 50 Umicore (2022).
- 51 Umicore (2023).
- 52 Finzel.
- 53 Bartmann.
- 54 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 70.
- 55 Plumeyer et al. (2024)
- 56 Porsche Consulting.
- 57 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 7, S. 69.
- 58 Zvei (2023b).
- 59 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 7, S. 69.
- 60 Zvei (2024).
- 61 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / IMU Institut.
- 62 Güßgen.
- 63 Noyan.
- 64 Fieten.
- 65 European Chemicals Agency, Hodgson, Ruttloff / Burchert, ZVEI (2023a).
- 66 Europäische Kommission (2024a), VDA (2024b).
- 67 Battery-News (2024a), Verdict Data Journalism Team.
- 68 Bockey, Thielmann et al.
- 69 Verivox.
- 70 Degen, f. et. al.
- 71 Bockey, Fraunhofer FFB.
- 72 Europäische Kommission (2019a), IEA (2024), Lustenhouwer.
- 73 Europäische Kommission (2023b), Europäische Kommission (2024g).
- 74 BMWK (2023a), Europäische Kommission (2024e), Tartler.
- 75 BMWK (2019).
- 76 BMWK, S. 33.
- 77 Olk / Hildebrand.
- 78 Fujioka, Japanese Agency for Natural Resources and Energy, Japan Organization for Metals and Energy Security, Seth.
- 79 Europäische Kommission (2019b).
- 80 Europäische Kommission (2024b).
- 81 Europäische Kommission (2024f).
- 82 Europäische Kommission (2024d)
- 83 Europäische Kommission (2024c).
- 84 BDI, DIHIK.
- 85 BMWK (2023b).
- 86 Home, U.S. Department of State.
- 87 Latham.London.
- 88 Vivoda.
- 89 O. V. (2023).
- 90 O. V. (2024).
- 91 Wolf.
- 92 Bloomberg NEF (2022), Campbell / Shao S. 11, O. V. (2024).
- 93 Campbell / Shao S. 8ff.
- 94 Europäische Kommission (2024h), Faure-Schuyer, InnoEnergy, McCaffrey / Poitiers.

- 95 Beck / Stoyanova, Landais et al., Scheinert, Stokes.
96 Europäischer Rat.
97 Akoto, Backovic, Transport&Enviroment (2024).
98 Aksoy et. al.
99 IW Consult GmbH / Fraunhofer ISI S. 83.
100 BMW (2024), S. 111f.
101 BMW (2023a), S. 111f., 124, BMW (2024), S. 111f., BMW (o. D.).
102 Bünting et. al., S. 44f., Europäische Kommission (2023a).
103 BASF, S. 182.
104 Umicore (2021).
105 Transport & Enviroment (2023).
106 BASF (2024), S. 105, 249.
107 BMWi, S.5.
108 Bähr et. al., S. 80f.
109 Volkswagen Group (2024), S 172.
110 IW Consult GmbH / Fraunhofer ISI, S. 87.
111 BMW (2020).
112 Schmid, S. 37f.
113 ntv.
114 BASF, S. 122.
115 Volkswagen AG (2021).
116 Schaal (2024).
117 Schaal (2022).
118 BenchmarkSource.
119 Economist (2024c), VDMA (2023), S. 161-165.
120 VDMA (2023) S. 161.
121 BMW (2023b); IWConsult / Fraunhofer ISI, S. 85.
122 Bünting et. al. S. 44f.
123 Kretschmer.
124 Hebestreit, Karu.
125 Lienert / Carey.
126 Frauenhofer IFAM Magazin, Vattenfall, VDMA, S. 162f.
127 ADAC.
128 Peter et. al.
129 Jülich Forschungszentrum.
130 Hanley, Hopf, Lewis.
131 Murray.
132 TrendForce.
133 Battery-News (2024b), Birke, NRTCAutomation.
134 O. V. (2023).
135 Volkswagen AG (o. J.).
136 Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 111.
137 Ey, S. 25, IW Consult GmbH / Fraunhofer ISI, S. 85, Prognos / Öko-Institut / Wuppertal Institut, S. 108-111.
138 Schmid, S. 31f., 38.



Dossier

Wertschöpfungsketten der Halbleiterfertigung

Abhängigkeiten und Resilienzstrategien im Bereich
Halbleiter in Deutschland und Europa

3

Autorenteam

Jakobus Kai Jaspersen

Paul Möhlmann

Miguel Wahle

Inhalt Dossier

84

Hintergrund

86

Herausforderungen und Abhängigkeiten in der Halbleiterwertschöpfungskette

102

Rahmenbedingungen und Handlungsfelder für den Halbleiterstandort Europa

111

Industrielle Strategien zur Steigerung der Resilienz und Souveränität in der Halbleiterwertschöpfungskette

115

Handlungsempfehlungen zur Stärkung der Halbleiterindustrie in Deutschland und Europa

1

Hintergrund

Halbleiter bzw. Mikrochips sind Bestandteil praktisch aller komplexeren Produkte, die eine elektronische Komponente beinhalten.¹ Das betrifft neben Smartphones, Computern und Industrierobotern auch Maschinen und Anlagen, medizinische Geräte, Rüstungsgüter, Automobile und viele mehr. Auch Technologien und Infrastruktur der Energiewende benötigen große Mengen an Halbleitern. Aktuell können die EU und Deutschland ihren industriellen Bedarf an Halbleitern nicht durch eigene Produktion decken. Dies gilt einerseits für die Bandbreite der benötigten Mikrochips – Hochleistungs-Chips und Speicherchips werden praktisch ausschließlich importiert – andererseits für das Volumen der Produktion, d. h. die EU kann momentan auch in den anderen Kategorien nicht bedarfsdeckend produzieren. Aktuelle Ausbaupläne werden mit dem Wachstum des Bedarfs möglicherweise schritthalten, aber keine wesentlichen Änderungen an den massiven Importabhängigkeiten für alle Volkswirtschaften und Industrien Europas bewirken. Welche Auswirkungen diese Abhängigkeiten haben können, wurde durch die von der Corona-Pandemie ausgelöste Chipkrise illustriert. Lieferkettenstörungen beeinträchtigten temporär die Versorgung Europas mit Halbleitern aus Ostasien. Infolgedessen musste unter anderem die deutsche Automobilindustrie ihre Produktion drosseln, was zu signifikanten Umsatzeinbußen führte.²

Für den globalen Halbleitermarkt wird Schätzungen zufolge ein starkes Wachstum von ca. 7 %³ bis 15 %⁴ pro Jahr erwartet. Die Industrie in der EU erwartete laut einer Befragung der Europäischen Kommission 2022 eine Verdopplung der Nachfrage von 2022 bis 2030.⁵ Dabei ist zu beachten, dass im Halbleitermarkt eine Vielzahl verschiedener Halbleiterprodukte subsumiert betrachtet werden – mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsfeldern sowie Markt- und Fertigungsstrukturen. Mikrochips werden u. a. nach ihren Knotengrößen klassifiziert, wobei niedrigere Zahlen höhere Leistungsfähigkeit, aber auch höhere Fragilität und höhere Preise indizieren. Die modernsten Logik-Chips mit den niedrigsten Knotengrößen von mittlerweile deutlich unter 10 nm werden als Leading-Edge-Chips bezeichnet.⁶ Sie werden u. a. in Computern und Smartphones verbaut und sind von herausragender Bedeutung in Zukunftsbereichen wie Cloud-Computing und Künstlicher Intelligenz, um eine ausreichende Leistungsfähigkeit der Rechenzentren zu sichern. In Deutschland und der EU werden für die heimischen Industrien größtenteils, aber keineswegs ausschließlich Mikrochips mit größeren Knotengrößen, sogenannte Trailing-Edge-Chips, benötigt, um z. B. als Komponenten in Automobilen und Industrierobotern zu dienen, wo u. a. Robustheit gegenüber Temperaturschwankungen und Erschütterungen unverzichtbar ist.⁷ Insbesondere Leistungshalbleiter sind überall dort notwendig, wo mit hohen elektrischen Spannungen und Strömen gearbeitet wird, wie z. B. bei E-Autos, denen wiederum eine tragende Rolle bei der Verkehrswende zukommt.⁸ Und auch in der Verteidigungsindustrie werden Chips verschiedenster Arten in großen Mengen benötigt. Z. B. kann eine einzelne Rakete bereits Hunderte von Chips benötigen.⁹ Weiterhin sind Chips unverzichtbar für das Funktionieren kritischer Infrastruktur z. B. als Teil von Steuerungselementen. Die unterschiedlichen Anwendungsfelder zeigen, dass es nicht nur essenziell ist, dass genügend Chips zur Verfügung stehen, sondern auch, dass diese sicher und vertrauenswürdig sind.

Die bestehenden Produktionskapazitäten in Deutschland und der EU sind der lokalen Nachfrage entsprechend auf Trailing-Edge-Chips ausgerichtet, ohne dabei bedarfsdeckend zu sein. Leading-Edge-Chips werden bisher nicht in der EU hergestellt, sondern praktisch ausschließlich in Taiwan und Südkorea.¹⁰ Auch wenn die europäische Nachfrage nach Mikrochips die europäische Produktion übersteigt, ist die europäische Chipindustrie aufgrund der spezifischen Struktur des Sektors auf externe Absatzmärkte angewiesen. Daraus ergeben sich Abhängigkeiten insbesondere gegenüber China und den USA als größte Absatzmärkte. Im EU Chips Act wird das ehrgeizige Ziel formuliert, den Anteil der EU an der weltweiten Produktion von Mikrochips über alle Kategorien hinweg bis 2030 auf 20 % zu verdoppeln. Da die EU aktuell ungefähr 20 % der weltweiten Chipproduktion verbraucht, würde die geplante Steigerung Produktion und Verbrauch in etwa austarieren.¹¹

Mikrochips sind eng mit dem weiteren Ökosystem Mikroelektronik verflochten. In diesem bestehen ebenfalls Abhängigkeiten gegenüber autoritären Staaten, z. B. im Bereich Leiterplatten und Electronics Manufacturing Services (EMS).¹² Das vorliegende Dossier klammert diesen Aspekt aus, um die Komplexität der Darstellung zu reduzieren, und begrenzt seinen Fokus auf die Halbleiterfertigung. Es untersucht sowohl die Situation bei Rohstoffen, Vorprodukten, Maschinen und Anlagen als auch Abhängigkeiten der deutschen und europäischen Wirtschaft von importierten Halbleitern verschiedener Kategorien. Besonders im Blick stehen dabei Abhängigkeiten gegenüber autoritären Staaten. Der im Halbleiterbereich hochrelevante Akteur Taiwan wird in die Betrachtung vor dem Hintergrund einbezogen, dass hier geopolitisch ein großes Spannungsfeld besteht und China potenziell großen Einfluss auf den Inselstaat ausüben kann. Darüber hinaus werden auch die Abhängigkeiten von den USA in den Blick genommen. Denn mit der neuen Trump-Regierung deuten sich hier veränderte Risiken und neue Handelskonflikte an. Gleichzeitig spielt die USA von allen Ländern die größte Bedeutung im Bereich Halbleiter – sowohl in der Herstellung als auch in der Nachfrage. Neben den Lieferketten werden bestehende und geplante Maßnahmen analysiert, welche die Resilienz der deutschen Wirtschaft im Bereich Halbleiter erhöhen können. Aufbauend auf den Untersuchungen wird das Dossier abschließend Handlungsempfehlungen formulieren, um Abhängigkeiten der deutschen Wirtschaft im Segment Halbleiter zu minimieren und dadurch Handlungsspielraum, Zukunftsfähigkeit, Wohlstand und Arbeitsplätze zu sichern.

Methodisch stützt sich das Dossier auf eine Auswertung von aktuellen Studien, Analysen, Artikeln und Geschäftsberichten ergänzt durch Interviews mit Experten und Expertinnen aus Verbänden und der Industrie. Zusätzlich werden aktuelle statistische Informationen herangezogen.

2

Herausforderungen und Abhängigkeiten in der Halbleiterwertschöpfungskette

Die Wertschöpfungsketten im Bereich Halbleiter sind komplex und mehr noch als in anderen Wirtschaftszweigen stark global verflochten.¹³ Kein Land dieser Welt ist in diesem Sektor momentan unabhängig von anderen handlungsfähig, auch wenn insbesondere China diesbezüglich Bestrebungen unternimmt. Die Wertschöpfungskette eines Chips überquert im Schnitt 70 Ländergrenzen und durchläuft 50 sog. Flaschenhälse¹⁴ bis sie den Endkonsumenten erreicht.¹⁵ Im Folgenden werden ausgewählte Wertschöpfungsstufen der Halbleiterfertigung (siehe Abbildung 1) hinsichtlich ihrer Struktur und bestehender Abhängigkeiten analysiert. In seinem Entstehungsprozess durchläuft ein Chip vereinfacht drei Wertschöpfungsschritte:

- Design
- Fabrikation
- Assembly, Testing, Packaging (ATP)

Beim Design werden unter Zuhilfenahme spezialisierter Software und bestehenden IPs (Intellectual Property) unter anderem die logische und physische Struktur des Chips festgelegt sowie Anforderungen und Funktionen spezifiziert. Bei der darauffolgenden Fabrikation wird der Chip bzw. Halbleiter in einer Gigafactory auf Grundlage eines Wafers hergestellt. Daraufhin wird der bearbeitete Halbleiter im hochspezialisierten Schritt des Assembly, Testing, Packaging (ATP) getestet, verdrahtet und in ein Gehäuse verbaut, das es erlaubt, ihn in Folgeprodukte wie z.B. Steuergeräte in Fahrzeugen einzubauen.¹⁶

Diese drei Stufen in der Halbleiterfertigung sind wiederum auf Vorleistungen und Vorprodukte auf folgenden Ebenen angewiesen:

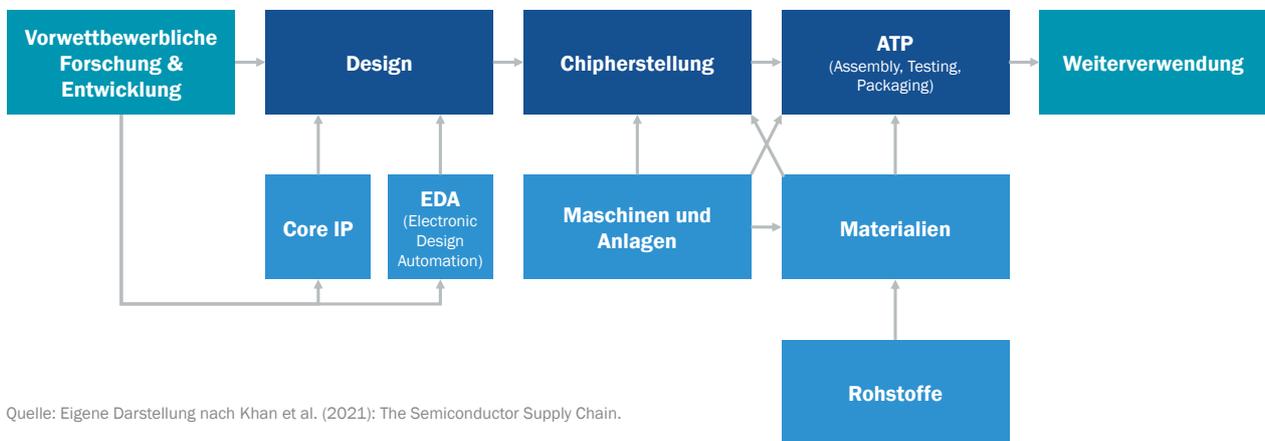
- Electronic Design Automation (EDA)
- Core IP
- Rohstoffförderung und -verarbeitung
- Zwischenmaterialherstellung
- Maschinen- & Anlagenbau

Eine wichtige intellektuelle und technologische Vorleistung bildet die Electronic Design Automation (EDA), welche spezialisierte Software entwickelt und bereitstellt, die für das Design in der Halbleiterherstellung unerlässlich ist. Beim Design wird außerdem auf Core IPs zurückgegriffen: bestehende Designlösungen, mit denen spezifische Teile und Aspekte des Halbleiters gestaltet werden können und die Entwicklungszeit und -kosten reduzieren. Die Entwicklung und der Besitz von Core IPs und EDA stellen einen erheblichen Asset und Wettbewerbsvorteil in der Halbleiterwertschöpfung dar.

Eine physische Vorleistung für die Halbleiterfertigung bildet zum einen die Rohstoffförderung und -verarbeitung, wobei eine Vielzahl von verschiedenen Rohstoffen, die oft zu hochreiner Qualität verarbeitet werden müssen, direkt oder indirekt in die Chipproduktion fließen. Zum anderen werden in der Zwischenmaterialherstellung Rohstoffe z. B. zu Wafern weiterverarbeitet, bevor diese Verwendung in der Chipproduktion finden.

Eine weitere zu betrachtende Wertschöpfungsebene ist der Maschinen- & Anlagenbau, da sowohl für die Produktion der Halbleiter, als auch für ATP und die Herstellung von Zwischenmaterialien hochspezialisierte Anlagen und Maschinen erforderlich sind.

Abbildung 1: Wertschöpfungsstufen der Halbleiterfertigung

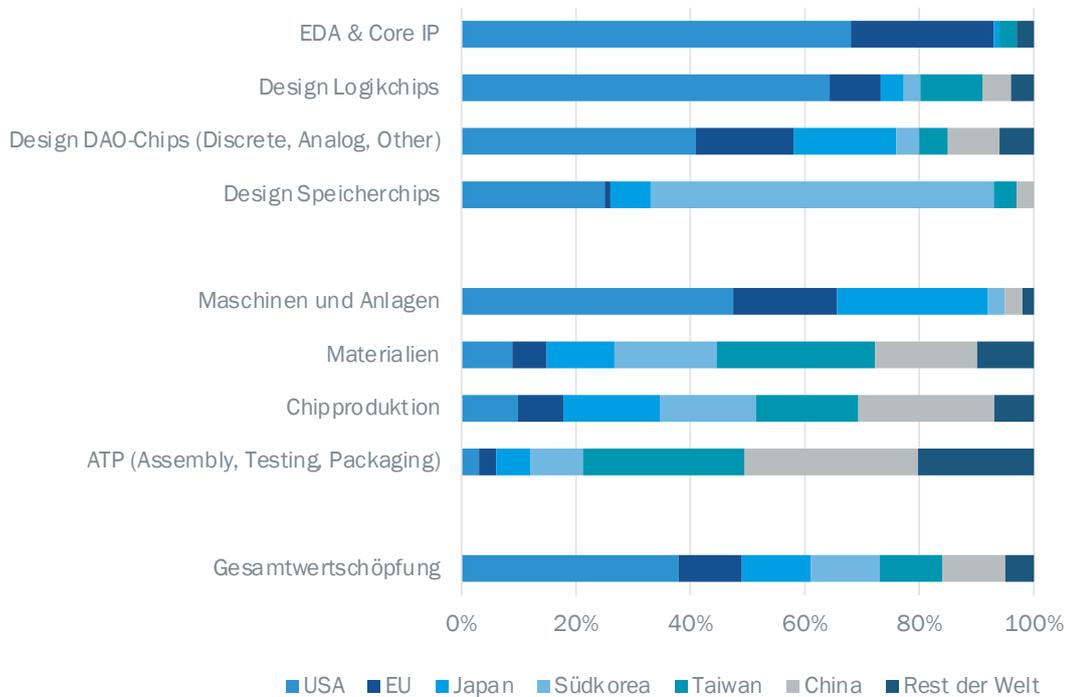


Quelle: Eigene Darstellung nach Khan et al. (2021): The Semiconductor Supply Chain.

Die EU und Deutschland verfügen momentan vor allem über relevante Marktanteile und Kapazitäten in den Bereichen Design, Maschinen- und Anlagenbau sowie in etwas geringerem Maße auch im Bereich Chemie (siehe Abbildung 2).¹⁷ Der Aufbau von Fabrikationskapazität für Halbleiter in Deutschland befindet sich im Hochlauf mit geplanten Großprojekten wie z. B. einem neuen Werk von ESMC, einem Joint Venture von TSMC, Bosch, Infineon und NXP¹⁸ sowie einem Ausbau der bestehenden Kapazitäten von Infineon¹⁹ und geplant auch Global Foundries²⁰

Abbildung 2:

Anteile verschiedener Regionen an Wertschöpfungsstufen 2022



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Varadarajan et al. (2024), S. 10f.

Zu beachten ist, dass EDA, Core IP, Design, Manufacturing Equipment zugeordnet sind nach dem Sitz des HQs, nicht nach tatsächlicher geographischer Verortung.

Eine detaillierte Betrachtung der Handelsströme einzelner mikroelektronischer Halbleiterkomponenten verdeutlicht die Importabhängigkeiten und global-orientierten Marktstrukturen – aber auch die Herausforderung, Resilienz unter dem Gesichtspunkt von Produkt- und Güterklassen zu analysieren. Eine aktuelle Handelsdatenuntersuchung zur Marktkonzentration der Importeure nach Deutschland zeigt Abhängigkeiten in 54 für die Halbleiterwertschöpfungskette relevanten Produktkategorien.²¹ Besonders hohe Abhängigkeiten (mit über 50 % des Bezugs) gegenüber autoritären Regimen und Taiwan bestehen unter anderem bei Transistoren, Diodenteilen, Schreib-Lesespeichern, Halbleiteraufzeichnungsträgern, sowie optischen Prüfinstrumenten für Halbleiter. Allerdings ist die Handelsdatenanalyse sehr begrenzt in ihrer Aussagekraft, da:

die Produktkategorien grobmaschig sind und relevante Abhängigkeiten durch Aggregation verschleiern können,

Handelsdaten nicht Aufschluss darüber geben, woher ursprünglich ein Produkt bzw. seine Komponenten, Vorprodukte, Materialien und Rohstoffe sowie die nötigen Fertigungsanlagen stammen,

Substitutionsmöglichkeiten auf Material- und anderen Ebenen unberücksichtigt bleiben und nicht klar ist, wie leicht oder schwer alternative Zulieferer gefunden und genutzt werden könnten.

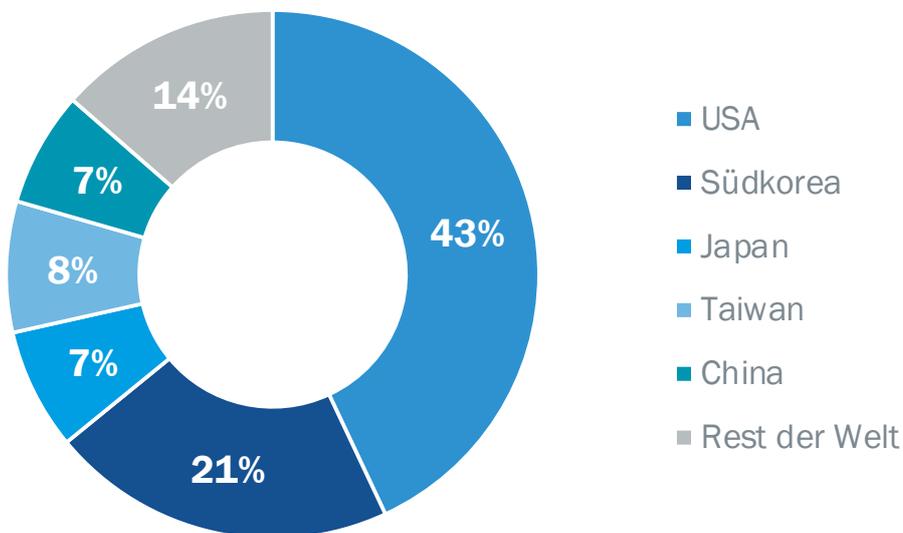
Die folgenden vertiefenden Analysen werden deshalb Handelsdaten zwar berücksichtigen, sich aber vor allem auf Weltmarktanteile stützen.

Forschung, Entwicklung und Design

Halbleiter unterscheiden sich von vielen anderen Produkten insofern, als dass Forschung, Entwicklung und Design einen enorm hohen Anteil von bis zu 59 % an der Gesamtwertschöpfung einnehmen. Vorwettbewerbliche Forschung ist dabei noch nicht inbegriffen.²² Die EU inkl. Deutschland ist, wie die vorstehende Abbildung 2 zeigt, im Bereich Entwicklung und Design noch relativ stark aufgestellt verglichen mit den folgenden Wertschöpfungsstufen. Im Bereich EDA und Core IP sowie dem Design von DAO-Chips (Discrete, Analog, Other) verfügte die EU 2022 über 25 % respektive 17 % der Wertschöpfung. Zu beachten ist allerdings, dass diese Zahlen auf dem Sitz der jeweiligen Firmen-HQs basieren. In der Praxis wird deshalb der Anteil der Wertschöpfung, der in den USA stattfindet, noch größer sein, als die obigen Zahlen vermuten lassen. Abgesehen von der EU und den USA sind auch Großbritannien, Südkorea, Japan, Taiwan und China im Chipdesign aktiv.

Abbildung 3:

Anteil am globalen Chip-Design-Umsatz 2021



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Thadani / Allen (2023), S. 3.

Die Abbildung bezieht nicht die Wertschöpfung von Firmen ein, die ihre Designs nicht vermarkten, sondern selbst nutzen.

Der Produktionsschritt umfasst neben dem Design selbst auch die Schritte:

vorkompetitive Forschung,
Design Automation Software / Electronic Design Automation (EDA),
Core IP.

Die Bedeutung vorwettbewerblicher Forschung ist schwer in ökonomischen Zahlen messbar, da sie sich nicht unmittelbar in Umsatzzahlen ausdrückt. Europa und Deutschland sind in diesem Bereich allgemein gut positioniert und auch im Bereich Mikrochips finden sich starke Akteure in der EU, unter denen sich das Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC) in Belgien und das Laboratoire d'électronique des technologies de l'information (CEA-Leti) in Frankreich hervortun.²³ Auch in Deutschland wird z. B. am Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS) und vielen anderen Forschungseinrichtungen Spitzenforschung in dem Gebiet durchgeführt.²⁴

EDA ist eine kleine, aber unverzichtbare Voraussetzung für das Design von Chips, da hochspezialisierte Software benötigt wird, um die außerordentlich komplexen Designschritte durchführen zu können. US-amerikanische Firmen nehmen eine dominante Stellung auf diesem Markt ein. Sie sind die einzigen, die Software anbieten, die das gesamte Spektrum an benötigten Funktionen abdecken. Nur drei US-amerikanische Firmen, Cadence, Synopsys und Mentor Graphics, teilen 70 % des gesamten Marktes unter sich auf. Letztgenannte Firma gehört seit 2017 dem deutschen Konzern Siemens.²⁵ 2021 führte die USA Exportrestriktionen gegenüber China ein, die u. a. EDA betrafen. Als Reaktion darauf laufen intensive Bemühungen in China, in diesem Sektor unabhängiger zu werden.²⁶

Meist werden Chips nicht neu vollständig designet, sondern beruhen zum Teil auf erprobten sogenannten Core IPs. Auch in diesem Bereich nimmt die USA diesmal zusammen mit Großbritannien eine dominante Stellung ein. Zusammen deckten sie 2019 über 90 % des Marktes ab.²⁷

Insgesamt lässt sich auf der Wertschöpfungsebene Forschung, Entwicklung und Design feststellen, dass Abhängigkeiten sich nicht auf autoritäre Staaten konzentrieren, sondern auf hochspezialisierten Unternehmen in den USA und z. T. in Großbritannien. Dies gilt insbesondere in den Unterbereichen EDA und Core IP. Die Experteninterviews bestätigen, dass Europa momentan zur Abdeckung aller nötigen Funktionen kaum auf US-amerikanische Software verzichten kann. Betrachtet man Design in den drei Chipkategorien Logic, Speicher und DAO, so fällt wiederum die starke Rolle der USA insbesondere bei Logic-Chips auf, wo sie auf 65 % der Wertschöpfung kommen. Südkorea hingegen kann 60 % der Wertschöpfung bei Speicherchips für sich in Anspruch nehmen. Deutschland und die EU sind im Design von Mikrochips in den Bereichen Logic und DAO aktiv, insbesondere bei DAO-Chips, wo die EU 17 % der globalen Wertschöpfung erzielt, doch liegen sie weit hinter den USA und teilweise auch anderen Staaten.²⁸ Mikrochips, die hierzulande hergestellt werden, beruhen somit wesentlich auf Designarbeit und IPs aus anderen Staaten. Dies gilt insbesondere für modernere Chips. Vorhandene Alternativen und Open Source-Lösungen sind in ihrer Nutzung mit hohen Umstellungskosten verbunden und nicht für alle Chipklassen vorhanden.²⁹ Darüber hinaus erfordern sie zusätzliche Neuentwicklungen.

Rohstoffförderung und -verarbeitung

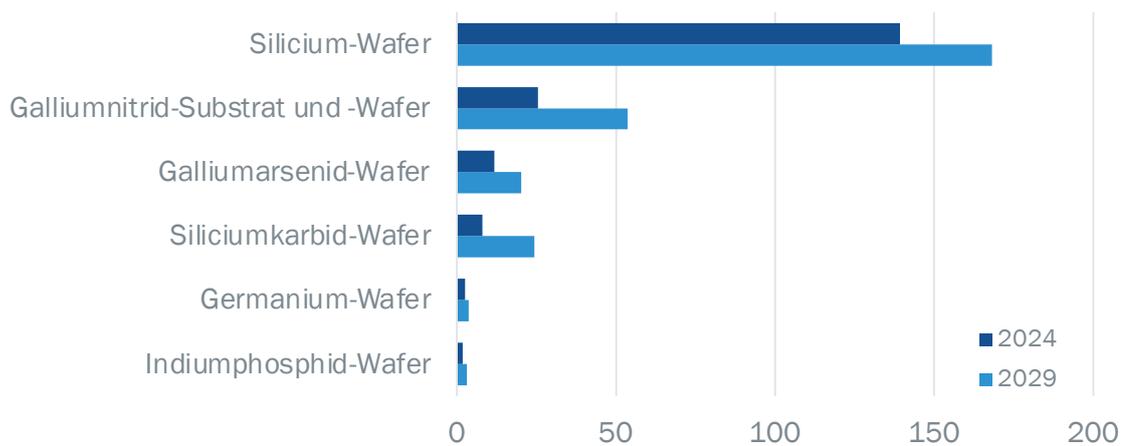
Die Herstellung von Halbleitern benötigt viele Dutzend verschiedener Rohstoffe wie z. B. Aluminium, Gallium, Germanium, Silicium, Magnesium, Wolfram und diverse Seltene Erden wie z. B. Lanthan. Hinzu kommen eine Reihe von Gasen, die teilweise in der Produktion direkt vor Ort aus der Luft gefiltert werden, wie z. B. Stickstoff.³⁰ Auch wenn z. T. nur geringe Mengen einzelner Rohstoffe benötigt werden, ist der Zugang zu und die Verfügbarkeit von Rohstoffen in der Halbleiterproduktion von großer Bedeutung sowohl aus einer Resilienz- als auch aus einer Wettbewerbsperspektive. Insgesamt stellen Rohstoffkosten einen signifikanten Anteil an der Gesamtwertschöpfung eines Chips dar.³¹

Dieser Abschnitt greift einige der Rohstoffe, die nicht substituierbar sind oder in verhältnismäßig großen Mengen für die Produktion von Halbleitern benötigt werden, heraus.

Nahezu alle Chips beruhen auf Wafern, die auf Silicium in Reinform oder als Siliciumcarbid oder Gallium als Galliumnitrit oder -arsenid basieren. Germanium und Indiumphosphid spielen als Wafermaterial eine untergeordnete, aber in ihrer Bedeutung steigende Rolle³² Silicium, Gallium und Germanium werden von der EU als kritische und strategische Rohstoffe eingestuft, Indium hingegen nicht.³³ Reines Silicium ist momentan und wird auf absehbare Zeit auch aufgrund des Preisvorteils das mit Abstand wichtigste und meistgenutzte Ausgangsmaterial für Wafer bleiben (siehe Abbildung 4).³⁴ Abweichungen von diesem Standard erfordern in der Regel spezielle Gründe, wie z. B. ein besonderes Anforderungs- und Leistungsprofil.

Abbildung 4:

Aktuelle und projizierte Marktgröße für Wafer-Typen in 100 Mio. USD



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Daten von Mordor Intelligence,³⁵ DataIntel³⁶ und Verified Market Research³⁷
Teilweise eigene Hochrechnungen. Beachten, dass die Werte für Galliumnitrid nicht völlig vergleichbar sind und dass die Werte in US-Dollar und nicht in Stückzahlen sind, diese liegen für Silicium im Vergleich zu den anderen Materialien deutlich höher.

Silicium bzw. Siliciummetall ist ein global sehr häufig vorkommendes Element und auch wenn nicht alle Vorkommen zum Abbau geeignet sind, bestehen beim Rohstoffabbau keine kritischen Abhängigkeiten. In China fand 2023 nach USGS zwar knapp 79 % der globalen Siliciummetallproduktion statt, während Deutschland über ein Werk der RW Silicium auf knapp 2 % der globalen Produktion kam.³⁸ Doch trotz der Weltmarktdominanz Chinas bestehen hier aktuell wenig direkte kritische Importabhängigkeiten der EU, weil der Verbrauch bisher relativ gering ist. Über drei Viertel des aktuellen europäischen Bedarfs an Siliciummetall werden aus Norwegen, Frankreich, Brasilien und Deutschland gedeckt.³⁹

Ein größerer Flaschenhals ist die Rohstoffverarbeitung: die Raffinerie des Erzes zu hochreinem Silicium. Dieser Prozess ist äußerst energieintensiv, weshalb die Energiepreise wesentlichen Einfluss darauf ausüben, wo Siliciummetall wettbewerbsfähig hergestellt werden kann.⁴⁰

Siliciummetall wird wiederum zu Polysilicium weiterverarbeitet, wo neben den Energiekosten auch anwendungsorientierte Spezialisierungsvorteile eine große Rolle spielen. Denn China nimmt zwar bei der Verarbeitung eine starke Position ein mit 2022 etwa 83 % der globalen Gesamtproduktion. Deutschland folgt mit 7 %. Allerdings liegt der chinesische Anteil für die halbleiterspezifische Verarbeitung, für die hohe Reinheitsgrade erforderlich sind, deutlich niedriger.⁴¹ Polysilicium dieser Qualitätsstufen macht nur etwa 5 % des Gesamtmarktes aus und wird von China in vergleichsweise geringen Mengen hergestellt.⁴² In Europa nimmt das deutsche Unternehmen Wacker Chemie AG als einziger Hersteller von Polysilicium in Halbleiterqualität eine starke Stellung ein. Das Unternehmen plant, seine Kapazitäten in Deutschland stark auszubauen und wird voraussichtlich den Bedarf an Polysilicium in Halbleiterqualität in Europa decken können.⁴³



Wacker Chemie AG

Der deutsche Chemiekonzern Wacker Chemie AG ist die tragende Säule der europäischen und weltweiten Siliciummetall und Polysiliciumproduktion. Er hat über 16.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, einen Jahresumsatz von 6,4 Mrd. Euro (2023) und verfügt über Produktionsanlagen in Europa, Nordamerika, Süd- und Ostasien.⁴⁴ Fast jeder zweite Chip weltweit wird aus Polysilicium von Wacker hergestellt.⁴⁵ Das ehemalige Tochterunternehmen Siltronic AG, an dem Wacker Chemie AG immer noch 30,8 % hält, ist zudem ein bedeutender Akteur in der Wafer-Produktion.⁴⁶

Eine aktuelle Studie der DERA geht davon aus, dass die zurzeit bestehenden Überkapazitäten im Bereich Siliciummetallproduktion und Polysiliciummetallproduktion weiter anwachsen werden, vor allem getrieben von massiven Investitionen in China. Es ist deshalb auf absehbare Zeit weder mit einer Verknappung noch mit einem Preisanstieg zu rechnen.⁴⁷ Die Konkurrenz und der Preisdruck aus China werden allerdings hohen Wettbewerbsdruck auf europäische Produktionskapazitäten im Bereich Silicium ausüben.

Siliciumkarbid ist erheblich teurer als Silicium, bietet als Wafermaterial aber einige Vorteile gegenüber reinem Silicium, wie z. B. geringeren Energieverlust und höhere Bandbreite.⁴⁸ U. a. in elektrischen Fahrzeugen werden Siliciumkarbid-Halbleiter verstärkt verwendet. Prognosen gehen davon aus, dass der Markt für Siliciumkarbid-Halbleiter von momentan 2,18 Mrd. US-Dollar bis 2029 auf 6,73 Mrd. US-Dollar anwachsen wird.⁴⁹ In Deutschland produzieren sowohl Bosch als auch Infineon bereits Siliciumkarbid-Halbleiter.⁵⁰ China verfügt über etwa 45 % der weltweiten Siliciumkarbid-Produktionskapazität. Es folgen Norwegen mit 8 % und Japan mit 6 %. Auch Deutschland verfügt über etwa 3,5 %.⁵¹

2023 importierte die EU etwa 150.000 t Siliciumkarbid von außerhalb der EU, etwa 43 % davon aus China.⁵² Momentan üben chinesische Anbieter einen enormen Preisdruck in diesem Markt aus, sodass unmittelbare Versorgungsrisiken für die Halbleiterindustrie weniger relevant sind als Preisrisiken.⁵³

Bei Gallium als Wafermaterial wird Galliumnitrit auf einem Substrat aus Silicium verwendet, was bedeutet, dass mengenmäßig auch bei diesen Chips mehr Silicium und nur wenig Gallium Verwendung findet. Gallium hat andere Eigenschaften als Silicium, was sie für bestimmte Anwendungen im Hochleistungsbereich präferabel macht, z. B. in Smartphones, Satelliten und Automobilen.⁵⁴ Gallium ist ein sehr seltenes Mineral und fällt hauptsächlich als Nebenprodukt bei der Verarbeitung von Bauxit ab. 2023 entfielen auf China 98 % der weltweiten primären Produktion von Gallium und 89 % der Produktionskapazitäten. Entsprechend sind die Importabhängigkeiten hoch. Die EU deckt 69 % ihres Bedarfs direkt aus China und Importe aus anderen Ländern werden angesichts des hohen Anteils an der Gesamtweltproduktion teilweise indirekt aus China stammen.⁵⁵ Nur drei andere Länder produzieren neben China momentan Gallium: Russland, Japan und Südkorea. Einige andere Länder, darunter Deutschland, verfügen über gegenwärtig ungenutzte geringfügige Produktionskapazitäten nach ihrem Ausstieg aus der Galliumproduktion.⁵⁶ Bauxit wird in vielen anderen Ländern neben China abgebaut. Den größten Anteil noch vor China hatten 2023 Australien und Guinea, aber auch in Kanada, Indien und Indonesien findet beträchtlicher Bauxitabbau statt.⁵⁷ Abhängigkeiten bestehen also nicht auf der Rohstoffabbau-, sondern auf der ersten Rohstoffverarbeitungsebene zu Gallium niedriger Qualität, wo China nahezu ein Monopol innehat.⁵⁸

In einem zweiten Verarbeitungsschritt wird dieses Gallium von Unreinheiten befreit, um das hochqualitative Gallium zu gewinnen, das für Halbleiter notwendig ist. Hochqualitatives Gallium wird in nur sehr geringen Mengen hergestellt, 2023 etwa 320 t. Neben China sind auf dieser Verarbeitungsebene Kanada, Japan, die Slowakei und die USA aktiv. Hinzu kommt die Wiedergewinnung von hochreinem Gallium aus Recycling, welches ebenfalls in den genannten Ländern stattfindet. Eine kritische Abhängigkeit auf Ebene des zweiten Verarbeitungsschrittes besteht für Deutschland und Europa also nicht.

Ähnlich wie Gallium findet Germanium Verwendung in spezialisierten Hochleistungschips, u. a. in der Sensorik. Wie Gallium ist auch Germanium höchst selten und wird nur als Nebenprodukt abgebaut, in diesem Fall in erster Linie beim Abbau von Zinkerzen.⁵⁹ Es ist nicht klar festzustellen, wie sich die Extraktionsstufe auf verschiedene Länder aufteilt. Die Minenproduktion für Zink kann als sehr grober Indikator dienen für die Potenziale, die es auf der Rohstoffabbauenebene in Bezug auf Germanium gibt. China führt mit ungefähr einem Drittel der globalen Produktion. Es folgen Peru mit knapp 12 % und Australien mit gut 9 %.⁶⁰ Die größeren Abhängigkeitsrisiken liegen auch hier auf der Verarbeitungsebene, auf der China mit 83 % des weltweiten Angebots eine unangefochtene Spitzenposition einnimmt. Es folgen Russland mit 5 %, Belgien mit 5 % und Deutschland mit 3 %.⁶¹ Der technisch anspruchsvolle und energieintensive Raffinerieprozess, um hochreines Germanium für die Halbleiterproduktion herzustellen, wird von China u. a. auch deshalb dominiert, weil niedrige Sozial- und Umweltstandards Kosten niedrig halten.⁶²

Somit bestehen zwar bei den geläufigen Wafer-Rohstoffen und -Materialien keine kurzfristigen Versorgungsrisiken für Deutschland und Europa, jedoch erhebliche langfristige Souveränitäts- und Wettbewerbsrisiken. Das hat sich zuletzt bei Gallium und Germanium angedeutet, als China zum August vergangenen Jahres Exportrestriktionen für diese beiden Rohstoffe verhängte. Dies war eine Reaktion auf die Bemühungen der USA, China Zugang zu Halbleitern und Halbleitertechnologie zu verwehren.⁶³ Die exportierten Mengen reduzierten sich in der Folge und die Preise stiegen deutlich.⁶⁴

Mittlerweile gibt es erste Anzeichen für drohende Versorgungsengpässe. Die künftige Entwicklung hängt einerseits davon ab, ob China die Restriktionen verschärfen oder lockern wird und andererseits, ob andere Produzenten ihre Kapazitäten zeitnah erhöhen können.⁶⁵ China hat darüber hinaus eine starke und teils dominante Position bei vielen weiteren Rohstoffen, die in kleineren Mengen Verwendung in der Halbleiterindustrie finden. Dies betrifft u. a. Wolfram, das zu 81 % aus China stammt.⁶⁶

Zwei weitere für den Herstellungsprozess relevante Rohstoffe mit größeren Abhängigkeitsrisiken gegenüber China sind Fluorapatit und Arsen. Aus ersterem wird Fluorwasserstoffsäure zur Ätzung der Wafer hergestellt.⁶⁷ Knapp zwei Drittel des Fluorapatits werden in China gefördert. Darauf folgen Mexiko mit 11,4 % und die Mongolei mit 10,6 %. Zwar verfügt auch Deutschland über eine geringfügige Produktion von unter 1 %, trotzdem bestehen bei Fluorapatit sehr einseitige Abhängigkeiten nach China.⁶⁸ Arsen zeichnet ein ähnliches, wenn auch etwas weniger kritisches Bild. Der Stoff wird sowohl in Form von Galliumarsenid-Wafern als auch als Prozesschemikalie in der Halbleiterindustrie eingesetzt. China produziert etwa 40 % weltweit knapp hinter Peru als größtem Produzenten. Auch Marokko produziert signifikante Mengen, sodass sich für Arsen aktuell mehr Alternativen auftun als für andere der genannten kritischen Rohstoffe.⁶⁹

Strategische Abhängigkeiten und Souveränitätsrisiken auf der Rohstoffebene müssen immer im Lichte der hohen Forschungs- und Innovationsdynamik im Halbleiterbereich betrachtet werden. Hier findet auf dem Gebiet der Materialwissenschaft Forschung und Entwicklung statt, die sich auf den Material- und Rohstoffbedarf auswirken und eine höhere Materialvielfalt mit sich bringen wird (z.B. durch Chiplets oder Heterointegration). Auch unkonventionelle Materialien, wie z. B. organische Substrate und Graphen könnten signifikante Verwendung finden im Zuge der zunehmenden Ausdifferenzierung von Chips.⁷⁰

Als letzter Rohstoff soll an dieser Stelle noch kurz Palladium betrachtet werden, der nicht in Chips selbst Verwendung findet, aber diese mit den Schaltplatten verbindet.⁷¹ In dieser Funktion ist Palladium nicht ohne Leistungseinbußen ersetzbar, findet in größeren Mengen Verwendung und ist zudem von kritischen Abhängigkeiten betroffen. Der größte Produzent von Palladium ist Russland mit knapp 44 % der globalen Produktion, gefolgt von Südafrika mit 34 %. Keines der beiden Länder ist als unproblematisch einzustufen.⁷²

Herstellung von Zwischenprodukten und Materialien

Die für die Herstellung von Halbleitern nötigen Materialien und Zwischenprodukte können in sieben Kategorien aufgeteilt werden: Wafer, Elektronikgase, Fotomasken, Fotolack, Stoffe zur chemisch-mechanischen Planarisierung, Sputtertargets und Elektronikchemikalien.

Akute Versorgungsrisiken und besonders einseitige Abhängigkeiten zu autoritären Staaten bestehen momentan nicht, da Firmen insbesondere aus den USA und Japan, aber auch aus Südkorea, Taiwan und der EU in den Subbereichen starke und teils dominante Positionen einnehmen.⁷³ Da aber Abhängigkeiten von den USA und Taiwan ihre eigenen Risiken bergen, werden im Sinne einer umfassenden Risikoanalyse im Folgenden einige wichtige Kategorien betrachtet.

Wafer sind das wichtigste Vorprodukt für Mikrochips und haben von allen Vorprodukten das mit Abstand größte Marktvolumen. Die Topproduzenten für Standard-Wafer sind Firmen, die ihren Hauptsitz in Japan (56% Marktanteil), Taiwan (16%), Deutschland (14%) und Südkorea haben.

Diese Firmen verfügen über weitere Standorte im Ausland u. a. den USA, wo ein starker Ausbau der Kapazitäten stattfindet.⁷⁴ Deutschlands Anteil ist vollständig auf die Firma Siltronic AG zurückzuführen, welche zu den führenden Produzenten von Wafern weltweit gehört und Wafer der höchsten Qualitätsstufe in Asien, Deutschland und den USA herstellt. Kritische Abhängigkeiten im Bereich Wafer bestehen für Deutschland nicht.⁷⁵

Vielmehr deuten Industriestimmen auf Risiken bei prozessrelevanten Stoffen wie Elektronikgasen und -chemikalien hin. Die Marktanteile verteilen sich in etwa gleichmäßig auf die USA, Südkorea, Japan, Taiwan, China und die EU, allerdings verbirgt sich darunter eine ausdifferenzierte Vielfalt hochspezialisierter Einzelprodukte, die nur von wenigen Firmen in bestimmten Ländern hergestellt werden. Dies gilt u. a. für Säuren, beispielsweise hochreine Schwefelsäure und Flusssäure, die in großen Mengen im Produktionsprozess von Halbleitern Verwendung finden. 2023 hatte der Markt für Schwefelsäure in Elektronikqualität eine Größe von knapp 350 Mio. US-Dollar mit einer Wachstumsprognose bis 2032 auf knapp 540 Mio. US-Dollar. Experten und Expertinnen zufolge bezieht die deutsche und europäische Halbleiterindustrie einen signifikanten, wenn nicht den Großteil der benötigten hochreinen Schwefelsäure mittlerweile aus China. Ähnliches gilt für Flusssäure, bei der, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, auch der Ausgangsrohstoff zum Großteil aus China stammt.⁷⁶

Auch bei den Edelgasen Neon, Krypton und Xenon bestehen große Abhängigkeiten in Richtung China. Nachdem mit Beginn des Ukrainekrieges der Bezug aus Russland (Handelsrestriktionen) als auch der Ukraine (Produktionsausfälle) zurückging, kam fast die Hälfte des Imports von Neon, Krypton und Xenon in die EU 2023 aus China.⁷⁷ Der Aufbau von Produktionskapazitäten für die drei genannten Gase wäre hierzulande prinzipiell gut möglich, weil sie mittels bekannter Verfahren aus der Luft gefiltert werden. Er ist allerdings sowohl energie- als auch kostenintensiv. Das Edelgas Helium fällt in erster Linie bei der Extraktion von Erdgas als Nebenprodukt ab. Die deutsche Industrie bezieht Helium vor allem aus Qatar, welches mit 38,8 % der Weltproduktion größter Produzent ist und Algerien. Die USA versorgen mit ihrem Anteil von 35,3 % der Weltproduktion im Wesentlichen ihre eigene Nachfrage. In Europa verfügt einzig Polen über kleinere Produktionskapazitäten.⁷⁸

Eine Vielzahl weiterer hochspezieseller, hochreiner Gase finden im Prozess der Halbleiterproduktion Verwendung⁷⁹ und werden von der Industrie zu beträchtlichen Teilen und teilweise zum Großteil aus China bezogen. In bestimmten Fällen ist eine Diversifizierung nach Taiwan möglich. Ein Beispiel sind perfluorierte Gase wie z. B. Hexafluoroethan - Halocarbon 116 (C₂F₆), die hierzulande u. a. aus Klima- und Umwelt-erwägungen kaum oder nicht mehr hergestellt werden. Bestimmte Gase, die in der Halbleiterproduktion Verwendung finden, zählen zu den per- und polyfluorierten Chemikalien (PFAS) und könnten zukünftig von den Beschränkungen betroffen sein, die auf EU-Ebene diskutiert werden.⁸⁰

Die Weltmarktführer Merck und BASF nehmen eine bedeutende Rolle bei anderen halbleiterrelevanten Gasen und Chemikalien ein. Ihre Produktionsstandorte beziehen das außereuropäische Ausland, häufig auch China, mit ein.⁸¹ Insofern existieren in dem Feld momentan komplexe wechselseitige Abhängigkeiten und stark auf den Freihandel angewiesene Strukturen. Die heimischen Kapazitäten der energieintensiven Chemieindustrie sind u. a. durch die hohen Energiepreise jedoch langfristig von Abwanderung bedroht, woraus sich erhebliche Lieferkettenrisiken für die Halbleiterindustrie ergeben könnten. Dies betrifft auch den Bereich spezieller Elektronikgase, die vielfach als Nebenprodukt bei der Chemieindustrie abfallen. Experten zufolge ließ sich gerade in diesem Bereich schon in den letzten Jahren eine Abwanderung beobachten.

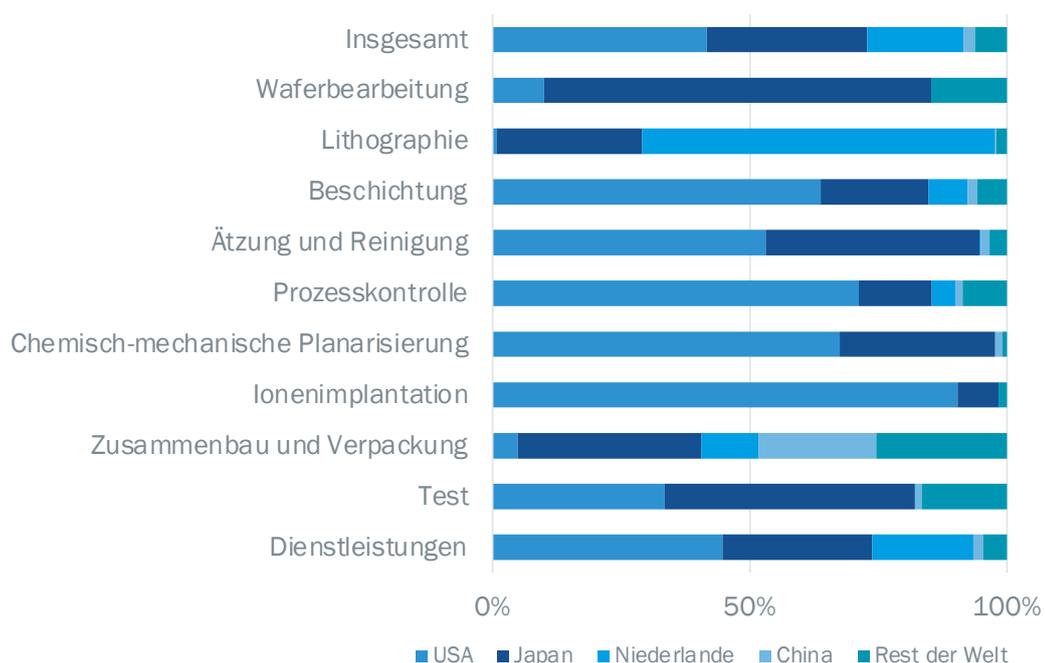
Maschinen & Anlagen

Der Markt für die Maschinen und Anlagen der Halbleiterindustrie besitzt eine Größe von 110 Mrd. US-Dollar. Die Segmente Lithographie, Deposition und Materialentfernung & -säuberung machen davon 70 % aus.⁸² Firmen aus den USA, Japan und den Niederlanden dominieren gemeinsam mit über 90 % Marktanteil den Gesamtmarkt (s. Abbildung 5).

Die einzelnen Segmente zerfallen in feingliedrigere Kategorien, in denen jeweils oft nur einige wenige, teilweise nur ein einziger hochspezialisierter Hersteller aktiv sind. Diese Unternehmen, darunter niederländische und deutsche, US-amerikanische und japanische besetzen teilweise effektiv Flaschenhälse.⁸³ Darunter befinden sich bisher keine aus China, Russland oder anderen autoritären Staaten.⁸⁴ Der Maschinen und Anlagenbau stellt somit ein wichtiges strategisches Faustpfand im globalen Halbleiterwettbewerb dar.

Abbildung 5:

Marktanteile Maschinen zur Halbleiterherstellung 2022 nach Sitz des HQ



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Khan et al. (2021), S. 26.

Am stärksten ist Europa im Bereich Lithographie für den Halbleiterbereich profiliert. Die niederländische Firma ASML ist momentan die einzige Firma weltweit, die Extreme Ultraviolet (EUV) Scanners herstellt. Diese technologisch fortgeschrittenen und teuren Maschinen sind unerlässlich für die Herstellung der modernsten Chips mit den kleinsten Knotengrößen. Auch in anderen Segmenten von Lithographie-Maschinen hat ASML eine sehr starke und teilweise dominante Position mit einem Gesamtanteil von 87 %.⁸⁵ Alle Chiphersteller von Leading-Edge-Chips sind auf Maschinen von ASML angewiesen.

ASML wiederum bezieht selbst Vorleistungen für seine Produktion. Die wichtigsten beiden Zulieferer sind die beiden deutschen Firmen Zeiss und Trumpf. Zeiss stellt hochpräzise Spiegel her und kann für sich in Anspruch nehmen, dass 80 % aller Mikrochips weltweit mit Zeiss Optiken hergestellt werden.⁸⁶ Ähnliches gilt für die EUV-Lasersysteme von Trumpf.⁸⁷

ASML stellt momentan durch seine Monopolstellung einen wichtigen Resilienzfaktor für Europa dar. Andere Länder versuchen Alternativen aufzubauen, haben aber Experten und Expertinnen zufolge einige Jahre technologischen Rückstand zu ASML.⁸⁸ Einen Nachteil für ASML stellt dar, dass sie sich aufgrund US-amerikanischen Drucks teilweise aus dem chinesischen Markt zurückziehen mussten. Dies illustriert, dass Abhängigkeiten auch gegenüber Absatzmärkten bestehen.⁸⁹ Hinzu kommt, dass diese Strategie, China aus dem internationalen Halbleiterwertschöpfungsnetz teilweise auszuschließen, dortige Bemühungen bezüglich der Etablierung eigener Technologien zusätzlich incentiviert.

Herstellung der Halbleiter

Die Investitionssummen in der Chipindustrie können gewaltig sein. Die Kosten für eine einzelne Fab (Produktionsstätte für Halbleiter) übersteigen mittlerweile oft die Summe von 10 Mrd. US-Dollar.⁹⁰ Damit sich solche Investitionen lohnen, müssen diese Fabs mit hoher Auslastung lange Zeit laufen. Aus diesem Grund und wegen der hohen Spezialisierung sowie einer z. T. erratischen Nachfrage werden Mikrochips grundsätzlich für den Weltmarkt produziert. In geringerem Maße gilt dies auch für andere Wertschöpfungsstufen, wie den Maschinen- und Anlagenbau. Daraus ergeben sich Abhängigkeiten für deutsche und europäische Hersteller insbesondere von den beiden größten Absatzmärkten: China und den USA.⁹¹ Der Zugang zu diesen Märkten ist zunehmend durch den eskalierenden Handelskonflikt zwischen China und den USA bedroht. Stimmen aus der Industrie warnen vor einem Szenario, in welchem die USA verbietet, bestimmte Chips nach China auszuführen, die mit US-amerikanischer Technologie oder US-amerikanischen IPs designiert wurden. Auf kurze Sicht wäre es nahezu unmöglich, die Chipproduktion so umzustellen, dass keine US-amerikanische Technologie mehr in einem Chip Verwendung finden würde. Auch eskalierende Handelskonflikte zwischen China und der EU im Zusammenhang mit Wettbewerbspraktiken sind denkbare und risikobehaftete Szenarien, weshalb aus Sicht der Industrie und Politik neben allen Resilienzbestrebungen auch Maßnahmen zum Erhalt des Freihandels zwischen diesen Weltmächten als oberste Priorität zu sehen ist.

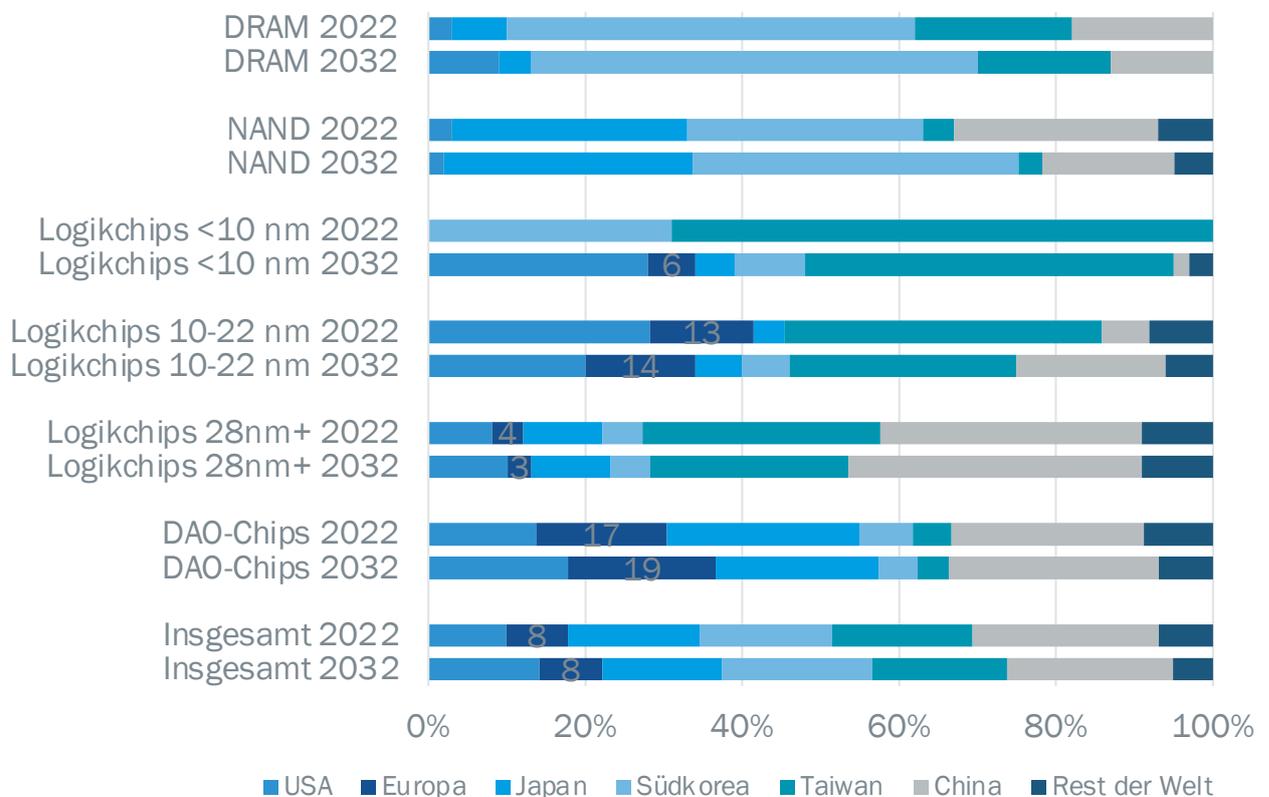
Chips und damit auch die Chipherstellung teilen sich in viele unterschiedlich Kategorien auf. Grob gesprochen lassen sich Chips in drei Kategorien unterteilen: Logic-Chips, Speicherchips und andere Chips. Logic-Chips werden, wie bereits angerissen, weiterhin nach ihren Knotengrößen differenziert. Speicherchips hingegen unterteilen sich nochmal in DRAM (Dynamic Random-Access Memory) Chips und NAND (Not AND) Speicherchips. Sie finden überall dort Verwendung, wo mehr als minimale Datenspeicherung stattfinden muss. Dies betrifft z. B. Smartphones und Laptops, aber auch Server, Automobile, Rechenzentren, Cloud-Computing-Zentren und vieles mehr. Die letzte Chipkategorie heißt DAO (Discrete, Analog, Other) und umfasst eine Vielzahl verschiedener spezialisierter Chips besonders auf dem Feld der Sensorik und Kommunikation.⁹²

Wie Abbildung 6 zeigt, verfügt Europa über alle Chipkategorien hinweg betrachtet mit 8 % der Weltproduktionskapazität⁹³ über eine schwache Position in der Fertigung. Dies gilt insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass Europa ungefähr doppelt so viele Chips verbraucht, wie es herstellt.⁹⁴

Eine Bedarfsdeckung aus eigener Produktion ist momentan nicht möglich. Das Ziel der EU, den Anteil an der Weltproduktion bis 2030 auf 20 % zu steigern, liegt in weiter Ferne und wird einer Prognose von BCG nach nicht erreicht werden. Vielmehr wird von einer Stagnation des Wertes ausgegangen.⁹⁵

Abbildung 6:

Anteile verschiedener Regionen an der globalen Halbleiterfertigungskapazität 2022 und geschätzt 2032



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Jvaradarajan et al. (2024), S. 14.

Betrachtet man einzelne Subkategorien, so werden die europäischen Abhängigkeiten noch deutlicher. Europa verfügt momentan über keinerlei nennenswerte Produktion in den Bereichen Speicherchips und Logic-Chips unter 10 nm. In diesen Kategorien ist man insbesondere von Südkorea und Taiwan abhängig. Der Prognose von BCG zufolge wird sich dies nur in der Kategorie der Logic-Chips unter 10 nm ändern und da diese Prognose den zumindest vorläufigen Stopp der geplanten Fabrik von Intel nicht berücksichtigen konnte,⁹⁶ ist sie höchstwahrscheinlich zu optimistisch. Auch bei den Chips älteren Designs, sogenannten Legacy-Chips, wird Europa voraussichtlich an Marktanteil verlieren und insbesondere China eine zunehmend starke Position einnehmen.

Die bestehenden Produktionskapazitäten in Deutschland und Europa orientieren sich an dem industriellen Bedarf. Branchen wie der Maschinenbau und die Automobilbranche benötigen größtenteils Trailing-Edge-Chips und Chips aus der DAO-Kategorie. In der letztgenannten Kategorie sind europäische und deutsche Unternehmen recht stark aufgestellt mit Firmen, wie z. B. Bosch.⁹⁷ Trotzdem besteht in Europa ein Bedarf an Speicherchips und Leading-Edge-Chips. Dieser Bedarf wird, einer Studie von Kearney zufolge, stark anwachsen, z. B. für Leading-Edge-Chips mit einer Wachstumsrate von 15 %.⁹⁸ Auch bei Speicherchips ist von einem großen Wachstum auszugehen.⁹⁹ Eine Rolle dabei spielt, dass Zukunftstechnologien, wie z. B. KI und autonome Systeme, auf die Verwendung von sowohl DRAM-Chips als auch Leading-Edge-Chips angewiesen sind. Technologiesouveränität in diesen beiden Zukunftsfeldern setzt entsprechend eine sichere Versorgung mit den genannten Chip-Klassen voraus.

Die Produktionskapazitäten für die Chipherstellung in Deutschland und Europa befinden sich momentan im Ausbau mit Milliarden Euro an Investitionen. Alleine die geplante Fab von ESMC wird schätzungsweise über 10 Mrd. Euro kosten.¹⁰⁰ Doch wie die Prognose von BCG zeigt, und Expertenmeinungen bestätigen dies, reicht das gerade aus, um mit dem weltweiten Ausbau der Kapazitäten und dem entsprechenden Wachstum der Nachfrage Schritt zu halten.

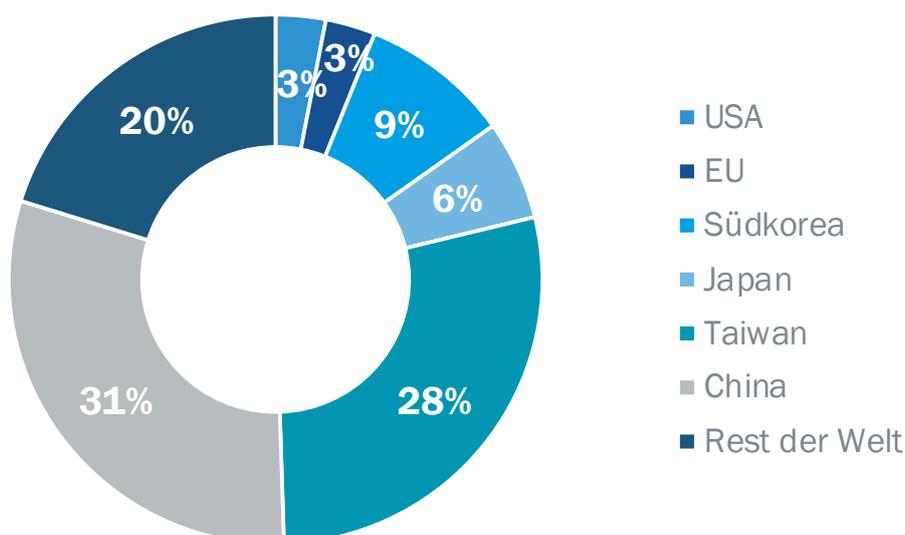
Assembly, Testing, Packaging (ATP)

Das Assembly, Testing, Packaging (ATP) nach der Fertigung von Halbleitern wird sowohl inhouse von Integrated Device Manufacturers (IDMs) betrieben als auch ausgelagert von Outsourced Semiconductor Assembly and Test (OSAT)¹⁰¹ und trägt insgesamt 6 % zur Gesamtwertschöpfung der Halbleiter-Wertschöpfungskette bei.¹⁰² Aufgrund der hohen Arbeitsintensität und der niedrigen Arbeitskosten findet ATP mehr als die anderen Wertschöpfungsschritte zum großen Teil in Ländern im pazifischen Raum statt (s. Abbildung 7).

Je kleiner die Knotengrößen eines Chips sind, desto höher werden die Anforderungen an ATP.¹⁰³ Die erforderlichen Methoden werden als Advanced Packaging bezeichnet und besitzen eine signifikante und wachsende Bedeutung an der Gesamtwertschöpfung.¹⁰⁴ Schätzungen zufolge wird der Markt für Advanced Packaging von 2,42 Mrd. US-Dollar im Jahr 2020 auf 8,69 Mrd. US-Dollar oder gar mehr im Jahr 2026 anwachsen.¹⁰⁵ Während Taiwan und China ihre bereits vorhandenen Stärken in diesem Bereich ausbauen, existieren analoge Bemühungen auch in der EU und insbesondere den USA sowie in Vietnam, Malaysia und Indien. Doch es ist unsicher, ob sie den stark steigenden Bedarf decken werden können.¹⁰⁶ Zudem entscheiden sich momentan einige hiesige Hersteller dazu, Kapazitäten in dem Bereich aus Kostengründen ins Ausland zu verlagern.¹⁰⁷ Zwischen den Wertschöpfungsschritten ATP und Chipdesign existieren Rückkopplungseffekte und Interdependenzen, was die Rolle kritischer Abhängigkeiten von autoritären Staaten beim ATP weiter verschärft. Beides im Entwicklungsprozess zusammenzudenken ist deshalb nutzbringend und kann einen Wettbewerbsvorteil darstellen.¹⁰⁸

Abbildung 7:

Anteile verschiedener Regionen an ATP-Kapazitäten 2022



Quelle: Eigene Darstellung nach Daten von Varadarajan et al. (2024), S. 10.

Wie Abbildung 7 zu entnehmen ist, beherrschen China und Taiwan zusammen knapp 60 % des Marktes. Betrachtet man ausschließlich OSAT, erhöht sich dieser Anteil sogar auf 80 %.¹⁰⁹ Neun der zehn größten Unternehmen in dem Bereich stammen aus China oder Taiwan, eines aus den USA. Neben den in der Grafik namentlich gelisteten Ländern spielen Singapur, Malaysia, Vietnam und die Philippinen eine bedeutende Rolle im ATP-Markt.¹¹⁰ Die Abhängigkeiten von ATP-Kapazitäten in Ostasien sind für europäische und deutsche Firmen momentan erheblich. Ein Ausfall oder eine deutliche Verringerung dieser Kapazitäten könnte Expertenmeinungen zufolge kurzfristig nicht ausgeglichen werden und würde erhebliche Disruptionen nach sich ziehen. Dies gilt umso mehr, je komplexer der Prozessschritt mit Blick auf Advanced Packaging wird.¹¹¹

3

Rahmenbedingungen und Handlungsfelder für den Halbleiterstandort Europa

Geopolitische Risiken, Standortfaktoren und Subventionswettbewerb

Wie in Abschnitt 2 ausgeführt, ist Europa in vielen Bereichen der Halbleiterwertschöpfungskette wesentlich von anderen Regionen, insbesondere Ostasien, abhängig. Die geopolitischen Spannungen in der Taiwanstraße stellen deshalb ein erhebliches Risiko für die europäische Versorgungssicherheit dar. Eine Eskalation des Konflikts zwischen China und Taiwan hätte massive Auswirkungen auf die globale Chipfertigung und Elektronikproduktion.¹¹²

Auf geo- und handelspolitischer Ebene setzt China zudem verstärkt Exportkontrollen für kritische Rohstoffe wie Gallium und Germanium ein. Auch die USA bedienen sich stärkerer Exportkontrollen und Restriktionen, um Chinas Zugang zu kritischen Halbleiter-Technologien zu beschränken. Der wachsende Handelskonflikt zwischen China und den USA belastet die globalen Lieferketten und birgt große Eskalationsrisiken. Dies kann potenziell den Bezug wichtiger Vorleistungen und Vorprodukte sowie fertiger Chips beeinträchtigen und gleichzeitig den Zugang zu den wichtigen Absatzmärkten USA und China erschweren.¹¹³

In Europa bestimmen vor allem wirtschaftliche Standortfaktoren die Attraktivität für den Aufbau von Halbleiterwertschöpfungsketten und -kapazitäten. Stimmen der Industrie zufolge belasten hohe Kosten und der Fachkräftemangel die Unternehmen, langwierige Genehmigungsverfahren und hoher bürokratischer Aufwand beeinträchtigen die Planbarkeit von Investitionen. Die beiden letztgenannten Aspekte gelten insbesondere für Projekte, die außerhalb des gegenwärtigen direkten politischen Interesses stehen, wie z. B. Aktivitäten in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen und solche mit kleinerem Umfang. Strenge Auflagen können z. B. im Chemiebereich dazu führen, dass Produktion hierzulande nicht mehr oder nicht mehr wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Dies betrifft u. a. die Debatte um das Verbot von PFAS-Materialien, die auch in der Halbleiterproduktion Verwendung finden.¹¹⁴ Auf der anderen Seite verfügen Deutschland und die USA über dezidierte Stärken wie u. a. hervorragende Forschungsinstitute und existierende Cluster in dem Bereich.

Die USA, China, Europa und verschiedene anderen Staaten haben industriepolitische Maßnahmen ergriffen, um ihre technologischen Kapazitäten im Bereich Halbleiter zu stärken. Diese Initiativen führen zu erheblichen Wettbewerbsverzerrungen infolge verschiedener Subventionsstrategien, vor allem aber aufgrund erheblicher Unterschiede beim Subventionsvolumen.

Während die USA 52,2 Milliarden USD investieren zuzüglich einer 25-prozentigen Gutschrift auf Investitionskosten und China 142 Milliarden USD für diverse Subventionsinstrumente planen, stellt die EU geplant 47 Milliarden USD bereit.¹¹⁵ Die Zahlen sind dabei nur eingeschränkt miteinander direkt vergleichbar, da jeweils unterschiedliche Konditionen und Rahmenbedingungen herrschen und ergänzende Maßnahmen die Subventionen flankieren.

Um die USA resilienter auf dem Gebiet der Halbleiter zu machen, soll der Chips and Science Act die Entwicklung von Produktionskapazitäten sowie Forschung und Kompetenzaufbau in dem Bereich fördern. Der Chips Act umfasst neben den direkten Zuschüssen steuerliche Anreize und Programme wie den International Technology Security and Innovation Fund (ITSI-Fund), die nicht nur Investitionen und Innovationen in der Halbleiterindustrie incentivieren, sondern auch den strategischen Aufbau unterrepräsentierter Wertschöpfungsebenen (wie z. B. ATP durch den ITSI-Fund) fördern sollen.¹¹⁶

China verfolgt mit dem National Integrated Circuits Industry Development Investment Fund und weiteren staatlichen Planungs- und Subventionsinstrumenten eine mehrphasige Subventionsstrategie. Diese soll die Produktionskapazitäten sowohl von älteren als auch von hochmodernen Chiptechnologien fördern und große Sprünge bei der Etablierung chinesischer Chip-Designs, Core IPs und Ausrüstungen ermöglichen. Zu diesem Zweck werden sowohl staatliches als auch privates Kapital mobilisiert, Talente aus dem Ausland gescoutet und die Nachfrage nach einheimischen Chips gestützt. Auch Steuervorteile für Chiphersteller sind geplant. Eine geplante Förderquote von 20 % würde langfristig Investitionen in Höhe von mindestens 715 Mrd. USD bedeuten. China verfolgt das langfristige Ziel, in allen Wertschöpfungsbereichen technologische Unabhängigkeit und langfristig technologische Führerschaft zu erlangen, um geopolitische Risiken insbesondere aus Richtung der USA zu minimieren.¹¹⁷

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Maßnahmen, die die USA, China und die EU ergriffen haben, um die Halbleiterindustrie im eigenen Land zu stärken. Auch andere Staaten insbesondere Japan (17,5 Mrd. USD), Südkorea (55 Mrd. USD) und Taiwan (16 Mrd. USD) unterstützen die heimische Industrie mit Milliardensummen. In Japan ist ein neues Programm geplant, das die finanziellen Mittel für die Förderung von Halbleitern voraussichtlich deutlich erhöhen wird.¹¹⁸

Tabelle 1:

Vergleich der Maßnahmen und Subventionsprogramme zur Förderung eigener Chipproduktionskapazitäten (USA, China und EU)

Region	Förderprogramme & Maßnahmen	Finanzielle Förderungen	Förderinstrumente	Schwerpunkte & Zielsetzungen
USA	<p>Chips Act (verabschiedet 2022)</p> <p>ITSI-Fund zur Förderung von Assembly, Test und Packaging (ATP)</p> <p>Ergänzende staatliche Programme (z. B. in Colorado, New York, Arizona, Texas, Oregon, Kalifornien)</p>	<p>Gesamtvolumen des Chips Act: ca. 52 Mrd. USD (davon ca. 39 Mrd. USD für Fertigung, 11 Mrd. USD für Forschung & Entwicklung sowie Workforce)</p> <p>25 % Investment Tax Credit (ITC)</p> <p>ITSI-Fund: 500 Mio. USD</p>	<p>Direkte Zuschüsse und Fördergelder</p> <p>Steueranreize (ITC)</p> <p>Staatliche Darlehen und Subventionen auf Bundes- und Länderebene</p>	<p>Ausbau der inländischen Fertigungskapazitäten (insbesondere fortschrittliche Logikchipfertigung)</p> <p>Diversifizierung der globalen Lieferkette</p> <p>Stärkung von F&E und Ausbildung (Workforce Development)</p>
China	<p>National Integrated Circuits Industry Development Investment Fund (National IC Fund) in mehreren Phasen (Phase I, II, III)</p> <p>Lokale Förderprogramme und zusätzliche staatliche Anreize (z. B. vergünstigte Versorgungsleistungen, Steuererleichterungen, kostenfreies Land)</p>	<p>Phase I: ca. 20 Mrd. USD</p> <p>Phase II: ca. 32 Mrd. USD</p> <p>Phase III: geplante Erweiterung (>40 Mrd. USD)</p> <p>Weitere lokale Subventionen</p>	<p>Direkte Subventionen und staatlich gesteuerte Equity-Finanzierung</p> <p>Steuererleichterungen</p> <p>Vergünstigte Infrastrukturmaßnahmen (Land, Versorgungsleistungen)</p>	<p>Ausbau der Fertigungskapazitäten, vor allem im Bereich älterer Technologieknoten (z. B. 28 nm)</p> <p>Förderung des heimischen Designs, Core IP und der Ausrüstung</p> <p>Erreichen einer höheren Selbstversorgung in der Halbleiterindustrie</p>
EU	<p>EU Chips Act (seit 2023 in Kraft)</p> <p>Nationale Förderprogramme in einzelnen Mitgliedstaaten (z. B. Deutschland, Frankreich)</p> <p>Unterstützung über EU-Fonds (Invest EU, Europäische Investitionsbank, Europäischer Innovationsrat)</p>	<p>Mobilisierung von ca. 47 Mrd. USD an öffentlichen und privaten Mitteln</p> <p>Ergänzende nationale Fördermittel, z. B. umfangreiche Zuschusspakete in Deutschland und Frankreich</p>	<p>Direkte Zuschüsse und Fördergelder</p> <p>Steueranreize</p> <p>Investitionsförderung über EU-Finanzierungsinstrumente</p> <p>Staatliche Beihilfen unter Einhaltung der EU-Staatsbeihilfe-Regeln</p>	<p>Erhöhung der inländischen Wafer-Fab-Kapazitäten und Erweiterung der Fertigungsinfrastruktur</p> <p>Stärkung von F&E und Innovationskraft</p> <p>Förderung strukturschwächerer Regionen zur Erzielung einer ausgewogeneren regionalen Entwicklung in der Halbleiterindustrie</p>

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage öffentlich zugänglicher Quellen.

EU Chips Act und europäische Förderprogramme

Der EU Chips Act wurde 2023 verabschiedet und soll die Voraussetzungen schaffen, um den europäischen Anteil an der Halbleiterproduktion bis 2030 auf 20 % zu erhöhen. Er ergänzt bestehende Programme wie Horizon Europe und das Digital Europe Programme. Mit einem Investitionsvolumen von über 43 Milliarden Euro, von denen bisher 32 Mrd. Euro aus öffentlichen Fördermitteln zugesagt sind,¹²⁰ setzt das Programm auf drei zentrale Säulen:

1. „Chips for Europe“-Initiative: Sie unterstützt Unternehmen durch den Zugang zu Designwerkzeugen, Pilotlinien für Prototyping, Tests und Experimente sowie die Entwicklung neuer Zertifizierungsverfahren für energieeffiziente und sichere Chips.¹²¹
2. Förderung öffentlicher und privater Investitionen in Fertigungsanlagen: Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, schafft der Chips Act investorenfreundliche Rahmenbedingungen für den Aufbau von Halbleiterfabriken in Europa. Dabei werden insbesondere „first-of-a-kind“-Fabs unterstützt – also Produktionsanlagen mit neuer, innovativer Technologie. Zusätzlich sollen Start-ups, Scale-ups und KMU gezielt beim Zugang zu Eigenkapitalfinanzierungen gefördert werden, um die Innovationskraft in Europa zu steigern.¹²²
3. Europäischer Halbleiterausschuss und Krisenreaktionsmechanismus: Der Halbleiterausschuss überwacht die Lieferketten, analysiert potenzielle Engpässe und setzt Notfallmaßnahmen um, um auf Störungen schnell reagieren zu können.¹²³

Neben diesen strukturellen Maßnahmen verfolgt der Chips Act weitere strategische Ziele. Dazu gehört die Stärkung der Forschungs- und Innovationskapazitäten in der Halbleitertechnologie, insbesondere im Bereich hochmoderner Chips mit Knotengrößen unter 2 nm. Gleichzeitig soll der Fachkräftemangel durch gezielte Investitionen in Ausbildung, Qualifizierungsprogramme und Talentförderung bekämpft werden. Ein weiteres Ziel ist der Aufbau eines tiefgehenden Verständnisses der globalen Halbleiter-Lieferketten, um potenzielle Risiken frühzeitig zu erkennen und Abhängigkeiten von Drittstaaten zu reduzieren. Dies soll unter anderem durch strategische Partnerschaften mit wichtigen Akteuren der Branche sowie durch eine diversifizierte Rohstoff- und Materialbeschaffung erreicht werden. Durch diese umfassenden Maßnahmen will Europa langfristig seine technologische Souveränität im Halbleitersektor sichern.¹²⁴ Im Rahmen des EU Chips Acts sind bereits Förderungen für eine ganze Reihe von Projekten genehmigt worden, darunter z. B. das Werk von ESMC in Dresden, welches 5 Mrd. Euro Fördergelder und ein Projekt von STMicroelectronics und GlobalFoundries in Crolles in Frankreich, welches Fördergelder in Höhe von 2,9 Mrd. Euro erhält.¹²⁵ Insgesamt bewertet die Industrie den Chips Act positiv, doch beklagt die langsame Umsetzung.¹²⁶

Der EU Chips Act wird begleitet von der Alliance on Processors and Semiconductor Technologies, welche Akteure aus allen Bereichen der genannten Industriezweige zusammenbringen soll, u. a. Unternehmen, Verbände und Forschungseinrichtungen. Zusammen sollen sie Lücken identifizieren hinsichtlich der Produktion und Entwicklung von Mikrochips in der EU.¹²⁷ Die Allianz war bereits 2021 angedacht gewesen, doch der Start verzögerte sich um einige Jahre auf Juli 2024, was von Industrie und Verbänden kritisiert wurde.¹²⁸ Mittlerweile hat sie über 100 Mitglieder und im Dezember 2024 wurden ihre ersten drei, mittlerweile sind es vier, strategischen Arbeitsgruppen vorgestellt. Eine dieser Arbeitsgruppen beschäftigt sich mit Lieferketten, welche diesbezüglichen Risiken bestehen und wie sie sich potenziell beseitigen lassen. Daneben existiert seit 2023 auch die European Semiconductor Regions Alliance, welche mehr als 30 Regionen in der EU auf dem Gebiet der Halbleiterindustrie vernetzen soll.¹²⁹

Ein wichtiger Baustein für die Umsetzung des EU Chips Act sind die Important Projects of Common European Interest (IPCEI), speziell der 2023 aufgelegte IPCEI Mikroelektronik und Kommunikationstechnologien. Mit dem Programm können FuE-Projekte, Industrieaufbau und Infrastrukturvorhaben, die einen Beitrag zur Stärkung der technologischen Souveränität Europas leisten, von den 14 Trägerstaaten mit bis zu 8,1 Mrd. Euro gefördert werden, was planmäßig weitere 13,7 Mrd. Euro privater Investitionen mobilisieren soll. Im Moment werden 68 Projekte von 56 Firmen gefördert.¹³⁰ Seit 2018 arbeiteten 32 europäische Unternehmen – davon 18 aus Deutschland – im Rahmen dieses IPCEI an der Entwicklung energieeffizienter Mikrochips und innovativer Bauelemente, dem Errichten neuer Produktionsanlagen sowie der Inbetriebnahme ganzer Chipfabriken.¹³¹

Eine Studie vom ZVEI beurteilt die bisherige Förderung im Bereich Mikroelektronik positiv und kommt zu dem Ergebnis, dass Förderung in dem Bereich außerordentlich gute Ergebnisse erzielen kann mit einem an Steuereinnahmen gemessenen jährlichen Return of Investment von 30 bis 40 % nach Vervollständigung der Projekte.¹³² Hinzu kommen weitere positive Effekte u. a. auf dem Gebiet der Resilienz. Zu beachten ist, dass solch positive Ergebnisse nur dann zu erwarten sind, wenn sich kein Angebotsüberhang bildet, was historisch betrachtet in der sehr zyklischen Halbleiterindustrie vorkam.

Stimmen aus der Halbleiterindustrie beurteilen die Förderlandschaft in Deutschland und der EU insgesamt als positiv, doch bemängeln unter Resilienzgesichtspunkten, dass insbesondere die IPCEI-Förderung zu stark auf Zukunftstechnologien und Innovationen ausgerichtet sei, während u. a. die Rückverlagerung (Reshoring) von Fertigungskapazitäten auf anderen Wertschöpfungsebenen wie der Materialverarbeitung und -herstellung weniger im Fokus stehe. Darüber hinaus wird die Förderung als übermäßig bürokratisch wahrgenommen. Die aus Sicht der Industrie lange Bewilligungszeiten entsprechen nicht den kurzen Innovationszyklen der Halbleiterindustrie. Die Förderbedingungen lassen nur enge Gestaltungsspielräume zu und bergen das Risiko von Rückforderungen, wenn Meilensteine nicht erreicht werden. Dies wiederum nötigt Unternehmen, hohe Rücklagen vorzuhalten. Experten und Expertinnen kritisieren darüber hinaus, dass trotz des 2023 geschaffenen Rechtsrahmens, Fördermittel – im Rahmen der IPCEI aber auch anderweitig – nur schleppend bewilligt und ausgezahlt würden. Fehlendes technisches Fachwissen und Personalknappheit werden als mögliche Ursachen genannt.¹³³ Die restriktiven Beihilfe- und Transparenzvorschriften lassen offenkundig weniger Handlungsspielräume zu als entsprechende Programme in China oder den USA.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die übermäßige Fokussierung des Chips Act auf den Bau innovativer Fertigungsanlagen. Vor- und nachgelagerte essenzielle Bereiche der Wertschöpfungskette werden bislang wenig berücksichtigt. Dazu zählen insbesondere Packaging, Materialversorgung und chemische Prozessschritte, aber auch bestimmte Bereiche des Chip-Designs.

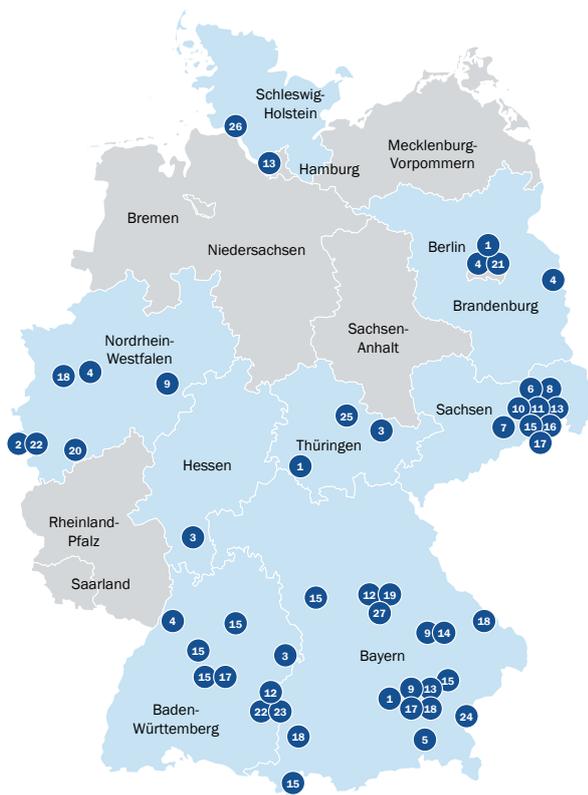
In der Beurteilung der europäischen Halbleiterstrategie insgesamt wird von Experten und Expertinnen ein Mangel an einheitlichen, klaren und realistischen Leitbildern konstatiert.¹³⁴ Eine zentrale Herausforderung besteht diesbezüglich darin, Prioritäten zu setzen und gleichzeitig eine ausgewogene Strategie zu entwickeln, die neben der Förderung hochmoderner Technologien auch bestehende industrielle Stärken wie die Mainstream-Chiptechnologien einbezieht.

Nationale Strategien und Investitionsprojekte

Die große Bedeutung des Themas Halbleiter ist auf Bundesebene erkannt und umfangreiche Maßnahmen werden bereits unternommen oder sind geplant, um Deutschlands Position in diesem Feld zu verbessern.¹³⁵ Eine Halbleiter-Strategie befindet sich in Entwicklung und wird, so hoffen Experten und Expertinnen der Industrie, eine strategische Vision und klar formulierte Ziele einschließlich einer technologischen Priorisierung definieren, diese mit geeigneten Maßnahmen unterlegen und dadurch Investitionssicherheit herstellen und damit die Weichenstellungen tätigen, die für den Ausbau einer resilienten Chipindustrie in Deutschland notwendig sind.

Abbildung 8:

Deutsche Teilnehmende am IPCEI ME/KT



1. **Adtran Networks SE** (Berlin; Martinsried, Bayern; Meiningen, Thüringen)
2. **Black Semiconductor** (Aachen, Nordrhein-Westfalen)
3. **Carl Zeiss SMIT** (Oberkochen, Baden-Württemberg; Roßdorf, Hessen; Jena, Thüringen)
4. **Elmos Semiconductor** (Bruchsal, Baden-Württemberg; Berlin; Frankfurt/Oder, Brandenburg; Dortmund, Nordrhein-Westfalen)
5. **Ericsson Antenna Technology Germany** (Rosenheim, Bayern)
6. **Ferroelectric Memory** (Dresden, Sachsen)
7. **Freiberger Compound Materials** (Freiberg, Sachsen)
8. **GlobalFoundries Dresden Module One** (Dresden, Sachsen)
9. **Infineon Technologies** (München, Bayern; Regensburg, Bayern; Warstein, Nordrhein-Westfalen)
10. **Infineon Technologies Dresden** (Dresden, Sachsen)
11. **Silitetra** (Dresden, Sachsen)
12. **Nokia Solutions and Networks** (Ulm, Baden-Württemberg; Nürnberg, Bayern)
13. **NXP Semiconductors Germany** (München, Bayern; Dresden, Sachsen; Hamburg)
14. **ams-OSRAM International** (Regensburg, Bayern)
15. **Robert Bosch** (Abstatt, Baden-Württemberg; Leonberg Baden-Württemberg; Reutlingen Baden-Württemberg; Blaichach, Bayern; Ansbach, Bayern; München, Bayern; Dresden, Sachsen)
16. **Robert Bosch SMD** (Dresden, Sachsen)
17. **Bosch Sensortec** (Reutlingen, Baden-Württemberg; München, Bayern; Duisburg, Nordrhein-Westfalen)
18. **Rohde & Schwarz** (Memmingen, Bayern; München, Bayern; Teisnach, Bayern; Duisburg, Nordrhein-Westfalen)
19. **SEMIKRON Elektronik** (Nürnberg, Bayern)
20. **SGL Carbon** (Bonn, Nordrhein-Westfalen)
21. **Swissbit Germany** (Berlin)
22. **Trumpf Photonic Components** (Ulm, Baden-Württemberg; Aachen, Nordrhein-Westfalen)
23. **United Monolithic Semiconductors** (Ulm, Baden-Württemberg)
24. **Wacker Chemie** (Burghausen, Bayern)
25. **X-FAB MEMS Foundry** (Erfurt, Thüringen)
26. **X-FAB MEMS Foundry Itzehoe** (Itzehoe, Schleswig-Holstein)
27. **ZF NewCo IV** (Nürnberg Bayern)

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von BMWK (2024a).

Das erste IPCEI Mikroelektronik hat demonstriert, dass die Förderung im Bereich Halbleiter in Deutschland effektiv ist. Das Programm trug wesentlich dazu bei, vier neu aufgebaute oder erweiterte Chipfabriken – unter anderem bei Bosch, Infineon und GlobalFoundries in Dresden sowie ams OSRAM in Regensburg – sowie eine hochspezialisierte Fertigungsanlage für optische Komponenten von ZEISS in Oberkochen und ein spezialisiertes Labor von AP&S in Donaueschingen zu realisieren. Neben den rund 2.400 geschaffenen Arbeitsplätzen wurden mehr als 500 Patente angemeldet und die Forschungsergebnisse in über 40 Publikationen und 100 Abschlussarbeiten dokumentiert.¹³⁶

Auf nationaler Ebene investiert der deutsche Staat weiterhin großvolumig in Halbleiter. U. a. im Rahmen des erwähnten IPCEI Mikroelektronik und Kommunikationstechnologien werden von Bund und Ländern etwa 4 Mrd. Euro in eine Reihe von Projekten der Halbleiterindustrie investiert (siehe Abbildung 8).¹³⁷ Hinzu kommt weitere Förderung z. B. im Rahmen der Forschungs- und Strukturförderung von Bund und Ländern. Im Portfolio finden sich beispielsweise die ESMC-Fabrik in Dresden sowie die Intel-Fabrik in Magdeburg – letzteres Projekt wurde allerdings aufgrund firmenseitiger Finanzierungsprobleme zunächst für zwei Jahre, aber mit ungewisser Zukunft verschoben.¹³⁸ Neue Investitionen in Höhe von ungefähr 2 Mrd. Euro sind in Planung.¹³⁹

Einige Stimmen aus der Industrie kritisieren die Förderung und Ansiedlung außereuropäischer Konzerne als lediglich zweitbeste Lösung hinter der Ertüchtigung deutscher oder europäischer Unternehmen. Es bestehe das Risiko, dass außereuropäische Konzerne – und der Fall von Intel scheint dies zu bestätigen – im Zweifel nicht ihre europäischen, sondern andere Standorte priorisieren würden.¹⁴⁰

Auf nationaler Ebene werden ähnliche administrative und strategische Herausforderungen kritisiert wie auf europäischer Ebene. Fachleute weisen darauf hin, dass Fördermittel oft nur zögerlich fließen und langwierige Bewilligungs- und Genehmigungsprozesse die Umsetzung von Projekten verzögern. Dies treffe gerade auch auf den notwendigen Ausbau von Kapazitäten auf vorgelagerten Wertschöpfungsschritten wie in der chemischen Industrie und der Materialherstellung zu. Auch hier scheinen personelle Engpässe in den zuständigen Verwaltungseinheiten ein Erklärungsansatz zu sein.¹⁴¹

Den Erfolgen der deutschen Förderung für Halbleiterprojekte stehen einige prominente Fehlschläge gegenüber wie die zumindest vorerst gescheiterte Intel-Fabrik, aber auch die geplante Siliciumkarbid-Chipproduktion von Wolfspeed im Saarland.¹⁴² Es mehren sich deshalb die skeptischen Stimmen gegenüber der gegenwärtigen Standortpolitik. Als längerfristig ausgerichtete Alternative wird ins Spiel gebracht, verstärkt und konsequent Zukunftstechnologien im Bereich Chips zu fördern, um sich einen Wettbewerbsvorteil in der zukünftigen Chipproduktion zu sichern. Genannt werden in diesem Zusammenhang vor allem Quantencomputing und Neuromorphes Computing.¹⁴³ Schon momentan fördert der Staat Forschung im Bereich Halbleiter, z. B. im Rahmen von ‚Gemeinsames Unternehmen Chips‘.¹⁴⁴ Ein weiteres Gestaltungsfeld bietet die Beschaffungspolitik, mit der sich der Staat ggf. als Pilotanwender profilieren kann.¹⁴⁵



Silicon Saxony

Silicon Saxony ist ein 2000 gegründetes, privat finanziertes High-Tech-Netzwerk in Dresden mit ungefähr 600 Mitgliedern. Es bringt verschiedene Firmen aus der Halbleiter-Industrie, Forschungseinrichtungen und öffentliche Institutionen zusammen mit dem Ziel, den Halbleiterstandort in Sachsen zu stärken. Erfolgreich in der Ansiedlung von Fabs wie momentan von ESMC zeigt Silicon Saxony, wie Clustereffekte genutzt werden können, um ausländische Arbeitskräfte und FDI anzuziehen.

Neben der direkten Förderung von Forschung und Entwicklung sowie Produktionskapazitäten existieren auf nationaler Ebene weitere Möglichkeiten, die Halbleiterindustrie und ihre Resilienz zu stärken, indem Rahmenbedingungen verbessert werden. Dies betrifft nicht nur die erwähnten bürokratischen Regelungen zu Genehmigungen und Antragstellungen, sondern auch der bedarfsgerechte Ausbau von Infrastruktur und die Gewinnung und den Erhalt von Fachkräften, was vor allem langfristig ein entscheidender Faktor sein wird. Die genannten Aufgaben fallen dabei nicht nur in den Verantwortungsbereich des Bundes, sondern auch in das der Länder und Kommunen.¹⁴⁶

Rohstoffsicherung, Recycling und internationale Kooperationen

Der Critical Raw Materials Act (CRMA) zielt darauf ab, die Versorgung mit essenziellen Rohstoffen u. a. für die Produktion von Halbleitern sicherzustellen. Dies betrifft beispielsweise Seltene Erden, Gallium, Germanium und Siliciumkarbid, bei denen kritische Abhängigkeiten aus China existieren. Zu diesem Zweck wird regelmäßig geprüft, welche Rohstoffe große Relevanz für die europäische Wirtschaft haben und gleichzeitig von fragilen Lieferketten abhängen.¹⁴⁷ Der CRMA ist Teil einer umfassenderen Strategie zur Reduzierung von Importabhängigkeit, wozu auch Rohstoffpartnerschaften gehören, die auf EU- und Bundesebene verfolgt werden. Solche Partnerschaften können wesentlich dazu beitragen, Investitionen in Rohstoffprojekte zu befördern und mittelbar Diversifikationsmöglichkeiten zu eröffnen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über Länder, die über signifikante Förderung relevanter Rohstoffe verfügen (vgl. auch den Abschnitt zu Rohstoffförderung und -verarbeitung). Norwegen, Kanada und Australien gelten als verlässliche und stabile Handelspartner. U. a. mit Australien und Kanada bestehen bereits Abkommen auf EU-Ebene.¹⁴⁸

Tabelle 2: Mögliche Zielländer für Rohstoffpartnerschaften

Rohstoff	Mögliche Partnerländer
Gallium	Australien, Guinea
Germanium	Australien, Indien, Mexiko, Peru, USA
Palladium	Kanada, Südafrika, USA, Zimbabwe
Silicium	Brasilien, Norwegen, USA

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Grundlage von Expertenmeinungen, Berg et al. (2024), USGS.

Die Minerals Security Partnership und das Minerals Security Partnership Forum sind multinationale Plattformen, die zum Ziel haben, Rohstoffprojekte voranzutreiben, um die Versorgung mit kritischen Rohstoffen unter Einhaltung von Nachhaltigkeits- und anderer Standards zu verbessern.¹⁴⁹ Kürzlich wurde in diesem Rahmen eine Vereinbarung zwischen Umicore in Belgien und STL in der DR Kongo zum Abbau und zur Verarbeitung von Germanium geschlossen.¹⁵⁰

Ein weiteres vielversprechendes Instrument, um Rohstoffprojekte zu fördern und dadurch die Resilienz zu steigern, sind Rohstofffonds, mit denen Staaten Rohstoffprojekte unterstützen können, insbesondere in den risikoreichen frühen Phasen. Deutschlands 2024 gestarteter Rohstofffonds mit einem Gesamtvolumen von etwa einer Mrd. Euro soll deutsche Unternehmen dazu ertüchtigen, sich wieder mehr in Rohstoffprojekten im Ausland zu engagieren.¹⁵¹

Insgesamt bleibt die Wirksamkeit des CRMA bisher aufgrund mangelnder Unterstützungs- und Umsetzungsmaßnahmen begrenzt. Kritisiert wird u. a. das Fehlen verbindlicher Recyclingquoten, wodurch der Ausbau der Kreislaufwirtschaft nur schleppend vorankommt. Gerade für die Halbleiterindustrie könnte ein effektiveres Recycling einen Resilienzbeitrag leisten, da Rohstoffe wie Gallium oder Germanium nur in geringen Mengen verfügbar sind und ihre Gewinnung umwelt- und energieintensiv ist.

Auch abseits der Rohstoffebene können neue und tiefere internationale Partnerschaften auf dem Gebiet der Halbleiter wesentlich zur Resilienzsteigerung beitragen. Engere Partnerschaften inkl. Handels- und Investitionsabkommen mit Taiwan und Südkorea könnten Lieferketten zu diesen unverzichtbaren Bezugsländern stabiler und wirtschaftlicher gestalten. Ähnliches gilt für Japan in Bezug auf bestimmte Vormaterialien, Anlagen und Geräte. Auch Technologietransfer kann über internationale Partnerschaften vorangetrieben werden – Taiwan und Südkorea verfügen mit TSMC respektiv Samsung und SK Hynix über die fortschrittlichsten Unternehmen im Bereich der Chipproduktion. Die Ansiedlung von ESMC könnte in diesem Sinne einen wertvollen Beitrag zum Aufbau von Know-how leisten. Auch die USA und China sind als größte Absatzmärkte und unverzichtbare Vorleister sowie Rohstoff- und Vorproduktlieferanten momentan unabdingbare Handelspartner für die deutsche und europäische Halbleiterindustrie. Einschränkung der Handelsbeziehungen mit diesen Staaten würden mit äußerst gravierenden Folgen für die hiesige Chipindustrie einhergehen.¹⁵²

4

Industrielle Strategien zur Steigerung der Resilienz

Die im Folgenden geschilderten Strategien und Maßnahmen finden allesamt Anwendung bei den Unternehmen des Halbleitersektors, sie sind jedoch nicht immer flächendeckend etabliert.

Risikomanagement und Lieferkettenmonitoring

Insbesondere große Unternehmen, die die nötigen Ressourcen haben, betreiben bereits umfangreiches Risikomanagement.¹⁵³ ASML z. B. verfügt über eine ausdifferenzierte Struktur zum Identifizieren und Managen von Risiken u. a. mit einem Corporate Risk Committee und regelmäßigen Risk Reviews.¹⁵⁴ Geopolitische Risiken, die aus dem Konflikt zwischen China und den USA erwachsen, sind in der Industrie wohlbekannt und unterliegen einem kontinuierlichen Monitoring.¹⁵⁵ Lieferketten und zunehmende Versorgungsrisiken werden somit von den großen Chipherstellern als Managementaufgaben wahrgenommen. Infineon beispielsweise hat für den Geschäftsbericht 2024 seine Einschätzung eines Einkaufs-/Logistik-Risikos von „signifikant“ auf „groß“ erhöht und ergreift entsprechende Maßnahmen.¹⁵⁶ Ein Bewusstsein für die aus Abhängigkeiten erwachsenen Risiken und ihre Abschätzung sowie das Entwickeln von Resilienzstrategien sind ein erster Schritt hin zu mehr Resilienz. Dazu gehört in der Industrie auch, sich möglichst akkurate Informationen zu beschaffen über den gegenwärtigen Stand der eigenen Lieferketten, mögliche Handlungsalternativen und Prognosen für die künftige Entwicklungen. Dies erlaubt das proaktive Management von Risiken durch z. B. frühzeitige Diversifizierung und flexibles Lagermanagement.¹⁵⁷ Die asymmetrischen und teilweise mono- und oligopolistischen Marktverhältnisse sowie der außergewöhnlich hohe Preisdruck im Halbleiterbereich setzen den Resilienz-Bestrebungen der Unternehmen oft enge Grenzen. Teilweise ist es schlicht nicht möglich oder zumindest nicht wirtschaftlich möglich, sich gegen einseitige Abhängigkeiten und Resilienzrisiken umfassend abzusichern. Die hohe Fragmentierung und Spezialisierung der Chipindustrie gekoppelt mit einer überschaubaren Anzahl von Anbietern in spezifischen Segmenten machen das äußerst schwierig und aufwendig.

Vertikale Integration in die Halbleiterwertschöpfungskette

Im Gegensatz zu anderen Industrien (z.B. Batterie) ist die vertikale Integration im Halbleitersektor begrenzt. Die extrem hohe Komplexität, die engen Kostenstrukturen und die enormen Investitionssummen verhindern, dass große Abnehmer von Chips hierzulande wie z. B. Automobilhersteller direkt in eine eigene Chipproduktion einsteigen. Auch Chiphersteller selbst sind wenig rückwärtsintegriert in ihre Wertschöpfungsketten. Zwar vereinigen manche Hersteller Design und Produktion ihrer Chips unter einem Dach und manchmal auch ATP, doch in der Herstellung der Rohwafer oder im Maschinen- und Anlagenbau sind hiesige Chiphersteller nicht aktiv, von der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung ganz zu schweigen. Hinzu kommt, dass auch vertikale Integration bestimmte Resilienzrisiken nicht ausräumt, wenn nämlich z. B. Produktionsstandorte in Staaten und Regionen liegen, die von geopolitischen Konflikten betroffen werden könnten.

Die Rückwärtsintegration in der Halbleiterwertschöpfungskette spielt eher auf den Rohstoffebenen und teilweise im Maschinen- und Anlagenbau eine Rolle. Wacker Chemie beispielsweise kann seinen Silicumbedarf teilweise aus einem eigenen Werk in Norwegen decken.¹⁵⁸ Dies betrifft allerdings Abhängigkeiten, die ohnehin nicht von bedeutenden Resilienzrisiken betroffen sind.

Diversifizierung und Lieferantenmanagement auf den Absatz- und Beschaffungsmärkten

Die wichtigste Strategie zum Verringern von Abhängigkeiten ist die Diversifizierung sowohl von Lieferanten als auch von Absatzmärkten. Alle größeren Unternehmen und viele kleinere bemühen sich aktiv auf diesen Feldern. Stimmen aus der Industrie bestätigen, dass Chip-Hersteller Multi-sourcing- und Multicountrysourcing-Strategien betreiben, wo dies möglich ist.¹⁵⁹ Auch die Regionalisierung von Wertschöpfungsketten (local for local) wird teilweise verfolgt – insbesondere dort, wo es um größere Mengen geht, die mit entsprechenden Transportkosten verknüpft sind. Selbst die Diversifizierung eines kleineren Anteils des eigenen Bedarfs kann sinnvoll sein, weil es durch Ertüchtigung von alternativen Zulieferern, Aufbauen von Know how und Beziehungen Handlungsoptionen für die Zukunft eröffnet.

Gespräche mit Experten und Expertinnen aus der Industrie zeigten, dass sowohl Chiphersteller als auch Chipabnehmer bei der Diversifizierung vor allem auf ihre direkten Zulieferer blicken und in ihren Bemühungen nicht tiefer in die Wertschöpfungsketten vordringen. Dies birgt offensichtliche Risiken, weil Diversifizierung auf einer Ebene nicht ausreicht, um Resilienz zu gewährleisten. Die enorme Komplexität der Lieferketten im Bereich Halbleiter macht es außerordentlich schwierig und aufwendig, eine umfassende Transparenz in den Lieferketten herzustellen. Selbst für größere Unternehmen ist dies oft nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Sie verfügen aufgrund ihrer Marktmacht jedoch über Möglichkeiten, Zulieferern bestimmte Vorgaben bezüglich der Offenlegung und auch Diversifizierung ihrer Zulieferer zu machen. Mit der steigenden Aufmerksamkeit, die das Thema Resilienz erfährt, werden auch diese Instrumente mehr genutzt werden.

In vielen einzelnen Bereichen ist eine Diversifizierung von Zulieferern aufgrund der Marktsituation sowie den damit verbundenen z. T. hohen Kosten schwierig oder unmöglich.

Deshalb fokussieren Unternehmen ihre Diversifizierungsbemühungen zumeist dort, wo ein wichtiges Gut aus risikoreichen Quellen bezogen wird und eine Diversifizierung mit verhältnismäßigen Kosten gelingen kann. Dies kann bedeuten, an europäischen Zulieferern zumindest teilweise festzuhalten, auch wenn andere günstiger wären, v. a. im Rohstoff- und Materialbereich z. B. bei Siliciumkarbid und hochreinen Säuren. In den Bereichen EDA und Core IP ist zumindest kurzfristig eine Diversifizierung schwierig, doch auch hier können teilweise europäische Anbieter und Open Source-Lösungen einen Resilienzbeitrag leisten. Bei Speicherchips und Leading-Edge-Chips sowie spezifischen Rohstoffen wie Seltene Erden, Gallium und Germanium ist eine Diversifizierung nur sehr begrenzt möglich. Ebenfalls betroffen, wenn auch weniger kritisch sind Abhängigkeiten von Japan bei spezifischen Materialien wie Fotolacken und von den USA bei bestimmten Arten von Maschinen.

Inwieweit Diversifizierung gelingt, hängt auch maßgeblich davon ab, was die Kunden der Halbleiterindustrie bereit sind, für Resilienz zu zahlen bzw. was sie diesbezüglich an Maßnahmen und Transparenz fordern. Die wachsende Bedeutung des Themas wird laut Stimmen aus der Industrie hier voraussichtlich Spielräume eröffnen.

Zur Stärkung der Resilienz ist auch die Diversifizierung von Absatzmärkten wichtig. Dies kann prinzipiell sowohl geographisch geschehen, indem unterschiedliche Länder und Regionen beliefert werden, als auch technologisch, indem unterschiedliche Branchen und Märkte beliefert werden. Beide Strategien werden von Chipherstellern verfolgt, dabei sehen sie sich jedoch verschiedenen Hürden gegenüber. Geographisch wird ohnehin für den Weltmarkt produziert. Hier bedeutet die starke Nachfrage von den USA und China, dass die Sicherung des freien Zugangs zu diesen Märkten von entscheidender Bedeutung ist.

Für Unternehmen ist es essenziell, gute und stabile Beziehungen zu Lieferanten wie Abnehmern zu pflegen, um ggf. gegen Disruptionen gewappnet zu sein.¹⁶⁰ Langfristige Lieferverträge können zu der Stabilität dieser Beziehungen beitragen. Darüberhinausgehend unterstützen einige der großen Chiphersteller Unternehmen in ihrer Supply Chain aktiv darin, Produktionskapazitäten auf- und auszubauen z. B. durch das Herstellen von Verbindungen zu Investoren und Förderern.

Lagermanagement der Halbleiterindustrie

Eine Lagerhaltung kann kurzfristige Lieferausfälle und Preissteigerungen kompensieren, doch ist sie nicht geeignet, langfristige Disruptionen der Lieferketten aufzufangen. Gerade in der Chipindustrie, in der in vielen Fällen kleine Mengen verarbeitet werden und große Preisschwankungen auftreten, kann ein vorausschauendes und flexibles Lagermanagement gewinnbringend sein. Für die großen Hersteller stellt es deshalb eine Selbstverständlichkeit dar, insbesondere für gut lagerbare Rohstoffe und Materialien mit großen Angebotsschwankungen wie z. B. Helium.¹⁶¹ Die Pandemie-Erfahrungen stärkten die Tendenz zur Lagerhaltung. Entsprechend werden Rohstoffe, die besonders von Lieferkettenunterbrechungen betroffen sein könnten, wie z. B. Gallium, verstärkt gelagert.¹⁶² Fertige Chips können ebenfalls gelagert werden,¹⁶³ doch stellen sie erhebliche Summen an gebundenem Kapital dar, weshalb es in größerem Stil derzeit nicht üblich ist. Hiesige Chiphersteller besitzen momentan Lagerbestände, die sie finanziell belasten.¹⁶⁴ Chinesische Firmen haben angesichts zunehmender Sanktionen in den vergangenen Jahren flankiert durch staatliche Unterstützung erhebliche Mengen von Halbleitermaterialien, Maschinen und Anlagen sowie Chips gelagert.¹⁶⁵ Ein geschicktes Lagermanagement verbunden mit einem möglichst akkuraten Supply & Demand-Forecast kann jedoch auch hier Resilienz stärken.¹⁶⁶

Materialeffizienz & Recycling

Das End-of-Life-Recycling von Chips birgt großes Potenzial und wird in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen. Es ist momentan Gegenstand intensiver Forschungsanstrengungen, wird aber zumindest kurzfristig keinen großen Resilienzbeitrag leisten können. Um End-of-Life-Recycling gelingen zu lassen, müssen Zirkularität beim Design der Chips mitgedacht, kosteneffiziente Recyclingmethoden entwickelt und eine Recyclinginfrastruktur aufgebaut werden.¹⁶⁷

Im Gegensatz zum End-of-Life-Recycling spielt Recycling im Produktionsprozess bereits eine große Rolle. Bereits seit Jahren existieren Bemühungen bei großen Chipherstellern wie Intel Produktionsabfälle zu recyceln. Dies erhöht die Umweltverträglichkeit der Produktion durch verringerten Materialverbrauch. Dies betrifft vor allem Prozesschemikalien wie z. B. Flusssäure und Schwefelsäure, aber auch z. B. Siliciumwaferabfälle.¹⁶⁸ Die Gewinnung von hochreinem Gallium aus Recycling von Neuschrott, das bereits in einigen Ländern auch in Europa stattfindet, ist ein Beispiel, wie seltene und von Abhängigkeiten betroffene Materialien teilweise abgesichert werden können.¹⁶⁹

5

Handlungsempfehlungen zur Stärkung der Halbleiterindustrie in Deutschland und Europa

Einheitliche Strategieentwicklung über nationale und europäische Ebenen hinweg

Notwendigkeit einer koordinierenden Strategie, die über die nationalen und europäischen Ebenen mit geeigneten Maßnahmen wirkt.

Verbesserung der strategischen Ausrichtung des EU Chips Act, um neben der Halbleiterfertigung auch EDA und ATP sowie die Halbleitermaterialien zu adressieren.

Es bedarf einer koordinierten Strategie, um die Resilienz im Bereich Halbleiter auf mehreren Ebenen mit einheitlichen Zielen und geeigneten Maßnahmen voranzutreiben. Die kommende Bundesstrategie Halbleiter soll einen wichtigen Schritt in diese Richtung darstellen. Der Fokus im EU Chips Act liegt stark auf dem Wertschöpfungsschritt der Chipproduktion, während andere essenzielle Schritte wie EDA und ATP eine geringere Aufmerksamkeit erfahren. Auch geht es in der gegenwärtigen Situation nicht nur darum, bestehende Defizite auszugleichen oder aufkeimende Stärken auszubauen, sondern zukünftige Probleme zu antizipieren, wie z. B. das Abwandern von Unternehmen der Chemieindustrie. Die Stärken im Bereich Maschinen- und Anlagenbau sollten dezidiert in den Blick genommen, systematisch evaluiert und strategischer gefördert werden, um den daraus erwachsenen Resilienzvorteil zu erhalten. Die Strategie sollte langfristige Investitionssicherheit für den Aufbau von Kapazitäten auf allen Wertschöpfungsstufen unterstützen, realistische Ziele definieren sowie von bedarfsorientierten und finanziell entsprechend ausgestatteten Unterstützungsmaßnahmen begleitet werden. Essenziell ist dabei Regulierungsfragen aufzunehmen und hierbei weitere Politikbereiche, wie z. B. Chemikalienpolitik und Nachhaltigkeitsziele zu koordinieren. Der Koordinationsanspruch sollte sich auf die Abstimmung der verschiedenen Fördermaßnahmen erstrecken und dabei auch das weitere Mikroelektronik-Ökosystem im Blick haben, in welches sich die Halbleiterindustrie einbettet.

Europa wird sich dem internationalen Subventionswettbewerb nicht entziehen können und sollte hier stärker die Nutzung steuerpolitischer Instrumente, die sich international bewährt haben, prüfen. Dazu zählen z. B. Steuergutschriften für Investitionsvorhaben in der Halbleiterwertschöpfungskette.

Aufbau strategischer Kapazitäten in Prioritätsfeldern und Unterstützung europäischer Stärken

Förderung und Aufbau von Kapazitäten in priorisierten Schlüsselfeldern.
Unterstützung heimischer Stärken.

Mehr als andere Branchen stellt die Halbleiterindustrie als global vernetzte, feingliedrige Industrie mit vielen Flaschenhälsen die Frage, was Resilienz in diesem Kontext bedeuten kann. Eine Wertschöpfungskette vollständig in Deutschland oder Europa (local for local) abzubilden ist vor dem Hintergrund der globalen Verflechtungen der Industrie und den bestehenden Rahmenbedingungen nicht realistisch. Stattdessen sollte der Fokus darauf liegen, an den Bedarfen der Schlüsselindustrien orientierte strategische Kapazitäten in Europa aufzubauen und zu halten und sich gleichzeitig um internationale Kooperation und Stabilität zu bemühen. Zu priorisierende Schlüsselfelder sind in diesem Zusammenhang sowohl die Chipproduktion im Trailing-Edge-Bereich sowie im Leading-Edge-Bereich, wobei ersterem die größere Bedeutung zukommt. Wichtig ist es in diesem Zusammenhang, Anwenderbedarfe aus der Wirtschaft möglichst gut zu erfassen und zu antizipieren sowie sicherheitspolitisch relevante Bedarfe abzuschätzen z. B. im Verteidigungs- und Infrastrukturbereich. Neben der Förderung der Chipproduktion, wie sie im Rahmen des EU Chips Acts bereits besteht, sollten verstärkt und gezielt die Bereiche EDA und IP, Materialherstellung u.a. in den Bereichen hochreiner Säuren und Gase sowie Advanced Packaging adressiert werden. Die Förderprogramme sollten entsprechend themenfokussiert gestaltet und in der Antragstellung vereinfacht werden. Auch die Rohstoffebene sollte effektiver als bisher adressiert werden, d. h. der CRMA sollte mit geeigneten Maßnahmen unterfüttert und ausgebaut werden. Es sollte im Zuge dessen die Möglichkeit geprüft werden, kritische Projekte entlang der Halbleiterwertschöpfungskette als strategisch einzustufen und Rohstoffprojekte auch außerhalb der EU als Teil einer Friendshoring-Strategie zu fördern. Auch die heimische Produktion von Rohstoffen sollte verstärkt angeregt werden, was eine geeignete Gestaltung von Regularien und Genehmigungsprozessen (z. B. Umweltverträglichkeitsprüfung) und das Schaffen von öffentlicher Akzeptanz für solche Projekte beinhaltet.

Eine Chance für Europa besteht im Bereich Halbleiter darin, dass die Abhängigkeiten nicht einseitig sind. In einigen Bereichen verfügt Europa über führende Unternehmen. Insbesondere ASML und sein umgebendes Ökosystem mit deutschen Unternehmen wie Zeiss und Trumpf sind in diesem Zusammenhang von überragender Bedeutung. Aber auch in den Bereichen Material und Design von DAO-Chips besitzt Deutschland global agierende Unternehmen mit hoher Marktmacht. Der daraus erwachsene Wettbewerbsvorteil trägt enorm zur Resilienz Europas und Deutschlands bei, weil er die eigene Verhandlungsposition stärkt und eine hohe Wertschöpfung hält. Mit Blick auf die Aktivitäten ist es wesentlich, den technologischen und prozessbezogenen Vorsprung durch gezielte Forschungs- und Investitionsförderung zumindest zu bewahren, wenn nicht auszubauen.

Gezielte stärkenorientierte und räumliche Förderung schafft Netzwerke und nutzt Synergien, wie sie u. a. durch Cluster entstehen. In diesem Sinne sollte man sich in Deutschland darauf fokussieren, bestehende Cluster zu nutzen und auszubauen, da Agglomerationseffekte die Innovations- und Investitionsdynamik stärken.

Verbesserung von Rahmenbedingungen, Abbau von regulatorischen Hürden und Beschleunigung von Genehmigungsprozessen.

- Berücksichtigung von Resilienzzielen bei der Weiterentwicklung von Regularien.
- Beschleunigung von Genehmigungsprozessen.
- Umsetzung einer geeigneten Fachkräftestrategie.

Die Förderung von Produktionskapazitäten in den genannten Bereichen beschränkt sich nicht auf Subventionen, sondern umfasst auch die Rahmenbedingungen. Die hohen regulatorischen Hürden, die z. B. dem Ausbau heimischer Kapazitäten in der Materialproduktion und Chipproduktion im Weg stehen, sollten abgebaut werden, indem Vorgaben unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten geprüft und Genehmigungsprozesse beschleunigt werden. Für letzteres sollten in der öffentlichen Verwaltung mehr qualifiziertes Personal eingesetzt, Prozesse verschlankt und Bearbeitungsfristen reduziert werden. Ausnahmeregelungen für strategisch wichtige Projekte, wie sie z. B. im CRMA existieren, könnten auch auf den Halbleiterbereich Anwendung finden und beispielsweise Priorisierung in Genehmigungsverfahren beinhalten.

Kompetenzen im Land zu halten und aufzubauen ist Grundvoraussetzung für eine resiliente Halbleiterbranche und sollte durch eine geeignete Fachkräftestrategie mit passenden Bildungsangeboten und gezielter Anwerbung von Fachkräften aus dem Ausland gestützt werden. Bezüglich des letzten Punktes stellen die gegenwärtigen Entwicklungen in den USA mit den Einschränkungen der wissenschaftlichen Arbeit eine Chance dar.

Förderung internationaler Handelsbeziehungen und Partnerschaften

- Schutz des Freihandels als prioritäre Präventionsstrategie.
- Vertiefung von Beziehungen mit relevanten Staaten.

Auf internationaler Ebene sollte sich die EU weiterhin für den weitestmöglichen Erhalt des Freihandels einsetzen. Gleichzeitig sollten mittels Kooperationen, MoUs und Verträgen Handelsbeziehungen gestärkt werden insbesondere zu Staaten, von denen aktuell besondere Abhängigkeiten bestehen. Dazu gehören die USA im Bereich Entwicklung, Design und IP, Taiwan und Südkorea im Bereich Leading-Edge-Chips, Speicherchips, China im Bereich Rohstoffe und Materialien und Japan bezüglich einzelner Vorprodukte. Dies sollte parallel stattfinden zu den Bemühungen, Alternativen zu unsicheren Bezugsquellen auf- und auszubauen. Auch der gezielte Technologietransfer kann Teil internationaler Kooperation sein. Zusätzlich sollte der zukünftige Zugang zu den Absatzmärkten in den Blick genommen werden, wobei insbesondere der Handelskonflikt zwischen den USA und China navigiert werden muss. Staat und Unternehmen sind gleichermaßen gefordert, sich auf Szenarien vorzubereiten, in denen dieser Handelskonflikt eskaliert.

Erhöhung der Transparenz und Diversifizierung in der Lieferkette

Verstärkte Investitionen in die Transparenz von Lieferketten.
Vorantreiben tiefergehender Diversifizierung in den Wertschöpfungsketten
und Erweiterung von Diversifizierungsmöglichkeiten.

Unternehmen sollten ihre Risikostrategien weiter entwickeln und ggf. neue Elemente integrieren, inklusive Stresstests und Notfallplänen. Unternehmen und staatliche Institutionen gemeinsam sollten sich bemühen, Abhängigkeiten von China und auch den USA zu reduzieren, indem neben China alternative Lieferquellen für Rohstoffe und Materialien wie Germanium und Gallium, Edelgase und Säuren elektro-nischer Qualität aufgetan werden sowie europäische und Open Source-Lösungen im Bereich EDA und IP gestärkt werden. Für Unternehmen ist es wichtig, mehr Transparenz in die eigenen Lieferketten zu bringen, auch über ihre unmittelbaren Zulieferer hinaus. Der Staat bzw. staatliche Institutionen wie z. B. die DERA auf Rohstoffebene können dabei eine wichtige unterstützende Rolle spielen und sollten entsprechend gestärkt werden. Auch andere überbetriebliche Akteure wie z. B. Verbände können in diesem Feld unterstützen. Gesamtgesellschaftliches Ziel sollte sein, wichtige Wertschöpfungsketten hinsichtlich bestehender Abhängigkeiten kontinuierlich und vorausschauend zu überwachen. Ein solches ‚Mapping‘ würde Akteure befähigen, informierte Entscheidungen bezüglich Resilienz treffen zu können und recht-zeitig Maßnahmen einzuleiten, um Risiken zu minimieren.

Aufbauend auf Risikostrategien und verbesserter Transparenz sollte die Halbleiterindustrie sich um tiefer-gehende Diversifizierung in kritischen Bereichen bemühen. Der Möglichkeitsraum, in dem dies statt-findet, kann von Unternehmen wie Staaten erweitert werden durch die Durchführung und Unterstützung von sowie Investition in Projekte in befreundeten Staaten.

Förderung von Innovation, Forschung und Recyclingtechnologien

Förderung von Forschung und Entwicklung.
Gezielter Einsatz von Beschaffungspolitik.
Entwicklung und Nutzung fortschrittlicher Recyclingtechnologien.

Langfristig wird eine europäische Halbleiterindustrie nur dann wettbewerbsfähig sein, wenn sie inno-vativ genug ist, um bestehende Wettbewerbsnachteile auszugleichen. Investitionen in Forschung und Entwicklung sind aus diesem Grund für Unternehmen wie den Staat unerlässlich. Ein Baustein für Innovation kann dabei der gezielte Technologietransfer durch FDI sein. Beschaffungspolitik sollte in Deutschland verstärkt genutzt werden, um die Nachfrage nach innovativen Technologien zu stärken, Märkte zu schaffen und vor allem Start-Ups zu unterstützen. Forschung und Entwicklung kann auch in vorgelagerten Wertschöpfungsschritten wie z. B. der Rohstoffverarbeitung Beiträge leisten, um technische Alternativen zu etablieren, die wiederum neue Bezugsquellen eröffnen können. Darüber hinaus spielt das Recycling eine Rolle insbesondere auf Ebene der hochrein verarbeiteten Rohstoffe und Materialien. Staat und Unternehmen sind gleichermaßen gefordert, durch Recyclinginnovationen und Investitionen in fortschrittliche Recyclingtechnologien und -kapazitäten die Gewinnung und Wieder-gewinnung der von einseitigen Importabhängigkeiten betroffenen Stoffe aus Recycling zu stärken.

Endnoten

- 1 Bundesregierung (2023).
- 2 ZVEI (2024a), S. 19f.
- 3 Shivarkar, Burkacky et al. (2022).
- 4 Fortune Business Insights (o. D.).
- 5 Europäische Kommission (2022), S. 3.
- 6 Dies ist eine vereinfachte Darstellung, die für die Zwecke des vorliegenden Dossiers ausreicht. Wie genau die nm-Angaben mit den konkreten physikalischen Eigenschaften der Chips korrespondieren oder nicht korrespondieren, ist kompliziert.
- 7 Cariad Technology (2023).
- 8 Pai (2020).
- 9 Saks / Huang (2024), Shivakumar / Wessner (2022).
- 10 Varadarajan et al. (2024), S. 14.
- 11 Europäische Kommission (o. D. a), European Strategy and Policy Analysis System (2022), S. 3.
- 12 ZVEI (2024b), Zühlke (2024).
- 13 Hillrichs / Wölfl (2025), S. 14-17, Haramboure et al. (2023).
- 14 Flaschenhals ist in diesem Zusammenhang definiert als ein Marktsegment, in welchem eine einzelne Region mindestens 65 % des globalen Marktanteils hält.
- 15 European Strategy and Policy Analysis System (2022), S. 3.
- 16 Chipexplorer (2024).
- 17 Varadarajan et al. (2024), S. 10f.
- 18 TSMC (2023).
- 19 Moeritz (2024).
- 20 Cantrill (2023).
- 21 Pasqual / Ullrich (2024).
- 22 Varadarajan et al. (2024), S. 10.
- 23 Kleinhans et al. (2023).
- 24 Härter (2023).
- 25 Yang (2022), Siemens (2027).
- 26 Thadani / Allen (2023), S. 4.
- 27 Khan et al. (2021), S. 49.
- 28 Varadarajan et al., S. 10.
- 29 Fraunhofer IMS (o. D.), Bao (2024), Sharma (2024).
- 30 SIAD (o. D.).
- 31 SEMI (2021).
- 32 IEEE (o. D.)
- 33 Grohol / Veeh (2023), S. 3f.
- 34 Goswami (2023), S. 120.
- 35 Mordorintelligence (o. D.).
- 36 DATAINTELO (2024).
- 37 VerifiedMarketResearch (2024).
- 38 United States Geological Survey, S. 161, Blume (2024).
- 39 Grohol / Veeh (2023) S. 49, 112f.

- 40 DERA (2023), S. 12, Kurlemann (2022).
- 41 DERA (2023), S. 74. Große Unsicherheiten über genaue Mengen und Anteile siehe Quelle.
- 42 Ebd., S. 12, 75.
- 43 PV Magazine (2023), Kurlemann (2022).
- 44 Wacker Chemie (2024), S. 4, 54, 92f.
- 45 ebd. S. 30.
- 46 Siltronic (o. D.).
- 47 DERA (2023), S. 88-91.
- 48 Shackell (2023), sgl carbon (2020).
- 49 MordorIntelligence (o. D.)
- 50 Bosch (2024), Infineon (o. D.).
- 51 United States Geological Survey, S. 31.
- 52 Daten von Eurostat.
- 53 Böcher et al.
- 54 Shivakumar et al., Baskaran / Schwartz (2024), S. 3.
- 55 EUCR, S. 109.
- 56 United States Geological Survey (2024), S. 74f.
- 57 Ebd., S. 43.
- 58 Ebd., S. 75.
- 59 Baskaran / Schwartz (2024), S. 3f.
- 60 United States Geological Survey (2024), S. 203.
- 61 Grohol / Veeh (2023), S. 109.
- 62 He (2023).
- 63 Holderness (2023), Reuters (2023).
- 64 Reuters (2023), Financial Times (2024).
- 65 TrendForce (2024), Kondratiev (2023).
- 66 United States Geological Survey (2024), S. 191.
- 67 Rohleder (2024).
- 68 United States Geological Survey (2024), S. 73.
- 69 Ebd., S. 37, Berg et al. (2024).
- 70 Silicon Saxony (o. D.), Vitrum Magazin (2023), Fraunhofer IPMS (o. D.), Infineon Canada (2025).
- 71 Baskaran / Schwartz (2024), S. 4.
- 72 United States Geological Survey (2024), S. 137.
- 73 Khan et al. (2021), S. 55-57.
- 74 Varadarajan et al. (2024), S. 18f., Khan et al. (2021), S. 57.
- 75 MordorIntelligence (o. D.), Siltronic (2024), S. 22f.
- 76 Samsung CNT (2024).
- 77 Daten von Eurostat, Joint Research Center of the European Union (2022), Berg et al. (2024), Spanjersberg (2024).
- 78 United States Geological Survey (2024), S. 88f.
- 79 Linde Gas (o. D.).
- 80 ECHA (2024).
- 81 Khan et al. (2021), S. 60, BASF (2018).
- 82 Varadarajan (2024), S. 17.
- 83 Handelsblatt (2025).
- 84 Khan et al. (2021), S. 25-48.
- 85 Kabir (2024), Das (2023), Khan et al. (2021), S. 30, Varadarajan et al. (2024), S. 17.

- 86 Brennkmeier / Ebert (2024), Zeiss SMT (o. D.).
- 87 Höltschi (2023), Trumpf (o. D.).
- 88 Economist (2025).
- 89 Simpson (2024), Kharpal (2023), ASML (2024), S. 25, TrendForce (2024), BBNC (2023b), AnySilicon (o. D.), South China Morning Post (2024), Dobberstein (2024), Manager Magazin (2024).
- 90 Potter (2024), Tembey (2023).
- 91 Alsop (2025).
- 92 BBNC (2023a).
- 93 Es ist davon auszugehen, dass die Differenz zwischen Produktionskapazitäten und tatsächlicher Produktion bei verschiedenen Regionen nicht so weit auseinanderfallen, dass es das Bild nennenswert ändern sollte.
- 94 Deloitte (2023).
- 95 Varadarajan et al. (2024), S. 14.
- 96 Haeck (2024).
- 97 GTAI (2025).
- 98 Kearney (2021), S. 1-4.
- 99 Di Giovanni (2024).
- 100 NXP (2024).
- 101 Khan et al. (2021), S. 23.
- 102 Varadarajan, et al. (2024), S. 10.
- 103 Khan et al. (2021), S. 24.
- 104 Die betrifft u. a. 2,5-D und 3-D-Packaging.
- 105 Borden, Burkacky et al. (2023), futuremarketinsights (2025).
- 106 Deloitte (2024), S. 8f.
- 107 IG Metall Regensburg (2024).
- 108 Burkacky (2023).
- 109 Deloitte (2024), S. 8, Lapedus (2020).
- 110 Thadani / Allen (2024), S. 11.
- 111 Deloitte (2024), S. 8f.
- 112 Singleton et al. (2024).
- 113 Deloitte (2024), S. 11, Hillrichs / Wölfl (2025), S. 17-20, Deloitte (o. D.).
- 114 ZVEI (2023).
- 115 Varadarajan et al (2024), S. 9.
- 116 U.S. Department of State (o. D.), BMWK (2024a), Congress (2021).
- 117 Varadarajan et al. (2024), S. 8 BMWK (2024a).
- 118 Varadarajan et al. (2024), S. 9, ZVEI (2024a), S. 26.
- 119 Europäische Kommission (o. D. a).
- 120 ZVEI (2024a), S. 25.
- 121 Europäische Kommission (2024a).
- 122 Europäische Kommission (2024b).
- 123 Europäische Kommission (o. D. a), Europäische Kommission (2024c).
- 124 Europäische Kommission (o. D. a).
- 125 ZVEI (2024a), S. 25.
- 126 Varadarajan et al. (2024), S. 9.
- 127 Europäische Kommission (2025).
- 128 ScienceBusiness (2024), Kleinhans (2023), ZVEI (2022), S. 19.
- 129 European Semiconductor Regions Alliance (o. D.).

- 130 BMWK (o. D.), IPCEI on Microelectronics (2025), Europäische Kommission (o. D. b), Europäische Kommission (o. D. c), IPCEI ME CT (o. D.).
- 131 VDI|VDE|IT (2024), ZVEI (2024a), S. 24.
- 132 ZVEI (2024a), S. 38.
- 133 Stroh (2023).
- 134 Ebrahimi (2024), S. 2f., Kleinhans (2024).
- 135 Bundesregierung (2023).
- 136 VDI|VDE|IT (2024).
- 137 BMWK (2024a).
- 138 Hofer (2024).
- 139 Hofer / Olk (2024).
- 140 Ebrahimi (2024), S. 5.
- 141 Stroh (2023).
- 142 Reuters (2024).
- 143 Neudert et al. (2025).
- 144 BMBF (2024).
- 145 Neudert et al. (2025).
- 146 strategy& (2023), ZVEI (2022), S. 17.
- 147 Europäische Kommission (o. D. d).
- 148 Europäische Kommission (2024d), Europäische Kommission (o. D. e).
- 149 Europäische Kommission (2024e), Vivoda (2023).
- 150 U.S. Department of State (2024).
- 151 Table.Media (o. D.), BMWK (2024b), Fremerey / Iglesias (2024).
- 152 Hu (2024).
- 153 BASF (2024), S. 173ff., Infineon (2024), S. 65ff.
- 154 ASML (2024), S. 50ff.
- 155 NXP (2024), S. 2, 53, Siltronic (2024), S. 40.
- 156 Infineon (2024), S. 70ff.
- 157 Cavallaro (2024).
- 158 Wacker (2014), S. 25.
- 159 ASML (2024), S. 53, Infineon (2024), S. 8, Infineon (2025).
- 160 BASF (2024), S. 178, Infineon (2024), S. 72.
- 161 Klotz (2021).
- 162 Burger (2023).
- 163 Yang (2024).
- 164 Hofer / Buchenau (2025), express (2024).
- 165 Shilov (2023), Valerio (2025), Goujon / Reynolds (2024).
- 166 Batra et al. (2018), Orbit & Skyline (2023), Xiong et al. (2023).
- 167 CAS (2024), Hopf (2024).
- 168 Rohleder (2024), Fiehrer et al. (2019), Wafer World (2024), Microchip USA (2025).
- 169 United States Geological Survey (2024), S. 75.



Dossier

Windkraftanlagen

4

Autorenteam

Michael Astor

Leonard Krampe

Bianca Derya Neumann

Inhalt Dossier

128

Hintergrund

129

Status Quo der Herausforderungen in der Windindustrie

134

Marktdynamik: Nationale, europäische und globale Einflüsse

139

Europäische und nationale (politische) Maßnahmen

142

Handlungsempfehlungen

1

Hintergrund

Eine resiliente europäische Windenergiebranche ist von zentraler Bedeutung für das Gelingen der Energiewende und die Stärkung einer von Rohstoffimporten unabhängigen Energieversorgung. Das Ziel der Energiewende ist die vollständige Klimaneutralität in allen Bereichen – nicht nur bei der Erzeugung von Strom, sondern auch im Bereich der Nachfrage, also bei der Wärmeversorgung, im Verkehrssektor sowie bei der Industrie. Folglich wird in allen Nutzungsbereichen Strom aus erneuerbaren Energiequellen – vor allem Wind und Sonne – benötigt.

Die aktuelle Entwicklung zeigt deutliche Fortschritte. Bis Ende Juni 2024 ist der Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch auf 57 % gestiegen und die 60%-Marke rückt in greifbare Nähe¹. Aktuell sind in Deutschland rund 70 GW Windkraftanlagen und fast 90 GW Photovoltaik (PV)-Anlagen installiert. Bis zum Jahr 2030 sollen es mindestens 145 GW Wind (an Land und auf See) sowie 215 GW PV werden. Dies bedeutet für beide Energieträger mehr als eine Verdoppelung der installierten Leistung in den nächsten fünf Jahren.

Um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen und Abhängigkeiten von fossilen Brennstoffen zu reduzieren, wird also ein deutlich erhöhtes Ausbautempo bei den erneuerbaren Energiequellen und der dazugehörigen Infrastruktur benötigt. Der Ausbau erneuerbarer Energiequellen dient nicht nur dem Erreichen der Klimaziele, sondern reduziert auch die Abhängigkeit von Öl- und Gas-Lieferländern, die oft keine demokratischen Regime und damit in ihrem Handeln nicht immer berechenbar sind.

Besonders der Bereich der Windkraftanlagen ist für eine resiliente, nachhaltige Energiezukunft essenziell. Hier sind auf den unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen starke nationale Unternehmen aktiv, die über ein breites Kompetenz- und Kapazitätsspektrum verfügen. Unter der Perspektive der Resilienz zeigen sich jedoch kritische Punkte:

Die Abhängigkeit von Zulieferteilen, die häufig auf ein einziges Herstellungsland konzentriert sind, wie etwa Permanentmagnete aus China.

Das Bestreben Chinas, weitere Stufen der Wertschöpfung zu besetzen und europäische Wettbewerber durch Ausbau des eigenen Anlagenbaus und gezielte Vorfinanzierungen vom Markt zu verdrängen.

Die spezifische Marktdynamik, die durch einen Ausschreibungsprozess, lange Vorlaufzeiten und späte Amortisation geprägt ist.

Der Ausbau der Windenergie kam in den letzten Jahren etwas ins Stocken. Dies zeigt sich auch daran, dass Ausschreibungen meistens deutlich unterzeichnet waren. Gleichzeitig belasten lange Genehmigungsdauern und ein häufig verzögerter Baubeginn die Umsetzung vieler Projekte.

Ziel dieses Dossiers ist die Darstellung der aktuellen Situation der Windenergiebranche, deren vielfältige Einflussfaktoren sowie Handlungsempfehlungen zu einer Positionierung der Branche unter Resilienzgesichtspunkten.

2

Windkraftindustrie: Status Quo der Herausforderungen

Die deutsche Windindustrie umfasst zahlreiche Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Entlang dieser sind Unternehmen aktiv, die von der Rohstoffbeschaffung bis hin zur Entwicklung, Produktion, Projektentwicklung, Installation und Wartung der Windkraftanlagen tätig sind. Insgesamt gibt es etwa 30.000 Windenergieanlagen mit einer installierten Leistung von nahezu 70.000 Megawatt, die Branche beschäftigt aktuell rund 135.000 Menschen.²

Ein Großteil der Unternehmen in der Windbranche sind mittelständische Betriebe, die sich auf verschiedene Segmente wie die Produktion von Rotorblättern, Getrieben oder Steuerungssystemen spezialisiert haben. Die deutsche Windindustrie weist eine enge Verzahnung zwischen verschiedenen Akteuren in der Forschung, Entwicklung, Produktion und im Service auf. Die Struktur der Branche umfasst sowohl Onshore- als auch Offshore-Projekte. Angesichts der Dynamik und Herausforderungen in der Energiebranche spielt die Resilienz, also die Fähigkeit der Windindustrie stabil gegenüber externen Schocks zu bleiben, eine entscheidende Rolle. Ein wesentlicher Faktor, der die Handlungsautonomie der Unternehmen beschränkt sind die Abhängigkeiten in verschiedenen Bereichen der Lieferkette, von der Rohstoffbeschaffung bis hin zum Bau von Windkrafträdern und Windkraftparks durch Original Equipment Manufacturers (OEMs). Die Branche ist stark auf ausländische Zulieferer angewiesen, die wichtige Komponenten wie Rotorblätter, Getriebe und Türme produzieren und bereitstellen. Störungen in der Lieferkette können den gesamten Produktionsprozess beeinflussen und die Effizienz sowie den Ausbau von Windkraftanlagen bremsen. Darüber hinaus sind regulatorische Rahmenbedingungen, wie lange Genehmigungsverfahren oder Änderungen in der Förderung durch staatliche Programme, entscheidend für die Planungssicherheit und das Wachstum der Branche.³

Die Resilienz der Branche hängt davon ab, wie gut sie in der Lage ist, diese Abhängigkeiten zu managen und flexibel auf Veränderungen zu reagieren. In der Vergangenheit zeigte sich die Bedeutung der Resilienz besonders während der COVID-19-Pandemie, als es zu globalen Lieferkettenstörungen kam. Unternehmen sahen sich mit erheblichen Verzögerungen bei der Lieferung von Schlüsselkomponenten konfrontiert, was die Produktion und Installation von Windkraftanlagen beeinträchtigte und massive betriebs- und volkswirtschaftliche Folgen hatte.⁴ Ein weiteres Beispiel war die Rohstoffkrise im Jahr 2022, ausgelöst durch den Krieg in der Ukraine, der zu Engpässen bei wichtigen Vorprodukten wie Stahl und weiteren Komponenten führte, die für den Bau von Windkraftanlagen unerlässlich sind. Darüber hinaus ist die Branche stark von Seltenen Erden und den unter Verwendung von Seltenen Erden produzierten Permanentmagneten abhängig, die überwiegend aus China importiert werden.⁵

Technologische Grundlagen der Windenergie

Die beiden wesentlichen Komponenten einer Windkraftanlage sind der Rotor, bestehend aus der Nabe und den Rotorblättern, der die kinetische Energie des Windes in Bewegungsenergie umwandelt, und der Generator, der diese Bewegungsenergie in elektrischen Strom verwandelt. Der Generator besteht aus Kupferspulen und Magneten, die entweder Elektromagnete oder Permanentmagnete unter Verwendung von Seltenen Erden sein können. Manche Windkraftanlagen sind zusätzlich mit einem Getriebe ausgestattet, das zwischen Rotor und Generator installiert ist. Dieses Getriebe wandelt die langsame Drehbewegung des Rotors in schnellere Drehbewegungen um, wodurch der Generator kompakter gebaut werden kann, was besonders im Hinblick auf den Einsatz von Seltenen Erden relevant ist. Darüber hinaus umfasst eine Windkraftanlage Turm, Fundament sowie Netzanschluss und besteht mitunter aus mehr als 50.000 Einzelteilen.⁶

Im Einsatz sind verschiedene Anlagentypen, die sich vor allem hinsichtlich ihres verwendeten Generatortyps und des Einsatzes von Getrieben unterscheiden. Die Wahl der Technologie beeinflusst dabei den Bedarf an Seltenen Erden. Es gibt grundsätzlich folgende vier Anlagentypen⁷:

1. Permanentmagnet-Generator mit Getriebe (GB PMSG)
2. Permanentmagnet-Generator ohne Getriebe (DD PMSG)
3. Induktionsgenerator mit Getriebe (GB DFIG)
4. Elektromagnetisch erregter Synchrongenerator ohne Getriebe (DD EESG).

Der wesentliche Unterschied liegt im Aufbau des Magnetfelds im Generator. Diese technologischen Unterschiede haben direkte Auswirkungen auf die Lieferkette, insbesondere auf die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen, die bei der Herstellung von Permanentmagnet-Generatoren benötigt werden. Anlagen mit Permanentmagnet-Generatoren (DD PMSG und GB PMSG) verwenden Permanentmagnete, die auf Seltenen Erden basieren, während Induktionsgeneratoren und elektromagnetisch erregte Synchrongeneratoren (GB DFIG und DD EESG) Elektromagnete oder elektromagnetisch induzierte Magnetfelder nutzen. Daher ist der Bedarf an Seltenen Erden bei den Permanentmagnet-Anlagen höher als bei den anderen Typen⁸. Getriebe ermöglichen höhere Drehzahlen im Generator, wodurch die Größe des Generators und der Einsatz von Magnetmaterial reduziert werden können. Obwohl der Einsatz von Seltenen Erden bei DD PMSG höher ist, bieten diese Anlagen technologische Vorteile, insbesondere für den Offshore-Einsatz. Permanentmagnete ermöglichen hohe Wirkungsgrade und eine effiziente Energieumwandlung, während das getriebeLOSE Antriebskonzept das Gondelgewicht reduziert, was bei großen Turbinen und schwierigen Installations- und Betriebsbedingungen auf See vorteilhaft ist. Daher sind heute 75 % der Offshore-Anlagen und 20 % der Onshore-Anlagen als DD PMSG ausgeführt. In China werden auch die meisten Onshore-Anlagen als DD PMSG gebaut. Der Rest der Offshore-Anlagen nutzt GB PMSG, wobei der Permanentmagnet aufgrund des Getriebes kleiner ausfällt.⁹

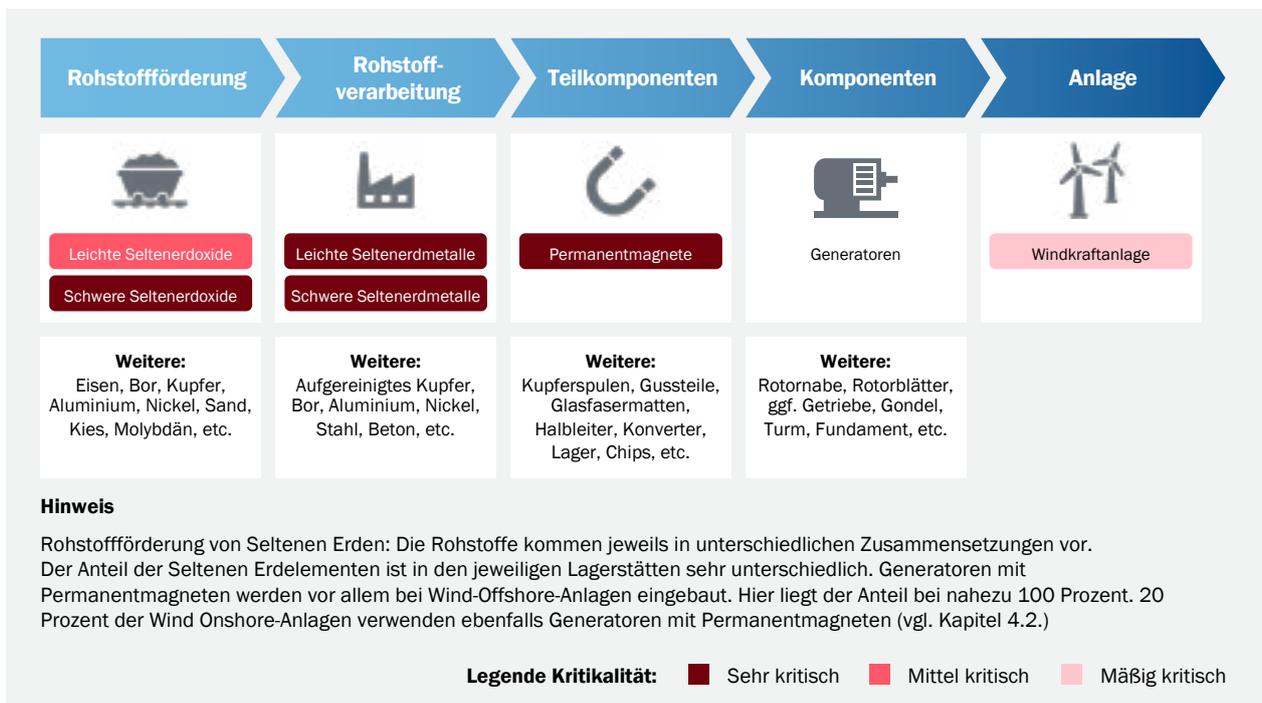
Neben den Generatoren spielen die Rotorblätter eine zentrale Rolle, da sie die Windenergie in Bewegungsenergie umwandeln. Moderne Rotorblätter bestehen aus leichten, aber robusten Verbundmaterialien wie Glas- und Kohlefaser. Zudem spielt die Digitalisierung in der Windindustrie eine immer größere Rolle, insbesondere bei der Überwachung und Wartung. Sensoren und Datenanalysen helfen, Ausfälle frühzeitig zu erkennen und Wartungsintervalle zu optimieren.¹⁰

Lieferkette und Rohstoffabhängigkeit in der Windbranche

Die Lieferkette der Windindustrie ist stark fragmentiert, da die verschiedenen Komponenten von spezialisierten Zulieferern weltweit bezogen werden. Sie sind zugleich global ausgelegt, sodass sie auch anfällig für Störungen sind. Windkraftanlagen bestehen aus zehntausenden Einzelkomponenten, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Rohstoffförderung bis hin zum Recycling – in verschiedenen Stufen und von unterschiedlichen Akteuren gefertigt werden. Abbildung 1 zeigt am Beispiel von Generatoren die Abhängigkeiten der Lieferketten von Seltenen Erden und verdeutlicht die Komplexität der Zulieferstrukturen.

Abbildung 1:

Abhängigkeiten der Lieferketten von Seltenen Erden am Beispiel von Permanentmagneten für Windkraftgeneratoren



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Stiftung Klimaneutralität (2023).

D.h. auf den ersten drei Wertschöpfungsstufen bestehen hohe und z.T. sehr kritische Abhängigkeiten, da in Europa weder die notwendigen Rohstoffe abgebaut werden noch entsprechende Verarbeitungskapazitäten vorhanden sind. China bildet hier den entscheidenden Akteur, der sich in eine fast monopolistisch zu nennende Position gebracht hat. Dies ist nur eine Teilkomponente, andere Bauteile unterliegen z. T. anderen Abhängigkeiten, die sich auch auf andere Staaten beziehen können.¹¹ Beispielsweise werden Rotorblätter häufig sowohl aus China als auch aus Indien bezogen, da diese Länder über höhere Produktionskapazitäten und Kostenvorteile verfügen.

Die Nacellen, also die Maschinenhäuser, werden ebenfalls zu einem Großteil in China produziert, das rund 60 % der globalen Fertigungskapazität abdeckt. Auch Monopile-Fundamente, die besonders für die Errichtung von Offshore-Windanlagen benötigt werden, werden oft in Asien, vor allem China und Südkorea, hergestellt, da sie spezialisierte Produktionstechniken erfordern, die in Europa nur eingeschränkt verfügbar sind. Kabel und Transformatoren für die Stromübertragung werden ebenfalls meist außerhalb der EU gefertigt, oft in Norwegen.¹² Deutschland verfügt nicht über die für den Bau von Windkraftanlagen erforderlichen Rohstoffe oder kann diese bisher nicht ökonomisch wettbewerbsfähig abbauen, was bereits zu Beginn der Lieferkette zu Abhängigkeiten von Drittstaaten führt. Besonders hohe Abhängigkeiten bestehen hier insbesondere bei den leichten Seltenen Erden (bis zu 85 % Abhängigkeit von China) und den schweren Seltenen Erden (bis zu 100 % Abhängigkeit von China), aber auch weiteren Rohstoffen und Vorprodukten, die für die Lieferkette relevant sind.¹³

Bei der Verarbeitung kritischer Rohstoffe ist ein ähnliches Muster zu beobachten. Obwohl Deutschland über hochentwickelte Technologien und industrielle Kapazitäten verfügt, wurde die heimische Rohstoffverarbeitung im Laufe der Jahre stark reduziert, da die Produktionskosten in China deutlich niedriger sind. Zudem hat China eine dominante Position in der Weiterverarbeitung von Seltenen Erden. Die wahrscheinlich stärkste Abhängigkeit in der Lieferkette besteht bei der Verarbeitung von Seltenen Erden zu Permanentmagneten, da diese zu über 90 % aus China importiert werden.¹⁴ Während Europa über ausreichende Kapazitäten zur Herstellung vieler mechanischer Komponenten verfügt, werden beispielsweise auch Glasfasermatten für Rotorblätter in China gefertigt. Zudem müssen Elektronikkomponenten, wie Steuerungssysteme und Halbleiter, aus Asien importiert werden.¹⁵

Bei der Fertigung der Hauptkomponenten, wie Turbinen und Generatoren, ist Europa als Technologieentwickler und -produzent gut positioniert. Siemens Gamesa, Vestas Wind Systems und GE zählen zu den führenden Herstellern von Windkraftanlagen in Europa. Dabei sind sie stark auf die Lieferung von Rohstoffen und Teilkomponenten angewiesen, die aus verschiedenen Ländern bezogen werden. Die Herstellung von leistungsstarken Offshore-Turbinen mit mehr als 12 MW Leistung ist besonders anspruchsvoll, da die Komponenten einer deutlichen anspruchsvolleren Umgebung standhalten müssen. Dies erfordert eine präzise Abstimmung zwischen verschiedenen Zulieferern weltweit, um diesen hohen Anforderungen gerecht zu werden.¹⁶

Grundsätzlich verfügt Europa derzeit über ausreichende Produktionskapazitäten im Bereich der Onshore-Windenergie, um den mittelfristigen Ausbaubedarf zu decken. Im Offshore-Bereich sind die bestehenden Kapazitäten mit den genannten Einschränkungen des notwendigen Bezugs von Vorleistungen derzeit noch ausreichend. Allerdings könnten mittelfristige Herausforderungen wie Lieferkettenstörungen, Genehmigungsprobleme und der Fachkräftemangel dazu führen, dass der Ausbaubedarf nicht problemlos gedeckt werden kann.¹⁷

Die Installation der Windkraftanlagen, insbesondere Offshore, ist komplex und derzeit auf eine globale Lieferkette angewiesen. Viele der für die Installation und Wartung benötigten Materialien und Technologien, wie spezielle Schiffe, Wind Turbine Installation Vessels (WITVs) und Montagesysteme, werden nur in wenigen Ländern hergestellt und müssen über weite Strecken transportiert werden. Auch hier spielt die Logistik eine zentrale Rolle, da Verzögerungen oder Engpässe in einer Stufe der Lieferkette den gesamten Prozess verzögern können. Die Hauptproduzenten von WITVs sind weltweit auf wenige Länder konzentriert. Hierbei spielen besonders China, die USA und einige europäische Länder eine hervorgehobene Rolle. Die USA haben spezifisch für ihren Markt WITVs gebaut, während Europa stark auf die vorhandenen Flotten in Asien und den USA angewiesen ist. Vor allem für die wachsende Nachfrage in Europa und in anderen Märkten wie Vietnam, Taiwan, Südkorea und Japan besteht ein

Bedarf an neuen WTIV-Kapazitäten, um die Nachfrage bis 2030 decken zu können. Somit ist der Bau von Offshore-Anlagen besonders stark von diesen globalen Zulieferern abhängig.¹⁸

Die Abhängigkeiten in den Lieferketten sind den beteiligten Akteuren ebenso bewusst wie die aktuell eingeschränkten Handlungsoptionen. Soweit möglich wird verstärkt an der Diversifizierung der Lieferkette gearbeitet. Kurzfristig lässt sich eine europäische Produktion von Seltenen Erden und Magneten jedoch kaum realisieren. Darüber hinaus steht die Branche in einem scharfen Kostenwettbewerb. Dies führt wiederum dazu, dass Einzelteile wie Glasfasermatten und Gussteile bei chinesischen Herstellern, die einen Kosten- und Preisvorteil bieten, eingekauft werden, obwohl es Anbieter außerhalb Chinas gibt.¹⁹ Diese Praxis senkt kurzfristig die Kosten, birgt jedoch das Risiko, dass sich auf lange Sicht die Position Chinas auf immer mehr Vorprodukte und Wertschöpfungsstufen ausdehnt und somit eine monopolartige Marktposition eröffnet. Damit werden nicht nur andere Anbieter aus dem Markt gedrängt, sondern es geht darüber hinaus Produktions- und ggf. Installations-Know how verloren.

Recycling und Kreislaufwirtschaft

Das Recycling von Windenergieanlagen bietet mittel- und langfristig die Chance für die nachhaltige und resiliente Entwicklung der Windindustrie. Laut Bundesverband WindEnergie können heute bereits zwischen 80 % und 90 % der Bestandteile einer Windenergieanlage recycelt werden. Materialien wie Stahl, Kupfer, Aluminium und Beton lassen sich wiederverwerten, was zur Schonung von Primärrohstoffen beiträgt und gleichzeitig den Energieaufwand für die Produktion neuer Materialien deutlich senkt. Dieser Beitrag zur Ressourceneffizienz stärkt die Resilienz der Windindustrie, da die Abhängigkeit von Rohstoffen und Komponenten verringert wird und die industrielle Versorgung langfristig gesichert werden kann. Zudem gibt es die Möglichkeit, gebrauchte Ersatzteile aus stillgelegten Anlagen weiterzuverwenden, was die Verfügbarkeit von Komponenten in der zweiten Betriebsdekade der Anlagen verbessern und Kosten senken kann.²⁰

Die Herausforderungen bei der breiten Umsetzung effizienter Recyclingverfahren in Deutschland sind unter anderem technischer Natur, da der Prozess der Materialtrennung aufwendig ist und spezielle Technologien erfordert. Besonders das Recycling der Rotorblätter stellt ein Problem dar, da die verwendeten Verbundmaterialien bislang schwer in ihre Ursprungskomponenten aufzutrennen sind. Häufig bleibt nur die thermische Verwertung, die mit Emissionen einhergeht und keine vollständige Rückgewinnung der Materialien ermöglicht. Darüber hinaus erschwert die Heterogenität der in älteren Windkraftanlagen verwendeten Materialien die Demontage und Sortierung. Speziell bei den Generatoren, in denen Seltene Erden verwendet werden, schränken die komplexen und kostenintensiven Recyclingverfahren die wirtschaftliche Effizienz des Prozesses ein. Obwohl Deutschland über moderne Recyclingtechnologien verfügt, wird aufgrund der Kostenvorteile der Großteil der Materialien weiterhin in China aufbereitet.²¹

Trotz der enormen Bedeutung einer weiteren Entwicklung neuer Recyclingverfahren im Bereich der Permanentmagnete wird sich ein positiver Effekt auf die Lieferkette voraussichtlich erst mittel- bis langfristig einstellen. Aktuell sind erst rund 9 GW Wind Offshore-Anlagen installiert. Dieser Bestand soll in den nächsten Jahren insbesondere ab 2028 sprunghaft ansteigen. Folglich wird ein Großteil der Anlagen erst ab Mitte der 2040er Jahre oder später zurückgebaut werden können. Angesichts der Lebensdauer der Windenergieanlagen von 20 bis 25 Jahren wird es noch viele Jahre dauern, bis wesentliche Mengen recycelten Materials der Kreislaufwirtschaft zugeführt werden können.

3

Marktdynamik: Nationale, europäische und globale Einflüsse

Primärrohstoff- und Lieferkettenabhängigkeiten, aber auch politische Unsicherheiten oder Änderungen in internationalen Handelsabkommen können die Verfügbarkeit von Rohstoffen und Komponenten beeinträchtigen. Aber auch die Marktdynamiken spielen eine entscheidende Rolle für die industrielle Resilienz der deutschen Windindustrie. Diese Dynamiken umfassen eine Vielzahl von Faktoren, die direkt die Wettbewerbsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit der Branche beeinflussen. Schwankungen in der Nachfrage, etwa durch politische Entscheidungen oder regulatorische Änderungen wie im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), können die wirtschaftliche Stabilität der Branche stark beeinflussen. Überkapazitäten in Drittstaaten in Zeiten hoher Nachfrage führen oft zu einem Preisdruck, der die Gewinnmargen verringert und die langfristige Widerstandsfähigkeit der Unternehmen schwächt.²² Dieser Wettbewerb wird insbesondere durch Hersteller aus China forciert, die nach Einschätzung der Branchenakteure Komponenten z.T. unterhalb der Produktionskosten anbieten.

Die Windenergiebranche entwickelt sich in technologischer Perspektive rasant weiter, und Unternehmen, die nicht in neue Technologien wie effizientere Turbinen oder digitale Lösungen investieren, laufen Gefahr, technologisch abgehängt zu werden. Gleichzeitig sind hohe Investitionen in neue Projekte erforderlich, was einerseits einen vereinfachten Zugang zu Kapital benötigt, andererseits die Branche bei wirtschaftlichen Abschwüngen oder Finanzierungsengpässen anfällig für Krisen macht.²³ Dass deutsche Unternehmen auf Innovation und technologische Führerschaft setzen, birgt Chancen, aber auch Risiken, da höhere Investitionen in Forschung und Entwicklung notwendig sind, die sich wiederum auf die Preisgestaltung auswirken. In diesem Zusammenhang ist die Auftragsvergabe von besonderer Bedeutung. Im Folgenden wird der Ausschreibungsprozess und seine Relevanz hinsichtlich der Resilienz und des Ausbaus der Windindustrie in Deutschland dargelegt.

Ausschreibungsprozesse für Windenergie-Projekte

Das Ausschreibungsdesign für die Windkraftindustrie in Deutschland zielt darauf ab, die Kosten für Windenergieprojekte zu senken und den Ausbau der Windkraft effizient voranzutreiben. Die Einführung des Ausschreibungsverfahrens im Jahr 2017 verfolgte das Ziel, den Wettbewerb zu fördern und die Kosten durch transparente und wettbewerbsorientierte Verfahren zu reduzieren. Das Verfahren beginnt mit der Festlegung von Kapazitätsmengen, die jährlich ausgeschrieben werden, wobei es separate Ausschreibungen für Onshore- und Offshore-Windkraftprojekte gibt.

Onshore-Ausschreibungen

Bei Ausschreibungen für Onshore-Projekte legt die Bundesnetzagentur, basierend auf den Regelungen des EEG, fest, wie viel Kapazität (in MW) ausgeschrieben wird.²⁴ Projektentwickler reichen Gebote ein, in denen sie angeben, zu welchem Preis sie bereit sind, den erzeugten Strom zu verkaufen. Der Höchstpreis, den die Entwickler fordern dürfen, wird ebenfalls vorab festgelegt. Die günstigsten Gebote erhalten den Zuschlag, woraufhin die Projekte innerhalb einer bestimmten Frist realisiert werden müssen. Werden die Projekte nicht rechtzeitig umgesetzt, verfällt der Zuschlag, alternativ kann die Frist verlängert werden. Im Ausschreibungsprozess können sich Projektentwickler mit unterschiedlichen Leistungskapazitäten bewerben, unabhängig davon, ob es sich um kleinere Projekte oder größere Windparks handelt.²⁵

Bei den Ausschreibungen für Windenergieprojekte an Land kam es in den vergangenen Jahren regelmäßig zu einer Unterzeichnung. Das bedeutet, dass weniger Projekte realisiert wurden als ursprünglich geplant. Im Jahr 2023 wurden von den geplanten Ausschreibungen in Höhe von 9.830 MW nur 6.376 MW mit Zuschlägen bedacht.²⁶ Dies weist auf ein strukturelles Problem im deutschen Windenergiemarkt hin. Wichtige Gründe für die Unterzeichnung waren u.a. die geringe Vergütungshöhe bzw. gestiegene Investitionskosten, gestiegene Zinsen sowie eine durch Schocks wie die COVID-19 Pandemie gestörte Lieferkette. Die Auswirkungen dieser Unterzeichnungen sind weitreichend. Zunächst einmal wird der angestrebte Ausbaupfad für die Windenergie verfehlt, sodass die Erreichung der nationalen Klimaziele gefährdet ist. Das bedeutet, dass das Potenzial dieser Energiequelle zur Sicherstellung der Energieversorgung nicht voll ausgeschöpft werden kann.²⁷

Langfristig kann eine anhaltende Unterzeichnung zu einer weiteren Verlangsamung des Ausbaus führen. Folglich rücken Verbesserungen der politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen auf die Tagesordnung. Diskutiert werden in diesem Kontext die Beschleunigung der Genehmigungsverfahren, die Stabilisierung der Lieferketten und mögliche finanzielle Anreize oder Förderungen, um die wirtschaftlichen Hürden für Projektentwickler zu senken. Durch entsprechende Reformen sollen die Wettbewerbsfähigkeit und die Attraktivität von Windenergieprojekten in den Ausschreibungen gesteigert werden, sodass der Ausbau planmäßig fortschreiten kann.²⁸ Die Bundesregierung hat in den vergangenen Monaten Maßnahmen ergriffen, die zu einem beschleunigten und vereinfachten Genehmigungsprozess führen sollen. Insbesondere wurden dabei Vorgaben aus der EU Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU) 2023/2413 (RED III) umgesetzt und zahlreiche Änderungen an weiteren Gesetzen (z.B. Raumordnungsgesetz und Energiewirtschaftsgesetz) vorgenommen.²⁹ Wie stark sich diese Änderungen auswirken, wird sich in den nächsten Ausschreibungsrunden zeigen. In der Onshore-Ausschreibung am 1. August 2024 kam es das erste Mal seit 2022 wieder zu einer Überzeichnung der Gebote.³⁰

Offshore-Ausschreibungen

Auch bei Offshore-Projekten legen die Bundesnetzagentur und das Wind-auf-See-Gesetz (Wind-SeeG) fest, wie viel Kapazität ausgeschrieben wird.³¹ Die Offshore-Projekte unterscheiden sich vom Onshore-Bereich durch deutlich höhere Investitionskosten und längere Realisierungszeiten. Projektentwickler reichen Gebote ein, in denen sie angeben, zu welchem Preis sie bereit sind, den erzeugten Strom zu verkaufen, wobei auch hier Höchstpreise festgelegt werden. In den letzten Jahren gab es jedoch vermehrt sogenannte „Null-Cent-Gebote“, bei denen die Anbieter auf direkte Zahlungen verzichten und stattdessen ausschließlich auf den Erlös aus dem späteren Stromverkauf setzen. Die günstigsten Gebote erhalten den Zuschlag, und die Projekte müssen dann innerhalb einer bestimmten Frist realisiert werden. Die Realisierungsdauern für Offshore-Projekte ist deutlich länger als im Onshore-Bereich. Dies ist dadurch begründet, dass die Bauphase selbst aufwendiger ist.

Die Installation auf hoher See findet unter schwierigen Bedingungen statt – etwa starke Winde, hohe Wellen und Korrosionsrisiken durch Salzwasser. Diese Faktoren erschweren sowohl die Logistik als auch die Bauarbeiten, darüber hinaus werden spezialisierte Schiffe und Geräte für den Transport und die Installation der riesigen Turbinenkomponenten benötigt.³²

Die lange Realisierungszeit erweist sich als ein zentrales Problem für die Projektentwickler. Die Komplexität des Baus von Offshore-Windparks kann dazu führen, dass Projekte die vorgegebenen Fristen überschreiten oder sich die Inbetriebnahme und damit auch die Auszahlung der Mittel deutlich verzögern. Diese Unsicherheiten stellen eine Herausforderung für die wirtschaftliche Situation der beteiligten Unternehmen dar und können zu Finanzierungslücken führen. Ein weiteres Problem ist das Ausschreibungsdesign. Die Einführung der „Null-Cent-Gebote“ hat zu einer Verschärfung des Wettbewerbs geführt, da viele Anbieter darauf spekulieren, dass die Strompreise auf dem freien Markt hoch genug sind, um ihre Investitionen zu decken. Dies birgt jedoch das Risiko, dass einige Projekte nicht wirtschaftlich tragfähig sind, wenn die Marktbedingungen sich ändern.³³

Aktuelle Ausbauziele und Entwicklungen der Windenergie gemäß EEG 2021/23

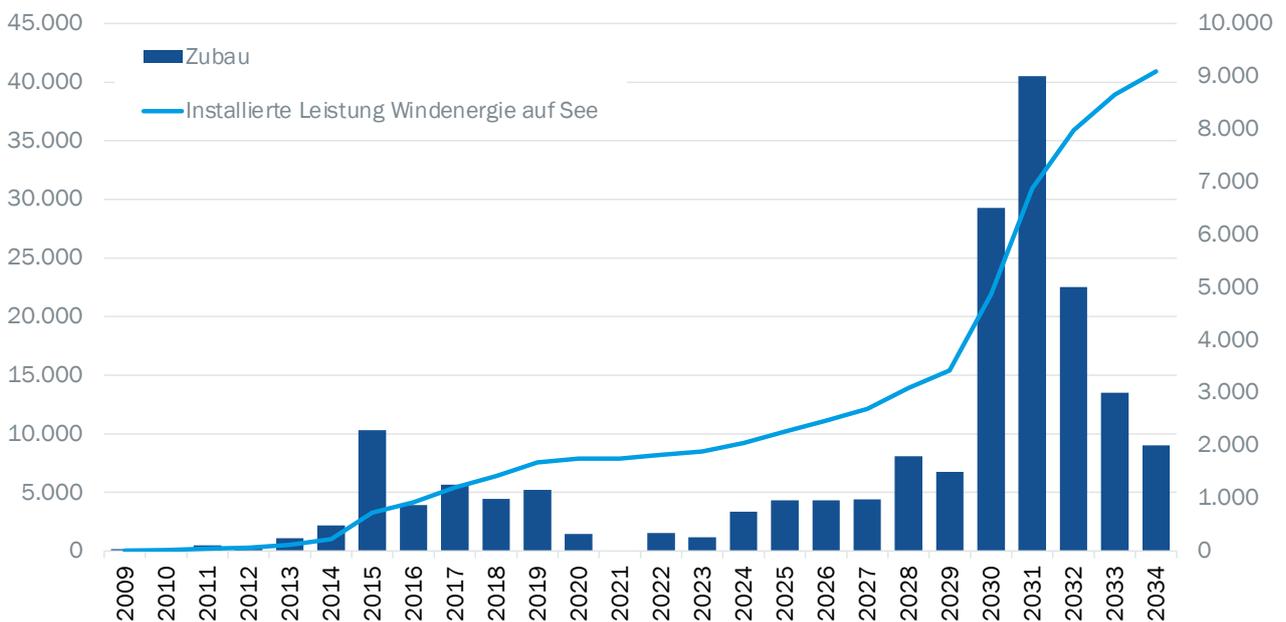
Die Ausbauziele für Windenergie an Land und auf See sind zentrale Bestandteile des EEG 2021/23. Es legt fest, dass bis zum Jahr 2030 in Deutschland eine installierte Leistung von 115 Gigawatt (GW) Windenergie Onshore erreicht werden soll. Dieses Ziel erfordert einen stetigen Zubau von Windenergieanlagen, um sowohl den Bedarf an erneuerbarer Energie zu decken als auch den Rückbau älterer Anlagen auszugleichen. Nicht vergebene Ausschreibungsmengen werden in Folgejahren nachgeholt, um sicherzustellen, dass der Ausbaupfad eingehalten wird.³⁴

Für die Offshore-Windenergie sieht das WindSeeG einen ambitionierten Ausbaupfad vor. Bis zum Jahr 2030 soll die installierte Offshore-Windkapazität in Deutschland mindestens 30 GW betragen. Hier sind Anpassungen am Ausschreibungsdesign notwendig, um eine fristgerechte, resiliente Realisierung und eine effiziente Netzanschlussplanung zu gewährleisten.³⁵

Die Ausbauziele führen zu einer starken Spitze im Ausbau, die bis 2030 geplant ist (siehe Abbildung 2). Die Hersteller und die am Ausbau und der Installation beteiligten Unternehmen stehen vor der Herausforderung, innerhalb weniger Jahre ihre Produktionskapazitäten stark zu erhöhen, um den hohen Bedarf zu decken. Dieser Kapazitätserhöhung steht aber eine zeitlich befristete Nachfrage gegenüber. Nach Erreichen der Ziele werden die nationalen Marktaktivitäten im Ausbau deutlich zurückgehen. Für eine mittelfristige Umsatz- und Beschäftigungsplanung erweist sich diese Schwankung für viele Unternehmen als problematisch, da ihre Kapazitäten nach dem Hochlauf nicht voll ausgelastet wären. Allein der Kapazitätsaufbau erfordert nach Experteneinschätzung mindestens zwei Jahre. Nach einem Peak Anfang der 2030er-Jahre müssten sie dann wieder reduziert werden.³⁶ Dies zeigt, dass Investitionen in flexible Produktionskapazitäten notwendig sind, um die Spitzen im Ausbau besser bewältigen zu können. Flexible Lieferketten und Arbeitskräfte sind unerlässlich, um den steigenden und dann wieder sinkenden Bedarf effizient zu bewältigen.

Abbildung 2:

(Erwartete) Entwicklung der Offshore-Windenergieleistung in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung nach AGEE-Stat und FEP 2025.

Gleichzeitig gibt es Bedenken, ob europäische Hersteller mit ihren Kapazitäten in der Lage sein werden, den Bedarf in diesem Umfang zu decken. D.h. die ambitionierten Zielsetzungen fördern wiederum das Engagement nicht-europäischer Unternehmen insbesondere am Offshore-Markt. Dies weist auf strukturelle Schwächen hin. Es bleibt eine hohe Abhängigkeit von Nicht-EU-Lieferanten für Komponenten und Anlagen, insbesondere aus Asien, sodass sich der Wettbewerbsdruck für die europäische Windindustrie allein aufgrund der Marktanforderungen erhöht. Die geographisch längeren Lieferketten sind tendenziell wiederum anfälliger für die Folgen von Handelskonflikten, geopolitischen Spannungen oder Lieferkettenunterbrechungen. Die stärkere Einbeziehung nicht-europäischer Unternehmen in den Kapazitätsaufbau wirkt sich in zweifacher Hinsicht auf die Wettbewerbssituation in Europa aus. Sie erhöht den Preisdruck und ist zugleich krisenanfälliger.

Entwicklung der Wettbewerbssituation

Die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Windkraftindustrie ist ebenso ein Aspekt von Resilienz, wie die Abhängigkeit von Primärrohstoffen und Komponenten für Windanlagen. Wie in Kapitel 2 dargelegt, ist ein zu hohes Maß an Abhängigkeit von Rohstoffen und Komponenten von einzelnen Herstellern, eine Herausforderung für die Resilienz der Windindustrie. Doch diese ist nicht nur darauf beschränkt, sondern muss auch im Kontext des gesamten europäischen Marktes betrachtet werden. Dies bedeutet, dass Lieferketten und Produktionskapazitäten auf deutscher und europäischer Ebene berücksichtigt werden müssen.

Eine resilient aufgestellte europäische Windkraftindustrie sollte in der Lage sein, die politischen Ziele des Ausbaus erneuerbarer Energien durch die Bereitstellung und einen zuverlässigen Betrieb von Windkraftanlagen zu unterstützen. Auf der Produktionsseite kämpfen die Hersteller von Windenergieanlagen aktuell mit unzureichend ausgelasteten Kapazitäten. In den letzten Jahren wurden mehrere Produktionsstätten geschlossen, darunter Werke von Nordex und Vestas, was zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und Produktionskapazitäten in Deutschland führte.³⁷ Gleichzeitig werden aus Kostengründen Produktionswerke ins Ausland verlagert und nicht-europäische Hersteller treten in den Markt ein.³⁸ Die Wettbewerber profitieren häufig von niedrigeren Produktionskosten, was durch staatliche Subventionen und geringere Lohnkosten in China und den USA ermöglicht wird. In China unterstützt die Regierung den Ausbau der Windindustrie durch großzügige Subventionen und strategische Investitionen in Forschung und Entwicklung. Gleichzeitig hat sie langfristige Pläne für den Ausbau der Windkraft festgelegt.³⁹ Der Inflation Reduction Act (IRA) in den USA bietet ebenfalls erhebliche steuerliche Anreize, um die heimische Produktion und den Ausbau der erneuerbaren Energien zu fördern.⁴⁰ Diese Programme schaffen langfristige Planungssicherheit, die es den Herstellern ermöglicht, ihre Kapazitäten effizient zu planen und technologische Innovationen voranzutreiben. Dies führt dazu, dass Wettbewerber mit Preisvorteilen von bis zu 40% agieren können.⁴¹ In Europa fehlt diese Planungssicherheit, gleichzeitig sind die Produktionskosten höher, was die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Hersteller schwächt.⁴² Somit werden der Erhalt und die Stärkung der europäischen Wertschöpfungsketten durch den laufenden Wettbewerb gefährdet.

Der in den kommenden 10 Jahren schwankende Verlauf der Ausbaupfade hat wettbewerbsrelevante Auswirkungen auf die Branche.⁴³ Aktuell können Hersteller nur schwer vorhersagen, wie viele Windkraftanlagen sie in welchen Zeitfenstern produzieren müssen oder wie sich die Nachfrage entwickeln wird. Infolgedessen laufen sie Gefahr, entweder Überkapazitäten aufzubauen, was zu hohen (Lager-)Kosten führen kann, oder Unterkapazitäten aufzuweisen, was Lieferverzögerungen und damit verbundene Wettbewerbsnachteile zur Folge haben kann. Investoren sind ebenfalls von dieser Unsicherheit betroffen. Stabile Ausbaupfade sind entscheidend für die Planung und Finanzierung von Projekten. Wenn die zukünftige Marktentwicklung unklar ist, wird das Investitionsrisiko erheblich erhöht. Investoren zögern folglich, Kapital für neue Projekte oder die Erweiterung bestehender Kapazitäten bereitzustellen, wenn sie nicht sicher sind, dass ihre Investitionen langfristig rentabel sein werden. Diese Zurückhaltung kann dazu führen, dass notwendige Innovationen und Erweiterungen nicht realisiert werden, was die gesamte Branche bremst und den Fortschritt hemmt.

4

Europäische und nationale (politische) Maßnahmen

Die Stärkung der Resilienz der Windindustrie erfordert sowohl staatliche als auch unternehmerische Maßnahmen. Auf politischer Ebene schaffen Initiativen wie der Net-Zero Industry Act und der Critical Raw Materials Act wichtige Rahmenbedingungen, um Lieferketten widerstandsfähiger zu machen. Gleichzeitig spielen Unternehmen und Verbände eine zentrale Rolle, indem sie Strategien zur Risikominimierung entwickeln und auf flexible, nachhaltige Lieferketten setzen.

Rolle staatlicher Maßnahmen

Auf EU-Ebene wurden weitere Förderprogramme mit unterschiedlichen Foki initiiert. Der vorgeschlagene Net-Zero Industry Act (NZIA) von 2023 zielt auf eine Erhöhung der Produktion strategischer Clean Technologies wie Photovoltaik, Batterien, Windturbinen, Wärmepumpen und Technologien zur Kohlenstoffbindung auf 40 % des Installationsbedarfs in der EU ab.⁴⁴ Dieses Gesetz ist ein Schlüsselement der EU-Strategie zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit in der globalen Energiewende und zur Sicherstellung einer nachhaltigen Energieversorgung. Der NZIA erhöht die Nachfrage nach erneuerbaren Energien, indem er in Beschaffungsverfahren für saubere Technologien und Ausschreibungen für erneuerbare Energien verpflichtende, nicht-preisbezogene Kriterien einführt. Besonders im Windsektor zielt er darauf ab, die Innovationskraft europäischer Hersteller zu fördern und gleichzeitig den technologischen Vorsprung gegenüber asiatischen und amerikanischen Konkurrenten zu verteidigen. Öffentliche Behörden müssen somit Aspekte wie Nachhaltigkeit, Resilienz, Cybersicherheit und andere qualitative Faktoren bei der Projektvergabe berücksichtigen. Diese Kriterien sind besonders im Bereich der Windindustrie entscheidend, da die langfristige Betriebssicherheit und die Minimierung von Ausfallzeiten zentrale Faktoren für die Resilienz der Energieversorgung darstellen. Darunter fällt auch das Resilienz-Kriterium, welches öffentliche Käufer verpflichtet, ihre Lieferquellen in Fällen hoher Abhängigkeit zu diversifizieren. Komponenten einer Anlage in einer Ausschreibung dürfen nicht zu mehr als 50 % aus dem EU-Ausland kommen. Diese Regelung zielt darauf ab, die europäische Windindustrie widerstandsfähiger gegenüber globalen Marktschwankungen und politischen Unsicherheiten zu machen. Die Windindustrie ist in hohem Maße auf kritische Rohstoffe angewiesen, die größtenteils aus Nicht-EU-Ländern importiert werden. Der NZIA fördert daher sowohl die Diversifizierung der Lieferketten als auch die Entwicklung von Recyclingkapazitäten innerhalb der EU, um die Abhängigkeit von Primärrohstoffen zu verringern. Zusätzlich setzt der NZIA Anreize zur Förderung neuer Produktionsanlagen in Europa, insbesondere durch steuerliche Erleichterungen und erleichterte Genehmigungsverfahren. Dies könnte langfristig zur Etablierung eines robusten, europaweiten Windindustrie-Netzwerks führen, das nicht nur den heimischen Bedarf deckt, sondern auch als globaler Exporteur agieren kann.⁴⁵

Eine weitere maßgebliche Maßnahme ist der Critical Raw Materials Act (CRMA)⁴⁶, der insbesondere die Produktionsrisiken in der Rohstoffförderung senken soll. Der Vorschlag beinhaltet verschiedene Maßnahmen, wie Subventionen für heimische Rohstoffprojekte, freiwillige Ziele zur Steigerung der heimischen Kapazität und Diversifizierung sowie ein Monitoring der Lagerung strategischer Rohstoffe. Außerdem soll ein neues Genehmigungssystem für Bergbau- und Verarbeitungsanlagen implementiert werden, das bestimmte Projekte als "strategisch" einstuft und in diesen Fällen einen beschleunigten Genehmigungsprozess sowie spezielle Finanzierungsmöglichkeiten für Unternehmen ermöglicht. Um ihre Verhandlungsposition zu stärken, wird die EU ein System für gemeinschaftliche Beschaffung einführen. Dieses wird die Nachfrage bündeln, um im Namen der Käufer weltweit mit Verkäufern zu verhandeln. Außerdem wurden strategische Rohstoffe definiert, die besonders wichtig für den Energie- und digitalen Wandel sowie für Verteidigungs- und Raumfahrtanwendungen sind. Der CRMA sieht vor, dass der EU-Bedarf dieser strategischen Rohstoffe bis 2030

1. zu mindestens 10 % durch heimischen Abbau,
2. zu mindestens 40 % durch heimische Verarbeitung,
3. zu mindestens 25 % durch Recycling gedeckt wird und
4. nicht mehr als 65 % jedes strategischen Rohstoffs in einer relevanten Stufe der Verarbeitung aus einem einzigen Drittland stammen.

Der CRMA unterstützt somit die heimische Gewinnung von Rohstoffen, was entscheidend für die Resilienz in der Rohstoffförderung ist. Außerdem wird verlangt, dass große Unternehmen (<500 Mitarbeitende) alle zwei Jahre eine Lieferkettenprüfung durchführen, einschließlich einer Bewertung der Rohstoffherkunft und -verarbeitung sowie eines Belastungstests für mögliche Unterbrechungsszenarien. Verkäufer von kritischen Rohstoffen könnten zudem verpflichtet werden, ihren ökologischen Fußabdruck offenzulegen, was insgesamt zu einer erhöhten Transparenz führen soll.⁴⁷

Rolle der Unternehmen und Verbände

Deutsche Unternehmen in der Windenergiebranche sind sich der Abhängigkeit von bestimmten Primärrohstoffen und Komponenten, wie etwa Permanentmagneten, bewusst. Um diesem Risiko zu begegnen, entwickeln Unternehmen und Verbände verschiedene Maßnahmen und strategische Ansätze zur Stärkung ihrer Resilienz. Gleichzeitig wird auch die langfristige Perspektive der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft in Betracht gezogen.

Ein zentrales Element im Umgang mit Rohstoffabhängigkeiten ist die Diversifikation der Lieferketten. Durch den Aufbau mehrerer Bezugsquellen versuchen Unternehmen, nicht zu sehr von einem einzigen Lieferanten oder einer bestimmten Region abhängig zu sein. Dies hilft, mögliche Engpässe abzufedern und das Risiko von Ausfällen zu verringern. Zudem hat sich die Lieferkettenplanung in der Windindustrie stark professionalisiert. Dies ermöglicht es, Lieferketten besser zu überwachen und zu steuern.

Trotz dieser Fortschritte zeigt sich jedoch, dass globale Krisen wie die COVID-19-Pandemie oder Engpässe in der Schifffahrtslogistik Herausforderungen darstellen, bei denen selbst gut diversifizierte Lieferketten an ihre Grenzen stoßen. Die Windenergiebranche hat sich in den letzten Jahrzehnten von einer eher pionierhaften Industrie hin zu einem hochprofessionalisierten und globalisierten Sektor entwickelt. Deutsche Unternehmen haben formalisierte Systeme zur Fehlererkennung und -behebung etabliert.⁴⁸

Insbesondere der Transport und die Lagerung von Windkraftkomponenten stellen eine Herausforderung für die Unternehmen dar, da die Kapazitäten oft begrenzt sind, die Infrastruktur nicht immer ausreicht und der bürokratische Aufwand für Genehmigungen die Transporte in die Länge ziehen kann. Deutsche Unternehmen arbeiten daran, die Lagerhaltung und Logistik so zu optimieren. Dies erfordert auch die Kooperation mit den lokalen politischen Akteuren, wie z.B. mit regionalen Infrastrukturen wie Häfen und Munizipalitäten.⁴⁹

Eine zentrale Rolle spielt die kreislaufwirtschaftliche Perspektive. Die Industrie weiß, dass sie auf lange Sicht verstärkt auf die Rückgewinnung und Wiederverwertung von Rohstoffen setzen muss, um ihre Abhängigkeit von knappen Primärrohstoffen zu reduzieren. Besonders im Bereich von Permanentmagneten und Seltenen Erden könnte das Recycling künftig eine größere Rolle spielen. Kurzfristig stellt dies jedoch keine Lösung dar, da die Infrastruktur und Technologien für das Recycling dieser Materialien noch nicht ausreichend entwickelt sind, um den aktuellen Bedarf zu decken.⁵⁰

Deutsche Unternehmen passen ihre Lieferkettenstrategien kontinuierlich an, um flexibel auf globale Veränderungen zu reagieren und mögliche Risiken zu minimieren. Diese regelmäßigen Anpassungen tragen dazu bei, dass das Tagesgeschäft auch in Krisenzeiten mit minimalen Störungen fortgeführt werden kann. Viele dieser Maßnahmen bleiben jedoch aus strategischen Gründen vertraulich, da Unternehmen sicherstellen wollen, dass ihre Anpassungen die Wettbewerbsfähigkeit fördern und nicht durch äußere Faktoren gefährdet werden.

5

Handlungsempfehlungen

Die Resilienz der Windindustrie ist ein entscheidender Faktor, um die ambitionierten Klimaziele Europas zu erreichen und die Energiewende nachhaltig zu gestalten. Vor dem Hintergrund geopolitischer Unsicherheiten, steigender globaler Nachfrage nach Rohstoffen und technologischem Wettbewerb ist es unerlässlich, dass sowohl Unternehmen als auch politische Akteure Maßnahmen ergreifen, um die Widerstandsfähigkeit der Branche zu stärken. Nachfolgend werden konkrete Handlungsempfehlungen formuliert und im Folgenden ausgeführt:

- Ausarbeitung des NZIA-Resilienzkriteriums
- Ausbau und Flexibilisierung der europäischen Produktionskapazitäten
- Diversifizierung der Lieferketten und Sicherung kritischer Rohstoffe
- Förderung der kollaborativen Kreislaufwirtschaft für eine nachhaltige Ressourcennutzung
- Beschleunigung von Planungs- und Genehmigungsverfahren
- Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit durch faire Marktbedingungen
- Erhöhung der Resilienz durch innovative Technologien und Digitalisierung

Ausarbeitung des NZIA-Resilienzkriteriums

Es gibt gerade von Branchenvertretungen einige Kritikpunkte am Resilienzkriterium, insbesondere für die Anwendung auf die Produktion von Windkraftanlagen und -komponenten. Das Resilienz-kriterium gibt vor, dass die Komponenten einer Windenergieanlage in einer Ausschreibung nicht zu mehr als 50 % aus einem nicht EU-Land kommen dürfen. Eine zentrale Kritik betrifft die bisher fehlende einheitliche Definition, wie diese 50 % berechnet werden sollen, also ob das Gewicht, die Stückzahl oder die Wertschöpfung als Kriterium herangezogen werden sollte.⁵¹ Außerdem erscheint die Auslegung der Regelungen zur Reduzierung der Abhängigkeiten von Lieferketten problematisch. Die Regelungen sehen vor, dass sie erst dann greifen, wenn mehr als 50 % der Abhängigkeit von einem speziellen Herkunftsland besteht. Diese Regelung wird als nicht effektiv angesehen, da in vielen Bereichen, wie beispielsweise bei Permanentmagneten, keine Alternativen zu Lieferungen aus China existieren.⁵² Des Weiteren sollten die Resilienzanforderungen technologiespezifisch gestaltet werden, da die Lieferketten und Projektgrößen je nach Technologie variieren.⁵³ Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die Gefahr einer Marktfragmentierung. Um diese zu vermeiden, sollten die Resilienz-kriterien EU-weit einheitlich angewendet werden. Unterschiedliche nationale Vorschriften würden die Kosten unnötig erhöhen und die Erreichung der Ziele des NZIA gefährden.⁵⁴ Darüber hinaus wird vorgeschlagen, die Resilienzbewertung im Windsektor auf Projektebene durchzuführen und sich auf wesentliche Komponenten wie Gondel, Turm und Rotorblätter zu konzentrieren, da eine Unabhängigkeit von Komponenten wie Permanentmagneten nahezu unmöglich ist.

Eine zu umfassende Bewertung könnte zusätzliche Komplexität und Kosten verursachen.⁵⁵ Der Resilienzbeitrag sollte zudem bereits im Angebotsprozess festgelegt werden, wobei der Nachweis während der Projektentwicklung zu erbringen ist, um sicherzustellen, dass die Anforderungen erfüllt werden.⁵⁶ Schließlich wird die Harmonisierung der Artikel 25 und 26 hinsichtlich der Ausnahmeregelungen für Länder wie die USA und das Vereinigte Königreich sowie für eng mit der EU integrierte Märkte wie die Türkei gefordert. Eine einheitliche Regelung würde zu mehr Klarheit und Konsistenz bei der Umsetzung des Gesetzes führen.⁵⁷

Die aktuellen regulatorischen Maßnahmen, wie sie im NZIA vorgesehen sind, werden als unklar und unsicher bewertet und bieten nach Ansicht der Branche nur begrenzte Unterstützung für die Industrie. Eine mögliche Interpretation des NZIA könnte darin bestehen, dass bestimmte Schlüsselkomponenten von Windkraftanlagen (wie Rotorblätter, Türme, Triebstränge und Maschinenhäuser) zu mindestens 50 % ihres Wertes in Europa gefertigt werden müssen. Dies würde nicht bedeuten, dass alle Komponenten vollständig aus Europa stammen müssten, sondern dass die Fertigung und das entsprechende Know-how in Europa gehalten werden. Diese Interpretation erfordert jedoch eine klare politische Unterstützung und entsprechende Anpassungen in der Umsetzung.⁵⁸ Es besteht also ein deutlicher Bedarf an Konkretisierung und Berücksichtigung spezifischer technologischer Quasi-Monopole in der Ausgestaltung des NZIA.

Ausbau und Flexibilisierung europäischer Produktionskapazitäten

Um die Abhängigkeit von außereuropäischen Lieferanten, insbesondere bei Schlüsselkomponenten, zu verringern, ist der gezielte und schrittweise Aufbau flexibler und skalierbarer Produktionskapazitäten innerhalb Europas von entscheidender Bedeutung. Dieser Ansatz sieht vor, dass bestehende europäische Produktionskapazitäten geschützt und die Lieferketten schrittweise überprüft werden, um zu entscheiden, welche Güter und Produkte innerhalb Europas hergestellt werden sollen. Ein besonderer Fokus sollte auf den Schutz des finalen Produkts, in diesem Fall der Windturbine, gelegt werden. Ohne eine entsprechende Sicherung der Produktion in Europa könnte es zu einer verstärkten Abhängigkeit von Importen aus Ländern wie Brasilien, den USA und China kommen, was hauptsächlich einem Handelsgeschäft entspricht und den Anreiz, die Produktion in Europa zu erhalten, vermindert.⁵⁹

Eine Möglichkeit, die Produktion von Schlüsselkomponenten, wie Permanentmagneten und Rotorblättern, in Europa zu fördern, bieten steuerliche Anreize für Unternehmen. Parallel dazu sind Investitionen in Forschung und Entwicklung erforderlich, um technologische Innovationen in der europäischen Windindustrie zu unterstützen. Ein konkreter Ansatz könnte die Entwicklung alternativer Materialien oder Technologien sein, die den Einsatz von Seltenen Erden verringern oder eliminieren.⁶⁰ D. h. es sind europäische und nationale Finanzierungsinstrumente zu entwickeln, die Investitionen, Produktion sowie Forschung und Entwicklung umfassen.

Diversifizierung der Lieferketten und Sicherung kritischer Rohstoffe

Der CRMA sieht vor, dass mehr Rohstoffe in Europa abgebaut, verarbeitet und recyclet werden, sowie maximal 65 % jedes strategischen Rohstoffs in einer Verarbeitungsstufe aus einem einzigen Drittland kommen soll. Dieses Ziel kann nur durch koordinierte Aktivitäten erreicht werden, die die Versorgungssicherheit langfristig gewährleisten.

Unternehmen sollten, falls nicht bereits der Fall, proaktiv daran arbeiten, ihre Lieferketten weitestgehend zu diversifizieren. Besonders wichtig ist hierbei die Zusammenarbeit mit Ländern, die über reiche Rohstoffvorkommen verfügen und bereit sind, nachhaltige Abbau- und Verarbeitungspraktiken zu unterstützen. Ein wichtiger Schritt in Richtung Lieferkettenresilienz ist der Aufbau strategischer Rohstoffpartnerschaften zwischen der EU und ressourcenreichen Ländern wie Kanada, Brasilien und Australien. Durch langfristige Handelsabkommen könnten Unternehmen den Zugang zu kritischen Rohstoffen sichern und gleichzeitig die Abhängigkeit von geopolitisch sensiblen Lieferketten verringern.⁶¹

Förderung der kollaborativen Kreislaufwirtschaft für eine nachhaltige Ressourcennutzung

Eine der langfristig wirksamsten Lösungen, um die Abhängigkeit von Primärrohstoffen zu verringern und die Ressourceneffizienz zu erhöhen, liegt in der Förderung der Kreislaufwirtschaft. Die Windindustrie kann bereits heute zwischen 80 % und 90 % der Bestandteile einer Windenergieanlage recyceln, insbesondere Materialien wie Stahl, Kupfer und Aluminium. Dennoch gibt es erhebliche Herausforderungen beim Recycling von Verbundmaterialien, die in Rotorblättern verwendet werden, sowie bei der Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Permanentmagneten.⁶²

Ein zentraler Punkt zur Stärkung der Resilienz der Windbranche ist die Weiterentwicklung von Recyclingtechnologien und -anlagen. Aktuell sind thermische Verfahren für das Recycling von Faserverbundstoffen, die in Rotorblättern verwendet werden, dominierend. Diese Verfahren führen jedoch zu Emissionen und ermöglichen keine vollständige Rückgewinnung der Materialien. Hier sollten verstärkte Forschungsanstrengungen unternommen werden, um innovative Recyclingmethoden zu entwickeln, die den Materialkreislauf schließen und so die Abhängigkeit von Primärmaterialien verringern. Langfristig könnten die bereits bestehenden Recyclingziele durch finanzielle Anreize und Förderprogramme unterstützt werden, um die wirtschaftliche Rentabilität des Recyclings zu erhöhen. Insbesondere die Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen wie Seltenen Erden aus gebrauchten Windturbinen könnte die Abhängigkeit von Importen aus China reduzieren.⁶³

Eine branchenübergreifende Zusammenarbeit könnte dazu beitragen effektive Recyclingstrategien und alternative Materialien zu entwickeln, die langfristig zur Entlastung der Lieferketten führen würden.⁶⁴

Beschleunigung von Planungs- und Genehmigungsverfahren

Die langwierigen Planungs- und Genehmigungsverfahren stellen eine erhebliche Hürde für den schnellen Ausbau der Windenergie dar. Um die Ziele des EEG zu erreichen, müssen die Verfahren zur Genehmigung von Windenergieprojekten weiter beschleunigt werden. Eine Vereinfachung der bürokratischen Abläufe sowie eine stärkere Nutzung digitaler Prozesse könnte dazu beitragen, dass Projekte schneller umgesetzt werden können. Bereits bestehende Maßnahmen, wie die Umsetzung der EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen sowie das Beschleunigungspaket für Erneuerbare Energien und das Solarpaket 1, zielen darauf ab, diese Prozesse zu optimieren und den Ausbau zu fördern. Diese Schritte verdeutlichen, dass auf politischer Ebene bereits Initiativen ergriffen wurden, um den Ausbau erneuerbarer Energien effizienter zu gestalten.

Es wird zudem empfohlen, standardisierte Verfahren zur Genehmigung von Windenergieprojekten auf nationaler und europäischer Ebene einzuführen, um langwierige Verzögerungen zu vermeiden. Hierbei könnte die Nutzung von digitalen Tools zur Verfahrensbeschleunigung, wie etwa die Einführung eines Online-Portals für Genehmigungen, Abhilfe schaffen. Unternehmen sollten zudem in enger Zusammenarbeit mit politischen Akteuren agieren, um Hindernisse in den Genehmigungsverfahren frühzeitig zu identifizieren und Lösungen zu erarbeiten.

Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit durch faire Marktbedingungen

Die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Hersteller wird durch hohe Produktions- und Energiekosten im Vergleich zu Wettbewerbern aus Ländern wie China und den USA beeinträchtigt. Die chinesische Regierung subventioniert ihre Windindustrie großzügig, während der IRA in den USA erhebliche steuerliche Anreize bietet, die die heimische Produktion und den Ausbau der erneuerbaren Energien fördern. Um vergleichbare Wettbewerbsbedingungen für die Unternehmen in Europa zu bieten, werden auch hier vergleichbare Maßnahmen erforderlich sein.⁶⁶ Geprüft werden sollten gezielte Subventionen und steuerliche Entlastungen für Unternehmen in der Windbranche, um die Produktionskosten zu senken und die europäische Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Darüber hinaus sollten europäische Unternehmen bei Investitionen in innovative Technologien gefördert werden, um ihre Produktionsprozesse effizienter und nachhaltiger zu gestalten. Um langfristig faire Marktbedingungen zu schaffen, ist es auch wichtig, dass die EU auf internationaler Ebene für ein Level Playing Field eintritt, um wettbewerbsverzerrende Subventionen und protektionistische Maßnahmen zu bekämpfen. Dies würde europäischen Unternehmen die Möglichkeit geben, auf dem globalen Markt wettbewerbsfähig zu agieren und gleichzeitig ihre Resilienz gegenüber globalen Preisschwankungen zu erhöhen.⁶⁷

Erhöhung der Resilienz durch innovative Technologien und Digitalisierung

Die Digitalisierung bietet enorme Potenziale zur Stärkung der Resilienz in der Windindustrie. Durch die Automatisierung von Produktionsprozessen sowie den Einsatz von KI zur Optimierung der Lieferketten können Unternehmen ihre Effizienz steigern und schneller auf globale Herausforderungen reagieren. Besondere Aufmerksamkeit sollte auf Cybersicherheit gelegt werden. Da die Windbranche sowie die Windenergieanlagen zunehmend digital vernetzt sind, steigt auch das Risiko von Cyberangriffen. Der NZIA fordert bereits Maßnahmen zur Cybersicherheit, diese sollten jedoch weiter ausgebaut und verbindlich gemacht werden. Unternehmen sollten verpflichtet werden, regelmäßige Risikoanalysen durchzuführen und sicherzustellen, dass ihre Systeme gegen Cyberbedrohungen geschützt sind.⁶⁸ Cybersicherheit ist ein entscheidender Faktor nicht nur für die Resilienz der deutschen Windindustrie, sondern auch der Energieversorgung, da Windkraftanlagen zunehmend auf digitale Steuerungssysteme und Vernetzung angewiesen sind. Diese Systeme überwachen den Betrieb, steuern die Energieproduktion und kommunizieren mit dem übergeordneten Stromnetz. Eine Schwachstelle in der Cybersicherheit könnte die gesamte Energieversorgung beeinträchtigen.

Ausländische OEMs, die wesentliche Komponenten der Windkraftanlagen produzieren und die Technologien entwickeln, haben potenziell Zugriff auf die Steuerungs- und Betriebssysteme der Windparks. Wenn solche Akteure negativen Einfluss nehmen wollen oder durch Cyberattacken von Dritten beeinträchtigt werden, könnten die Windkraftanlagen manipuliert werden.

Diese Attacken können zu Fehlfunktionen, Ausfällen oder sogar zur gezielten Abschaltung von Windparks führen, was nicht nur die Energieversorgung, sondern auch die Netzstabilität gefährden würde. Besonders kritisch ist, dass solche Cyberattacken das gesamte Energiesystem betreffen können. Da Windenergie in Deutschland eine bedeutende Rolle in der Stromversorgung spielt, könnten im schlimmsten Fall Angriffe auf die digitale Infrastruktur von Windrädern zu landesweiten Stromausfällen oder erheblichen Schwankungen im Netz führen. In einem stark digitalisierten und vernetzten Energiesystem besteht die Gefahr, dass Cyberangriffe sich kaskadenartig ausbreiten und so den Betrieb anderer Kraftwerke, Netzwerke und Energieunternehmen beeinträchtigen.⁶⁹

Die Windindustrie steht vor erheblichen Herausforderungen, die sowohl geopolitische als auch technologische Unsicherheiten betreffen. Diese Handlungsempfehlungen zeigen auf, dass eine langfristige Resilienz nur durch koordiniertes Handeln auf europäischer Ebene sowie durch die enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Politik erreicht werden kann. Die Stärkung der europäischen Produktionskapazitäten, die Diversifizierung der Lieferketten und die Förderung innovativer Technologien sind entscheidende Schritte, um die Wettbewerbsfähigkeit und Zukunftsfähigkeit der Windbranche zu sichern. Eine resiliente Windindustrie wird nicht nur die Versorgungssicherheit in Europa gewährleisten, sondern auch einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten.

Endnoten

- 1 Bundesnetzagentur 2024c.
- 2 Bundesverband WindEnergie.
- 3 Hans Böckler Stiftung (03.2023).
- 4 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 5 European Commission: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M. and Veeh, C. (2023b).
- 6 Stiftung Klimaneutralität.
- 7 ebd.
- 8 ebd.
- 9 ebd.
- 10 Tripathi, S. M., Tiwari, A. N., & Singh, D.
- 11 Stiftung Klimaneutralität.
- 12 Rystad Energy.
- 13 Tripathi, S. M., Tiwari, A. N., & Singh, D.
- 14 European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M. and Veeh, C. (2023b).
- 15 Stiftung Klimaneutralität.
- 16 ebd.
- 17 ebd.
- 18 Rystad Energy.
- 19 Stiftung Klimaneutralität.
- 20 Bundesverband WindEnergie.
- 21 Schönfeldt, M., Diehl, O., & Gassmann, J.
- 22 Workshop mit Vertreter*innen der Windindustrie.
- 23 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 24 Bundesministerium der Justiz (2023).
- 25 Bundesnetzagentur (2024b).
- 26 Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e. V.
- 27 Hans Böckler Stiftung.
- 28 ebd.
- 29 Deutscher Bundestag.
- 30 BWE.
- 31 Bundesministerium der Justiz (2024).
- 32 Bundesnetzagentur (2024b).
- 33 Bundesnetzagentur (2024a).
- 34 Deutsche Windguard (2024).
- 35 ebd.
- 36 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 37 Hans Böckler Stiftung.
- 38 Deutsche Welle.
- 39 Sahu, B. K.
- 40 Loan Programs Office.

- 41 VDMA.
- 42 Kiel Institute for the World Economy.
- 43 Hans Böckler Stiftung.
- 44 European Commission (2023a).
- 45 European Commission (2023a).
- 46 European Commission (2024b).
- 47 ebd.
- 48 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 49 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 50 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 51 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 52 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 53 WindEurope (2024), Interviews mit Herstellerunternehmen, Workshop mit Vertreter*innen der Windindustrie.
- 54 WindEurope (2024), Interviews mit Herstellerunternehmen, Workshop mit Vertreter*innen der Windindustrie.
- 55 WindEurope (2024), Interviews mit Herstellerunternehmen.
- 56 WindEurope (2024).
- 57 WindEurope (2024).
- 58 Interviews mit Herstellerunternehmen.
- 59 Interviews mit Herstellerunternehmen.
- 60 EIT (2021), EIT RawMaterials (14.11.2023), EIT RawMaterials (14.12.2020).
- 61 IRENA, WindEurope (2024).
- 62 Schönfeldt, M., Diehl, O., & Gassmann, J.
- 63 Schönfeldt, M., Diehl, O., & Gassmann, J.
- 64 Interview mit Herstellerunternehmen.
- 65 Interview mit Herstellerunternehmen; Workshop mit Vertreter*innen der Windindustrie.
- 66 Interview mit Herstellerunternehmen, WindEurope (2024).
- 67 Workshop mit Vertreter*innen der Windindustrie.
- 68 WindEurope (2022), Interview mit Herstellerunternehmen.
- 69 WindEurope (2022), Interview mit Herstellerunternehmen.



Dossier

Titan in der Verteidigungswirtschaft

Lösungswege zur Steigerung der Resilienz für Titan
in der deutschen Verteidigungsindustrie

5

Autorenteam

Miguel Wahle

Helena Seide

Jakobus K. Jaspersen

Inhalt Dossier

154

Hintergrund

156

Titan in der Verteidigungsindustrie

169

Herausforderungen und geopolitische Risiken

174

Regulierung und staatliche Strategien

177

Maßnahmen der Unternehmen

179

Handlungsoptionen

186

Anhang

1

Hintergrund

Ausgangslage

Der russische Angriffskrieg auf die Ukraine hat eine neue Aufrüstungsdynamik in Europa und Deutschland ausgelöst, was den Bedarf an für die Verteidigungsindustrie relevanten Rohstoffen und Vorprodukten weiter verstärkt. Damit werden nach den coronabedingten Engpässen auch in diesem Industriezweig Lieferkettenrisiken stärker in das Bewusstsein gerückt.

Das vorliegende Dossier fokussiert sich auf Titan als Rohstoff, um beispielhaft die Problematik von Vorleistungsbezügen aus autoritären Staaten und mögliche Lösungswege zu beleuchten. Titan ist einer der meistverbaute Werkstoffe, der in wehrtechnischem Großgerät zu finden ist. Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften ist Titan unverzichtbar für den Bau von Verteidigungsprodukten. Eine Substituierbarkeit durch andere Rohstoffe oder Materialien ist in diesem sicherheitstechnisch sensiblen Bereich fast nicht möglich. Durch den hohen Titanbedarf in der militärischen Luftfahrt und dem Marineschiffbau spielt Titan für Deutschland, wo diese beiden Industrien besonders stark sind, eine hervorgehobene Rolle.

Struktur der deutschen Verteidigungsindustrie

Die Sicherheits- und Verteidigungsindustrie (SVI) in Deutschland ist eine Querschnittsindustrie. Viele Unternehmen in diesem Sektor produzieren sowohl für den zivilen als auch den militärischen Markt. Der verteidigungsindustrielle Zweig der SVI, der im Fokus dieser Studie steht, ist geprägt von großen Systemhäusern und zahlreichen mittelständischen Zulieferern, dem sogenannten wehrtechnischen Mittelstand.¹ Im Jahr 2020 wurden in Deutschland Rüstungsgüter im Wert von 11,3 Milliarden Euro produziert. Der größte Anteil, rund 63 % oder 7,1 Milliarden Euro, entfiel auf die militärische Luft- und Raumfahrt, einschließlich Technologien wie dem Eurofighter und dem Transportflugzeug A400M. Im Bereich Waffen und Munition wurden 2,4 Milliarden Euro umgesetzt, während der militärische Kampffahrzeugbau einen Umsatz von 721 Millionen Euro erzielte.² Mit der Neufassung der Strategie zur Stärkung der SVI wird zukünftig auch der Marineschiffbau als Schlüsseltechnologie der deutschen Verteidigungsindustrie definiert.³ Die Verteidigungsindustrie Deutschlands hat über ihre wirtschaftliche Bedeutung hinaus eine sicherheitspolitische Dimension. Abhängigkeiten von autoritären Staaten können in diesem Bereich deshalb besonders problematisch sein.

Ziel, Methodik und Aufbau der Studie

Das Ziel dieses Themendossiers besteht darin, die Abhängigkeiten der deutschen Verteidigungsindustrie von Titanlieferungen aus autoritären Staaten detailliert zu untersuchen und dabei Risiken und Herausforderungen für die Versorgungssicherheit zu identifizieren. Im Vordergrund stehen die Analyse der Lieferketten sowie die Entwicklung von Handlungsempfehlungen, um die Resilienz der deutschen und europäischen Verteidigungsindustrie zu stärken. Dabei wird nicht nur der Bedarf an Rohstoffen, sondern auch der Zugang zu verarbeiteten Produkten und kritischen Vorprodukten betrachtet. Besondere Aufmerksamkeit gilt den Implikationen für die deutsche Verteidigungsindustrie im Kontext geopolitischer Spannungen und globaler Marktveränderungen.

Die Methodik dieses Themendossiers stützt sich auf eine Kombination aus umfangreichen Literatur-Recherchen und Interviews mit Experten aus Industrie und verteidigungspolitischer Forschung. Ergänzend wurden Daten durch die Analyse von statistischen Erhebungen, Handelsdaten, Marktstudien und Geschäftsberichten der größten Verteidigungsunternehmen in Deutschland gewonnen (vgl. Anhang: Liste der untersuchten Geschäftsberichte).

Im nachfolgenden Kapitel werden zunächst die Daten und Fakten zur weltweiten Produktion von und zum Handel mit Titan sowie dessen Verwendung in der Verteidigungsindustrie analysiert. In Kapitel 3 werden daraufhin die Herausforderungen und geopolitischen Risiken im Zusammenhang mit der Titanversorgung beschrieben und die Auswirkungen für die deutsche Verteidigungsindustrie eingeordnet. Die Strategien und Maßnahmen, die von Staat und Unternehmen bereits ergriffen wurden, um diesen Risiken zu begegnen, werden in Kapitel 4 und 5 erläutert. Abschließend werden in Kapitel 6 Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2

Titan in der Verteidigungsindustrie

Die Verteidigungsindustrie ist auf eine Vielzahl von kritischen Rohstoffen angewiesen, darunter Aluminium, Graphit und Titan.⁴ Insbesondere Titan ist aufgrund seiner Eigenschaften, wie hohe Festigkeit, geringes Gewicht und Korrosionsbeständigkeit, in wehrtechnischem Großgerät, wie Fluggeräten, Kampfschiffen und Panzern, unverzichtbar.

Titanmetall gibt es in verschiedenen Qualitätsstufen. Für die Verteidigungsindustrie eignet sich nur Titanschwamm der höchsten Qualitätsstufe mit Reinheitsgraden von über 99 %. Insbesondere die daraus hergestellte Titanlegierung „Grade 5 Titan“, auch als „Ti-6Al-4V“ bezeichnet, welche aus 90 % Titan, 6 % Aluminium und 4 % Vanadium besteht, wird von der Verteidigungsindustrie nachgefragt.

Titanlegierungen finden breite Anwendung in der Produktion von kritischen Komponenten für Flugzeuge, Flugkörper (z.B. im Marschflugkörper „Taurus“) und Schiffen, da sie auch unter extremen Bedingungen strukturelle Stabilität und Leistung sicherstellen. In der Luftfahrtindustrie wird Titan in strukturellen Komponenten wie Flugzeugrümpfen, Triebwerksbauteilen und Fahrwerken eingesetzt, was eine erhebliche Gewichtsreduzierung bei gleichbleibender Festigkeit ermöglicht. Im Marineschiffbau kommt Titan vor allem in Rumpfstrukturen zum Einsatz, wobei seine Korrosionsbeständigkeit – insbesondere in salzhaltigen Umgebungen – eine zentrale Rolle spielt.⁵

Der Bedarf der Verteidigungsindustrie am Titan-Gesamtverbrauch in der EU liegt bei etwa 2 %.⁶ Große Flugzeugbauer benötigen beispielsweise jährlich rund 8.000 Tonnen Titan-Rohmaterialien für zivile und militärische Anwendungen.⁷ Dazu zählen aufgewinkelte Bleche sowie Halberzeugnisse wie Schmiedeteile, Gussteile, Platten und Bleche. Es wird prognostiziert, dass der Weltmarkt für Titan von 2022 bis 2030 um etwa 81,85 % anwachsen wird.⁸

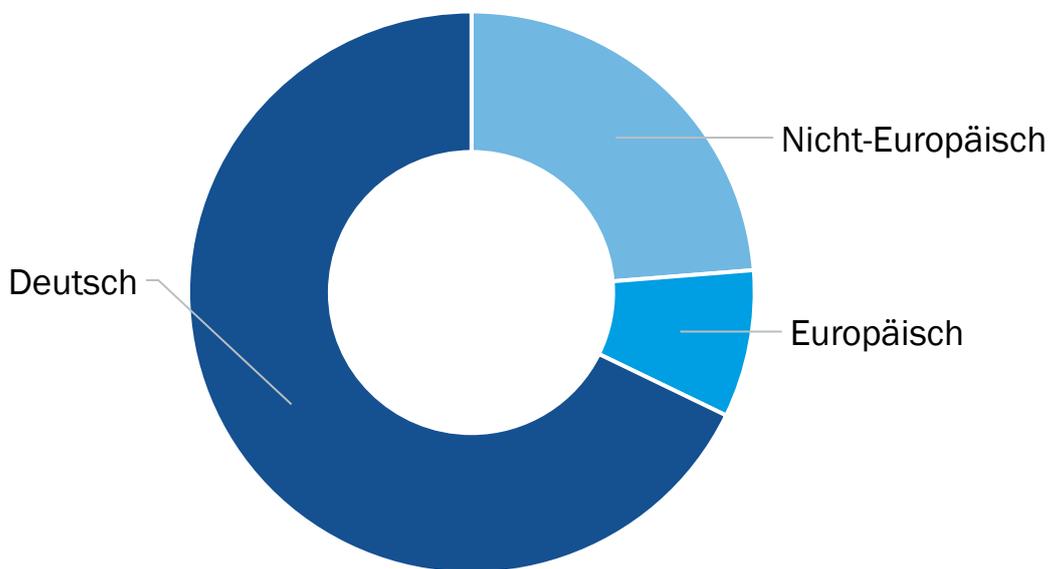
Die Bedeutung von Titan für die Verteidigungsindustrie ist allerdings auf allen Verarbeitungsstufen von geopolitischen Spannungen und Marktvolatilitäten gekennzeichnet.

Importabhängigkeiten Deutschlands und der EU

Abbildung 1 zeigt, dass in Deutschland die Abhängigkeit bei wehrtechnischem Großgerät von nicht-europäischen Ländern vergleichsweise gering ist. Dies wird v. a. durch Partnerschaften mit europäischen und NATO-Partnern gesichert.

Abbildung 1:

Militärische Beschaffung in Deutschland nach Herkunft, 2020 -2024



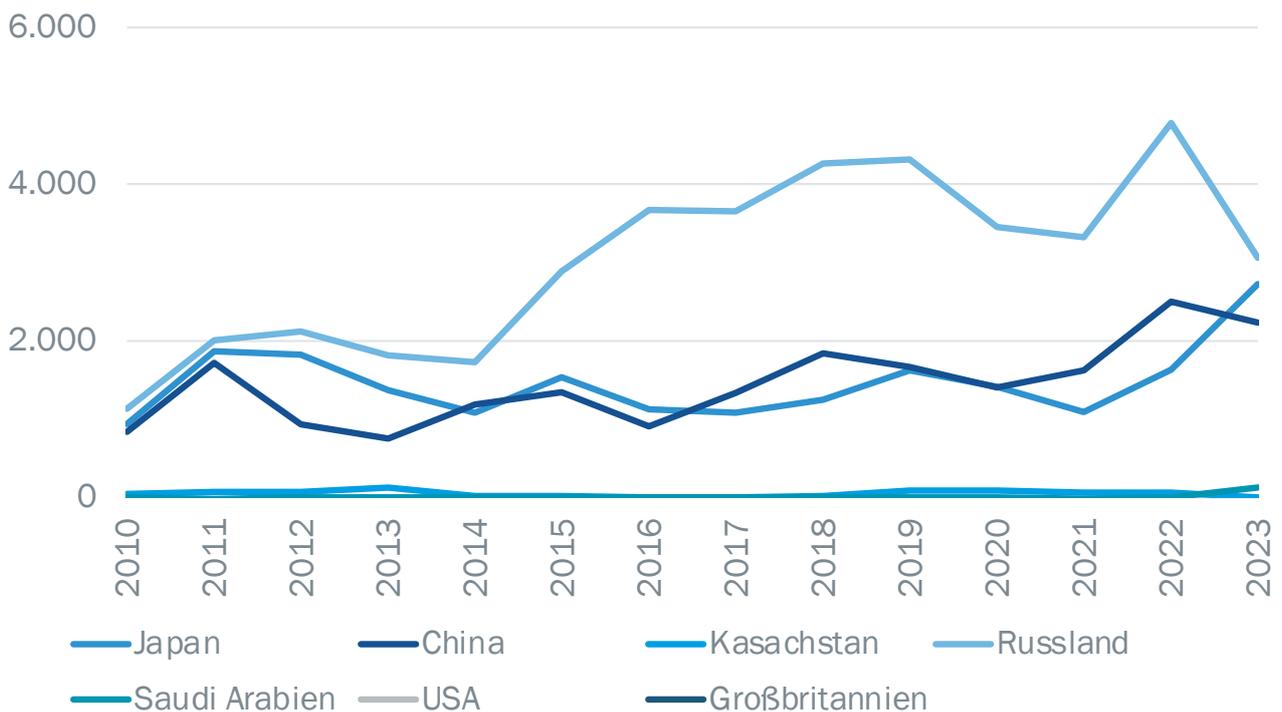
Quelle: Eigene Darstellung nach Lopez, Juan Mejino / Wolff, Guntram B. (2024): What role do imports play in European defence? Bruegel 04.07.2024.

Auf der Ebene der Vorprodukte, die für die Herstellung dieser Systeme benötigt werden, bestehen jedoch laut Expertenmeinungen erhebliche Abhängigkeiten vom nicht-europäischen Ausland. Diese ergeben sich aus der Integration der europäischen und deutschen Verteidigungsindustrie in internationale Wertschöpfungsketten und Liefernetzwerke. Eine 2016 veröffentlichte Studie des Joint Research Centre der EU-Kommission stellte bereits fest, dass eine Abhängigkeit der europäischen Verteidigungsindustrie im Zugang zu Halbfertigprodukten und Hochleistungsmaterialien wie Speziallegierungen liegt.¹⁰ Auch in einer 2023 veröffentlichten Studie des The Hague Center for Strategic Studies wurden 41 kritische Rohstoffe identifiziert, die essenziell für die europäische Verteidigungsindustrie sind.¹¹ Es zeigt sich, dass Titan zu den drei kritischsten Materialien gehört und daher für die Verteidigungsindustrie in Deutschland und in der EU unverzichtbar ist.

Herausforderungen ergeben sich daraus, dass der Abbau von Titanmineralien und auch die Weiterverarbeitung zu Titanschwamm nicht bzw. nur in einem geringen Umfang in der EU stattfindet. Den größten Teil seines Bedarfs an Titan und Titanprodukten müssen Deutschland und die EU aus dem Nicht-EU-Ausland decken. Für Deutschland sind die drei mit Abstand größten Nettoimportländer für Titan und Titanprodukte Russland, Japan und China (s. Abbildung 2), welche zusammen nahezu den vollständigen Nettoimport von außerhalb der EU nach Deutschlands abbilden.¹² Saudi-Arabien hat in diesem Feld bisher keine Rolle gespielt, aber es deutet sich bereits an, dass sich dies in Zukunft ändern könnte. Auffallend im Vergleich mit anderen EU-Mitgliedsstaaten ist, wie stark gerade Deutschland im Bereich Titan von Russland abhängig war und trotz des drastischen Rückgangs seit Ausbruch des Ukrainekriegs noch ist.

Abbildung 2:

Nettoimport nach Deutschland von Titan und Titanprodukten in t



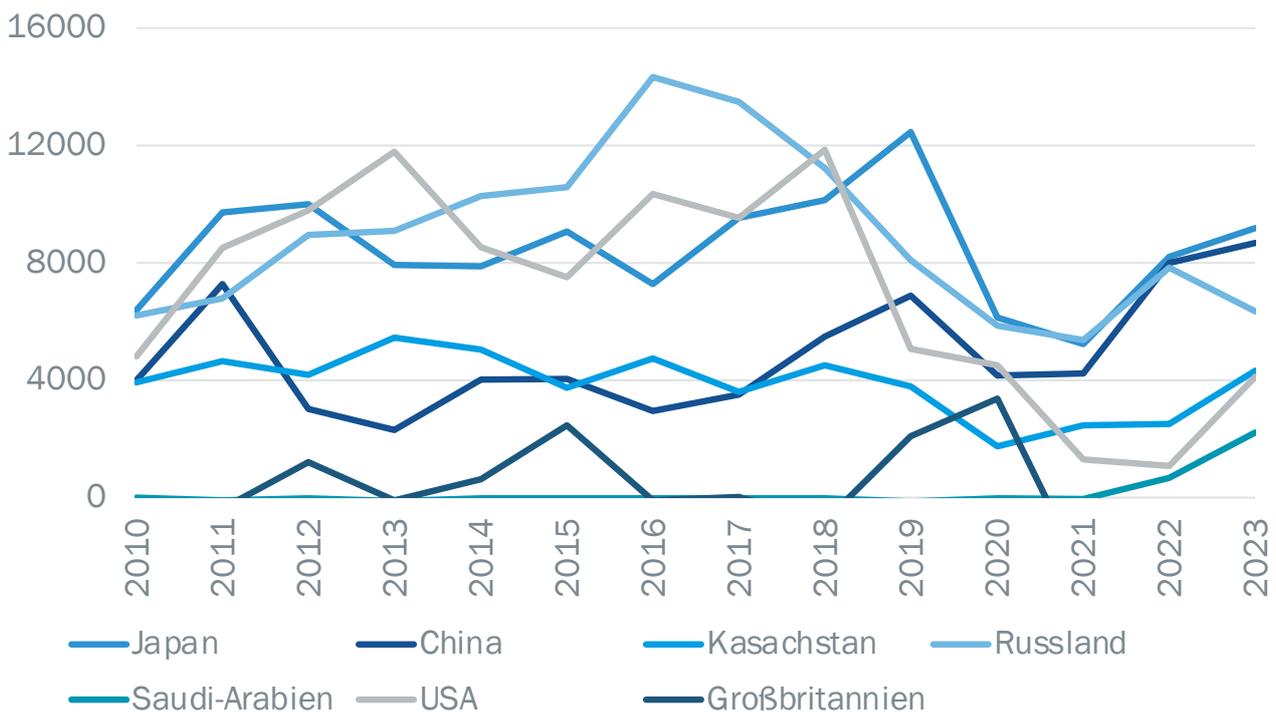
Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage von Eurostat. HS 8108.

Geringfügige Mengen werden bei Eurostat oft nicht erfasst, sodass teilweise Schätzungen vorgenommen werden mussten. Insignifikante Abweichungen sind deshalb möglich.

Deutschland bezieht einen Großteil seines Imports an Titan- und Titanprodukten direkt von außerhalb der EU. Doch etwa ein Drittel des Gesamtimports entfallen auf EU-Länder, die wiederum ihre Titan- und Titanprodukte sowie deren Vorprodukte teilweise aus dem Ausland beziehen. Um die teilweise indirekten Importabhängigkeiten Deutschlands im Bereich Titan und Titanprodukte nachzuvollziehen, ist deshalb ein ergänzender Blick auf die Importe der EU unabdingbar. Analoges gilt auch für andere Produktkategorien, die in diesem Dossier betrachtet werden.

Bei Titan und Titanprodukten bietet sich für die EU ein ähnliches Bild wie für Deutschland. Dies ist dadurch bedingt, dass Deutschland einen beträchtlichen Teil der Gesamtimporte der EU in Anspruch nimmt. Der größte Nettoimport entfällt auf Japan, Russland und China (s. Abbildung 3). Im Gegensatz zu Deutschland ist der Nettoimport in die EU bereits diversifizierter. Auch die USA und Kasachstan spielen eine nicht unbeträchtliche Rolle. Deutlicher noch als bei Deutschland wird an dieser Stelle die wachsende, wenn auch noch geringe Rolle Saudi-Arabiens als Lieferant.

Abbildung 3: Nettoimport in die EU von Titan und Titanprodukten in t



Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage von Eurostat. HS 8108.

Geringfügige Mengen werden bei Eurostat oft nicht erfasst, sodass teilweise Schätzungen vorgenommen werden mussten. Insignifikante Abweichungen sind deshalb möglich.

Die gezeigten Datenauswertungen sind nur ein erster Indikator für die Abhängigkeiten im Bereich Titan. Die grobmaschige Produktklassifizierung gilt es durch differenziertere Analysen aufzuschlüsseln.

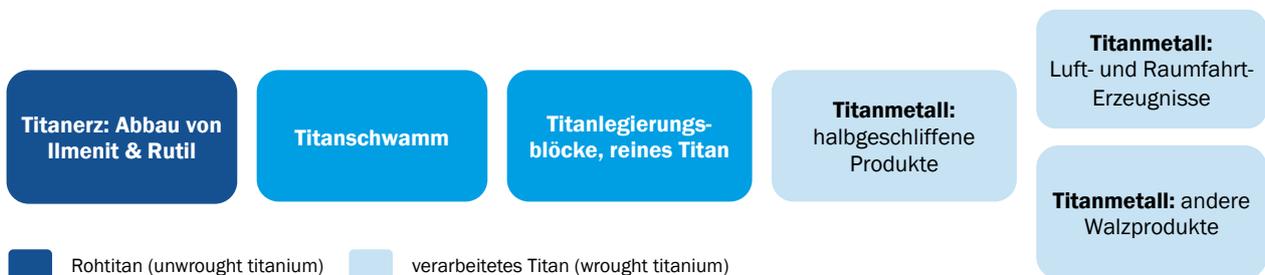
Trotz vieler Lieferanten für den Rohstoff Titan dominiert China die globale Produktion, insbesondere den Verarbeitungsschritt hin zu Titanschwamm. Russland und Kasachstan wiederum spielen eine große Rolle im Marktsegment von hochqualitativem Titan, welches für die Luft- und Raumfahrt sowie die Verteidigungsindustrie essenziell ist. Nach wie vor sind diese Staaten Hauptbezugsländer für die EU.

Globale Titan-Wertschöpfungskette

Die globale Wertschöpfungskette von Titanmetall ist komplex und umfasst mehrere Stufen (s. Abbildung 4). Sie beginnt mit der Rohstoffgewinnung des Titanerzes, aus dem durch thermische und chemische Verfahren Titanschwamm erzeugt wird, welches anschließend durch Brechen, Mahlen, Pressen und Schmelzen zu Barren und zusätzlich durch Walzen zu Blechen weiterverarbeitet wird. Abhängig von Anzahl und Qualität dieser Prozessschritte entsteht Titanmetall in unterschiedlicher Qualität. Durch weitere Verarbeitung entstehen dann Titanlegierungen.¹³

Abbildung 4:

Vereinfachte Wertschöpfungskette Titan



1. Titan-„Schwamm“ ist die primäre Metallstufe des Titans, ein Zwischenprodukt zwischen Titanerz und Titanbarren. Die nächste Verarbeitungsstufe ist das Schmelzen von Schwamm und/oder Schrott (hauptsächlich Neuschrott), in der Regel mit Legierungselementen wie Vanadium und Aluminium, um Barren und Brammen sowie Titanpulver für die additive Fertigung herzustellen. Allgemeine Walzprodukte in verschiedenen (Stangen und Stäbe, Rohre, Draht, Bleche und Platten) und andere nachgelagerte Erzeugnisse (Schmiedestücke, Gussstücke, Fertigteile und Komponenten) werden anschließend aus Rohblöcken (und Brammen) hergestellt. Bei der Verarbeitung von Titan zu Fertigerzeugnissen fallen große Mengen an Schrott, der ein wertvoller Rohstoff für die Herstellung von Roh titan ist.
2. Bei den untersuchten Titanrohstoffen handelt es sich um Rohprodukte, Knetprodukte und Titanschrott. Titanminerale, Titanschlacke und Titanoxid für Pigmente stehen nicht im Mittelpunkt.
3. Ungeknetete Titanerzeugnisse umfassen Schwämme und Barren. Knetzeugnisse aus Titan umfassen Walzprodukte und Erzeugnisse aus Titan.

Quelle: Eigene Darstellung, adaptiert nach „Titanium’s value chain and scope“ in Europäische Kommission (2022): Titanium metal: Impact assessment for supply security.

Abbau und Förderung

Titan wird hauptsächlich aus den Mineralien Ilmenit (FeTiO₃) und Rutil (TiO₂) gewonnen. Die Hauptförderländer sind China, Australien, Indien, Norwegen, Südafrika und Mosambik.¹⁴ Die EU bezieht Titanminerale und -konzentrate vor allem aus den Ländern Norwegen, Südafrika, Ukraine, Mosambik, Sierra Leone, Australien und Kanada. Auch für Deutschland nimmt Norwegen die Spitzenposition für den Bezug von Titanminerale von außerhalb der EU ein. Ein beträchtlicher Teil des Gesamtimports Deutschland lässt sich schwer zurückverfolgen, da er indirekt über die Beneluxstaaten ins Land kommt.¹⁵ Obwohl Ilmenit und Rutil weit verbreitet sind, führen ihre geringe Konzentration und die aufwendige Verarbeitung in den weiteren Schritten dazu, dass Titanmetall letztendlich ein relativ teurer und seltener Werkstoff bleibt.¹⁶

Tabelle 1:

Tabellarische Übersicht über die Förderung von Titanminerale und ihrer Weiterverarbeitung nach Ländern

	Förderung Ilmenit und Rutil 2023 in kt	Reserven von Ilmenit und Rutil 2023 in kt
USA	200	2.000
Australien	600	215.000
Japan	-	-
China	3.100	210.000
Russland	**	**
Kasachstan	*	*
Mozambik	1.609	22.720
Südafrika	1.100	34.100
Indien	223	92.400
Saudi-Arabien	-	-
Norwegen	430	37.000
Ukraine	110	8.400
Global	9.200	750.000

Quelle: Eigene Darstellung. Daten von U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey S. 186-189.

* Keine aktuellen belastbaren Daten verfügbar.

** Keine aktuellen belastbaren Daten verfügbar. Russland hat beträchtliche Reserven.¹⁷ Die aktuelle Abbaumenge ist unbekannt. Eine Erweiterung der Abbaukapazitäten von Titanminerale in Russland ist geplant.¹⁸

- Keine signifikante Produktion bekannt.

In Europa sind Norwegen und die Ukraine die einzigen Länder mit bedeutenden Reserven an Ilmenit und Rutil, die dort auch bereits abgebaut werden. Die 2023 verabschiedete Mineralstrategie Norwegens bekräftigt den Willen, den Abbau im eigenen Land auszuweiten.

i

Abbau von Titanmineralien in der EU

Im Rahmen der Mineralstrategie Norwegens soll ein Bündel an Maßnahmen umgesetzt und ein „national mineral forum“ etabliert werden. Dieses wird dem Handels- und Industrieministerium unterstehen und die Implementation und Weiterentwicklung der Mineralstrategie vorantreiben. Diese definiert fünf Ziele:

1. Norwegische Rohstoffprojekte sollen schneller implementiert werden.
2. Die norwegische Rohstoffindustrie soll zur Kreislaufwirtschaft beitragen.
3. Sie soll nachhaltiger werden.
4. Privates Kapital soll für Rohstoffprojekte mobilisiert werden.
5. Internationale Partnerschaften sollen ausgebaut werden.¹⁹

Resilienz als Ziel schwingt in der norwegischen Mineralstrategie mit, doch genießt sie keine Priorität. Stattdessen liegt ein starker Fokus auf ökologischen Aspekten, welche in Konkurrenz stehen zum möglichst schnellen Ausbau des Rohstoffabbaus in Norwegen.

Trotz dieser Bestrebungen ist es aufgrund der langen Anlaufzeiten für Projekte ungewiss, wie effektiv diese Ziele umgesetzt werden können. Selbst ein Ausbau der Rohstoffförderung in Norwegen wird die Abhängigkeiten Europas mittelfristig nur begrenzt reduzieren. Darüber hinaus fehlen in der EU Verarbeitungskapazitäten für Titanschwamm, sodass eine Erhöhung des Abbaus von Titanmineralien allein noch nicht ausreichend wäre, um einen Resilienzzugewinn mit Blick auf Titanmetall verbuchen zu können.

Im Fall der Ukraine zeichnet sich ein anderes Bild. Hier sind nicht nur Titanerze vorhanden, die abgebaut werden, sondern es existieren auch die notwendigen Anlagen und das Fachwissen, um das Titan in verschiedenen Formen weiterzuverarbeiten.²⁰ Im Jahr 2021 wurde mit einem Memorandum of Understanding die Grundlage für eine Zusammenarbeit zwischen der EU und der Ukraine im Bereich der Rohstoffgewinnung geschaffen. Diese Partnerschaft zielt darauf ab, die Rohstoffversorgung der EU zu diversifizieren und steht im Einklang mit den Zielen des Critical Raw Materials Act. Die strategische Bedeutung der ukrainischen Abbaugelände zeigt sich insbesondere im derzeitigen Krieg gegen Russland, wo derzeit zahlreiche titanabhängige Militärtechnologien zum Einsatz kommen.²¹



Titanindustrie in der Ukraine

Die Ukraine war 2019 für 7 % der weltweiten Förderung von Titanmineralien verantwortlich. 2020 produzierte die Ukraine weltweit 2% des Titanschwamms und hatte einen Anteil von 1% am globalen Export von Titanschwamm, 7% bei unbearbeitetem Titanmetall und 2% bei verarbeitetem Titan. Die Ukraine war bis 2021 der Hauptlieferant von Titanmineralienkonzentraten nach Russland, mit einem Anteil von 70 % bis 90 %. Nach dem Verbot der Exporte von Titanrohstoffen von der Ukraine nach Russland hat der russische Titanproduzent VSMPO Avisma seine Einkäufe auf andere Länder umgestellt. Die Unterbrechung der ukrainischen Exporte betrifft jedoch hauptsächlich die TiO₂-Produktion und nicht direkt die Versorgung mit Titanmetall.²²

Die einzige Anlage zur Titanschwammproduktion in Europa befindet sich in Saporischschja im Südosten der Ukraine, in der Nähe der Frontlinie des aktuellen Konflikts. Je nach Ausgang des Ukrainekrieges behält oder entfällt für Europa der Zugang zur Herstellung dieses verteidigungsstrategisch wichtigen Zwischenprodukts.²³

Verarbeitung zu Titanschwamm

Die nächste Stufe in der Wertschöpfungskette ist die Verarbeitung von Titanmineralien zu Titanschwamm. Es handelt sich um ein aufgereinigtes, poröses Zwischenprodukt, das bei der chemischen Reduzierung des Erzes entsteht und als Ausgangsmaterial zur Herstellung von metallischem Titan dient.

Die Produktion von Titanschwamm wird global von chinesischen Unternehmen dominiert, die mehr als die Hälfte des Gesamtvolumens ausmachen.²⁴ Japanische Firmen halten etwas weniger als ein Viertel, während Russland hauptsächlich durch das Unternehmen VSMPO-Avisma, das etwa 15 % der globalen Produktion stellt, vertreten ist.²⁵ Kasachische Unternehmen tragen mit weniger als 10 % zur weltweiten Produktion bei.²⁶ Weitere Produzenten sind die Ukraine, Indien und seit kurzem auch Saudi-Arabien.²⁷ Dort hat das japanische Unternehmen Toho Titanium in ein Joint Venture mit Advanced Metals Industries (AMIC) investiert. In der EU gibt es keine eigene Produktion von Titanschwamm. Die Herstellung von Titanpigmenten (Titandioxid) für die Chemie-, Farben- und Papierindustrie als zivile Anwendungsbereiche ist gut entwickelt.

Obwohl China auf dieser Stufe der Wertschöpfungskette den Markt dominiert, spielt es als Lieferant in der Wertschöpfungskette der deutschen Verteidigungsindustrie keine große Rolle. Dies liegt daran, dass chinesischer Titanschwamm bisher qualitativ nicht für kritische Flugzeugkomponenten und die Verteidigungsindustrie verwendbar war.²⁸ Die einzigen qualifizierten Hersteller für die Produktion von Titanschwamm in dieser Qualität sind Japan, Russland und Kasachstan.²⁹ Seit kurzem produziert Saudi-Arabien mit einem neuen Werk ebenfalls Titanschwamm der benötigten Qualität.³⁰

Tabelle 2:

Tabellarische Übersicht über die Titanschwamm-Produktion nach Ländern

	Produktion Titanschwamm 2023 in t	Produktionskapazität Titanschwamm 2023 in t
USA	**	500
Australien	-	-
Japan	60.000	65.200
China	220.000	260.000
Russland	20.000	46.500
Kasachstan	14.000	26.000
Mozambik	-	-
Südafrika	-	-
Indien	300	500
Saudi-Arabien	12.000	15.600
Norwegen	-	-
Ukraine	1.000*	12.000*
Global	330.000	410.000

Quelle: Eigene Darstellung. Daten von U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey S. 186-189.

*Für die Ukraine liegen keine aussagekräftigen Daten vor, daher wurden hier die Daten aus dem Mineral Commodity Summaries Bericht 2023 entnommen, die sich auf das Jahr 2022 beziehen. Im Vorkriegsjahr 2021 belief sich die Produktion an Titanschwamm auf 411.000 Tonnen (USGS 2023).

**Keine aktuellen Daten zugänglich. Die USA geben aus Datenschutzgründen in dieser Kategorie keine Informationen heraus.

- Keine nennenswerte Produktion bekannt.

Die EU verfügt über keine eigene Titanschwammproduktion und ist daher auf Importe angewiesen. Für Deutschland stammen die Nettoimporte in der Kategorie unverarbeitetes Titan und Titanpulver in erster Linie aus Japan, China und Russland. Bei der EU hingegen spielen auch die USA, Saudi-Arabien und Kasachstan eine bedeutende Rolle. Das letztgenannte Land hat mit einem Importanteil von über einem Viertel die Spitzenposition in diesem Produktsegment und eine steigende Tendenz inne.³¹

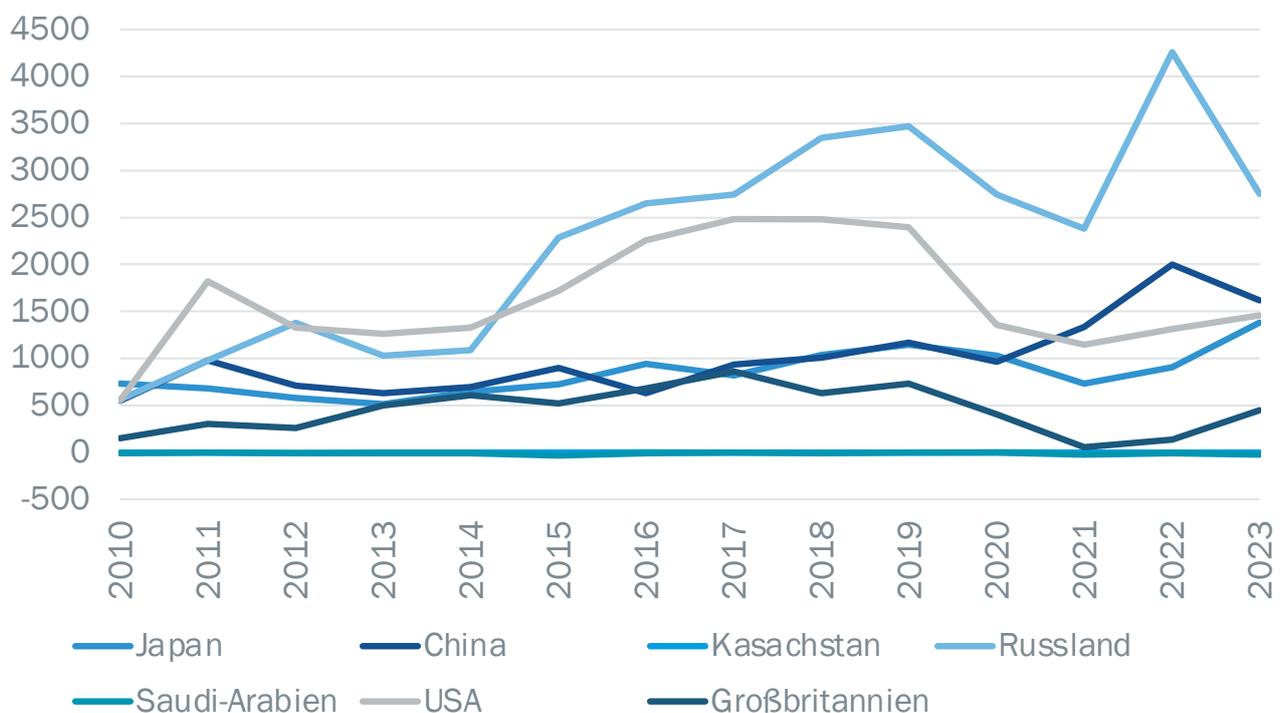
Titanmetall und -produkte

Je nach Verwendungszweck, wird das Titanmetall in Form von Barren, Platten, Blechen, Drähten, Stäben oder Pulver an die Hersteller bspw. im Flugzeug- und Schiffbau geliefert. Dort wird es entweder direkt oder als Legierung, z.B. Grade-5-Titan, verbaut.

Im Bereich Titanmetall sind Deutschland und die EU nahezu hundertprozentig vom Import abhängig.³² Obwohl es auch möglich ist, Titanmetall der höchsten Qualitätsstufen über Recyclingprozesse zu gewinnen (vgl. Kap. 5 zu Recycling- und Kreislaufwirtschaftsinitiativen), werden noch große Mengen aus teilweise problematischen Quellen bezogen. Am Nettoimport gemessen stellt für Deutschland Russland das bedeutendste Bezugsland in der Rubrik Titanwaren dar. Das gilt obwohl in Folge des Ausbruchs des Ukrainekrieges die Importe aus Russland deutlich zurückgegangen sind. Das zweitwichtigste Bezugsland für Deutschland ist nach Russland China. Allerdings zeichnet sich auch dort ab 2022 ein rückläufiger Trend ab, der allerdings schwächer ausfällt als für Russland. Im Gegensatz dazu steigen die Nettoimporte aus den USA und Japan momentan, wobei allerdings insbesondere der Nettoimport aus den USA großen Schwankungen unterliegt und 2017 bis 2019 auf einem deutlich höheren Niveau als im Jahr 2023 lag (s. Abbildung 5).

Abbildung 5:

Nettoimporte nach Deutschland an Titanwaren in t

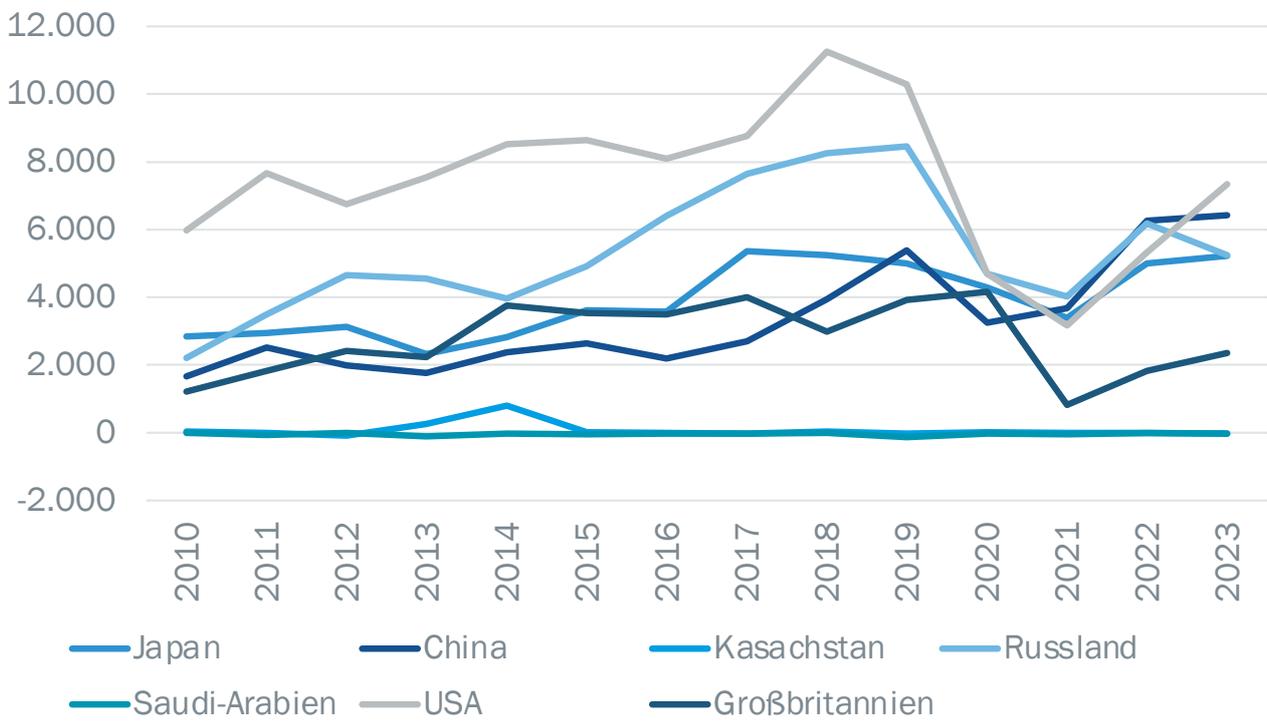


Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage von Eurostat. HS: 810890. Geringfügige Mengen werden bei Eurostat oft nicht erfasst, sodass teilweise Schätzungen vorgenommen werden mussten. Insignifikante Abweichungen sind deshalb möglich.

Nimmt man die EU in den Blick relativiert sich dieses Bild etwas. Zwar sinkt der Anteil Russlands auch hier, während die USA und Japan an Bedeutung zunehmen, doch China behauptet seine Position oder baut sie sogar aus (s. Abbildung 6).

Abbildung 6:

Nettoimporte in die EU an Titanprodukten in t



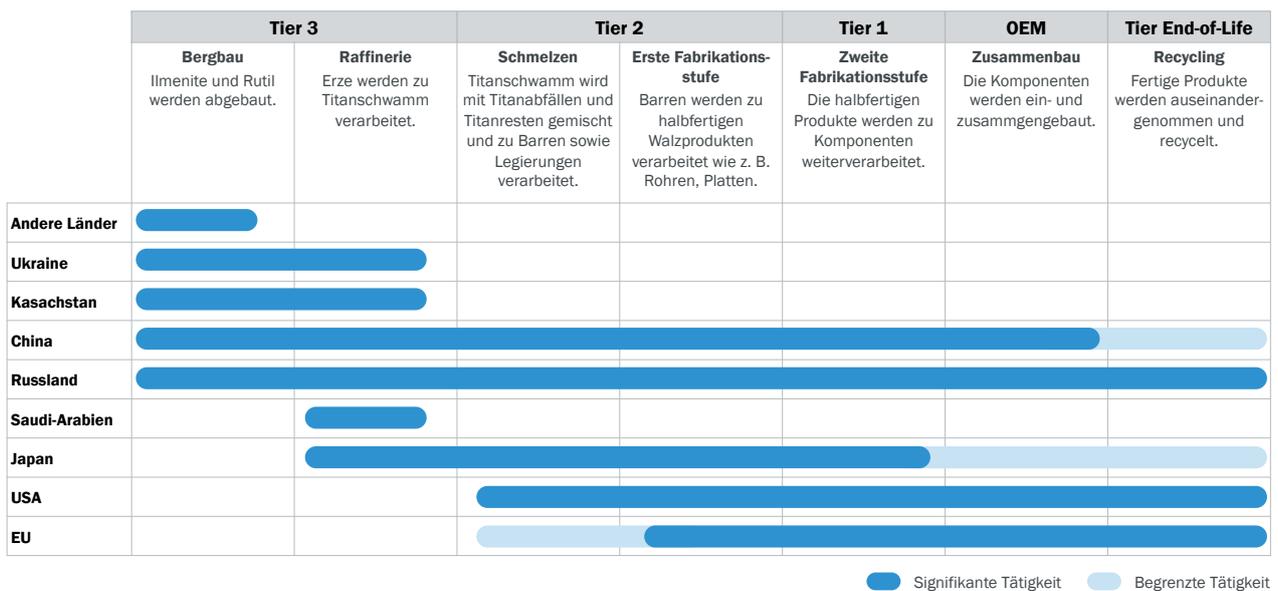
Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage von Eurostat. HS: 810890. Geringfügige Mengen werden bei Eurostat oft nicht erfasst, sodass teilweise Schätzungen vorgenommen werden mussten. Insignifikante Abweichungen sind deshalb möglich.

Das im vorliegenden Dossier besonders relevante Titanmetall der für Flugzeuge geeigneten Qualitätsstufe ist in den Handelsstatistiken nicht gesondert ausgewiesen, sodass eine Handelsdatenanalyse alleine zwar Abhängigkeiten in dem Bereich nahelegt, sie aber nicht eindeutig nachweisen kann. Zu diesem Zweck werden im folgenden Abschnitt weitere Quellen herangezogen.

Ein Blick auf die globale Wertschöpfungskette Titan (s. Abbildung 7) zeigt, dass die EU und Deutschland starke Abhängigkeiten in den ersten Wertschöpfungsstufen haben, insbesondere auf den Ebenen Bergbau und Raffinerie. Autoritäre Staaten nehmen insbesondere auf der zweiten Ebene, die die Verarbeitung zu Titanschwamm umfasst, eine Schlüsselrolle in der globalen Titan-Wertschöpfungskette ein. Japan als Ausweichmöglichkeit kommt auf dieser Stufe deshalb eine besondere Bedeutung zu.

Abbildung 7:

Rolle einzelner Länder in der Wertschöpfungskette Titan



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von eigenen Recherchen und Jakimów et al. (2024), S. 1739.

3

Herausforderungen und geopolitische Risiken

Die Versorgungssicherheit von Titan für die deutsche Verteidigungsindustrie wird von mehreren globalen Entwicklungen beeinflusst. Auf der Titanerz-Ebene sind die Diversifikationsoptionen noch vielfältig, sodass sich daraus Chancen ergeben, die von der Politik forciert werden könnten. Da die Bezugsländer und Liefermengen jährlich schwanken, scheint eine gewisse Flexibilität in den Lieferantenstrukturen zu existieren. In der Tabelle „Diversifikationsoptionen im Titanerz-Bezug“ im Anhang (Kap. 7) sind verschiedene Optionen dargestellt, die bei der Rohstoffversorgung mit Titanerz zur Verfügung stehen, sowie sieben Entscheidungsgrößen, die die Auswahl der Lieferantenländer beeinflussen. Zu den zentralen Herausforderungen in der Versorgungssicherheit zählen die Abhängigkeit von wenigen autokratischen Staaten bei den weiterverarbeiteten Titanprodukten, geopolitische Spannungen und die erwartbaren Preiserhöhungen. Zusätzlich führt die zunehmende Spezialisierung der deutschen Verteidigungsindustrie auf hoch spezialisierte Nischenprodukte zu einer weiteren Einschränkung der möglichen Lieferanten. Da spezifische Vorprodukte für diese Nischenprodukte benötigt werden, ist die Zahl der verfügbaren Lieferanten begrenzt. Dies erhöht die Anfälligkeit der Lieferketten gegenüber Störungen, da es in spezialisierten Märkten weniger Redundanz gibt. Sollte ein Lieferant ausfallen, kann dies zu erheblichen Engpässen führen, da kurzfristige Alternativen häufig nicht verfügbar sind.

Abhängigkeiten Deutschlands von autokratischen Ländern als Lieferanten von Titan

Deutschland und die EU sind stark von Titanlieferungen aus Russland und Kasachstan abhängig. Rund 36 % des in Europa verwendeten Titanmetalls stammen aus Kasachstan, während 34 % aus Russland geliefert werden. Die Problematik der Abhängigkeit von Russland hängt vor allem von der Substituierbarkeit als Handelspartner und dem Risiko zunehmender geopolitischer Spannungen ab. Ein von der Europäischen Kommission nach Beginn des Ukraine-Kriegs erstellter Bericht stellt fest, dass ein Ausfall Russlands als Lieferant von Titan und Titanprodukten durch alternative Quellen, insbesondere Kasachstan und Japan, kompensiert werden könnte. Eine kurzfristige Unterbrechung der Lieferungen im Luft- und Raumfahrtsektor dürfte für die EU aufgrund hoher Lagerbestände nicht kritisch sein. Dennoch sind die mittelfristigen Auswirkungen einer Störung der Lieferbeziehungen zu russischen Anbietern von Walzprodukten, insbesondere bearbeiteten metallischen Materialien, schwer vorhersehbar. Gleichzeitig könnten steigende Verteidigungsaufwendungen oder zunehmende globale Spannungen die Nachfrage nach hochwertigem Titanschwamm und -metall erhöhen.

Der Bericht weist darauf hin, dass das Risiko eines gleichzeitigen Ausfalls von Russland und Kasachstan als Lieferanten nicht explizit behandelt wird. Solch ein Szenario könnte nicht leicht durch andere Anbieter kompensiert werden, da im hochqualitativen Sektor alternative Bezugsmöglichkeiten begrenzt sind. Darüber hinaus werden die Umstellungsschwierigkeiten und Preisrisiken, die mit einem Ausfall dieser beiden Länder einhergehen könnten, nicht tiefergehend thematisiert.³³

Neben der hohen Importquote entsteht auch unabhängig von den Lieferabhängigkeiten ein Risiko der Preisvolatilität durch den signifikanten globalen Marktanteil an speziellem Titan in Luftfahrtqualität. Sollte Russland seinen Anteil am Welthandelsvolumen reduzieren, könnten die Preise für Titan steigen, was auch Deutschland und die EU betreffen würde, selbst wenn sie kein Titan direkt aus Russland beziehen. Präsident Putin hat eine Verknappung des Angebots Mitte September 2024 offiziell in Erwägung gezogen.

Die bestehenden Sanktionen gegen Russland, die in den USA und Kanada auch Titanimporte betreffen, haben dazu geführt, dass europäische Unternehmen zunehmend Schwierigkeiten haben, Titanlieferungen aus Russland weiter zu verwenden, da sie in den nordamerikanischen Markt eingebunden sind. Darüber hinaus besteht auch in der deutschen Wirtschaft das Bedürfnis, sich von Russland unabhängiger zu positionieren. Dies sieht man unter anderem an den Daten zu den rückläufigen Metallimporten aus Russland sowie an den Aussagen deutscher Industrievertreter. Gleichzeitig können Deutschland und Europa in der aktuellen Lage nicht vollständig auf die russischen Lieferungen verzichten.³⁴

Kasachstan, als autokratisch geführter Staat, ist keine geeignete Option, um die deutsche Industrie in Richtung einer stärkeren Diversifizierung hin zu demokratisch verfassten verlässlichen Zulieferern auszurichten. Zudem durchqueren Lieferungen zur Versorgung Deutschlands aus Kasachstan russisches Territorium, wodurch de facto russische Abhängigkeiten bestehen bleiben. Darüber hinaus ist Kasachstan wirtschaftlich, politisch und militärisch eng mit Russland verbunden, beispielsweise durch die Eurasische Wirtschaftsunion, die Organisation des Vertrags über kollektive Sicherheit (OVKS) sowie das russische Raketentestgelände Saryschagan und den russischen Weltraumbahnhof Baikonur. Der politische Einfluss Russlands auf Kasachstan ist nach wie vor stark.

Seit kurzem hat Saudi-Arabien den Markt für Titanschwamm betreten und etabliert sich als neuer Akteur mit dem Ziel, hochwertiges Titan in Luftfahrtqualität zu produzieren.³⁵ Damit könnte das Land langfristig potenziell zu einer Entschärfung der Lage beitragen. Die Importe in die EU aus Saudi-Arabien sind steigend (siehe Abbildung 3). Auch hier handelt es sich um einen autokratischen Staat, dessen politische Stabilität und Bereitschaft zur strategischen Allianz hinterfragt werden kann.

Chinas wachsende Kontrolle: Titan-Abhängigkeit der EU steigt

China spielt eine zunehmend wichtige Rolle in der Versorgung Europas mit Titan. Als größter Produzent von Titanschwamm beeinflusst China den globalen Titanmarkt erheblich. Zwar wird chinesischer Titanschwamm aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen in der Regel nicht für Anwendungen in der deutschen Luftfahrt- und Verteidigungsindustrie genutzt, dennoch hat China einen indirekten Einfluss auf den europäischen Markt. Die Kontrolle Chinas über die weltweiten Produktionskapazitäten wirkt sich auf die Preisgestaltung und Verfügbarkeit von Titan aus. Darüber hinaus versucht sich China auch auf dem Weltmarkt für Titanmetall in Luftfahrtqualität zu etablieren.³⁶ Nicht zuletzt durch die seit 2022 unternommenen Bemühungen, sich vom russischen Markt zu lösen, bleiben die chinesischen Titanimporte weiterhin hoch (siehe Abbildung 2 und Abbildung 5).

Wie im Fall Boeings beobachtet werden konnte, besteht jedoch ein gewisses Qualitätsrisiko beim Bezug von Titan aus China.³⁷ Momentan bleibt die Abhängigkeit von qualitativ hochwertigem Titanmetall aus Kasachstan und Russland bestehen. Für die deutsche Verteidigungsindustrie bedeutet dies eine doppelte Abhängigkeit: Einerseits von autokratischen Staaten wie Russland und Kasachstan, andererseits von Chinas Einfluss auf den Weltmarkt.

Für ein erfolgreiches De-Risking könnte perspektivisch die Ukraine zu einem bedeutenden Rüstungshersteller in Europa werden, mit einer vollständigen Wertschöpfungskette – von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Produktion komplexer Endprodukte wie Marschflugkörper. Die EU verfolgt bereits das Ziel, in der Ukraine Kapazitäten für die lokale Weiterverarbeitung strategisch wichtiger Materialien wie Titan und Mangan aufzubauen.³⁸ Eine Wiederbelebung und Ausweitung der Förderung und der Weiterverarbeitungskapazitäten im Bereich Titan in der Ukraine könnte Europas Resilienz erhöhen und gleichzeitig einen Beitrag zur Stärkung der Ukraine leisten.³⁹ Nach der Sensibilisierung für Lieferkettenrisiken von China im Pandemiejahr 2020, steigen die deutschen Titanimporte aus den USA, Japan und, in geringeren Mengen, aus dem Vereinigten Königreich (siehe Abbildung 4). Zu diesen Diversifikationsentwicklungen sollte jedoch angemerkt werden, dass das Vereinigte Königreich weiterhin große Mengen Titan aus Russland importiert; im Jahr 2023 im Wert von 57,8 Millionen US Dollar.⁴⁰

USA als Konkurrent: Verschärfter Wettbewerb um Titanressourcen

Die USA sind Europas größter Lieferant von Titanprodukten und spielen eine zunehmende Rolle im internationalen Wettbewerb um Titanressourcen. Die steigende Nachfrage in der amerikanischen Luftfahrt- und Verteidigungsindustrie erhöht den Konkurrenzdruck auf dem globalen Markt, insbesondere bei Importen aus Japan, da die USA einen Großteil ihres Rohtitans aus Japan beziehen.⁴¹ Europäische Unternehmen stehen somit in direkter Konkurrenz zu US-amerikanischen Firmen, die aufgrund der Größe des US-Marktes und der umfangreichen staatlichen Unterstützung Wettbewerbsvorteile genießen.

Auch im Hinblick auf den Aufbau europäischer Recyclingkapazitäten zeichnet sich eine Konkurrenzsituation mit den USA ab. Um die strategische Unabhängigkeit und die Dekarbonisierungsziele der EU zu erreichen, bietet der Ausbau von Titan-Recyclinganlagen einen wichtigen Lösungsweg. Eine eigene Recyclinginfrastruktur könnte nicht nur eine stabilere und umweltfreundlichere Titanindustrie schaffen, sondern auch die Abhängigkeit von Importen verringern. Die Implementierung eines solchen Recyclingprogramms bringt jedoch erhebliche Herausforderungen mit sich.

Zunächst erfordert das Recycling von Titanmetall den Aufbau von industriellen Midstream-Kapazitäten, da die gleichen Anlagen sowohl für das Recycling als auch für die Umwandlung von Titanschwämmen in Barren genutzt werden. Diese Rückverlagerung des Tier-2-Bereichs der Lieferkette in die EU ist eine Grundlage dafür, die Effizienz und Nachhaltigkeit der Produktion zu gewährleisten. Um die notwendigen Kapazitäten zu schaffen, sind bedeutende Investitionen in moderne Titan-Umschmelzanlagen erforderlich. Aktuell ist die EU stark auf die Recyclingkapazitäten der USA angewiesen, was den eigenen Autonomie- und Recyclingzielen widerspricht.⁴² 2023 exportierte die EU knapp 8.000 t Titanschrott in die USA.⁴³ Die USA fungieren folglich als Partner, der auch auf Importe europäischen Titanschrotts angewiesen ist, insbesondere aus der Luftfahrtproduktion. Zukünftig würde der Aufbau europäischer Recyclingkapazitäten und damit eine eigene Verwertung von Titanschrott den Export in die USA beschränken. Hier bieten sich somit neue Konfliktlinien mit einem Partner, mit dem eine für beide Seiten vorteilhafte Arbeitsteilung vereinbart worden war.⁴⁴

Inländische Industrieverflechtungen: Kein Titan-Schrott, teure Importe

Die spezifische Nachfrage in der nationalen Verteidigungsindustrie ist eng an die Verfügbarkeit von Titanschrott aus der zivilen Industrie gekoppelt, da recycelte Titanmaterialien eine wichtige Quelle für spezialisierte Legierungen darstellen. Während der COVID-19-Pandemie wurde diese Abhängigkeit besonders deutlich. Der starke Rückgang in der zivilen Luftfahrtproduktion, dem größten Abnehmer von Titan, führte zu einem deutlichen Rückgang von Titanschrott, der normalerweise bei der Herstellung und Wartung von Flugzeugen anfällt. Diese Reduktion verringerte die Verfügbarkeit an recyceltem Titan erheblich, was die Verteidigungsindustrie besonders traf, da sie auf spezialisierte Titanlegierungen wie Titan Grade 5 (Ti-6Al-4V) angewiesen ist.^{45,46,47}

Während die allgemeine Nachfrage nach Titan aufgrund des Rückgangs in der zivilen Luftfahrt sank und die Preise für Standard-Titan fielen, blieb der Bedarf der Verteidigungsindustrie stabil. Dies führte zu einem paradoxen Szenario: Trotz sinkender Weltmarktpreise für Titan stiegen die Preise für spezialisierte Titanqualitäten, da die Verfügbarkeit an Schrottmaterial eingeschränkt war und hochwertige Titanlegierungen im Preis erhöht wurden. Unternehmen in der Verteidigungsindustrie mussten daher für ihre benötigten Titanmaterialien höhere Preise zahlen und konnten nicht von den fallenden allgemeinen Marktpreisen profitieren.^{48,49} Diese Entwicklungen verdeutlichen, wie sich externe Schocks für die Verteidigungsindustrie sowohl auf Preise als auch auf die Verfügbarkeit von Materialien sowie Recyclingkapazitäten auswirken können.

Status Quo und strategische Handlungsoptionen

Trotz der Abhängigkeit von Lieferungen aus kritischen Ländern sind bisher keine unmittelbaren Versorgungsengpässe bei Titanmetallen für die deutsche Verteidigungsindustrie erkennbar. Deutsche Unternehmen haben Instrumente etabliert, um die Versorgung sicherzustellen, auch unter Einbezug kritischer Lieferländer. Dies zeigt die bisherige Resilienz und Anpassungsfähigkeit der Branche. Dennoch lassen die aktuellen Marktdynamiken und die steigenden Verteidigungsanstrengungen weltweit eine zukünftige Verknappung von Titan erwarten. Der Problemlösungsdruck steigt, da die langfristigen Auswirkungen schwer vorhersehbar sind – insbesondere falls wichtige Lieferanten wie Russland und Kasachstan ausfallen sollten. Gleichzeitig erhöht die wachsende Nachfrage im Verteidigungs- und Luftfahrtsektor den Preisdruck.

Neben den Unsicherheiten auf dem globalen Markt kommen weitere interne Herausforderungen auf die deutsche Industrie zu. Der Fachkräftemangel sowie steigende Anforderungen an Nachhaltigkeit und Umweltschutz verschärfen die Wettbewerbssituation zusätzlich. In diesem Kontext gewinnt das Recycling von Titan an Bedeutung – nicht nur aus Nachhaltigkeitsgründen, sondern auch als strategisches Mittel, um die Abhängigkeit von Importen zu reduzieren und die Versorgungssicherheit zu erhöhen.

Hervorzuheben ist, dass der Staat bei der Verteidigungsindustrie über seine Beschaffungspolitik mehr Steuerungshebel in der Hand hält als in anderen Industrien. Um den steigenden Risiken entgegenzuwirken, könnten Deutschland und die EU verstärkte Partnerschaften mit den USA, Japan und als weitere, allerdings krisenanfällige Alternative Kasachstan eingehen, um die Abhängigkeit von Russland und China zu reduzieren. Auch britische, französische und potenziell ukrainische Produktionskapazitäten für Luftfahrt-Titan könnten zur Sicherung der Versorgung beitragen. Allerdings könnte die Konkurrenz aus den USA, insbesondere um Lieferungen aus den USA und Japan, dazu führen, dass deutsche Unternehmen längere Lieferzeiten in Kauf nehmen müssen. Als weiterer Player etabliert sich Saudi-Arabien in diesem Markt.

Angesichts des steigenden Problemlösungsdrucks, der strategischen Bedeutung des Recyclings und der besonderen Einflussmöglichkeiten des Staates in der Verteidigungsindustrie sollten Unternehmen und Staat gemeinsam Strategien entwickeln, um die Resilienz der Lieferketten zu erhöhen. Im nächsten Kapitel werden diese Strategien im Detail dargelegt.

4

Regulierung und staatliche Strategien

Staatliche Regulierung

Die deutsche Verteidigungsindustrie ist stark durch politische Vorgaben reguliert. Der Staat ist der einzig berechnigte Käufer und Endabnehmer von militärischen Gütern, die unter das Kriegswaffenkontrollgesetz fallen. Darüber hinaus regulieren gesetzliche Vorgaben, wie u.a. das Außenwirtschaftsgesetz (AWG) die Ein- und Ausfuhr, Transport und Lagerung von Militärgütern in Deutschland. Auf der Produktebene sind genaue Vorgaben an die Entwicklung und Beschaffung von Wehrmaterial, durch die wehrtechnischen Normen und die technischen Lieferbedingungen geknüpft. Diese enthalten u.a. die Liste der zugelassenen Bauelemente (LZB) und Werkstoffleistungsblätter sowie Leistungs- und Beschaffungsmerkmale, Qualitätssicherungs- und Verpackungsvorgaben.⁵⁰

Durch das 100-Milliarden-Euro-Sondervermögen für die Bundeswehr erreicht Deutschland erstmals das mit der NATO vereinbarte Ziel von Verteidigungsausgaben in Höhe von 2 % des BIP.⁵¹ Gleichzeitig stärkt dies auch die deutsche Verteidigungsindustrie.⁵² Nach dem Beginn des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine haben deutsche Verteidigungsunternehmen ihre Produktionskapazitäten im Rahmen von Großaufträgen für Beschaffungsprojekte erweitert. Jedoch prognostizieren Industrie und Wissenschaft mittelfristig eine strukturelle Unterfinanzierung der Bundeswehr, wodurch wiederum längerfristige Beschaffungsprojekte betroffen sind.⁵³

Die Nationale Sicherheitsstrategie (2024) beschreibt, dass Deutschland aufgrund steigender Nachfrage und geopolitischer Spannungen ein wachsendes Problem in der Rohstoffverfügbarkeit hat.⁵⁴ Zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit sollen einseitige Abhängigkeiten reduziert, Rohstoffprojekte gezielt gefördert und strategische Reserven angelegt werden. Weiterhin betont sie, dass die Diversifizierung der Bezugsquellen für Rohstoffe von verlässlichen Partnern im Fokus steht. Die Strategie spricht auch von einer geplanten Stärkung der Kreislaufwirtschaft zur Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen und strategischen Rohstoffreserven. Gleichzeitig wird betont, dass Lieferketten auf ihre Abhängigkeiten hin überprüft und auf potenzielle Risiken hin angepasst werden sollen, um die Resilienz der Industrie, einschließlich der Verteidigungsindustrie, zu erhöhen. In einem Entwurf zur Nationalen Sicherheits- und Verteidigungsindustriestrategie der Bundesregierung vom August 2024 werden verschiedene Maßnahmen zur Sicherstellung der Rohstoffversorgung und Resilienz der Lieferketten konkretisiert.⁵⁵

Die Bundesregierung plant, die Diversifizierung und Resilienz von Lieferketten zu stärken, indem sie das Monitoring hinsichtlich des Zugangs zu kritischen Rohstoffen intensiviert und Unternehmen beim Aufbau widerstandsfähiger Strukturen unterstützt. Zudem wird die Möglichkeit einer strategischen Lagerhaltung von sicherheits- und verteidigungswichtigen Rohstoffen untersucht. Der geplante Rohstofffonds könnte hierbei eine Rolle spielen. Ferner wird geprüft, inwiefern Kapazitätsvorhalteprämien und Kompensationsgeschäfte genutzt werden können, um die Skalierbarkeit der Produktion und Versorgung zu sichern.

Strategien der Europäischen Union

Der auf EU-Ebene bereits verabschiedete Critical Raw Materials Act sowie die Nationale Rohstoffstrategie der Bundesregierung beeinflussen die Lieferketten- und Versorgungsproblematik der Verteidigungsindustrie nur indirekt. Die europäische Industriestrategie für den Verteidigungsbereich (EDIS) und das European Defence Industry Programme (EDIP) gehen konkreter auf Maßnahmen zur Sicherung der Lieferketten ein. Sie verfolgen das gemeinsame Ziel, die Resilienz der europäischen Verteidigungsindustrie zu stärken und die Abhängigkeit von Drittstaaten zu verringern. Im Zentrum dieser Maßnahmen steht die Etablierung eines europäischen Verteidigungsregimes, das als übergeordneter Rahmen fungiert, um die Versorgungssicherheit (Security-of-Supply) in Krisenzeiten sicherzustellen.

Das Verteidigungsregime umfasst mehrere Schlüsselmaßnahmen, die auf die Stärkung der Lieferketten und die Verfügbarkeit von Rohstoffen abzielen. Dazu gehört die Schaffung eines zweistufigen Krisenmanagementsystems, das es den nationalen Behörden ermöglicht, Engpässe frühzeitig zu erkennen und koordinierte Maßnahmen auf EU-Ebene einzuleiten. Dies soll in Krisenzeiten eine schnelle und flexible Produktion und Lieferung von Verteidigungsgütern sicherstellen.

Ein wichtiger Aspekt des Regimes ist die Förderung der Resilienz der Lieferketten innerhalb der EU. Durch die Diversifizierung der Bezugsquellen und den Ausbau industrieller Kapazitäten soll die Abhängigkeit von Drittstaaten reduziert werden. Dies umfasst auch die strategische Kooperation zwischen Unternehmen der Verteidigungsindustrie, um langfristig eine stabile Versorgung mit kritischen Gütern sicherzustellen.

Ein zentrales Element des Regimes ist zudem die Schaffung strategischer Rohstoffreserven, die für die Produktion von Verteidigungsgütern unerlässlich sind. Damit wird die Security-of-Supply gestärkt und ein kontinuierlicher Zugang zu wesentlichen Ressourcen sichergestellt. Momentan wird von der EU noch keine strategische Rohstoffreserve gehalten.⁵⁶

Herausforderungen für die Politik

Trotz der in den Strategien formulierten Maßnahmen bleibt die Versorgungssicherheit eine der größten Herausforderungen für die europäische Verteidigungsindustrie. Besonders kritisch ist die weiterhin bestehende Fragmentierung der Lieferketten entlang nationaler Grenzen. Diese Fragmentierung führt dazu, dass in Krisenzeiten, etwa bei plötzlichen Nachfragespitzen oder geopolitischen Spannungen, schnell Engpässe auftreten können. Nationale Ansätze behindern oft eine effiziente europäische grenzüberschreitende Zusammenarbeit, was den Zugang zu kritischen Gütern und die Produktionsprozesse erheblich verlangsamen kann. Eine bessere Koordination zwischen den Mitgliedstaaten der EU ist dringend erforderlich, um diese strukturellen Engpässe zu beheben.

Hinzu kommt die übermäßige Abhängigkeit von Drittstaaten bei der Versorgung mit Rohstoffen und Schlüsseltechnologien. Diese Abhängigkeiten setzen die EU geopolitischen Risiken aus, was ihre Fähigkeit, in Krisenzeiten unabhängig und schnell zu reagieren, stark einschränken kann. Die Schaffung strategischer Reserven wird zwar im Rahmen von EDIS und EDIP angestrebt, aber ihre Umsetzung ist essenziell, um schnell auf Lieferausfälle reagieren zu können und so die strategische Autonomie der EU zu sichern.⁵⁷

Darüber hinaus zeigt sich, dass bisherige Initiativen zur Verbesserung der Versorgungssicherheit oft zu unverbindlich gestaltet waren. Nationale Interessen haben die Bereitschaft zur grenzüberschreitenden Zusammenarbeit häufig blockiert. Dies hat dazu geführt, dass sicherheitsrelevante Informationen nicht ausreichend ausgetauscht wurden und die Reaktionsfähigkeit in Krisenzeiten geschwächt wurde. Es ist daher unerlässlich, verbindlichere Regelungen und Kooperationsmechanismen einzuführen, um die europäische Verteidigungsindustrie besser zu vernetzen und Sicherheitslücken zu schließen.

Ein weiteres zentrales Element ist die Notwendigkeit eines Krisenmechanismus, der in Zeiten plötzlicher Nachfragespitzen oder geopolitischer Unsicherheiten aktiviert werden kann. Dieser Mechanismus soll sicherstellen, dass kritische Güter und Technologien schnell priorisiert produziert und verteilt werden. Ohne eine solche Priorisierung könnten Engpässe nicht rechtzeitig überwunden werden.⁵⁸

Schließlich wird die Notwendigkeit einer verstärkten Investitionsprüfung betont, um zu verhindern, dass strategisch wichtige Unternehmen in der Verteidigungsindustrie von ausländischen Akteuren übernommen werden, die europäische Sicherheitsinteressen gefährden könnten.⁵⁹

5

Maßnahmen der Unternehmen

Die deutsche Verteidigungsindustrie hat eine Reihe von strategischen Maßnahmen ergriffen, um ihre Resilienz zu erhöhen und ihre Wettbewerbsfähigkeit in einem dynamischen Marktumfeld zu sichern. Diese Maßnahmen umfassen v. a. die Diversifizierung von Lieferketten, die Entwicklung innovativer Technologien und die Implementierung nachhaltiger Prozesse zur Reduzierung des Primärrohstoffbedarfs.⁶⁰

Diversifikation der Lieferketten

Um die Abhängigkeit von globalen Lieferanten und kritischen Rohstoffen zu verringern, setzen Unternehmen verstärkt auf Diversifizierung und Lokalisierung ihrer Beschaffungsstrategien. Einige Unternehmen haben beispielsweise regionale Beschaffungsbüros in Nordamerika, Indien, im asiatisch-pazifischen Raum und in China eingerichtet, um lokale Beschaffungsinitiativen zu unterstützen und strategisches Sourcing voranzutreiben. Diese dezentralisierte Beschaffung ermöglicht es, lokale Bezugsquellen zu identifizieren und die Abhängigkeit von einzelnen Lieferanten zu reduzieren.

Darüber hinaus könnte Deutschland in Kooperation mit der EU verstärkt auf die Beschaffung von Vorprodukten wie Teilsystemen und ganzen Waffensystemen von europäischen und NATO-Partnern setzen. Obwohl Teile und gesamte Waffen bereits von diesen Partnern beschafft werden und dadurch die Stabilität und Verlässlichkeit der Lieferketten in diesem Bereich erhöht wird, besteht für Vorprodukte weiter unten in der Lieferkette weiterhin ein Risiko. Diese tieferen Ebenen werden oft nicht von solchen Partnerschaften abgedeckt, was die Anfälligkeit für Störungen erhöht. Deshalb ist es wichtig, Diversifizierung und Partnerschaften miteinander zu kombinieren, um auch die Risiken in den unteren Ebenen der Lieferkette zu minimieren.

Recycling- und Kreislaufwirtschaftsinitiativen

Innovationen in der Materialforschung, in Fertigungsprozessen und im Recycling spielen eine entscheidende Rolle bei der Erhöhung der Resilienz. Ein herausragendes Beispiel ist das Forschungsprojekt Return II der Leibniz Universität Hannover, das darauf abzielt, die Ressourcen- und Energieeffizienz bei der Herstellung von Titanbauteilen zu verbessern. Derzeit führt die spanende Fertigung von Titanbauteilen zu erheblichen Materialverlusten, da über 90 % des Rohstoffs als Späne entsorgt werden. Das Projekt zielt darauf ab, einen geschlossenen Werkstoffkreislauf zu etablieren, bei dem die Späne in hochwertiges Titanpulver umgewandelt werden, ohne den energieintensiven Einschmelzprozess. Diese Methode könnte den Energieaufwand und den CO₂-Ausstoß um bis zu 80 % reduzieren und die Wirtschaftlichkeit der Produktion verbessern.

Das französische Recyclingwerk EcoTitanium nutzt moderne Technologien wie Plasmaöfen und Vakuum-Lichtbogenöfen, um Titan effizient und mit geringerem Energieverbrauch zu recyceln. Das Werk produziert jährlich bis zu 4.000 Tonnen Titanlegierungen und verringert so die Abhängigkeit von Primärerzen. Dennoch kann Recycling nur bei besonders teuren Materialien wie Titan eine Hauptquelle für Rohstoffe darstellen.

Transnationale Beschaffungs- und Entwicklungsprojekte

Zur Stärkung der strategischen Autonomie und militärischen Zusammenarbeit Europas bestehen bereits eine Reihe internationaler Kooperationen, die gemeinsame Entwicklungs- und Beschaffungsprojekte umfassen. Je mehr Komponenten innerhalb Europas beschafft werden, desto unabhängiger wird man von außereuropäischen Zulieferern. Projekte wie das Future Combat Air System (FCAS) und das Main Ground Combat System (MGCS) zeigen, wie internationale Kooperationen zwischen Staat und Unternehmen die strategische Autonomie stärken und gleichzeitig die Abhängigkeit von außereuropäischen Lieferanten reduzieren können.

Durch diese Gemeinschaftsprojekte wird auch die Lokalisierung der Beschaffung gefördert. Sie unterstützen das Sourcing innerhalb der EU und demonstrieren, wie durch die enge Zusammenarbeit von Staat und Industrie die strategische Autonomie Europas gestärkt und gleichzeitig die Abhängigkeit von externen Lieferanten verringert werden kann.

Einsatz von Finanzinstrumenten zur Stabilisierung von Rohstoffpreisen

Große Unternehmen wie Rheinmetall und ThyssenKrupp haben spezifische Strategien entwickelt, um Preisschwankungen abzufedern und die Stabilität ihrer Lieferketten zu sichern. Durch den Einsatz von Preisgleitklauseln und finanziellen Sicherungsinstrumenten wie Hedging wird es möglich, Kostensteigerungen bei Rohstoffen und Energie effektiv zu managen und finanzielle Risiken zu minimieren. Diese Maßnahmen helfen, finanzielle Verluste zu vermeiden, allerdings lösen sie das grundsätzliche Problem der Versorgungsunsicherheit nicht. Parallel dazu setzen Unternehmen auf strukturierte Beschaffungskonzepte, die durch eine frühzeitige Einbindung von Lieferanten gekennzeichnet sind. Diese Vorgehensweise hilft, potenzielle Engpässe bereits im Entwicklungsstadium zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen sowie die Anpassungsfähigkeit der Lieferkette an wechselnde Marktbedingungen zu stärken.

Notfallpläne und Business-Continuity-Management

Unternehmen wie Rheinmetall setzen auf Notfallpläne und Business-Continuity-Management, um ihre Lieferketten robust gegen Störungen und unvorhergesehene Ereignisse zu machen. Dazu gehört die strategische Lagerhaltung von kritischen Rohstoffen wie Titan, die es ermöglicht, kurzfristige Lieferengpässe abzufedern und die Produktion aufrechtzuerhalten. Darüber hinaus helfen diese Managementsysteme dabei, auf plötzliche Unterbrechungen wie Lieferausfälle schnell und effizient zu reagieren. Durch die Kombination dieser Maßnahmen – Preissicherung, vorausschauende Beschaffung und Krisenmanagement – können Unternehmen nicht nur die Stabilität ihrer Lieferketten aufrechterhalten, sondern auch ihre operative Flexibilität erheblich verbessern.

6

Handlungsoptionen

Die nachfolgenden Handlungsempfehlungen sind darauf ausgerichtet, die Resilienz und Versorgungssicherheit im Bereich der Titanlieferketten zu stärken.

Diversifizierung der Titan-Lieferketten

Handelsabkommen und Friendshoring: Unternehmen, die bereits proaktive Schritte zur Sicherstellung ihrer Lieferketten unternehmen, sollten verstärkt Aspekte der Zuverlässigkeit und der kurzfristigen Mobilisierung von Alternativen in ihre Strategien integrieren. Dies kann durch gezielte staatliche Maßnahmen unterstützt werden. In diesem Kontext sollten Deutschland und die EU ihre Handelsabkommen mit stabilen Ländern wie den USA, Japan und Australien entlang der Wertschöpfungsketten intensivieren. Darüber hinaus ist es entscheidend, Länder wie Norwegen, die sich als verlässliche Rohstofflieferanten etabliert haben, stärker in die Lieferketten einzubinden. Eine solche Strategie wird nicht nur die Resilienz der Unternehmen erhöhen, sondern auch die wirtschaftliche Stabilität in einem zunehmend unberechenbaren globalen Umfeld fördern.

Alternative Lieferanten: Unternehmen sollten neue Lieferquellen identifizieren, insbesondere in politisch stabilen Regionen. Perspektivisch könnte auch die Ukraine nach dem Konflikt wieder eine bedeutende Rolle spielen, da sie 2019 rund 7 % der weltweiten Förderung von Titan-mineralien verantwortete.

Alternative Rohstoffstrategien: Staatliche Programme sollten Unternehmen dabei unterstützen, in Regionen zu investieren, die weniger anfällig für geopolitische Spannungen sind.

Stärkung von Recycling und Kreislaufwirtschaft

EU-Strategien zur Stärkung von Recycling und Kreislaufwirtschaft sollten die Interessen europäischer Luft- und Raumfahrtunternehmen berücksichtigen. Dabei ist es ebenso wichtig, die Rolle amerikanischer Zulieferer sowie das Ziel einer stärkeren europäischen Industrie in diese Strategien zu integrieren.

Definition und Förderung langfristiger Ziele: Falls der Ausbau der industriellen Kapazitäten von Titanschwammproduktion zu Titanbarren erfolgen soll, sollten mehrere Maßnahmen ergriffen werden. Zunächst sollte die EU langfristige Ziele definieren und verlässliche finanzielle Mittel bereitstellen, um den Aufbau von Industrieanlagen für das Titan-Recycling zu unterstützen. Eine koordinierte Anstrengung zwischen verschiedenen politischen Ebenen ist notwendig, um aufgrund abgestimmter Richtlinien finanzielle Anreize zu schaffen.

Genehmigungsverfahren vereinfachen und beschleunigen: Des Weiteren hat der EU Green Deal bereits die Weichen für schnellere Genehmigungsverfahren und einfachere Vorschriften für den Bau von Produktionsstätten gelegt. Diese Initiativen sollten weiterverfolgt und ausgebaut werden, um den Aufbau von Recyclinganlagen zu beschleunigen und bürokratische Hürden abzubauen. Zudem sollte die EU mögliche Partnerschaften mit US-Unternehmen in Betracht ziehen, um den Zugang zu ausgereiften Recyclingtechnologien zu ermöglichen. Eine solche Zusammenarbeit könnte nicht nur den Technologietransfer fördern, sondern auch dazu beitragen, potenzielle Handelsstreitigkeiten zu vermeiden. Dabei ist es wichtig, gemeinsame Standards und Praktiken zu entwickeln, um die Effizienz und Nachhaltigkeit der Recyclingprozesse zu verbessern.

Investitionen fördern: Zusätzlich sollte die EU gezielt Investitionen in fortschrittliche Recyclinganlagen fördern, um die Abhängigkeit von Primärtitan zu reduzieren und Kosten zu senken. Die Integration von Recyclingkapazitäten erhöht zudem die Versorgungssicherheit und unterstützt eine nachhaltigere Rohstoffverwendung. Um Investitionen in die Kreislaufwirtschaft und Recycling zu beschleunigen, empfiehlt sich die Einführung gezielter Förderprogramme, steuerlicher Anreize und einer an Resilienz Kriterien orientierte Forschungsförderung (FuE). Die EU könnte im Rahmen des Green Deals zusätzliche Mittel bereitstellen und so den Ausbau einer nachhaltigen Wertschöpfungskette unterstützen.

Angesichts der wachsenden Nachfrage nach Titanmetall ist es wichtig, dass die Impulse für den Ausbau der Recyclingkapazitäten nachhaltig sind. Dies erfordert eine langfristige Strategie, die finanzielle Unterstützung und Anreize für Unternehmen bietet, auch wenn die Wirtschaftlichkeit des Recyclings zunächst in Frage steht.

Recyclingtechnologien weiter entwickeln: Als Handlungsoption zu diskutieren, bleiben verbindliche Quoten für den Einsatz von recyceltem Titan in der Industrie, ähnlich wie sie bereits für recyceltes Plastik oder Aluminium vorgesehen sind. Diese Maßnahme würde die Nutzung von Sekundärrohstoffen in der Titanverarbeitung fördern. Zudem sollte der europäische Green Deal gezielt auf den Ausbau von Recyclingtechnologien und Kreislaufwirtschaftsstrukturen im Titanbereich abzielen, um eine nachhaltige Ressourcennutzung und höhere Effizienz zu gewährleisten. Erfahrungen aus Frankreich und Deutschland können dabei als Leitfaden dienen: So zeigt das französische EcoTitanium-Werk mit einer Jahreskapazität von 4.000 Tonnen recycelter Titanlegierungen die Machbarkeit moderner Recyclingverfahren im industriellen Maßstab. Das deutsche Forschungsprojekt Return II der Universität Hannover demonstriert ebenfalls eine hohe Materialeinsparung durch optimierte Recyclingmethoden – bis zu 90 % des eingesetzten Materials können eingespart werden, was den Bedarf an Primärtitan erheblich senkt.

Förderung der Inlandsproduktion

Die mangelnde industrielle Basis in der EU zur Verarbeitung von Titanerz zu Titanschwamm zeigt die europäische Verwundbarkeit in der Wertschöpfungskette: Derzeit verfügt die EU über keine Tier-3-Anlagen (zur Verarbeitung von Erz zu Schwamm), was bedeutet, dass sie vollständig auf Importe von Titanschwamm angewiesen ist. Zudem fehlt es der EU an einer soliden industriellen Grundlage für den gesamten Produktionszyklus.

Investitionen in neue Produktionsanlagen in der EU fördern: Der Aufbau von Produktionskapazitäten innerhalb der EU würde die Versorgungssicherheit erheblich verbessern und die geopolitische Abhängigkeit verringern. Um dies zu erreichen, müssten die Bundesregierung und die EU eine langfristig ausgerichtete Entwicklungsperspektive einnehmen und gezielt Anreize schaffen. Dies könnten beispielsweise die Förderung der Forschung und Entwicklung zur Titanverarbeitung, die Schaffung von Innovationszentren oder die Unterstützung beim Bau von Tier-3-Anlagen umfassen. Eine geeignete Umgestaltung des regulatorischen Rahmens ist notwendig, um die Förderung und Weiterverarbeitung von Titan im Inland zu erleichtern und wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Allerdings muss vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und des Kosten-Nutzen-Profiles geprüft werden, ob der Aufbau solcher Anlagen in der EU tatsächlich sinnvoll und wirtschaftlich und ökologisch tragfähig ist.

Strategische Partnerschaften entwickeln und pflegen: Zusätzlich sollten strategische Partnerschaften mit Ländern wie Norwegen, die bereits über nennenswerte Titanreserven verfügen und die Ausweitung des Rohstoffabbaus planen, gestärkt werden, um eine langfristige Versorgung zu gewährleisten. Die Verantwortung für diese Entwicklungen liegt sowohl bei den Unternehmen als auch beim Staat. Während Unternehmen in der Pflicht sind, Investitionen in neue Technologien und Produktionsverfahren zu tätigen, sollte der Staat durch Anreize und einen angepassten regulatorischen Rahmen die Bedingungen schaffen, unter denen diese Investitionen wirtschaftlich tragfähig sind.

Supranationale Ansätze statt nationaler Alleingänge

Koordinierte Verhandlungen auf globaler Ebene: Ein einheitliches und koordiniertes Auftreten der EU kann die Resilienz der europäischen Verteidigungsindustrie erheblich stärken, indem es die strategische Position verbessert und wirtschaftliche Vorteile sichert.

Gemeinsame Beschaffung und Preisvorteile: Die EU sollte gemeinsame Beschaffungsprogramme ausbauen, um durch größere Bestellmengen sowohl Kostenvorteile zu erzielen als auch die Interoperabilität der Verteidigungssysteme zu verbessern. Zudem sollte die EU als Einheit bei globalen Rohstoffverhandlungen auftreten, um ihre Nachfragemacht zu stärken und günstigere Konditionen bei der Rohstoffbeschaffung zu sichern.

Strategische Partnerschaften bei Einkäufen: Die EU sollte strategische Partnerschaften für den Einkauf von Rohstoffen und militärischen Technologien etablieren, um stabile Lieferketten und günstigere Handelsbedingungen sicherzustellen.

Optimierung der Handelsbedingungen: Die EU sollte einen offenen europäischen Verteidigungsmarkt schaffen und bei internationalen Handelsverhandlungen günstigere Exportbedingungen für europäische Rüstungsunternehmen anstreben.

Sicherstellung strategischer Lieferketten: Die EU sollte eine Diversifizierung der Lieferketten vorantreiben und gemeinsame Vorratslager für kritische Materialien einrichten, um Produktionsengpässe zu verhindern.

Sicherstellung des Technologiestroms und geistigen Eigentums: Die EU sollte europäisches geistiges Eigentum im Verteidigungssektor stärker schützen und durch gezielte Exportkontrollen den Zugang zu Schlüsseltechnologien absichern.

Stärkung der Arbeitskräftebasis und Industrie: Die EU sollte in Ausbildungsprogramme und die Kooperation zwischen Hochschulen und Industrie investieren, um die technologische Kompetenz und Innovationskraft der europäischen Verteidigungsindustrie zu stärken.

Einführung strategischer Lagerhaltung

Die Lagerung kritischer Rohstoffe wie Titan bildet eine weitere Option zur Absicherung gegen vorübergehende Engpässe.

Nationale und europäische Rohstoffreserven: Die EU sollte im Rahmen des Critical Raw Materials Act (CRMA) gezielt strategische Titanreserven aufbauen, die in Krisenzeiten schnell verfügbar sind. Der CRMA sieht bereits vor, dass Unternehmen Risikovorsorge treffen (Art. 23) und regelmäßig über ihre Bestände berichten (Art. 21). Zudem ermöglicht die gemeinsame Beschaffung (Art. 24) eine Kostenreduktion und erleichtert kleinen Unternehmen den Zugang zu Rohstoffen.

Trotz dieser bestehenden Maßnahmen des CRMA kann der gezielte Aufbau spezifischer Titanreserven eine wichtige proaktive Ergänzung darstellen. Diese Reserven sollten koordiniert mit nationalen Beständen und unternehmerischen Lagerkapazitäten verwaltet werden, um die Versorgungssicherheit zu maximieren. Ein solches integriertes System würde gewährleisten, dass eine schnelle und gesicherte Versorgung jederzeit verfügbar ist.

Finanzielle Anreize für Lagerhaltung: Die EU könnte insbesondere kleinen Unternehmen finanzielle Anreize bieten, um ihre Lagerbestände auszubauen. Dies würde die Versorgungssicherheit in Europa deutlich stärken. So könnten mehr Unternehmen Lagerkapazitäten für Titan und andere kritische Rohstoffe aufbauen.

Krisenteams und Notfallpläne: Einige Systemhäuser der Verteidigungsindustrie haben bereits Krisenteams eingerichtet, die schnell auf Unterbrechungen der Lieferketten reagieren können. Diese Best Practices sollten von anderen Unternehmen übernommen werden. Durch diese präventiven Maßnahmen kann vermieden werden, auf die beschränkten Reserven zurückgreifen zu müssen, was den überbrückenden Effekt der strategischen Lagerhaltung verstärkt.

Flexibilisierung durch angepasste Regulierungen und verstärkte unternehmerische Verantwortung

Strenge Regulierungen, Exportkontrollen und technische Vorgaben schränken die Flexibilität der Unternehmen in der Verteidigungsindustrie ein. Dies führt zu verzögerten Reaktionsmöglichkeiten bei Marktveränderungen und Lieferkettenstörungen. Um dies zu beheben, sollten folgende Maßnahmen ergriffen werden:

Lockerung von technischen Vorgaben: Technische Vorgaben sollten überprüft und gelockert werden, um Unternehmen mehr Spielraum bei der Modularisierung und Standardisierung ihrer Produkte zu bieten. Länder wie die USA und Frankreich profitieren von flexibleren Vorgaben, die ihren Unternehmen ermöglichen, schneller auf Marktveränderungen zu reagieren und effizienter zu produzieren.

Stärkung der unternehmerischen Verantwortung: Der Staat als Hauptbeschaffer von Verteidigungsgütern sollte seine Marktmacht nutzen, um die unternehmerische Verantwortung zu stärken. Unternehmen sollten bei der Auswahl von Werkstoffen und Lieferanten flexibler agieren dürfen, um alternative Lösungen zu entwickeln, die die Resilienz der Lieferketten erhöhen und die Beschaffung beschleunigen.

Dialog zwischen Politik und Wirtschaft zur praxisnahen Regulierung: Um die genannten Maßnahmen erfolgreich umzusetzen, muss der Dialog zwischen Industrie und Politik intensiviert werden. Dies geschieht bereits in Foren wie der Europäischen Verteidigungsagentur (EDA), sollte jedoch weiter ausgebaut werden, um praxisnahe Regulierungen zu schaffen, die den Anforderungen der Unternehmen gerecht werden und gleichzeitig die geopolitischen Herausforderungen berücksichtigen.

Fazit

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zu den genannten Handlungsoptionen und bewertet sie nach einem ersten einfachen Kriterienraster. Jede Maßnahme wurde dabei auf Basis von drei Dimensionen bewertet: Die erste ist der Impact auf die Resilienz, die misst, wie stark die jeweilige Maßnahme zur Verbesserung der Stabilität und Sicherheit der Lieferketten beiträgt. Die zweite Dimension ist die unternehmerische Implementierbarkeit, die beurteilt, wie einfach und schnell die Maßnahme von Unternehmen umgesetzt werden kann. Schließlich berücksichtigt die dritte Dimension den politischen Einfluss, also inwieweit politische Unterstützung oder regulatorische Anpassungen für eine erfolgreiche Umsetzung notwendig sind.

Tabelle 9:

Zuordnung der Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlung	Impact auf Resilienz	Zeitpunkt der Wirkung	Unternehmerische Implementierbarkeit	Staatlicher Unterstützungsbedarf
Diversifizierung der Lieferketten	Hoch	Kurzfristig	Mittel	Hoch
Recycling und Kreislaufwirtschaft	Hoch	Mittelfristig	Mittel	Hoch
Förderung der Inlandsproduktion	Hoch	Langfristig	Mittel	Hoch
Supranationale Ansätze statt nationaler Alleingänge	Hoch	Kurzfristig	Niedrig	Hoch
Strategische Lagerhaltung	Mittel	Kurzfristig	Hoch	Niedrig
Flexibilisierung (angepasste Regulierungen u. unternehmerische Verantwortung)	Niedrig	Mittelfristig	Hoch	Hoch

Die Kombination dieser Dimensionen verdeutlicht, wie wirkungsvoll die jeweiligen Maßnahmen sind, wie kurzfristig ein Resilienzgewinn erzielt werden kann, wie realisierbar die Maßnahmen für Unternehmen sind, und wie groß der staatliche Unterstützungsbedarf jeweils ist. Maßnahmen mit einem hohen Impact auf die Resilienz haben die höchste Priorität, auch wenn sie in der Umsetzung herausfordernder sind, wie etwa die Diversifizierung der Lieferketten. Solche Maßnahmen bieten langfristige Stabilität und Versorgungssicherheit, erfordern jedoch politische Unterstützung und Investitionen. Gleichzeitig gibt es Maßnahmen, die schneller und leichter umsetzbar sind, aber eine vergleichsweise geringere Wirkung haben.

Die aufgezeigten Handlungsoptionen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit sind eng miteinander verknüpft und verstärken sich gegenseitig. Sie sollten deshalb nicht isoliert betrachtet werden. Die Diversifizierung der Lieferketten reduziert die Abhängigkeit von autokratischen Staaten. Supranationale Ansätze und Flexibilisierung ermöglichen und erleichtern umfangreichere Diversifizierung. Die Stärkung von Recycling und der Kreislaufwirtschaft verringern den Importbedarf und erleichtern so, auf problematische Lieferanten zu verzichten.

Die langfristige Förderung der Inlandsproduktion von Titan und dessen Weiterverarbeitung könnte einen wertvollen Beitrag dazu leisten, dauerhafte Resilienz in der Titanwertschöpfungskette zu schaffen, aber ist auch mit großen Herausforderungen verbunden. Ohne eigene Kapazitäten können weder Diversifizierung noch Recycling ihre volle Wirkung entfalten. Hier müssen staatliche Unterstützung und unternehmerische Initiative ineinandergreifen. Ein supranationaler Ansatz hingegen ist notwendig, um die Fragmentierung in Europa zu überwinden. Gemeinsame Beschaffungsprogramme und strategische Partnerschaften auf EU-Ebene schaffen Synergien, steigern die Effizienz und unterstützen die Diversifizierung sowie den Aufbau von Recyclingstrukturen.

Andere unternehmerische Maßnahmen wie die strategische Lagerhaltung bieten kurzfristig Sicherheit bei Lieferengpässen, sind aber allein keine nachhaltige Lösung und wirken nur in Kombination mit den anderen Maßnahmen. Die Umsetzung aller Maßnahmen erfordert eine Anpassung der Regulierungen. Flexiblere gesetzliche Rahmenbedingungen erleichtern Unternehmen die Implementierung und fördern Innovationen.

Insgesamt zeigt die Analyse, dass die Titanversorgung nur durch ein ganzheitliches Vorgehen sichergestellt werden kann. Die Handlungsoptionen sind interdependent und wirken erst im Zusammenspiel. Eine koordinierte Anstrengung von Politik und Industrie ist daher essenziell, um die Resilienz der deutschen Verteidigungsindustrie nachhaltig zu stärken.

7

Ergänzende Informationen

Liste der untersuchten Geschäftsberichte

Die Geschäftsberichte, die für diese Studie herangezogen wurden, wurden im Jahr 2024 veröffentlicht und sind anhand des aktuellen Top-100-Rankings der weltweit größten Verteidigungsunternehmen des Stockholmer Friedensforschungsinstituts SIPRI ausgewählt worden. Darunter befinden sich sieben deutsche Unternehmen bzw. jene mit großer deutscher Beteiligung. In absteigender Reihenfolge sind das Airbus, Rheinmetall, MBDA, KNDS, Thyssenkrupp, Hensoldt und Diehl. KMDS wurde nicht berücksichtigt, da der Geschäftsbericht nicht öffentlich zugänglich ist.⁶¹

Tabelle zu 6.2 Diversifikationsoptionen im Titanerz Bezug

Kriterien	1. Produktionsreserven des Landes ¹	2. Produktionsmenge des Landes ²	3. Hauptlieferant für die EU-Verteidigungsindustrie oder für Deutschland ³	4. Demokratie-Index ⁴	5. Bewertung d. Lieferkettenrisikos ⁵	6. Economic Freedom Index ⁶	7. Zwischenstaatliche Beziehungen ⁷
Länder							
China*	Green	Green	Green	Red	Yellow	Red	Yellow
Australien*	Green	Dark Green	Green	Green	Green	Green	Green
Indien*	Dark Green	Dark Green	Yellow	Dark Green	Yellow	Yellow	Dark Green
Brasilien*	Yellow	Yellow	Yellow	Dark Green	Yellow	Yellow	Dark Green
Norwegen*	Yellow	Dark Green	Green	Green	Green	Green	Green
Kanada*	Yellow	Dark Green	Green	Green	Green	Dark Green	Green
Südafrika*	Yellow	Green	Green	Dark Green	Yellow	Yellow	Dark Green
Mosambik*	Yellow	Green	Green	Orange	X	Orange	Yellow
Madagaskar*	Yellow	Dark Green	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Yellow
Ukraine*	Orange	Yellow	Green	Yellow	Yellow	8	Dark Green
Vietnam	Orange	Yellow	Green	Red	Orange	Dark Green	Dark Green
Sierra Leone	Orange	Yellow	Green	Orange	X keine Daten vorhanden	Red	Yellow
Kenia	Red	Green	Green	Yellow	Orange	Yellow	Dark Green

¹Die Produktionsreserven der Länder wurden in fünf Gruppen eingestuft. Bewertung entnommen aus dem Mineral Commodity Summaries 2024 des U.S.:G.S. Dunkelgrün steht immer für die beste Kategorie, Hellgrün für die zweitbeste, Gelb für die drittbeste, Orange für die zweitschlechteste und Rot für die schlechteste Kategorie.

²Die größten Produzenten an Titanerzen weltweit wurden entsprechend ihrer Fördermenge in drei Gruppen eingeteilt.

³Hauptlieferanten für die EU-Verteidigungsindustrie oder für Deutschland wurden für ihre bereits etablierten Strukturen höher bewertet als solche, die momentan keine Hauptlieferländer darstellen.

⁴Die Staaten wurden entsprechend ihrem Demokratieindex-Wert, erstellt von der Economist Intelligence Unit, in fünf Gruppen eingestuft.

⁵Die Lieferkettensicherheit wurde aus den Ergebnissen des FM Global Resilience Index, des Allianz Risk Barometers und Political Risk Reports erstellt und in drei Gruppen eingestuft.

⁶Da Demokratie allein ist nicht immer als ein Indikator für wirtschaftliche Stabilität ausreicht, wurden die Staaten entsprechend ihrem Wert beim Economic Freedom Index in fünf Gruppen eingestuft. Dadurch werden auch wirtschaftlich relevante Aspekte der Rechtsstaatlichkeit, der offenen Märkte oder der Rolle des Staates in der Wirtschaft betrachtet.

⁷Die zwischenstaatlichen Beziehungen wurden anhand verschiedener Indikatoren wie Handelsvolumen, diplomatischen Besuchen, gemeinsamen Abkommen, Kooperationen und politischer Dialoge sowie bestehender Partnerschaften in drei Gruppen eingestuft.

⁸Hier lagen nicht alle Daten für 2024 vor, es wurde der Mittelwert aus Eigentumsrechten, Rechtswirksamkeit und Integrität der Regierung betrachtet.

Begründung der Zuordnung in Diversifikationsoptionen im Titanerz Bezug (6.1)

Um die Attraktivität einzelner Länder als Titanlieferanten zu bewerten, wurde eine Risiko-Bewertungsmatrix entwickelt. Diese Methode ermöglicht eine systematische Bewertung und den Vergleich verschiedener Risiken und Chancen, indem sie qualitative und quantitative Daten kombiniert, um eine klare und übersichtliche Darstellung zu schaffen. Zur Bewertung jedes Landes als Titanlieferant werden mehrere Faktoren herangezogen, um die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß einer möglichen Lieferunterbrechung zu beurteilen. Die Länder wurden dabei mit Werten von 0 bis 10 bewertet, die anschließend in eine Farbskala überführt wurden.

Produktionsreserven des Landes

Die Produktionsreserven der Länder, die das langfristige Potenzial darstellen, wurden gemäß ihrer Bewertung im USGS Mineral Commodity Summaries 2024 in fünf Gruppen eingeteilt. Ressourcen, die ausreichend Hinweise auf potentiell abbauwürdige Lagerstätten liefern, werden als Reserven klassifiziert, das heißt, als wirtschaftlich und technisch abbaubares Material.⁷⁰ Da die Einflussfaktoren für wirtschaftlich und technisch lohnenswerten Abbau variieren können, sind auch die Angaben zu den Reserven dynamisch. Beispielsweise ändern sich die Rohstoffpreise, die Kosten für Bohrungen und Steuern, was zu kontinuierlichen Anpassungen der Reservemengen führt.^{71,72} Die Reserven wurden folgendermaßen in Kategorien eingeteilt: Dunkelgrün steht für die beste Kategorie (Reserven über 200.000.000 t Ilmenit und Rutil), Hellgrün für die zweitbeste (über 90.000.000 t), Gelb für die drittbeste (über 20.000.000 t), Orange für die zweitschlechteste (über 1 500.000 t) und Rot für die schlechteste Kategorie (über 200.000 t). Diese Farbskala ermöglicht eine klare visuelle Unterscheidung der einzelnen Bewertungskategorien.

Produktionsmenge des Landes

Das Produktionsvolumen gibt an, wie viel Titan derzeit abgebaut und aktiv auf den Markt gebracht wird, was die kurzfristige Verfügbarkeit und Versorgungsstabilität widerspiegelt. Die größten Produzenten an Titanerzen weltweit wurden entsprechend ihrer Fördermenge, erfasst durch den USGS 2024, in drei Gruppen eingeteilt. Dunkelgrün steht für die beste Kategorie (ab 1.100.000 t), Hellgrün für die zweitbeste (ab 198.000 t), Gelb für die drittbeste (ab 50.000 t).

Hauptlieferant für die EU oder Deutschland

Hauptlieferanten für die EU-Verteidigungsindustrie oder für Deutschland wurden für ihre bereits etablierten Strukturen höher bewertet als solche, die momentan keine Hauptlieferländer darstellen. Entsprechend konnte die dunkelgrüne oder gelbe Kategorie erreicht werden.

Demokratieindex

Der von der Economist Intelligence Unit erstellte Democracy Index misst, inwieweit Bürger ihre Regierung in freien und fairen Wahlen wählen können, Bürgerrechte genießen, Demokratie anderen politischen Systemen vorziehen, an der Politik teilnehmen können und dies auch tun, sowie eine funktionierende Regierung haben, die in ihrem Namen handelt und reicht von 0 bis 10 (höchste Demokratie). Die Staaten wurden basierend auf ihrem Demokratieindex in fünf Gruppen eingeteilt, um ihre Zuverlässigkeit als Partner

zu bewerten und die im Dossier angestrebte Unabhängigkeit von nicht-demokratischen Staaten zu fokussieren. Dunkelgrün steht für die beste Kategorie (für einen Indexwert höher 8), Hellgrün für die zweitbeste (für einen Indexwert höher 6), Gelb für die drittbeste (für einen Indexwert höher 5), Orange für die zweitschlechteste (für einen Indexwert höher 3) und Rot für die schlechteste Kategorie.

Daten aus dem FM Global Resilience Index, dem Allianz Risk Barometer und Political Risk Report zur Bewertung der Lieferkettensicherheit

Der FM Resilienz Index, herausgegeben von der Beratungsfirma FM Global, misst die Widerstandsfähigkeit von Unternehmen gegenüber Betriebsunterbrechungen und Risiken. Er bewertet, wie gut Unternehmen auf verschiedene Störfaktoren vorbereitet sind und ihre Betriebsabläufe aufrechterhalten können. Im Gegensatz dazu analysiert der Allianz Risk Barometer globale Geschäftsrisiken, darunter Betriebsunterbrechungen, Cyberrisiken, Naturkatastrophen, Pandemien, Veränderungen im Marktumfeld und den Klimawandel. Die Analyse basiert auf einer globalen Umfrage unter Risikomanagern, Führungskräften und Experten aus verschiedenen Branchen. Der Political Risk Report, herausgegeben von der Beratungsfirma Marsh, konzentriert sich auf politische Risiken, die Unternehmen in verschiedenen Ländern betreffen können. Hierzu zählen politische Instabilität, Regierungswechsel, Enteignungen, Verstaatlichungen, Handelshemmnisse und Bürgerunruhen. Die Bewertung der Länder erfolgt durch die Aggregation der Ergebnisse aus diesen drei Quellen, wobei die Länder mit Werten von 0 bis 10 versehen und in eine Farbskala überführt wurden: Werte bis 2 wurden rot markiert, von 2,1 bis 4,4 in Orange dargestellt, der Bereich von 4,5 bis 7,5 erhielt die Farbe Gelb, und Werte zwischen 7,5 und 10 wurden grün zugeordnet.

Economic Freedom Index

Da Demokratie allein nicht als ein Indikator für wirtschaftliche Stabilität ausreicht, wird auch der Economic Freedom Index miteinbezogen. Dadurch werden auch wirtschaftlich relevante Aspekte der Rechtsstaatlichkeit, der offenen Märkte oder der Rolle des Staates in der Wirtschaft betrachtet. Die Länder erhielten Werte von 0 bis 10, wobei höhere Werte eine bessere Einstufung bedeuten. Die ursprünglichen Werte (0–100) wurden ins Verhältnis gesetzt. Basierend auf ihrem Ergebnis im Economic Freedom Index wurden die Staaten in fünf Gruppen eingeteilt: Grün ab 7,6, Hellgrün ab 6,3, Gelb ab 5,4, Orange ab 5,1 und Rot für Werte bis 4,9.

Zwischenstaatliche Beziehungen

Die Bewertung der zwischenstaatlichen Beziehungen erfolgte durch eine qualitative Analyse, die verschiedene Aspekte wie Handelsvolumen, diplomatische Besuche, gemeinsame Abkommen, kulturelle Kooperationen und politische Dialoge einbezieht. Dabei wurde geprüft, ob die Qualität der Beziehungen eher entwicklungsfördernd oder strategisch relevant ist. Die Ergebnisse wurden in drei Kategorien klassifiziert: Dunkelgrün steht für die beste Kategorie, während Gelb die schlechteste Kategorie darstellt.

Kriterien für die Zuordnung von Handlungsempfehlungen

Impact auf die Resilienz: Hier wurde bewertet, wie stark eine Handlungsempfehlung die Versorgungssicherheit, Resilienz und Stabilität der Lieferkette stärkt. Ein hoher Impact bedeutet, dass die Maßnahme direkt und signifikant zur Verbesserung der Versorgungssicherheit beiträgt, während ein niedriger Impact nur marginale oder langfristige Effekte hat.

Zeitpunkt der Wirkung: Hier wurde abgeschätzt, wie schnell ein Resilienzgewinn durch die Maßnahme erzielt werden kann. Dies umfasst sowohl die Zeit, die eine Umsetzung voraussichtlich in Anspruch nehmen würde, als auch die Zeit, die schätzungsweise bis zur Entfaltung der Wirkung verstreichen würde. Die Beurteilung ‚kurzfristig‘ bedeutet, dass ein Resilienzgewinn innerhalb von einem Jahr erzielt werden kann. Die Beurteilung ‚langfristig‘ hingegen heißt, dass realistischweise viele Jahre gebraucht werden, bis ein Resilienzgewinn auf diesem Weg erzielt werden kann.

Unternehmerische Implementierbarkeit: Hier wurde beurteilt, wie einfach und schnell Unternehmen die jeweilige Handlungsempfehlung umsetzen können. Dies hängt davon ab, wie komplex die Maßnahme ist, welche Ressourcen benötigt werden und ob technologische oder prozessuale Anpassungen notwendig sind.

Politischer Einfluss: Hier wurde bewertet, wie stark politischer Einfluss oder Unterstützung notwendig ist, um die Maßnahme erfolgreich umzusetzen. Einige Maßnahmen erfordern eine enge Zusammenarbeit mit Regierungen oder internationale Vereinbarungen, während andere unternehmensseitig autonom durchgeführt werden können.

Endnoten

- 1 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.
- 2 Institut der deutschen Wirtschaft, Industrie- und Handelskammer Schwaben.
- 3 Bundesministerium der Verteidigung (2024).
- 4 Girardi et al.
- 5 Girardi et al., Pavel / Tzimas.
- 6 Georgitzikis et al.
- 7 Experteninterview.
- 8 Jaganmohan.
- 9 Lopez / Wolff.
- 10 Pavel / Tzimas, S. 58.
- 11 Girardi et al.
- 12 Das vorliegende Dossier zieht in erster Linie den Nettoimport und nicht absolute Importmengen als Datengrundlage voran, da der Nettoimport akkurater einseitige Abhängigkeiten darstellt.
- 13 Gentzmann, Marie
- 14 U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- 15 Reihung vom gewichtsmäßig größten Bezugsland zum kleinsten Bezugsland. Gemessen an Importen von außerhalb der EU in die EU nach Eurostat. Absolute Werte und Nettowerte zeichnen in diesem Fall nahezu dasselbe Bild.
- 16 Titanoxid, das andere Zwischenprodukt, welches aus Ilmenit und Rutil hergestellt wird, spielt im Kontext des vorliegenden Dossiers keine bedeutende Rolle.
- 17 Bykhovskii / Tiginov.
- 18 Jones.
- 19 Norwegian Ministry of Trade and Industry.
- 20 Georgitzikis et al.
- 21 Kullik et al.
- 22 Georgitzikis et al.
- 23 Brennan.
- 24 Grohol / Veeh, S. 6, 50.
- 25 Kommersant.
- 26 Grohol / Veeh, S. 6, 50.
- 27 U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- 28 Georgitzikis et al.
- 29 Georgitzikis et al.
- 30 Abuljadayel / Martin.
- 31 Aussagen auf Grundlage der Nettoimportdaten von Eurostat.
- 32 Grohol / Veeh S. 39.
- 33 Georgitzikis et al.
- 34 GTAI.
- 35 Tasnee
- 36 Mining Metals, GNEE Metal, Baoji Zhongyang Metal Materials.
- 37 Lampert, Allison & Shepardson, David.
- 38 Kullik et al.

- 39 Kullik et. al., Venger et. al.
- 40 Trading Economics.
- 41 Georgitzikis et al.
- 42 Positive Ausnahme: das französische EcoTitanium-Werk, s.u.
- 43 Daten auf Grundlage von Eurostat.
- 44 Jakimow et al.
- 45 Argus (2020a).
- 46 Argus (2020b).
- 47 US Department of Defense.
- 48 Burns.
- 49 Hensel.
- 50 Bundeswehr (2024a), Bundeswehr (2024b).
- 51 Deutscher Bundeswehrverband.
- 52 Reich.
- 53 ZDF Heute.
- 54 Bundesministerium der Verteidigung (2023).
- 55 Bundesministerium der Verteidigung (2024).
- 56 Reckordt.
- 57 Fiott.
- 58 Ebd.
- 59 Ebd.
- 60 Für dieses Kapitel wurden vorrangig Geschäftsberichte der Systemhäuser (vgl. Anhang) und teilweise mit Aussagen aus Experteninterviews gestützt. Es handelt sich bei den Unternehmen nicht exklusiv nur um titanabhängige Unternehmen, sondern auch um IKT-Unternehmen wie Hemshold. Aufgrund der mangelnden Informationslage wurden diese mit aufgenommen, um aggregierte und zumindest allgemeine Maßnahmen nennen zu können.
- 61 Airbus, Diehl, Hensoldt, MBDA, Rheinmetall, Thyssenkrupp.
- 62 Die Produktionsreserven der Länder wurden in fünf Gruppen eingestuft. Bewertung entnommen aus dem Mineral Commodity Summaries 2024 des U.S.G.S. Dunkelgrün steht immer für die beste Kategorie, Hellgrün für die zweitbeste, Gelb für die drittbeste, Orange für die zweit schlechteste und Rot für die schlechteste Kategorie.
- 63 Die größten Produzenten an Titanerzen weltweit wurden entsprechend ihrer Fördermenge in drei Gruppen eingeteilt.
- 64 Hauptlieferanten für die EU-Verteidigungsindustrie oder für Deutschland wurden für ihre bereits etablierten Strukturen höher bewertet als solche, die momentan keine Hauptlieferländer darstellen.
- 65 Die Staaten wurden entsprechend ihrem Demokratieindex-Wert, erstellt von der Economist Intelligence Unit, in fünf Gruppen eingestuft.
- 66 Die Lieferkettensicherheit wurde aus den Ergebnissen des FM Global Resilience Index, des Allianz Risk Barometers und Political Risk Reports erstellt und in drei Gruppen eingestuft.
- 67 Da Demokratie allein ist nicht immer als ein Indikator für wirtschaftliche Stabilität ausreichend, wurden die Staaten entsprechend ihrem Wert beim Economic Freedom Index in fünf Gruppen eingestuft. Dadurch werden auch wirtschaftlich relevante Aspekte der Rechtsstaatlichkeit, der offenen Märkte oder der Rolle des Staates in der Wirtschaft betrachtet.
- 68 Die zwischenstaatlichen Beziehungen wurden anhand verschiedener Indikatoren wie Handelsvolumen, diplomatischen Besuchen, gemeinsamen Abkommen, Kooperationen und politischer Dialoge sowie bestehender Partnerschaften in drei Gruppen eingestuft.
- 69 Hier lagen nicht alle Daten für 2024 vor, es wurde der Mittelwert aus Eigentumsrechten, Rechtswirksamkeit und Integrität der Regierung betrachtet.

- 70 Wellmer FM, Dalheimer M, Wagner M.
- 71 U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, S. 189.
- 72 Hilgers et al., S. 22.



Ergebnisintegration: Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen

Die folgenden Empfehlungen integrieren die unterschiedlichen Perspektiven der vier thematischen Dossiers und beschreiben unter einer übergeordneten Perspektive, welche Aufgaben sich den Akteuren in Wirtschaft und Politik in naher Zukunft stellen. Wir strukturieren die vorgeschlagenen Maßnahmen in thematischen Blöcken. Diese enthalten eine Untergliederung danach, welche Akteursgruppen für eine Umsetzung verantwortlich sind. Zu nennen sind hier Unternehmen, intermediäre Organisationen (z. B. Verbände und Gewerkschaften), nationalstaatliche Institutionen und Institutionen der EU. Die Fokussierung auf thematische Schwerpunkte trägt dem Fakt Rechnung, dass eine Steigerung der Resilienz eine gesamtwirtschaftliche und in vielen Fällen gesamteuropäische Aufgabe darstellt, die wiederum ein gemeinsames Agieren der genannten Akteure erfordert.

Die Handlungsempfehlungen stützen sich auf die im Rahmen der vier Dossiers durchgeführten Analysen und konkretisieren ausgehend von den dort benannten branchen- bzw. technologiespezifischen Empfehlungen den Weg zu einer verbesserten Resilienz der europäischen Wirtschaft. Die Auswertungen greifen Befunde aus den Literaturrecherchen, der Analyse von volkswirtschaftlichen und Handelsdaten sowie Interviews mit Expertinnen und Experten aus Verbänden, Unternehmen, Wissenschaft und staatlichen Institutionen auf.

Zwei Aspekte sind aus unserer Sicht hervorzuheben: Das Risikomanagement steht am Beginn der Empfehlungen, weil es die Grundlage für jedes Handeln in diesem Feld bildet. Nur wenn entlang der Lieferkette deutlich wird, wo und in welchem Umfang einseitige Abhängigkeiten bestehen, können unterschiedliche Handlungsoptionen entwickelt und geprüft werden. Transparenz ist somit die Voraussetzung, um Resilienz ein angemessenes Gewicht in Entscheidungsprozessen einzuräumen. Die Berücksichtigung und Aktivierung internationalen Handelns (und hier vor allem auf der europäischen Ebene) stellt den zweiten Aspekt dar, der vor die Klammer zu ziehen ist. In einem geopolitischen Feld, in dem nationale Interessen offenkundig immer konfrontativer umgesetzt werden, sind einzelne Unternehmen, Branchenorganisationen, Verbände und selbst Nationalstaaten nicht immer stark genug, um die eigenen Interessen erfolgreich zu vertreten. Insofern ist ein europäisches Handeln zur Herstellung eines Level Playing Field von höchster Bedeutung.

Die Maßnahmen werden darüber hinaus nicht priorisiert, da sie stets Optionen im Hinblick auf spezifische Herausforderungen darstellen. Thematisch werden diese wie folgt gegliedert: Diversifizierung, Forschung und Entwicklung, Recycling und Kreislaufwirtschaft, Aufbau von Kapazitäten in der EU und befreundeten Staaten sowie weitere Maßnahmen zur Stärkung der Resilienz. Diese Liste umfasst nicht alle denkbaren Handlungsfelder im Bereich Resilienz, sondern enthält diejenigen Handlungsempfehlungen, die Antworten auf die in der Studie erarbeiteten Problemlagen ermöglichen.

Risikomanagement

Abhängigkeiten von einzelnen Zulieferern oder einzelnen Rohstoff- und Vorleistungsproduzenten treten an unterschiedlichen Stellen der Wertschöpfungskette auf. Deshalb steht vor der Initiierung von Maßnahmen eine unternehmens- und branchenspezifische bzw. volkswirtschaftliche Analyse zentraler Wertschöpfungsketten. Verbunden damit sollten Strukturen und Prozesse etabliert werden, die Resilienzrisiken systematisch und regelmäßig erfassen, evaluieren und in Entscheidungsprozesse integrieren.

Aus betrieblicher Perspektive heißt dies, Ressourcen für Risikomanagementstrategien bereitzustellen und die Erkenntnisse als Parameter in Entscheidungsprozessen zu verankern. Dies umfasst neben personellen und finanziellen Ressourcen das Etablieren von Berichtsroutinen, Notfallplänen und Stress-tests. Das so gewonnene Wissen sollte handlungsleitend sein, insbesondere im Einkauf, bei Investitions- und Standortentscheidungen, aber auch für die Bereiche Forschung und Entwicklung sowie Kooperationen mit anderen Unternehmen. Unternehmen sollten weiter aus einer Technologie-, Ressourcen- oder Prozessperspektive prüfen, an welchen Stellen akteursübergreifende Maßnahmen sinnvoll oder notwendig sind, um durch ein gemeinsames Vorgehen Resilienzrisiken abzuwenden oder zu managen. Dies können Industrieverbände, Gewerkschaften und staatliche Einrichtungen durch die Initiierung bzw. Etablierung von Branchen- oder Ressourcenplattformen unterstützen. Diese Plattformen sollen Unternehmen und Verbänden als Informationsdrehscheibe dienen, strukturierte Konsultationen mit den entsprechenden staatlichen Stellen ermöglichen und auf dieser Basis Handlungsbedarfe identifizieren und Handlungsnotwendigkeiten aufzeigen.

Risikomanagementstrategien und die Berücksichtigung von Resilienzrisiken sollten als Teil einer umfassenden Wirtschaftssicherheitsstrategie entsprechend auf nationalstaatlicher und EU-Ebene stärker verankert werden. Auf der nationalen Ebene sollte dem Thema Resilienz im Regierungshandeln und im parlamentarischen Prozess deutlich mehr Raum als bisher gegeben werden. Darüber hinaus bedarf es einer klaren Governancestruktur die eine ressortübergreifende Koordination ermöglicht und z. B. im BMWK oder im Bundeskanzleramt verankert werden kann. In diese Verantwortlichkeit fällt auch die Entwicklung langfristiger Resilienzstrategien, das Aufzeigen der Haushaltsrelevanz von Aktivitäten zur Stärkung der Resilienz und die Abstimmung mit weiteren Politikfeldern. Zu nennen sind hier u. a. die Technologie-, Industrie- und Außenwirtschaftspolitik sowie Forschung und Entwicklung. Die Koordination umfasst auch Aspekte resilienzbezogener Prioritäten und Zielvorgaben, die kontinuierlich festgelegt, überprüft, evaluiert und ggf. angepasst werden. Fortlaufende Konsultationen mit den Wirtschaftsakteuren sind essenziell, um bedarfsgerechte Maßnahmen zu entwickeln und zielgerichtete Prozesse sicherzustellen. Institutionen, die Resilienzrisiken untersuchen und entsprechende Informationen bereitstellen, wie z. B. die DERA, sollten finanziell gestärkt, ihre koordinierende Rolle betont und ihre Erkenntnisse stärker in den politischen Entscheidungsprozessen berücksichtigt werden.

Auf EU-Ebene sollten Resilienzrisiken stärker Eingang in langfristige Strategien finden, wie z. B. technologiespezifische Strategien für Traktionsbatterien oder Halbleiter. Auch hier sollten Fragen der technologischen Souveränität ressortübergreifend etabliert werden und in allen relevanten Entscheidungsfeldern, u. a. bei der Ausgestaltung von Förderprogrammen und von Regularien im Energie- und Chemiebereich, mitgedacht werden. Bestehende Programme und Strategien wie der EU Chips Act und der CRMA sollten in ihren Maßnahmen zur operativen Umsetzung konkretisiert werden.

Essenziell ist auch eine bessere Koordination sowohl zwischen verschiedenen Generaldirektionen, aber auch den Mitgliedsstaaten sowie zwischen Förderprogrammen und zwischen geförderten Projekten, um Maßnahmen aufeinander abzustimmen und Synergien zu nutzen.

Auf staatlich-regulativer Ebene besteht ein Trade Off zwischen dem Gestaltungsanspruch und daraus resultierenden zunehmend komplexen Detailregulierungen und der Sicherung unternehmerischer Handlungsfreiheit. D. h. Steuerung und Koordination sollten unternehmerisches Engagement fördern und darüber hinaus Impulse setzen, sich mit dem Thema Abhängigkeit von Ressourcen und Vorleistungen kontinuierlich und systematisch auseinanderzusetzen. Als Leitbild sollte dabei Risikomanagement als eine mittel- bis langfristige Perspektive etabliert werden, das nicht nur in einem Reaktionsmodus und im Hinblick auf tagesaktuelle Störungen reagiert.

Risikomanagementstrategien und das Etablieren bzw. Verbessern von Risikomanagementstrukturen sollten als unverzichtbare erste Schritte auf den unterschiedlichen Akteursebenen unverzüglich in Angriff genommen bzw. vorhandene Ansätze ausgebaut werden. Die Maßnahmen können kurzfristig implementiert werden und aufzeigen, wo Handlungsbedarf existiert und welche Handlungsoptionen sich bieten.

Internationale Zusammenarbeit

Die europäischen Staaten sollten den aktuell gegenläufigen Tendenzen zum Trotz das Prinzip des Freihandels als Leitbild des Waren- und Güterverkehrs verteidigen. Die globale Konkurrenz um Rohstoffe und spezifische Vorleistungsprodukte erfordert allerdings auch die Bündelung von wirtschaftlicher Stärke und Marktmacht. Ziel der Aktivitäten ist die strukturelle Stärkung der europäischen Industrie durch gemeinschaftliche und abgestimmte Maßnahmen. Die Herausforderung liegt nicht nur in der Absicherung der Produktion gegen kurzfristige Störungen, sondern in der mittel- und langfristigen Sicherung der Handlungsfähigkeit. Die Versorgung mit kritischen Rohstoffen und Komponenten soll durch strategische Partnerschaften und langfristige Lieferverträge gesichert werden. In der Batteriezellfertigung heißt dies beispielsweise langfristige Lieferverträge für Lithium, aber auch Anoden- und Kathodenmaterial abzuschließen und Recyclingkapazitäten auszubauen, um die Rohstoff- und Materialversorgung zuverlässig zu gewährleisten. Die technologische Souveränität soll dadurch erreicht werden, dass kritische Abhängigkeiten durch gezielte Investitionen in Schlüsseltechnologien sowie durch enge technologische Partnerschaften abgebaut werden. Unternehmen profitieren damit durch eine verbesserte Planungssicherheit, da verlässliche Handels- und Investitionsabkommen protektionistischen Maßnahmen entgegenwirken und stabile Rahmenbedingungen schaffen.

Unternehmen sollten ggf. im Verbund mit weiteren europäischen Partnerunternehmen strategische Allianzen mit Produzenten in rohstoffreichen Ländern eingehen, um eine stabile Versorgung mit essenziellen Ressourcen sicherzustellen. Dazu gehören z. B. direkte Lieferverträge mit europäischen Lithiumproduzenten oder Kooperationen mit Titanabbauunternehmen. Insbesondere im Bereich der Mikroelektronik können Handlungsalternativen durch den Ausbau von Kooperationen oder durch Allianzen und gemeinsame Forschungsinitiativen gewonnen werden. Durch direkte Vereinbarungen lassen sich Rohstoffströme stabilisieren, während bilaterale Abkommen mit Industriepartnern die Produktion in Europa absichern. Strategische Investitionen in politisch stabile Drittstaaten schaffen dabei zusätzliche verlässliche Rahmenbedingungen.

Ein strukturierter Austausch zwischen Unternehmen, Verbänden und staatlichen Stellen ist essenziell, um Resilienzrisiken frühzeitig zu erkennen und gemeinsam anzugehen. Eine entsprechende Plattform zur Stärkung der Resilienz kann den Informationsfluss und die Koordination verbessern und helfen, Bereiche zu identifizieren, in denen „große Lösungen“ erforderlich sind, die auf Verbandsebene oder durch nationale und europäische Maßnahmen adressiert werden müssen. Ergänzend dazu können staatlich unterstützte Einkaufsplattformen dazu beitragen, Lieferketten zu stabilisieren. Anknüpfen lässt sich hier z. B. an die Planungen der Europäischen Union im Rahmen des Clean Industrial Deals eine entsprechende Einkaufsplattform zu entwickeln. Durch die Bündelung der Nachfrage wird auch die Verhandlungsmacht gegenüber internationalen Anbietern gestärkt, was langfristig zu einer verlässlichen Versorgung beiträgt. Besonders kleine und mittlere Unternehmen (KMU) können so von gemeinschaftlichen Instrumenten profitieren, die ihnen den Aufbau eigener resilienter Lieferstrukturen ermöglichen.

Die Bundesregierung sollte ggf. gemeinsam mit der Europäischen Kommission oder einzelnen industriestarken europäischen Partnern aktiv multilaterale Abkommen mit verlässlichen Staaten abschließen und durch gezielte Handels- und Investitionsförderung neue Bezugsländer für kritische Rohstoffe erschließen. Einheitliche Handels- und Investitionsstandards – wie sie etwa im EU Competitiveness Compass oder NZIA formuliert sind – erleichtern den Marktzugang und ermöglichen abgestimmte Strategien, indem sie regulatorische Kriterien vereinheitlichen und transnationale Forschungsprojekte in Schlüsselindustrien fördern. Nationale und europäische Strategien sollten aufeinander abgestimmt werden, um Fragmentierung und ineffiziente Parallelstrukturen zu vermeiden.

Zudem sollte die internationale Zusammenarbeit in multilateralen Foren intensiviert werden. Der strategische Austausch mit Partnerländern in der G7, der OECD, der G20 sowie in interregionalen EU-Formaten mit Lateinamerika, Asien und Afrika sollte dazu beitragen, gemeinsame Resilienzfördernde Maßnahmen zu koordinieren. Friendshoring-Strategien mit vertrauenswürdigen Demokratien und bilaterale Abkommen sollten zur Absicherung langfristig stabiler Lieferketten entwickelt und der Aufbau gemeinsamer Produktionskapazitäten gefördert werden. Die Europäische Kommission sollte dabei den strategischen Rahmen festlegen, der von den nationalen Regierungen mit Blick auf die eigenen industriellen Stärken und Erfordernisse ausgebaut wird – eine koordinierte Resilienzstrategie auf EU- und Mitgliedsstaatenebene ist hierbei unerlässlich.

Herausforderungen bestehen insbesondere in der praktischen Umsetzung und der Koordination zwischen den beteiligten Akteuren. Unterschiedliche regulatorische Vorgaben, hohe Anfangsinvestitionen und geopolitische Spannungen erfordern flexible und abgestimmte Anpassungsstrategien. Zudem können nationale Alleingänge die angestrebte Harmonisierung behindern und das Risiko der Marktfragmentierung erhöhen. Langfristig hängt der Erfolg der internationalen Zusammenarbeit von klar definierten politischen Entscheidungen, einheitlichen Standards und der Bereitschaft ab, in gemeinsame Projekte zu investieren. Die umfassende Ausschöpfung aller Handlungsoptionen zur Reduzierung von Lieferrisiken schließt selbstverständlich auch die Vermeidung zusätzlicher Handelskonflikte mit Staaten ein, die gegenwärtig nicht als demokratische Partnerländer gelten. Ziel muss dabei sein, den regelbasierten und freien internationalen Warenhandel zu verteidigen. Zu diesem Zweck sollte sich die Bundesregierung gemeinsam mit der Europäischen Kommission für die Stärkung und den Erhalt von internationalen Handelsorganisationen, -verträgen und -normen einsetzen sowie entsprechende diplomatische Bemühungen unternehmen.

Diversifizierung

Für eine Vielzahl von Rohstoffen verfügen autoritäre Staaten, wie China oder Russland, über große natürliche Vorkommen oder vereinen einen Großteil der häufig energieintensiven Verarbeitungskapazitäten auf sich. Sie werden auf absehbare Zeit durch ihre starke Position im Abbau der Rohstoffe bzw. in ihren Kapazitäten und Kompetenzen auf den frühen Verarbeitungsstufen die globalen Märkte dominieren. Zwar verfügen auch andere Länder über relevante Vorkommen, der Abbau dieser Vorkommen befindet sich jedoch in vielen Fällen noch im Aufbau, sodass kurzfristig nur begrenzte Ausweichmöglichkeiten bestehen. Gerade bei komplexen Produktgruppen mit zahlreichen Vorleistungsbezügen stellt der diversifizierte Einkauf von Vorleistungen und Komponenten eine besondere Herausforderung dar. Ein Beispiel sind Mikrochips, hier ist Deutschland auf Importe aus Taiwan und Südkorea angewiesen, die kaum substituiert werden können.

Die Diversifizierung zielt auf die Reduktion dieser Abhängigkeit von einzelnen kritischen Ländern oder Lieferanten. Mit Hilfe von Multisourcing- und Multicountrysourcing-Strategien wird der Einkauf von Rohstoffen, Vorprodukten oder Komponenten auf verschiedene Lieferanten verteilt. Durch die Verlagerung oder Streuung der Beschaffung können das Risiko eines Lieferausfalls bzw. die damit verbundenen Schäden bereits kurzfristig reduziert werden.

Das Supply Chain Management vieler Unternehmen setzt überwiegend auf Kriterien wie den Preis, die Produkteigenschaften oder Lieferzeiten. Unternehmen sollten verstärkt Aspekte der dauerhaften Lieferketten-Resilienz als Beschaffungskriterium berücksichtigen und Bezugsquellen diversifizieren. Das Single Sourcing, der Einkauf von Gütern von nur einem Lieferanten/Land, stellt für Unternehmen ein besonderes Risiko dar, insbesondere wenn es sich um Lieferungen aus China oder anderen autokratischen Staaten handelt. Angesichts der Rohstoffvorkommen und der spezifischen Verarbeitungskompetenzen Chinas ist die Entkopplung der Lieferbeziehungen oft kaum möglich: Hier empfiehlt sich eine „China +1“ Strategie, die zumindest eine Risikoverteilung vorsieht. Ein Beispiel für eine erfolgreiche Diversifizierung: Bis 2022 importierte Deutschland den Großteil an Titanwaren aus Russland und China, Zwischenprodukte, die z. B. in der Produktion von Rüstungsgütern von großer Bedeutung sind. Im Jahr 2023 ging der Import aus Russland stark zurück, während die importierte Menge aus Japan signifikant zunahm. Die Diversifizierung von Lieferbeziehungen fällt direkt in die Verantwortung betroffener Betriebe, die neue Möglichkeiten des geeigneten Vorleistungsbezugs identifizieren und vertraglich regeln können. Staatliche Akteure und Verbände sollten verstärkt Maßnahmen zur Unterstützung bei der Identifikation entsprechender Rohstoff- und Vorleistungsquellen bereitstellen.

Forschung und Entwicklung

Forschung und Entwicklung (FuE) bieten sowohl Unternehmen als auch staatlichen Akteuren einen eigenständigen Ansatz zur Stärkung der Resilienz. Sie können technische oder prozessuale Alternativen zu den vorhandenen Wertschöpfungsketten und -strukturen bereitstellen. Weltmarktrelevante FuE-Erfolge erfordern in der Regel viel Zeit, gleichzeitig bieten neue Lösungen langfristige Alternativen und verbessern somit die strategische Handlungsautonomie von Unternehmen und Staaten.

Forschung und Entwicklung sind zuallererst unternehmerische Aufgaben, da sie dazu dienen mit neuen oder verbesserten Produkten und Prozessen die eigene Marktposition zu stärken. Markt und Kunden sowie zukünftige Marktchancen motivieren das Engagement für FuE. Unter dem Resilienzaspekt ist es zentral, dass in den Auswahlprozess der Forschungsthemen auch erkannte Abhängigkeiten aufgenommen werden. Zu prüfen ist dabei, ob entsprechende Risiken durch Lieferstopps einzelner Produzenten durch neue (technische) Lösungen kompensiert werden können. Die Stärkung von Handlungskompetenz und -autonomie sollte hierbei als Kriterium für Investitions- und Innovationsentscheidungen berücksichtigt werden. Möglichkeiten der Forschung im Verbund (mit anderen Unternehmen oder Partnern aus der Wissenschaft) bieten die Chance, weitere Wissensressourcen zu erschließen und damit zu neuen Handlungsoptionen zu gelangen.

Zum Handeln staatlicher Akteure bieten sich zumindest zwei Schnittstellen:

- 1) das Einbringen von Themen und Fragestellungen in die nationale und europäische Forschungsagenda. Hier bietet sich insbesondere Verbänden und Organisationen ein Aufgabenfeld, indem sie einfordern, dass die unternehmerische und nationale Souveränität bei der Entwicklung von Programmen der Forschungsförderung Berücksichtigung finden;
- 2) die Nutzung dieser Programme und Fördermaßnahmen selbst zur Ko-Finanzierung eigener FuE-Aktivitäten oder zur Finanzierung von Leistungen der Wissenschaftspartner. Zu nennen ist hier auch die Möglichkeit der Inanspruchnahme der Forschungszulage.

Der Draghi-Report thematisiert die Interdependenz von Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit, von Initiativen zur Dekarbonisierung und Resilienz. Die nationale und europäische Forschungs- und Innovationspolitik waren in jüngster Vergangenheit stark missionsgetrieben. In der zukünftigen nationalen und europäischen Forschungsplanung sollte der Beitrag der Forschung zur Stärkung der Souveränität, zur Senkung des Rohstoffverbrauchs und zur Ermöglichung von Zirkularität in den Produktionsprozessen ein hohes Gewicht, d. h. auch eine entsprechende Ressourcenausstattung erhalten. Von besonderer Bedeutung ist dabei die gezielte Ausbildung von Fachkräften in Forschung und Entwicklung. Daher sollte verstärkt in spezialisierte Weiterbildungsprogramme investiert werden, um die Expertise im Bereich rohstoffeffizienter Produktgestaltung und Substitution zu fördern.

Die Identifikation und Definition dieser Forschungsfelder sind als kritische Punkte der Debatte anzusehen, da hier unterschiedliche Interessen gegeneinander abgewogen werden müssen und es hierbei immer um den Zugang und die Verteilung von Ressourcen geht. Auch hier bildet Transparenz eine Voraussetzung für einen offenen Diskurs über die notwendige Priorisierung von staatlichen Forschungsbudgets. Dabei stellt sich die Frage nach staatlicher und unternehmerischer Verantwortung im Hinblick auf die Ressourcenbereitstellung.

Wenn die Priorisierung von Forschungszielen unter dem Aspekt der Stärkung der technologischen Souveränität als Voraussetzung zukünftiger Wettbewerbsfähigkeit erfolgt, tritt diese in Konkurrenz zu missionsgetriebenen Zielen, zur Wissenschaftsfreiheit und zu unternehmerischer Autonomie. Notwendig ist es, diesen Diskurs zu initiieren und ihn offen und transparent zu führen, um auch für Entscheidungen zur Ressourcenausstattung einzelner Programme und Maßnahmen eine Argumentationsgrundlage bereitzustellen. Dies erfordert Kommunikation und Kooperation aller Akteure in den einzelnen Themenfeldern.

Das Beispiel Batterie verdeutlichte, dass Alternativen zu den bestehenden Verfahren und den dabei genutzten Rohstoffen vorhanden sind bzw. Entwicklungsperspektiven liefern können: Hier bieten z. B. Natrium-Ionen-Akkus einen – bisher allerdings noch nicht gleichwertigen – Ersatz zu den im Automobilbau genutzten Lithium-Ionen-Akkus. Zentrale Fragen, die dabei beantwortet werden müssen:

Welche Ziele und Prioritäten werden mit einer Forschungsagenda definiert?

Wer trägt die Verantwortung für die Finanzierung und Umsetzung?

Wie kann ein Monitoring etabliert werden, das z. B. auch mögliche Abbruchkriterien bei fehlenden Umsetzungsperspektiven berücksichtigt?

Wer sichert das Vorhandensein und die Qualifikation exzellenten Forschungspersonals?

Wie gelingt der Transfer von technologischen Innovationen in die Serienproduktion und die entsprechende Skalierung?

Wesentliche Aufgabe ist, die entsprechenden Klärungsprozesse herbeizuführen und unter Einbeziehung der unterschiedlichen Akteure zu Leitlinien und Ergebnissen zu gelangen. Mit einer Neuaufwertung von FuE werden keine kurzfristigen Erfolge zu erzielen sein, zu betonen bleibt aber eine große Nachhaltigkeit erzielter Effekte. Gleichzeitig wird an der Schnittstelle von wissenschaftlicher und industrieller Forschung ein langfristiger Kompetenzaufbau ermöglicht.

Kreislaufwirtschaft

Die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft für strategische Rohstoffe kann mittel- bis langfristig einen signifikanten Beitrag zur Reduktion von Importabhängigkeiten leisten. Entlang von Kreislaufwirtschaftsstrategien kann der Primärrohstoffverbrauch deutlich reduziert werden. Ein wesentlicher Bestandteil einer Kreislaufwirtschaftsstrategie ist die gezielte Vermeidung des Einsatzes kritischer Rohstoffe, etwa durch ein verändertes oder verbessertes Produktdesign. Darüber hinaus kann die Verlängerung der Produktlebensdauer dazu beitragen, die Nutzungsdauer der eingesetzten Rohstoffe zu maximieren. Von besonderer Bedeutung ist jedoch die möglichst umfassende Rückgewinnung kritischer Rohstoffe aus End-of-life Produkten.

Unternehmen sollten folglich in Recycling und die Kreislaufführung von Wertstoffen investieren, insbesondere für Rohstoffe, die von Versorgungsrisiken betroffen sind wie z. B. Gallium, Germanium, Titan und bestimmte Seltene Erden. Dies umfasst die Entwicklung von Recyclingverfahren, das Errichten und die Skalierung von Recyclinganlagen sowie das Mitbedenken von Recyclingpotenzialen bei der Entwicklung neuer Produkte zur Optimierung der eigenen Produktionsprozesse. Besonders ins Auge zu fassen sind Recyclingprozesse, die über die thermische und mechanische Verwertung hinausgehen wie das chemische Recycling. Unternehmen sollten im Recyclingbereich Kooperationen mit anderen Unternehmen entwickeln, um Investitionskosten auf mehrere Schultern zu verteilen und Expertise zu bündeln. Eine enge Abstimmung mit Recyclingunternehmen ist notwendig, um verfahrens- und produkttechnische Bemühungen, Anforderungen und Bedarfe aufeinander abzustimmen. Von großer Bedeutung ist dabei die Qualifizierung des Personals, das sich u. a. neu gestaltete Prozesse und Verfahren sowie neue Materialkenntnisse aneignen muss.

Sowohl Bundesregierung als auch Europäische Kommission sind auf industriepolitischer Ebene im Bereich Recycling gefordert, günstige Rahmenbedingungen zu schaffen und substanzielle finanzielle Anreize zu bieten. Dies betrifft sowohl Forschung und Entwicklung als auch den Auf- und Ausbau von Recyclinganlagen. Dabei sollten neben Nachhaltigkeitsaspekten auch dezidiert Resilienz Aspekte stärker bei der Auswahl von Vorhaben für die Unterstützung gewichtet werden. Bestehende gesetzliche Rahmenwerke wie der Net-Zero Industry Act, der Critical Raw Materials Act und die Batterieverordnung sollten ausgebaut und durch geeignete Fördermaßnahmen sowie bürokratische Erleichterungen unterfüttert werden.

Aufbau von Kapazitäten in der EU und befreundeten Staaten

Um die Abhängigkeit von importierten Rohstoffen und Zwischenprodukten zu verringern, sind der Ausbau und die Erhaltung heimischer Verarbeitungskapazitäten sowie der Rohstoffabbau in der EU und befreundeten Staaten von entscheidender Bedeutung. Unsere Studie zeigt, dass dies insbesondere zur Erhöhung der Resilienz in kritischen Bereichen beiträgt, einschließlich Schlüsselkomponenten wie Permanentmagneten, Rotorblättern, Titanmetall (Ti-6Al-4V), Halbleitern, hochreinen Elektronikchemikalien und -gasen sowie der Verarbeitung von Silizium, Gallium und Germanium.

Obwohl eine vollständige Eigenversorgung in diesen Bereichen nicht erreichbar sein wird, ist es entscheidend, den heimischen Abbau von Rohstoffen sowie von Weiterverarbeitungskapazitäten (Raffinerien) für Rohstoffe wie z. B. Lithium zu stärken. Diese Maßnahmen sichern nicht nur wertvolles Fachwissen, sondern tragen auch zur Erhaltung und Stärkung der Wertschöpfungsketten in Europa bei. Unternehmen sollten gezielt europäische Produktionskapazitäten ausbauen und flexibilisieren, insbesondere mittlere und vorgelagerte Wertschöpfungsstufen. Wir empfehlen die folgenden Maßnahmen zu prüfen:

Vertikale Integration und Aufbau von Kapazitäten in vorgelagerten Wertschöpfungsstufen, um Risiken in der Zulieferung sowie Preis- und Qualitätsunsicherheiten zu minimieren.

Investitionen in europäische und Open-Source-Technologien, um Innovationskapazitäten zu stärken und Wettbewerbsvorteile zu erzielen.

Abschluss direkter Lieferverträge mit Abbauprojekten zur Sicherstellung der Rohstoffverfügbarkeit, Kostenkalkulierbarkeit und langfristigen Investitionssicherheit.

Langfristige Lieferverträge mit europäischen Produzenten, um stabile Lieferketten zu erzielen und die regionale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

Bundesregierung und die EU sollten klären, welche Industrien unterstützt werden sollten und entsprechende Anreize setzen. Konkrete Maßnahmen sollten folgende Aspekte umfassen:

Verbesserter Zugang zu Fördermitteln über nationale Programme, z. B. in Form einer Resilienzprämie.

Investitionen in Innovation und Cybersicherheit, Bürokratieabbau, strategische Energie- und Fachkräftepolitik.

Steuerliche (Investitions-) Anreize für Schlüsselproduktionen.

Schnellere Genehmigungsprozesse, um den Aufwand für Unternehmen zu reduzieren (z. B. vorläufige Zulassungen).

Ausbau der Digitalisierung und Standardisierung von Verfahren mit Aufbau eines zentralen Online-Portals.

Langfristige Zielvorgaben innerhalb der Ressorts formulieren, um klare Perspektiven zu schaffen.

Strategien zur Begrenzung wettbewerbsverzerrender globaler Subventionen entwickeln, um Level-Playing-Field zu erreichen.

Es sollte ein koordiniertes Programm zur Stärkung der europäischen Zusammenarbeit etabliert werden. Dabei bietet sich an, die Analyse gesamter Risiken auf europäischer Ebene zu bündeln und effektive Abhilfemaßnahmen zu entwickeln, um die Widerstandsfähigkeit in der Region zu erhöhen und Synergien besser zu nutzen.

Die Industrie sollte sich gemeinsam für den Ausbau deutscher Raffinerien einsetzen. Hierfür sind strategische Investitionen in lokale Verarbeitungstechnologien notwendig, um die Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu gewährleisten.

Obwohl der Aufbau von Kapazitäten eine mittel- bis langfristige Maßnahme ist und mit Risiken wie hohen Investitionen und Preissensitivität verbunden sein kann, ist es entscheidend, diesen Prozess voranzutreiben, um technologische Komplexitäten zu meistern und die Handlungsfähigkeit der Unternehmen in Europa zu sichern.

Weitere Resilienzmaßnahmen

Es gibt eine Reihe von weiteren, oft bereits genutzten Möglichkeiten für Unternehmen Resilienzrisiken im operativen Geschäft zu berücksichtigen, um insbesondere kurzfristige Versorgungsunterbrechungen und Preisspitzen auszugleichen und vermeidbare Lieferengpässe zu minimieren. Zu diesen Möglichkeiten gehört ein intelligentes und flexibles Lagermanagement, welches erwartbaren Veränderungen von Angebot und Nachfrage Rechnung trägt und besonders kritische und von Versorgungsrisiken betroffene Rohstoffe und Vorprodukte vorhält wie z. B. Gallium. Essenziell für alle Unternehmen ist die Pflege der Beziehungen zu Lieferanten, was auch langfristige Lieferverträge und tiefergehende Partnerschaften beinhalten kann. Die Unterstützung und Ertüchtigung von v. a. Zulieferern aus vergleichsweise sicheren Bezugsländern kann die Resilienz von Lieferketten dauerhaft erhöhen. Beispielsweise kann der Bezug von hochqualitativem Titan aus Saudi-Arabien die Versorgungsbasis mit diesem kritischen Rohstoff auf ein breiteres Fundament stellen. Einkaufsgemeinschaften ermöglichen die Bündelung von Nachfrage und verbessern dadurch die Verhandlungsposition insbesondere von KMU gegenüber Zulieferern, was Preis- wie Versorgungssicherheit erhöht. Auch wenn diese Maßnahmen zuvorderst von Unternehmen umgesetzt werden, können Verbände und der Staat unterstützen z. B. durch Koordination oder das Formulieren von Anreizen beispielsweise durch die Gestaltung des steuerlichen Rahmens für Lagerbestände.

Viele der genannten Maßnahmen sind unmittelbar bis kurzfristig umsetzbar und versprechen bereits kurzfristig eine Stärkung der Resilienz. Der Aufbau von strategischen Beziehungen zu und möglicherweise Kooperationen mit Zulieferern ist ein eher langfristiges Projekt, der auch den Aufbau von Lagerkapazitäten beinhalten kann. Herausforderungen bestehen in den teils erheblichen Kosten, die z. B. eine umfangreichere Lagerhaltung verursacht, und dem großen personellen Aufwand, der mit vielen der genannten Maßnahmen einhergeht.

Auch auf staatlicher Ebene stehen weitere Möglichkeiten zur Steigerung der Resilienz zur Verfügung. Es sollte geprüft werden, inwieweit laufende Bemühungen auf dem Gebiet der strategischen Lagerhaltung auf EU-Ebene und dem Überwachen von Fremdeinflüssen bei Investitionen in der EU ausgebaut werden können. Dies sollte vor dem Hintergrund einer klaren strategischen Ausrichtung und einer vorgenommenen Priorisierung von Resilienzrisiken geschehen.

Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis Resilienz - Thematische Einführung

AlixPartners. Boranova, V., Huidrom, R., Ozturk, E., Stepanyan, A., Opalova, P., & Zhan, S. (2022). Cars in Europe: Supply chains and spillovers during COVID-19 times. IMF Working Paper, 9-13, 16, 25f. URL: <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WP/2022/English/wpiea2022006-print-pdf.ashx>.

Baur, A., & Flach, L. (2022). Deutsch-chinesische Handelsbeziehungen: Wie abhängig ist Deutschland vom Reich der Mitte? Ifo Schnelldienst, 75(04), 56-65. URL: <https://www.ifo.de/publikationen/2022/aufsatz-zeitschrift/deutsch-chinesische-handelsbeziehungen-wie-abhaengig-ist>.

BGR. (2024). DERA untersucht deutsche Metallimporte aus Russland. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Ak-tuelles/2023/2023-06-13_dera-untersucht-deutsche-metallimporte-aus-russland.html.

BMW Group. (2021): BMW Group Bericht 2021. S. 73; URL: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0374217DE/bmw-group-bericht-2021?language=de>.

BMW Group. (2023): BMW Group Bericht 2023. S. 70; URL: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0440520DE/bmw-group-bericht-2023?language=de>.

Bolte, M., & Weckmann, H. (2022). Halbleiterkrise in der Automobilindustrie – Wo stehen wir heute und wo geht die Reise hin? URL: <https://www.alixpartners.com/de/insights/halbleiterkrise-in-der-automobilindustrie-wo-stehen-wir-heute-und-wo-geht-die-reise-hin/>.

Brinley, S. (2023). The semiconductor shortage is – mostly – over for the auto industry. S&P Global Mobility Blog. URL: <https://www.spglobal.com/mobility/en/research-analysis/the-semiconductor-shortage-is-mostly-over-for-the-auto-industry.html>.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. (2022). Deutsche Strategie zur Stärkung der Resilienz gegenüber Katastrophen. URL: https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Nationale-Kontaktstelle-Sendai-Rahmenwerk/Resilienzstrategie/resilienz-strategie_node.html.

Deloitte. (2023): Supply Chain Pulse Check Herbst 2023. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/energy-re-sources/Deloitte-Supply-Chain-Pulse-Check-Herbst-2023-DE.pdf>.

DERA (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. DERA-Rohstoffinformationen, 50, Berlin. URL: https://www.deutsche-rohstoffagen-tur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

DERA. (2023). Rohstoffliste. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken. URL: https://www.deutsche-rohstoffagen-tur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-56.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

European Commission. (2021): Shaping and securing the EU's open strategic autonomy by 2040 and beyond. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e1bcf73-06e2-11ec-b5d3-01aa75ed71a1/language-en>.

European Commission. (2023). Net-Zero Industry Act. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/net-zero-industry-act_en.

European Commission. (2023). European Chips Act. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uris-er-v%3A0J.L_.2023.229.01.0001.01.ENG

European Parliament. (2023). Internal Market Emergency and Resilience Act (IMERA). URL: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/de/document/EPRS_BRI\(2023\)739338](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/de/document/EPRS_BRI(2023)739338).

European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. Publications Office of the European Union. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>.

Fromm, T. (2021). Der Chipmangel trifft die Autoindustrie mit voller Wucht. Süddeutsche Zeitung, 23. September 2021. Abgerufen am 3. Mai 2024; URL: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/chipmangel-autoindustrie-halbleiter-absatzrueckgang-1.5419456>.

Gauß et al. (2021). Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance. Berlin. URL: <https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2021/09/ERMA-Action-Plan-2021-A-European-Call-for-Action.pdf>.

Ifo Zentrum für Außenwirtschaft. (2021): Internationale Wertschöpfungsketten – Reformbedarf und Möglichkeiten. URL: <https://www.ifo.de/publikationen/2021/monographie-autorenschaft/internationale-wertschoepfungsketten-reformbedarf>.

Ifo Institut. (2023). Internationale Wertschöpfungsketten – Reformbedarf und Möglichkeiten. URL: <https://www.ifo.de/DocDL/ifoStudie-2021-KAS-Wertschoepfungsketten.pdf>.

Ifo Schnelldienst Digital. (2024): Lieferketten nach Corona: Welche Prioritäten setzen deutsche Unternehmen? URL: <https://www.ifo.de/publikationen/2024/aufsatz-zeitschrift/lieferketten-prioritaeten-deutscher-unternehmer>.

IFP. (2021). Aluminium in the energy transition: What lies ahead for this indispensable metal of the modern world? URL: <https://www.ifpen-ergiesnouvelles.com/article/aluminium-energy-transition-what-lies-ahead-indispensable-metal-modern-world>.

Kullik, Jakob (2020): Verlorenes Jahrzehnt der Rohstoffsicherheit. URL: <https://www.kas.de/de/web/auslandsinformationen/artikel/detail/-/content/ver-lorenes-jahrzehnt-der-rohstoffsicherheit-1>.

Kleinfeld, M. (2021). Der Chipmangel führt weltweit zu 3,9 Millionen weniger produzierten Fahrzeugen im Jahr 2022. AlixPartners, 14. Mai 2021. Abgerufen am 3. Mai 2024. URL: <https://www.alixpartners.com/newsroom/prognose-chipmangel-in-automobilproduktion-2021/>.

LKAB. (2024). Europe's largest deposit of rare earth metals located in Kiruna area. URL: <https://lkab.com/en/press/europes-largest-deposit-of-rare-earth-metals-is-located-in-the-kiruna-area/>.

OECD. (2023): Risks and opportunities of reshaping global value chains. (OECD Economics Department Working Papers No. 1762). OECD Publishing. URL: <https://doi.org/10.1787/f758afe8-en>.

OECD (2024): Keys to resilient supply chains. URL: <https://www.oecd.org/trade/resilient-supply-chains/>.

Statista (2024): Deutschlands Rohstoffimporte. URL: <https://de.statista.com/themen/10258/deutschlands-rohstoffimporte/#topicOverview>.

Statistisches Bundesamt (2023): Verwertete inländische Rohstoffentnahme, Ein- und Ausfuhr von Gütern (Inländerkonzept): Deutschland, Jahre, Materialgrad und Rohstoffarten. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Statistik-Online/_inhalt.html.

Statistisches Bundesamt (2024): Statistisches Bundesamt - Gesamtwirtschaftliches Materialkonto. URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=85131-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1715619164662#breadcrumb>.

Stiftung Klimaneutralität. (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045. URL: https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/09/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Kurzfassung-1.pdf.

The World Bank. (2024). Worldwide Governance Indicators. URL: <https://www.worldbank.org/en/publication/worldwide-governance-indicators>.

USGS. (2023). Mineral Commodity Summaries. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>.

vbw. (2023). Neue Beschaffungsmärkte für die bayerische Wirtschaft. URL: https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Freizugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Au%C3%9Fenwirtschaft/2023/Downloads/Neue-Beschaffungsm%C3%A4rkte-f%C3%BCr-die-bayerische-Wirtschaft_2023-10-18_final.pdf.

Volkswagen (2021) Jahresabschluss Volkswagen Aktiengesellschaft zum 31. Dezember 2021 S. 5, URL: <https://www.volkswagen-group.com/de/publikationen/unternehmensberichte/jahresabschluss-der-volkswagen-aktiengesellschaft-zum-31-12-2021-1945/download?disposition=attachment>.

Volkswagen (2022) Volkswagen Group Geschäftsbericht 2022 S. 28. URL: https://geschaeftsbericht2022.volkswagenag.com/_assets/downloads/entire-vw-gb22.pdf.

Literaturverzeichnis Batteriefertigung für die Elektromobilität

ADAC (2024): Feststoffbatterie: Ist das die Zukunft im Elektroauto? URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/feststoffbatterie/>.

Akoto, Philip (2024): Northvolt: Cancellation of order has no consequences in Heide. Energate Messenger. URL: <https://www.energate-messenger.com/news/245104/northvolt-cancellation-of-order-has-no-consequences-in-heide>.

Aksoy, Cevat Giray et. al. (2024): Lieferketten nach Corona: Welche Prioritäten setzen deutsche Unternehmen? Ifo Schnelldienst Digital 12.02.2024. URL: <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2024-digital-01-baur-et-al-lieferketten.pdf>.

Backovic, Lazar et. al. (2024): Autoindustrie sorgt sich um Batterieproduktion in Europa, Handelsblatt 27.06.2024. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektromobilitaet-autoindustrie-sorgt-sich-um-batterieproduktion-in-europa/100047595.html>.

Bähr, Cornelius et. al. (2023): Optionen der deutschen Wirtschaft für eine sichere Rohstoffversorgung, IW-Trends - Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung, ISSN 1864-810X, Institut der deutschen Wirtschaft (IW), Köln, Vol. 50, Iss. 3, S. 67-86. URL: <https://doi.org/10.2373/1864-810X.23-03-04>.

Bartmann, Matthias (2024): BASF starts change negotiations for Harjavalta precursor battery materials plant because of lengthy permitting process with unclear outcomes. Global Media 11.04.2024. URL: <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2024/04/p-24-158>.

BASF (2024): BASF-Bericht 2023. URL: https://bericht.basf.com/2023/de/_assets/downloads/entire-basf-gb23.pdf?h=Wv0MX-PE9.

Battery-News (2024): Batterieforschung: „Politisch verordnete Lade-Hemmung mit fatalen Folgen“. URL: <https://battery-news.de/2024/03/08/batterieforschung-politisch-verordnete-lade-hemmung/>.

Battery-News (2024): Festkörper und Natrium Ionen Zellen Lead im Interview. URL: <https://battery-news.de/2024/03/25/festkoerper-und-natrium-ionen-zellen-lead-im-interview/>.

Beck, Lee / Stoyanova, Sonia (2023): Lessons for Europe from the U.S. Inflation Reduction Act. Clean Air Task Force 09.08.2023. URL: <https://www.catf.us/2023/08/lessons-europe-from-us-inflation-reduction-act/>.

BenchmarkSource (2024): Northvolt halts European cathode plans to refocus on batteries. URL: <https://source.benchmarkminerals.com/article/northvolt-halts-european-cathode-plans-to-refocus-on-batteries>.

Bernhart, Wolfgang et al. (2024): Wege aus der Abhängigkeit. Wie Deutschland die Rohstoffe für eine zukunftsfähige Wirtschaft sichert. URL: <https://bdi.eu/publikation/news/wege-aus-der-abhaengigkeit-wie-deutschland-die-rohstoffe-fuer-eine-zukunftsaehige-wirtschaft-sichert>.

BDI (2023): EU Critical Raw Materials Act: Richtige Ziele, Umsetzung offen. URL: <https://bdi.eu/artikel/news/eu-critical-raw-materials-act-richtige-ziele-umsetzung-offen>.

BGR (2023): Deutschland – Rohstoffsituation 2022, URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2022.pdf;jsessionid=35D709A2F24A5818DC6F6DE9E930D7.internet011?__blob=publicationFile&v=7.

Birke, Kait Peter (2022): Produktion von Batteriezellen: Große Herausforderung und große Chance. URL: <https://transforming-economies.de/produktion-von-batteriezellen-grosse-herausforderung-und-grosse-chance/>

Bloomberg NEF (2022): The battle to break China's battery-making supremacy, in five charts. Bloomberg Professional Services. 01.12.2022. URL: <https://www.bloomberg.com/professional/insights/commodities/the-battle-to-break-chinas-battery-making-supremacy-in-five-charts/>

Bloomberg NEF (2024): Long-Term Electric Vehicle Outlook. URL: <https://about.bnef.com/blog/electric-vehicle-sales-headed-for-record-year-but-growth-slowdown-puts-climate-targets-at-risk-according-to-bloombergnef-report/>.

BMW (2020): BMW Group Einkauf intensiviert Aktivitäten im Bereich der Nachhaltigkeit und sichert zukünftiges Wachstum in der E-Mobilität ab. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0322172DE/bmw-group-einkauf-intensiviert-aktivitaeten-im-bereich-der-nachhaltigkeit-und-sichert-zukuenftiges-wachstum-in-der-e-mobilitaet-ab?language=de>.

BMW (2023a): BMW Group Bericht 2022. URL: <https://www.bmwgroup.com/de/bericht/2022/downloads/BMW-Group-Bericht-2022-de.pdf>.

BMW (2023b): Zellintelligenz. Neue Batterie-Rundzellen für BMW, URL: <https://www.bmwgroup.com/de/bericht/2023/bmw-group-bericht/zellintelligenz/index.html>.

BMW (2024): BMW Group Bericht 2023. URL: https://www.bmwgroup.com/content/dam/grpw/websites/bmwgroup_com/ir/downloads/de/2024/bericht/BMW-Group-Bericht-2023-de.pdf

BMW (o. D.): Due Diligence in the Supply Chain. URL: <https://www.bmwgroup.com/en/sustainability/supply-chain.html>.

BMW (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktepapier-nachhaltige-und-resiliente-rohstoffversorgung.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

BMW (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

BMW (2023a): Der Klima- und Transformationsfonds 2024: Entlastung schaffen, Zukunftsinvestitionen sichern, Transformation gestalten. Meldung Wirtschaftliche Entwicklung 21.12.2024. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Meldung/2023/20231221-haushalt-einigung-ktf-2024.html#:~:text=Die%20F%C3%B6rderung%20der%20Elektromobilit%C3%A4t%20durch,rund%201%2C92%20Milliarden%20Euro>.

BMW (2023b): Konsultation zur Modernisierung des Bundesberggesetzes. Stellungnahmen von NGOs, Verbänden und Einzelpersonen. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Stellungnahmen/Modernisierung-Bundesberggesetz/Stellungnahmen-Modernisierung-Bundesberggesetz.html>.

BMW (2024): Exportkreditgarantien Jahresbericht 2023 inkl. Garantien für Ungebundene Finanzkredite. URL: https://www.exportkreditgarantien.de/_Resources/Persistent/9/2/3/b/923bdfbef6fc9acb660597c88fd53ed460451f9d/jb-2023.pdf.

BMW (o. D.): Automobilindustrie. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html#:~:text=Die%20Zahl%20der%20direkt%20Besch%C3%A4ftigten,2023%20rund%20564%20Milliarden%20Euro>.

Bockey, Gerrit (2024): Interview mit Prof. Heiner Heimes. Battery-News.com. URL: <https://battery-news.de/en/2024/07/12/interview-heimes-battery-atlas-2/>.

Bockey, Gerrit / Heimes, Heiner (2024): Battery Cell Production as of December 2024. Battery-News. URL: <https://battery-news.de/batterieproduktion/>.

Bradley, Chris et al. (2024): The next big arenas of competition. McKinsey Global Institute. URL: https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/mckinsey%20global%20institute/our%20research/the%20next%20big%20arenas%20of%20competition/the-next-big-arenas-of-competition_final.pdf.

Die Bundesregierung (2023): Chinastrategie der Bundesregierung. URL: <https://www.auswaertiges-amt.de/blob/2608578/810fdade376b1467f20bdb697b2acd58/china-strategie-data.pdf>.

Bünting, Aiko et. al. (2023): Resiliente Lieferketten in der Batterieindustrie. Publikation der wissenschaftlichen Begleitung zur Fördermaßnahme Batteriezellfertigung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. VDI/VDE Innovation + Technik GmbH. URL: https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/2023-03-BZF_Studie_Lieferketten_DE_0.pdf.

Campbell, Loyle / Shao, Oscar (2024): Automotive Geopolitics. How Germany Can Respond to China. German Council of Foreign Relations Policy Brief No. 17. Sep. 2024. URL: https://dgap.org/system/files/article_pdfs/DGAP%20Policy%20Brief_No-17_September-2024_12pp_0.pdf.

Carrara, S. et. al. (2023): Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. JRC Science For Policy Report. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC132889/JRC132889_01.pdf.

Dahlmann, Don (2024): VW, BMW, Mercedes: Die deutsche Autoindustrie steckt in der China-Falle. Gründerszene 06.04.2024. URL: <https://www.businessinsider.de/gruenderszene/automotive-mobility/vw-bmw-mercedes-die-deutsche-autoindustrie-steckt-in-der-china-falle/>.

Degen, f. et. al. (2023): Energy consumption of current and future production of lithium-ion and post lithium-ion battery cells. In: Nature Energy 8, 2023, S. 1284-1295. URL: <https://www.nature.com/articles/s41560-023-01355-z.pdf>.

DERA (2021): Batterierohstoffe für die Elektromobilität. – DERA Themenheft. URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf;jsessionid=6EDC8F8ECEEE225C49BED00456A3510C6.internet991?__blob=publicationFile&v=6.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / IMU Institut (2022): Zukunftsfähige Lieferketten und neue Wertschöpfungsstrukturen in der Automobilindustrie. URL: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Studie_Zukunftsfaeilige_Lieferketten_und_neue_Wertschoepfungsstrukturen_in_der_Automobilindustrie.pdf.

DIHK (2024): Kritische Rohstoffe: EU-Verordnung mit Licht und Schatten. URL: <https://www.dihk.de/de/aktuelles-und-presse/aktuelle-informationen/kritische-rohstoffe-eu-verordnung-mit-licht-und-schatten-117298>.

Drought, Adam (2023): Talga to shore up European graphite supply. Mining.com.au 09.10.2023. URL: <https://mining.com.au/talga-to-shore-up-european-graphite-supply/>.

Economist (2024a): Chinese companies are winning the global south Economist. URL: <https://www.economist.com/leaders/2024/08/01/chinese-companies-are-winning-the-global-south>.

Economist (2024b): Chinese firms are growing rapidly in the global south. URL: <https://www.economist.com/briefing/2024/08/01/chinese-firms-are-growing-rapidly-in-the-global-south>. Economist (2024c): China is tightening its grip on the world's minerals. URL: <https://www.economist.com/business/2024/10/31/china-is-tightening-its-grip-on-the-worlds-minerals>.

Economist (2024c): New battery designs could lead to gains in power and capacity. URL: <https://www.economist.com/science-and-technology/2024/09/19/new-battery-designs-could-lead-to-gains-in-power-and-capacity>.

Europäische Kommission (2019a): Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank. on the Implementation of the Strategic Action Plan on Batteries: Building a Strategic Battery Value Chain in Europe. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0176>.

Europäische Kommission (2019b): State aid: Commission approves €3.2 billion public support by seven Member States for a pan-European research and innovation project in all segments of the battery value chain. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/bg/ip_19_6705.

Europäische Kommission (2021): Shaping and securing the EU's open strategic autonomy by 2040 and beyond. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e1bcf73-06e2-11ec-b5d3-01aa75ed71a1/language-en>

Europäische Kommission (2023a): Kritische Rohstoffe: Sichere und nachhaltige Lieferketten für die grüne und die digitale Zukunft der EU gewährleisten. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_23_1661.

Europäische Kommission (2023b): The Green Deal Industrial Plan: putting Europe's net-zero industry in the lead. Press Release 01.02.2023. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_510.

Europäische Kommission (2024a): Batterien für Elektrofahrzeuge – Methode zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks. URL: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13877-Batterien-fur-Elektrofahrzeuge-Methode-zur-Ermittlung-des-CO2-Fu%C3%9Fabdrucks_de.

Europäische Kommission (2024b): Critical Raw Materials Act. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en.

Europäische Kommission (2024c): EU and Serbia sign strategic partnership on sustainable raw materials, battery value chains and electric vehicles. Press Release 19.07.2024. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_3922.

Europäische Kommission (2024d): Raw materials diplomacy. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/raw-materials-diplomacy_en.

Europäische Kommission (2024e): EU-Kommission genehmigt deutsche Beihilfe für den Bau eines Werks für Elektrofahrzeug-batterien in Schleswig-Holstein. Pressemitteilung 08.01.2024. URL: https://germany.representation.ec.europa.eu/news/eu-kommission-genehmigt-deutsche-beihilfe-fur-den-bau-eines-werks-fur-elektrofahrzeugbatterien-2024-01-08_de#:~:text=Lesedauer%3A%203%20Min-,EU%2DKommission%20genehmigt%20deutsche%20Beihilfe%20f%C3%BCr%20den%20Bau%20eines%20Werks,eines%20Werks%20f%C3%BCr%20Elektrofahrzeugbatterien%20genehmigt

Europäische Kommission (2024f): Fragen und Antworten zur Verordnung zu kritischen Rohstoffen. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda_24_2749.

Europäische Kommission (2024g): Temporary Crisis and Transition Framework. URL: https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/temporary-crisis-and-transition-framework_en.

Europäische Kommission (2024h): European Battery Alliance. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-battery-alliance_en.

Europäischer Rat (2024): Ein EU-Gesetz zu kritischen Rohstoffen für die Zukunft der EU-Lieferketten. URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/critical-raw-materials/>.

European Chemicals Agency (2024): Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). URL: <https://echa.europa.eu/hot-topics/per-fluoroalkyl-chemicals-pfas>.

Ey (2023): Begleitforschung des Expertenkreises Transformation der Automobilwirtschaft zum Thema Resilienz der automobilen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke. Analyse kritischer Rohstoffe in der deutschen Automobilindustrie und mögliche Handlungsoptionen. Endbericht. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/begleitforschung-des-expertenkreises-transformation-der-automobilwirtschaft-zum-thema-resilienz-der-automobilen-wertschoepfungs-und-liefernetzwerke.html>.

Faure-Schuyer, Aurélie (2018): The European Battery Alliance. cepts, 27.04.2018. URL: <https://www.ceps.eu/ceps-publications/european-battery-alliance-ambitions-and-requirements/>.

Fieten, Robert (2024): Die Rohstoffversorgung der EU im Klammergriff von China. in: Beschaffung aktuell. URL: <https://beschaffung-aktuell.industrie.de/kommentar/die-rohstoffversorgung-der-eu-im-klammergriff-von-china/>.

Finzel, Hugh (2018): BASF to build battery materials plant in Finland. URL: <https://www.bestmag.co.uk/basf-build-battery-materials-plant-finland/>.

Flach, Lisandra et. al. (2021): Internationale Wertschöpfungsketten: Reformbedarf und Möglichkeiten, ifo Forschungsberichte, No. 133, ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/272944/1/1851106472.pdf>.

Fleischmann, Jakob et. al. (2024): The battery cell component opportunity in Europe and North America. McKinsey 18.04.2024. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-battery-cell-component-opportunity-in-europe-and-north-america>.

Fluchs, Sarah (2021): Batterierecycling: Potentiale zur Reduzierung der Rohstoffabhängigkeit, IW-Kurzbericht Nr. 35. URL: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2021/IW-Kurzbericht_2021-Batterierecycling.pdf.

Fortune Business Insights (2023): Marktgröße, Anteil und Branchenanalyse für Batterien für Elektrofahrzeuge (EV), nach Batterietyp (Lithium-Ionen, Bleisäure, Nickel-Metallhydrid und andere), nach Fahrzeugtyp (Batterie-Elektrofahrzeuge, Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeuge und Hybrid). Elektrofahrzeuge) und regionale Prognosen, 2024-2032. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/de/industrie-berichte/markt-f-r-elektrofahrzeugbatterien-101700>.

Fraunhofer IFAM Magazin: Festkörperbatterien für die Elektromobilität. URL: <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/magazin/festkoerperbatterien-fuer-die-elektromobilitaet.html>.

Fraunhofer FFB (2024): Statement zur Neuplanung des Klimatransformationsfonds. URL: https://www.ffb.fraunhofer.de/de/news/Nachrichten/statement_zu_ktf-neuplanung.html.

Fraunhofer ISI (2024): Welche Ansätze in Forschung und Innovation der EU bei der nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen helfen können. Presseinformation 22.07.2024. URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2024/presseinfo-21-eu-kritische-rohstoffe-forschung-entwicklung-innovation-nachhaltige-versorgung.html>.

Fritz, Alexander (2024): Die Elektromobilität weltweit auf dem Vormarsch. VDA. URL: <https://www.vda.de/de/themen/elektromobilitaet/marktentwicklung-europa-international>.

Fujioka, Ko (2023): Japan to subsidize half of costs for lithium and key mineral projects. Nikkei Asia 23.04.2023. URL: <https://asia.nikkei.com/Economy/Japan-to-subsidize-half-of-costs-for-lithium-and-key-mineral-projects>.

Güßgen, Florian (2024): Darum beantragt Europas Batteriehoffnung Northvolt Insolvenz. Wirtschaftswoche 22.11.2024. URL: <https://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/batteriezellenhersteller-darum-beantragt-europas-batteriehoffnung-northvolt-insolvenz/30099680.html>.

Handelsblatt (2024): Streitgespräch: Muss das Verbrenner-Aus wieder gekippt werden? In: Handelsblatt 16.07.2024. URL: <https://www.handelsblatt.com/audio/green-podcast/streitgesprach-muss-das-verbrenner-aus-wieder-gekippt-werden/29898198.html>.

Hanley, Steve (2024): Electric Cars Powered By Sodium Ion Batteries Go On Sale In China. URL: <https://cleantechnica.com/2023/12/29/electric-cars-powered-by-sodium-ion-batteries-go-on-sale-in-china/>.

Hebestreit, Corina (2022): Innovation in Europe's graphite supply for the battery value chain. Innovation News Network 23.02.2022. URL: <https://www.innovationnewsnetwork.com/innovation-europes-graphite-supply-battery-value-chain/18755/#:~:text=Europe%20currently%20has%20two%20small,are%20not%20suitable%20for%20batteries.>

Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (2024): Heimische Lithiumquellen sind enorm relevant. Interview mit Valentin Goldberg. Helmholtz.de 12.02.2024. URL: „Heimische Lithiumquellen sind enorm relevant“ - Helmholtz Home

Hodgson, Robert (2024): Von der Leyen mollifies MEPs over PFAS ban concerns. euronews 13.05.2024. URL: <https://www.euronews.com/green/2024/05/13/von-der-leyen-mollifies-meps-over-pfas-ban-concerns>.

Home, Andy (2022): U.S. forms 'friendly' coalition to secure critical minerals. Reuters 01.06.2022. URL: <https://www.reuters.com/article/critical-minerals-ahome-idUSKBN2OB1J7/>.

Hopf, Engelbert (2023): Natrium-Ionen-Batterie vor dem Durchbruch? URL: <https://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/natrium-ionen-batterie-vor-dem-durchbruch.204322.html>.

IEA (2021): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>.

IEA (2023): Global EV Outlook 2023. Trends in Batteries. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries>.

IEA (2024): EU Strategic Action Plan on Batteries. URL: <https://www.iea.org/policies/24821-eu-strategic-action-plan-on-batteries>.

Impey, Ben (2024): Elektromobilität in Deutschland. Statista 16.08.2024. URL: <https://de.statista.com/themen/608/elektromobilitaet/#topicOverview>.

InnoEnergy (o. D.): Building a European battery industry. URL: <https://www.eba250.com/>.

IW Consult GmbH /Fraunhofer ISI (2023): Kritisch für die Wertschöpfung – Rohstoffabhängigkeit der deutschen Wirtschaft. URL: https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/Studie-Rohstoffabhaengigkeit_IWC_ISI.pdf.

Japanese Agency for Natural Resources and Energy (METI) (2020): Japan's new international resource strategy to secure rare metals. URL: https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_158.html.

Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC) (o. D.): JOGMEC Webseite. URL: <https://www.jogmec.go.jp/english/>.

Jülich Forschungszentrum (2024): Neue Chance für alten Bekannten: der Natrium-Schwefel-Akku. URL: <https://www.fz-juelich.de/de/aktuelles/effzett/2024/neue-chance-fuer-alten-bekannten-der-natrium-schwefel-akku>.

- Karu, Einar (2024): Nachhaltige EV-Batterien dank synthetischem Graphit. elektroniknet.de 12.02.2024. URL: <https://www.elektroniknet.de/automotive/elektromobilitaet/nachhaltige-ev-batterien-dank-synthetischem-graphit.213979.html>.
- Kretschmer, Christian (2024): Baustopp für die Batteriefabrik der Superlative. Tagesschau 22.06.2024. URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/batteriefabrik-kaiserslautern-100.html>.
- Landais, Camille et al. (2023): The Inflation Reduction Act: How should the EU react? Joint Statement French Council of Economic Analysis, Franco-German Council of Economic Experts, German Council of Economic Experts. URL: https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/Publikationen/FGCEE/CAE-SVG_Joint_statement_IRA_2309.pdf.
- Large, Martin (2024): So steht es um die Batterieindustrie in Deutschland und Europa. all-electronics 02.07.2024. URL: <https://www.all-electronics.de/e-mobility/batterie-sicherheit/so-steht-es-um-die-batterieindustrie-in-deutschland-und-europa-633.html>.
- Latham. London (2024): Landmark Minerals Security Partnership Finance Network Established for Critical Minerals Projects. URL: <https://www.latham.london/2024/11/landmark-minerals-security-partnership-finance-network-established-for-critical-minerals-projects/>.
- Lewis, Michelle (2024): China's first large-scale sodium-ion battery charges to 90% in 12 minutes. electrek 17.05.2024. URL: <https://electrek.co/2024/05/17/china-first-large-scale-sodium-ion-battery/>.
- Lienert, Paul / Carey, Nick (2023): Synthetic graphite for EV batteries: Can the West crack Chi-na's code? Reuters 12.09.2023. URL: <https://www.marketscreener.com/quote/stock/NOVONIX-LIMITED-105515576/news/Synthetic-graphite-for-EV-batteries-Can-the-West-crack-China-s-code-44821699/>.
- Lustenhouwer, Colin (2019): Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank on the Implementation of the Strategic Action Plan on Batteries: Building a Strategic Battery Value Chain in Europe. European Economic and Social Committee. URL: <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/strategic-action-plan-batteries-report>.
- McCaffrey, Connor / Poitiers, Niclas (2024): Making industrial policy work: a case study on the European Battery Alliance Academy. bruegel, 16.01.2024. URL: <https://www.bruegel.org/working-paper/making-industrial-policy-work-case-study-european-battery-alliance-academy>.
- Mendelson, Ben / Tyborski, Roman (2024): Das China-Fiasko von VW, BMW und Mercedes erklärt in fünf Grafiken. Handelsblatt 26.04.2024. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/auto-china-das-china-fiasko-von-vw-bmw-und-mercedes-erklaert-in-fuenf-grafiken/100034501.html>.
- Miningscout (2022). Graphit: Europa kann seinen Bedarf auch langfristig nicht decken. URL: Graphit: Europa kann seinen Bedarf auch langfristig nicht decken - Miningscout
- Miningscout (2024): Graphit:Nachfrage in den USA steigt bis 2034 um 600 %. Investing.com 07.10.2024. URL: Goldpreis auf der Kippe: Was Anleger jetzt wissen müssen | Investing.com
- Mining Technology (2024): Vittangi Anode Project, Sweden. URL: <https://www.mining-technology.com/projects/vittangi-anode-project-sweden/?cf-view>.
- Murray, Cameron (2024): World's largest sodium-ion BESS comes online in China as it seeks to diversify away from lithium. Energy Storage News 04.07.2024. URL: <https://www.energy-storage.news/first-half-world-largest-200mwh-sodium-ion-project-comes-online-chi-na/#:~:text=news%20has%20been%20told%20anecdotaly,of%20the%20lithium%20supply%20chain>.

Noyan, Oliver (2023): Lokaler Widerstand als Hindernis für EU-Pläne für kritische Rohstoffe. In: Euractiv. URL: <https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/lokaler-widerstand-als-hindernis-fuer-eu-plaene-fuer-kritische-rohstoffe/>.

NRTCAutomation (o. D.): Step-by-Step Process of Manufacturing a Car. URL: <https://www.nrtcautomation.com/blog/step-by-step-process-of-manufacturing-a-car#:~:text=From%20design%20to%20launch%2C%20it,interest%20within%20a%20large%20market.>

ntv (2021): "Wer in China verkaufen will, muss in China bauen". URL: <https://www.n-tv.de/wirtschaft/Wer-in-China-verkaufen-will-muss-in-China-bauen-article22422587.html>.

O. V. (2023): Batterieverordnung des europäischen Parlaments und des Rates. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>.

O. V. (2024): Die neue EU-Batterieverordnung 2023 (BATT2). Das Batteriegesetz. URL: <https://www.batteriegesetz.de/themen/die-neue-batterieverordnung-batt2-2023/#artikel-batt2-aenderung14>.

OECD. (2023): Risks and opportunities of reshaping global value chains. (OECD Economics Department Working Papers No. 1762). OECD Publishing. URL: <https://doi.org/10.1787/f758afe8-en>.

Olk, Julian / Hildebrand, Jan (2024): Habecks Rohstoff-Fonds droht doch noch zu scheitern. Handelsblatt 03.07.2024. URL: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/neuer-ampelstreit-habecks-rohstoff-fonds-droht-doch-noch-zu-scheitern/100050001.html>.

Peter, Jens F. et. al. (2019): Exploring the Economic Potential of Sodium-Ion Batteries. URL: <https://www.mdpi.com/2313-0105/5/1/10>.

Plumeyer, Jan Felix et al. (2024): Battery active materials (extract) as of January 2024. Battery-News. URL: <https://battery-news.de/aktivmaterialieneu/>.

Porsche Consulting (2024): Battery Manufacturing 2030: Collaborating at Warp Speed. What it takes for equipment manufacturers to ride the coming wave of breakneck growth. URL: https://www.porsche-consulting.com/sites/default/files/2024-02/battery_manufacturing_2030_porsche_consulting_2024.pdf.

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

Ruttloff, Marc / Burchert, Tobias (2023): PFAS restriction proposal on the EU level. GleissLutz 21.03.2024. URL: <https://www.gleisslutz.com/en/news-events/know-how/pfas-restriction-proposal-eu-level>.

Saxena, Vishakha (2024): After Chips, China to Pour Millions Into Solid-State Batteries. AsiaFinancial 20.05.2024. URL: <https://www.asiafinancial.com/after-chips-china-to-pour-millions-into-solid-state-batteries>.

Schaal, Sebastian (2022): Uwe Keller über die globale Batterieproduktion von Mercedes-Benz. electrive.net 07.10.2022. URL: <https://www.electrive.net/2022/10/07/uwe-keller-ueber-die-globale-batterieproduktion-von-mercedes-benz/>.

Schaal, Sebastian (2024): Northvolt verliert wohl Milliarden-Auftrag von BMW. electrive.net 20.06.2024. URL: <https://www.electrive.net/2024/06/20/northvolt-verliert-wohl-milliarden-auftrag-von-bmw/>.

Scheinert, Christian (2023): EU's response to the US Inflation Reduction Act (IRA). Briefing Requested by the ECON Committee. European Parliament. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2023/740087/IPOL_IDA\(2023\)740087_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2023/740087/IPOL_IDA(2023)740087_EN.pdf).

Schmid, Marc (2020): Unternehmerische Rohstoffstrategien. Zum Umgang mit kritischen Versorgungssituationen. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Scholle, K. (2024): Lithium-Ionen-Batterien: Prognostizierte, globale Nachfrage nach Segment von 2019 bis 2030. Statista 05.07.2024. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1324056/umfrage/nachfrage-nach-lithium-ion-batterien/>.

Schüler-Zhou, Yun et. al. (2020): DERA Rohstoffinformationen 41. Einblicke in die chinesische Rohstoffwirtschaft. URL: https://www.deutsche-rohstoffagen-tur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-41.pdf;jsessionid=3F1A707865A0B5C8F0B56EDD6F5E4188.internet952?__blob=publicationFile&v=2.

Seth, Nayan (2024): How to Diversify Mineral Supply Chains – A Japanese Agency has Lessons for All. NewSecurityBeat 15.08.2024. URL: <https://www.newsecuritybeat.org/2024/08/how-to-diversify-mineral-supply-chains-a-japanese-agency-has-lessons-for-all/>.

Siebel, Thomas (2021) Bedarf an Anoden für Li-Ionen-Batterien wälzt Graphitmarkt um. URL: Bedarf an Anoden für Li-Ionen-Batterien wälzt Graphitmarkt um | springerprofessional.de

Soldan, Natalia / Heimes, Heiner (2024): LIB recycling projects EU: September 2024. Battery-News. URL: <https://battery-news.de/batterierecycling/>.

SPD / Bündnis 90 – Die Grünen / FDP: Mehr Fortschritt wagen. Koalitionsvertrag 2021-2025. URL: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf.

Statistisches Bundesamt (2024): 58 % mehr E-Autos im Jahr 2023 exportiert als im Vorjahr. Pressemitteilung 06.05.2024. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/05/PD24_N020_46_51.html.

Stokes, Bruce (2024): EU-US relations after the Inflation Reduction Act, and the challenges ahead. European Parliamentary Research Service. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2024/759588/EPRS_STU\(2024\)759588_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2024/759588/EPRS_STU(2024)759588_EN.pdf).

Tartler, Jens (2024): Zellfabrik FFB in Münster bekommt 140 Millionen Euro mehr. In: Tages-spiegel Background 30.04.2024. URL: <https://background.tagesspiegel.de/verkehr-und-smart-mobility/briefing/zellfabrik-ffb-in-muenster-bekommt-140-millionen-euro-mehr#:~:text=Batterieforschung%20Zellfabrik%20FFB%20in%20M%C3%BCnster,kommen%20500%20Millionen%20vom%20Bund.>

The University of Sydney (2024): Chinese investment in Australia falls to second lowest level since 2006. URL: <https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2024/04/08/chinese-investment-in-australia-falls-to-second-lowest-level-sin.html>.

Thielmann, Axel et al. (2024): Wird der Aufbau eines europäischen und deutschen Batterie-Ökosystems am Fachkräftemangel scheitern? Fraunhofer ISI. URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2024/batterieforschung-kuerzung-foerderung-folgen-aufbau-oekosystem-europa-deutschland-fachkraefte-mangel.html>.

Think Tank Industrielle Ressourcenstrategien (2024): Resiliente Rohstoffversorgung Deutschlands – Bergbaupotentiale in Ausgewählten Ländern Afrikas und die Rolle Chinas. URL: https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2024/02/RZ_THINK-TANK_Afrika_A4_DE_01I24.pdf.

Transport & Environment (2023): Autohersteller im EU-Markt haben nicht einmal ein Fünftel der wichtigsten Batteriemetalle gesichert. Pressemitteilung 04.12.2023. URL: <https://www.transportenvironment.org/te-deutschland/articles/autohersteller-im-eu-markt-haben-nicht-einmal-ein-funftel-der-wichtigsten-batteriemetalle-gesichert>.

Transport&Environment (2024): An industrial blueprint for batteries in Europe. URL: <https://www.transportenvironment.org/articles/an-industrial-blueprint-for-batteries-in-europe>.

TrendForce (2024): [Insights] China's Position in EV Battery Market to be Shaken as the Mass Production Race of All-Solid-State Battery Industry Speeds up? URL: <https://www.trendforce.com/news/2024/04/17/insights-chinas-position-in-ev-battery-market-to-be-shaken-as-the-mass-production-race-of-all-solid-state-battery-industry-speeds-up/>.

Umicore (2021): Umicore unterzeichnet langfristige nachhaltige Lithiumverträge mit Ganfeng und Vulcan. URL: <https://www.umicore.de/de/presse/news/umicore-unterzeichnet-langfristige-nachhaltige-lithiumvertrage-mit-ganfeng-und-vulcan/>.

Umicore (2022): Umicore und PowerCo gründen Joint Venture für die Produktion von Batterie-materialien in Europa. Pressemitteilung 26.09.2022. URL: <https://www.umicore.de/de/presse/news/umicore-und-powerco-grunden-joint-venture-fur-die-produktion-von-batteriematerialien-in-europa/>.

Umicore (2023): Umicore und PowerCo präsentieren IONWAY. Pressemitteilung 06.10.2023. URL: <https://www.umicore.de/de/presse/news/umicore-und-powerco-prasentieren-ionway/>.

UNCTAD (2023): Clean energy minerals: Developing countries must add value to capitalize on demand. URL: <https://unctad.org/news/clean-energy-minerals-developing-countries-must-add-value-capitalize-demand>.

UNSW / CLMR (2024): Chinese Investment in Australia and the World: More than State-Owned Companies and Mines. URL: <https://clmr.unsw.edu.au/article//chinese-investment-in-australia-and-the-world%3A-more-than-state-owned-companies-and-mines>.

U.S. Department of State (o. D.): Minerals Security Partnership. URL: <https://www.state.gov/minerals-security-partnership/#:~:text=The%20MSP%20aims%20to%20ensure,countries%20developing%20their%20minerals%20sectors>.

Vattenfall (2024): Neue Batterietechnologien: Gehört der Feststoffbatterie die Zukunft? URL: <https://www.vattenfall.de/infowelt-energie/e-mobility/emobility-feststoffbatterie#akku>.

VDA (2024a): Automobilindustrie in Deutschland mit Umsatzplus. URL: <https://www.vda.de/de/themen/automobilindustrie/marktentwicklungen/umsatzdaten>.

VDA (2024b): Feedback from: Verband der Automobilindustrie e. V. for: Batteries for electric vehicles – carbon footprint methodology. URL: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13877-Batteries-for-electric-vehicles-carbon-footprint-methodology/F3467152_en.

VDMA (2023): Roadmap. Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2023. Online unter: https://vdma.org/documents/34570/35405938/VDMA+Batterieproduktion_Roadmap_2023.pdf/ee2452cd-ed44-93bf-4762-6a09ce29b4b7.

Verdict Data Journalism Team (2022): Batteries vacancies in the tech industry were the hardest tech roles to fill in Q2 2022. URL: <https://www.verdict.co.uk/batteries-vacancies-in-the-tech-industry-were-the-hardest-tech-roles-to-fill-in-q2-2022/>.

Verivox (2024): Verbraucher-Atlas: Weltweite Strompreise. URL: <https://www.verivox.de/strom/verbraucheratlas/strompreise-weltweit/>.

Vivoda, Vlado (2023): Friend-shoring and critical minerals: Exploring the role of the Minerals Security Partnership. in: Energy Research & Social Science, Volume 100, June 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629623001457>.

Volkswagen AG (2021): Volkswagen investiert weitere 500 Millionen Euro in nachhaltige Batterieaktivitäten mit Northvolt AB. Medieninformation. URL: <https://www.volkswagen-group.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-investiert-weitere-500-millionen-euro-in-nachhaltige-batterieaktivitaeten-mit-northvolt-ab-16763/download?disposition=attachment#:~:text=Wolfsburg%2C%209.,von%20rund%2020%20Prozent%20konstant>.

Volkswagen AG (o. J.): Effiziente Herstellung von Komponenten. URL: <https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/nachhaltigkeit/effiziente-transportkette.html>.

Volkswagen Group (2024): Geschäftsbericht 2023. URL: https://uploads.vw-mms.de/system/production/documents/cws/002/671/file_de/0638247dc949c755ddfa5ceba53df467a704db17/Y_2023_d.pdf?1711034295&disposition=attachment.

Wolf, Edda (2024a): Europäische Union beschließt Verordnung zu kritischen Rohstoffen. Germany Trade & Invest 03.05.2024. URL: <https://www.gtai.de/de/trade/eu/specials/europaeische-union-beschliesst-verordnung-zu-kritischen-rohstoffen-1743904>.

Wolf, Edda (2024b): EBRD investiert in Graphitprojekt Sarytogan in Kasachstan. Germany Trade Invest 23.08.2024. URL: [EBRD investiert in Graphitprojekt Sarytogan in Kasachstan | Special | Kasachstan | Rohstoffsicherung \(gtai.de\)](https://www.gtai.de/de/trade/eu/specials/europaeische-union-beschliesst-verordnung-zu-kritischen-rohstoffen-1743904)

Zhang, Marina Yue (2024): Rare earths vs rarer resources: Global ripples from Australia's divestment decision. theinterpreter 11.06.2024. URL: <https://www.lowyinstitute.org/the-interpreter/rare-earths-vs-rarer-resources-global-ripples-australia-s-divestment-decision>.

ZVEI (2023a): Factsheet "PFAS in Batteries". URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Themen/Nachhaltigkeit_Umwelt/PFAS/12-ZVEI-PFAS-Factsheet-Batteries.pdf.

ZVEI (2023b): Steigender Import von Batterien: Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien dominieren, URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2023/Mai/Faktenblatt_Import/Faktenblatt_Import_End.pdf.

ZVEI (2024): Faktenblatt Batterien-Import 2023, URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2024/Juni/Faktenblaetter_Batteriemarkt_2024/Import-Batterien-Faktenblatt-2024.pdf.

Literaturverzeichnis Wertschöpfungsketten der Halbleiterfertigung

Alsop, Thomas (2025): Semiconductor market sales worldwide 2015-2025, by region. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/249509/forecast-of-semiconductor-revenue-in-the-americas-since-2006/#:~:text=In%202023%2C%20the%20Asia%20Pacific,reached%2055.76%20billion%20U.S.%20dollars.>

AnySilicon (o. D.): TSMC tech only 3 years ahead of China's progress. URL: <https://anysilicon.com/tsmc-tech-only-3-years-ahead-of-chinas-progress/>.

ASML (2024): 2023 Annual Report based on US GAAP. URL: <https://edge.sitecorecloud.io/asmlnetherlaaea-asmlcom-prd-5369/media/project/asmlcom/asmlcom/asml/files/investors/financial-results/a-results/2023/2023-annual-report-based-on-us-gaap-m7rf6.pdf>.

Bao, Y. (2024): Embracing the era of open source chips. SIGARCH. URL: <https://www.sigarch.org/embracing-the-era-of-open-source-chips/>.

BASF (2018): BASF inaugurates electronic-grade sulfuric acid plant in China. URL: <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2018/05/p-IR-180530>.

BASF (2024): Jahresbericht 2023. URL: <https://bericht.basf.com/2023/de/services/downloads.html>.

Baskaran, G. & Schwartz, M. (2024): From Mine to Microchips: Addressing Critical Mineral Supply Chain Risks in Semiconductor Production. Center for Strategic and International Studies. URL: <https://www.csis.org/analysis/mine-microchip>.

Batra, Gaurav et al. (2018): Right product, right time, right location: Quantifying the semiconductor supply chain. McKinsey & Company. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Semiconductors/Our%20Insights/Right%20product%20right%20time%20right%20location%20Quantifying%20the%20semiconductor%20supply%20chain/Right-product-right-time-right-location.pdf>.

BBNC (2023a): Semiconductors Overview. Bens National Office. URL: <https://bbnc.bens.org/semiconductors---page-1-overview>.

BBNC (2023b): Semiconductors Supply Chain Phases. Bens National Office. URL: <https://bbnc.bens.org/semiconductors---page-2-supply-chain-phases>.

Berg, R.; Ziemer, H. & Polo Anaya, E. (2024): Mineral Demands for Resilient Semiconductor Supply Chains. Center for Strategic and International Studies. URL: <https://www.csis.org/analysis/mineral-demands-resilient-semiconductor-supply-chains>.

Blume, J. (2024): Deutschlands einziges Silizium-Werk fährt Produktion wieder hoch. Handelsblatt. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/rohstoffe-deutschlands-einziges-Silizium-werk-faehrt-produktion-wieder-hoch/100028600.html>.

BMBF (2024): Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung der Mikroelektronik-Forschung von Verbundpartnern im Rahmen des Gemeinsamen Unternehmens Chips. Bundesanzeiger. URL: <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/2024/03/2024-03-19-Bekanntmachung-Chips.html?view=renderNewsletterHtml>.

BMWK (2023): IPCEI im Bereich Mikroelektronik und European Chips Act. Europäische Maßnahmen zur Stärkung des Mikroelektronik-Standorts Deutschland und Europa. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/staerkung-mikroelektronik-standort-deutschland-europa-erlaeuterungspapier.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

- BMWK (2024a): Der Herzschlag der digitalen Welt: Warum die Halbleiterindustrie ein entscheidender Wirtschaftsfaktor für Deutschland und Europa ist. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2024/10/05-halbleiterindustrie.html>.
- BMWK (2024b): Rohstofffonds der Bundesregierung startet. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/10/20241002-rohstofffonds-der-bundesregierung-startet.html>.
- BMWK (o. D.): Häufig gestellte Fragen zum "Important Project of Common European Interest (IPCEI)". URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/IPCEI/faq-ipcei.html>.
- Böcher, Catrin et al. (2024): Integrating material flow analysis and supply chain resilience analysis to study silicon carbide. *Journal of Industrial Ecology* 28, 6. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13541>.
- Borden, M. (2023): Why advanced packaging is vital to the future of semiconductors. *Microcontroller Tips*. URL: <https://www.microcontrollertips.com/why-advanced-packaging-is-vital-to-the-future-of-semiconductors/>.
- Bosch (2024): Silicon carbide chips: Teaming up to produce a key technology of the future. URL: <https://www.bosch.com/stories/semiconductor-manufacturing/>.
- Bosch (o. D.): Silicon carbide chips. URL: <https://www.bosch.com/stories/semiconductor-manufacturing/>.
- Brennkemeyer, H. & Ebert, M. (2024): Chiphersteller Zeiss und ASML mischen groß im Chipgeschäft mit. *Tagesschau*. URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/chip-oberkochen-zeiss-100.html>.
- Bundesregierung (2023): „Rohstoff des 21. Jahrhunderts“. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/halbleiter-deutschland-2187370>.
- Burger, Ludwig (2023): World's biggest gallium buyer says clients stockpiling. URL: <https://www.reuters.com/markets/commodities/worlds-biggest-gallium-buyer-says-clients-stockpiling-2023-07-11/>.
- Burkacky, O.; Dragon, J. & Lehmann, N. (2022): The semiconductor decade: A trillion-dollar industry. McKinsey and Company. URL: <https://www.mckinsey.de/industries/semiconductors/our-insights/the-semiconductor-decade-a-trillion-dollar-industry>.
- Burkacky, O.; Kim, T. & Yeom, I. (2023): Advanced chip packaging: How manufacturers can play to win. McKinsey and Company. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/advanced-chip-packaging-how-manufacturers-can-play-to-win>.
- Cantrill, A. (2023): GlobalFoundries to invest \$8 billion in Dresden plant, HB says Bloomberg. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-09-28/globalfoundries-to-invest-8-billion-in-dresden-plant-hb-says>.
- Cariad Technology (2023): Semiconductors power our cars. URL: <https://cariad.technology/de/en/news/stories/semiconductors-power-our-cars.html>.
- CAS (2024): Science, fact, fiction: Can we really recycle semiconductors? URL: <https://www.cas.org/resources/cas-insights/science-fact-fiction-can-we-really-recycle-semiconductors>.
- Cavallaro, Frank (2024): What to Expect in the 2025 Semiconductor Supply Chain. URL: <https://www.sdexec.com/sourcing-procurement/manufacturing/article/22918774/a2-global-electronics-what-to-expect-in-the-2025-semiconductor-supply-chain>.
- Chipexplorer (2024): Supply Chain Explorer: Assembly, testing, and packaging. URL: <https://chipexplorer.eto.tech/static/0da9e24876649dae03fcaaeecf360e63/S3.pdf>.

Deloitte (2023): Halbleiterindustrie im Umbruch. URL: <https://www.deloitte.com/de/de/Industries/tmt/analysis/halbleiterindustrie-im-umbruch.html>.

Congress (2021): H.R.4346 - CHIPS and Science Act. URL: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/4346>.

Das, Mehul Reuben (2023): The semiconductor monopoly: How one Dutch company has a stranglehold over the global chip industry. Firstpost. URL: <https://www.firstpost.com/world/asml-holdings-dutch-company-that-has-monopoly-over-global-semiconductor-industry-12030422.html>.

DATAINTELO (2024): Germanium Wafer Market. URL: <https://dataintelo.com/report/germanium-wafer-market>.

Deloitte (2024): Semiconductor Industry Outlook 2024. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/technology-media-telecommunications/us-tmt-semiconductor-industry-outlook-2024v2.pdf>.

Deloitte (o. D.): European Semiconductor Trend Radar: Halbleiterbranche im Fokus. URL: <https://www.deloitte.com/de/de/Industries/tmt/research/european-semiconductor-trend-radar.html>.

DERA – Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023): Silizium und Ferrosilikolegierungen. Zwischenprodukte auf Basis von Quarz. DERA Rohstoffinformationen 59. URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-59.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

Di Giovanni, Filippo (2024): Europe Is Convincingly Pursuing a Path to Semiconductor Sovereignty. EE Times Europe. URL: <https://www.eetimes.eu/europe-is-convincingly-pursuing-a-path-to-semiconductor-sovereignty/>.

Dobberstein, L. (2024): China's chip tech still lags the West – by up to five generations. The Register. URL: https://www.theregister.com/2024/08/21/china_us_chip_tech_gap_report/.

Ebrahimi, A. (2024): Groundbreaking chip sovereignty: Europe's strategic push in the semiconductor race. URL: <https://www.ifri.org/en/memos/groundbreaking-chip-sovereignty-europes-strategic-push-semiconductor-race>.

ECHA (2024): Highlights from November 2024 RAC and SEAC Meetings. URL: <https://echa.europa.eu/-/highlights-from-november-2024-rac-and-seac-meetings>.

Economist (2025): The race is on to build the world's most complex machine. URL: <https://www.economist.com/science-and-technology/2025/03/12/the-race-is-on-to-build-the-worlds-most-complex-machine>.

EUR-LEX (2025): 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 ("Critical Raw Materials Act"). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1252>.

Europäische Kommission (2022): European Chips Survey Report. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/c93f2acb-8ba8-43ad-a7d8-90447ddb667a_en?filename=European%20Chips%20Report.pdf.

Europäische Kommission (2024a, November 04): European Chips Act: The Chips for Europe Initiative. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/european-chips-act-chips-europe-initiative>.

Europäische Kommission (2024b): European Chips Act: Security of supply and resilience. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/european-chips-act-security-supply-and-resilience>.

Europäische Kommission (2024c): European Chips Act: Monitoring and crisis response. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/european-chips-act-monitoring-and-crisis-response>.

Europäische Kommission (2024d): EU and Australia sign partnership on sustainable critical and strategic minerals. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_2904.

Europäische Kommission (2024e): EU and international partners agree to expand cooperation on critical raw materials. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_1807.

Europäische Kommission (2025): Alliance on Processors and Semiconductor technologies. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/alliance-processors-and-semiconductor-technologies>.

Europäische Kommission (o. D. a): European Chips Act. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en.

Europäische Kommission (o. D. b): Approved integrated Important Projects of Common European Interest (IPCEI). URL: https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis_en.

Europäische Kommission (o. D. c): Approved IPCEIs in the Microelectronics value chain. URL: https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis/microelectronics-value-chain_en.

Europäische Kommission (o. D. d): Critical Raw Materials Act. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en.

Europäische Kommission (o. D. e): Framework for a Strategic Partnership on Raw Materials between Canada and the European Union. URL: <https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2023-12/Framework%20for%20a%20Strategic%20Partnership%20on%20Raw%20Materials%20Between%20Canada%20and%20The%20European%20Union.pdf>.

European Semiconductor Regions Alliance (o. D.): Homepage. URL: <https://www.esra-org.eu/#top>.

European Strategy and Policy Analysis System (2022): Global Semiconductor Trends and the Future of EU Chip Capabilities. URL: <https://espas.eu/files/Global-Semiconductor-Trends-and-the-Future-of-EU-Chip-Capabilities-2022.pdf>.

express (2024): Überfüllte Lager und drohende Pleitewelle: Chiphersteller in Sorge. URL: <https://express.at/economy/ueberfuellte-lager-und-drohende-pleitewelle-chiphersteller-in-sorge/>.

Fiehrer, Kathleen et al. (2019): Circularity in Intel's Semiconductor Manufacturing: Recovery and Reuse. Intel. URL: <https://community.intel.com/legacyfs/online/files/Circularity-at-Intel-Waste-Recovery-and-Reuse-November-2019.pdf>.

Financial Times (2024): China's export curbs on semiconductor materials stoke chip output fears. URL: <https://www.ft.com/content/9cd56880-4360-4e11-8c22-e810d3787e88>.

Fortune Business Insights (o. D.): Semiconductor Market Size, Share, Growth & Forecast [2032]. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/semiconductor-market-102365>.

Fraunhofer IMS (o. D.): Open source semiconductors. URL: <https://www.ims.fraunhofer.de/en/Newsroom/news---articles/feature--open-source-semiconductors.html>.

Fraunhofer IPMS (o. D.): Organische Feld-Effekt Transistoren (OFET) und Organische Elektro-chemische Transistoren. URL: <https://www.ipms.fraunhofer.de/de/Components-and-Systems/Components-and-Systems-Sensors/Electrochemical-Sensors/OFET-LOFET.html>.

Haack, P. (2024): The EU's chips plan implodes as Intel pauses investments. Politico. URL: <https://www.politico.eu/article/intel-germany-chips-plant-competitiveness-eu-ambition/>.

Fremerey, Melinda / Iglesias, Simon G. (2024): Geringe Anzahl und Diversität bei Rohstoffbeteiligungen im Ausland. IW-Kurzbericht Nr. 11. URL: <https://www.iwkoeln.de/studien/melinda-fremerey-simon-gerards-iglesias-geringe-anzahl-und-diversitaet-bei-rohstoffbeteiligungen-im-ausland.html>.

futuremarketinsights (2025): Advanced Packaging Market Analysis by Type, End User and Region Through 2025 to 2035. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/advanced-packaging-market>.

Goswami, Omanjana (2023): Chipping in: Critical minerals for semiconductor manufacturing in the U.S. MIT Science Policy Review. URL: <https://sciencepolicyreview.org/wp-content/uploads/securepdfs/2023/08/MITSPR-v4-191618004005.pdf>.

Goujon, Reva / Reynolds, Ben (2024): Slaying Self-Reliance: US Chip Controls in Biden's Final Stretch. URL: <https://rhg.com/research/slaying-self-reliance-us-chip-controls-in-bidens-final-stretch/>.

Grohol, Milan / Veeh, Constanze (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>.

GTAI Germany Trade & Invest (2025): Germany Plays Leading Role in Chip Production. URL: <https://www.gtai.de/en/invest/industries/germany-plays-leading-role-in-chip-production-1869868>.

Handelsblatt (2025): Münchener Sicherheitskonferenz: Deutschland ist globaler Schlüssellieferant bei Halbleitern. URL: <https://www.handelsblatt.com/dpa/muenchner-sicherheitskonferenz-deutschland-ist-globaler-schluessellieferant-bei-halbleitern/30212930.html>.

Haramboure, Antton et al. (2023): Vulnerabilities in the semiconductor supply chain. OECD Science, Technology and Industry Working Papers. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/06/vulnerabilities-in-the-semiconductor-supply-chain_f4de7491/6bed616f-en.pdf.

Härter, H. (2023): Halbleiterforschung in Deutschland: Aktuelle Entwicklungen und Vorteile. Elektronikpraxis. URL: <https://www.elektronikpraxis.de/-halbleiterforschung-deutschland-fraunhofer-ipms-a-03e2642242384ec58dde7b011eb65147/>.

He, Laura (2023): The world will pay a high price if China cuts off supplies of chipmaking materials. CNN Business. URL: <https://edition.cnn.com/2023/10/11/tech/china-chips-gallium-germanium-intl-hnk/index.html#:~:text=It's%20commonly%20used%20to%20produce,commodities%20strategist%20at%20ING%20Group>.

Hillrichs, D. & Wöflf, A. (2025): Complexities & Dependencies in the Global Semiconductor Value Chain. ifo Institut. URL: <https://www.ifo.de/publikationen/2025/working-paper/complexities-dependencies-global-semiconductor-value-chain>.

Hofer, Joachim (2024): Intel wendet sich ab – das sind die Folgen. URL: <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/halbleiter-intel-wendet-sich-ab-das-sind-die-folgen/100070023.html>.

Hofer, Joachim / Buchenau, Martin-W. (2025): Chiphersteller warnen vor der nächsten Lieferkrise. URL: <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/autobauer-chiphersteller-warnen-vor-der-naechsten-lieferkrise/100092156.html>.

Hofer, Joachim / Olk, Julian (2024): Chipfabriken sollen mit zwei Milliarden Euro gefördert werden. URL: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/wirtschaftsministerium-chipfabriken-sollen-mit-zwei-milliarden-euro-gefördert-werden/100091458.html>.

Holderness, Alexander et al. (2023): Understanding China's Gallium Sanctions. Center for Strategic & International Studies. URL: <https://www.csis.org/analysis/understanding-chinas-gallium-sanctions>.

Höltzsch, R. (2023): Von wegen Europa ist abhängig von Asien und USA – Ohne die Deutsche Trumpf geht nichts in der globalen Chipindustrie. Neue Zürcher Zeitung. URL: <https://www.nzz.ch/wirtschaft/von-wegen-europa-ist-abhaengig-von-asien-und-usa-ohne-die-deutsche-trumpf-geht-nichts-in-der-globalen-chipindustrie-ld.1757415>.

Hopf, E. (2024): The semiconductor industry is very skeptical about recycling of semiconduc-tors. Messe Frankfurt GmbH. URL: <https://pcim.mesago.com/nuernberg/en/pcim-insights/pcim-magazine/the-semiconductro-industry-is-very-skeptical-about-recycling-of-semis.html>.

Hu, J. (2024): Chips and the Future of Taiwan. URL: <https://doi.org/10.47611/jsrhs.v13i1.6282>.

IDC (o. D.): [IDC Report]. URL: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prAP51065123>.

IEEE (o. D.): Semiconductor Materials. URL: <https://irds.ieee.org/topics/semiconductor-materials>.

IG Metall Regensburg (2024): 2.800 unterschriebene IG Metall-Postkarten an Infineon-CEO übergeben. URL: <https://regens-burg.igmetall.de/aktuell/2800-unterschriebene-ig-metall-postkarten-an-infineon-ceo->

Infineon (2024): Jahresabschluss und Lagebericht 2024 der Infineon Technologies AG 2024. URL: <https://www.infineon.com/cms/de/about-infineon/investor/annual-report-2024/>.

Infineon (2025): Supplier Management. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/company/procurement/supplier-management/>.

Infineon (o. D.): Silicon Carbide. URL: <https://www.infineon.com/cms/de/product/technology/silicon-carbide-sic/>.

Infineon Canada (2025): What is gallium nitride and GaN power semiconductors?. URL: <https://gansystems.com/gallium-nitride-semiconductor/>.

IPCEI ME CT (o. D.): Home. URL: <https://ipcei-me-ct.eu/>.

IPCEI on Microelectronics (2025): About the IPCEI. URL: <https://www.ipcei-me.eu/what-is/>.

Joint Research Center of the European Union (2022): Rare Gases (Krypton, Neon, Xenon): Im-pact Assessment for supply secu-rity. URL: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/JRC130349_01_rare_gases.pdf.

Kabir, Omer (2024): The price of failure: Dutch company's chip monopoly born from a bad bet by Intel. CTECH. URL: <https://www.calcalistech.com/ctechnews/article/y4j6dd07g>.

Kearney (2021): Europe's urgent need to invest in a leading-edge semiconductor ecosystem. URL: <https://www.kearney.com/documents/291362523/291371424/Europes+urgent+need+to+invest+in+a+leading-edge+semiconductor+ecosystem.pdf/f3ec1e30-b8ff-b367-417c-62cf476342ea?t=1636562554000>.

Khan, Saif M. et al. (2021): The Semiconductor Supply Chain: Assessing National Competitive-ness. Center for Security and Emerging Technology. URL: <https://cset.georgetown.edu/publication/the-semiconductor-supply-chain/>.

Kharpal, A. (2023): Canon launches ASML challenge with machine to makmost advanced chips. CNBC. URL: <https://www.cnbc.com/2023/10/13/canon-launches-asml-challenge-with-machine-to-make-most-advanced-chips.html>.

Kleinhans, J.P. (2024): The Missing Strategy in Europe's Chip Ambitions. Interface, ehemals Stiftung Neue Verantwortung. URL: <https://www.interface-eu.org/publications/europe-semiconductor-strategy>.

Kleinhans, J.P.; Hess, J.C. & Hemmen, L. (2023): Who's developing chips? Future Reloaded. Interface, ehemals Stiftung Neue Verantwortung. URL: <https://www.stiftung-nv.de/publications/who-developing-chips-future-reloaded#deep-dive-research-power-of-eu-rtos>.

Klotz, Aaron (2021): Chip Manufacturers Stockpile Record Amount of Raw Materials to End Shortage. URL: <https://www.toms-hardware.com/news/chip-makers-stockpile-record-amount-of-raw-materials>.

Kolev-Schaefer, G.; Matthes, J.; Schaefer, Thilo / Schmitz, E.; Weber, B. & Schmitz-Brieber, J. (2025): Resilienz der deutschen Lieferketten nach der Zeitenwende. EPICO Klimainnovation e.V. & Institut der deutschen Wirtschaft. URL: <https://epico.org/de/resilienz-der-deutschen-lieferketten-nach-der-zeitenwende>.

Kondratiev, V. (2023): China in Global Mining Industry. URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-78-87>.

Kurlemann, R. (2022): Silicium – Kann Europa sich selbst mit dem wichtigen Rohstoff versorgen?. Heise Online. URL: <https://www.heise.de/hintergrund/Silicium-Kann-Europa-sich-selbst-mit-dem-wichtigen-Rohstoff-versorgen-7281539.html>.

Lapedus, Mark (2020): The Race To Much More Advanced Packaging. Semiconductor Engineering. URL: <https://semiengineering.com/the-race-to-much-more-advanced-packages/>.

Linde Gas (o. D.): Specialty gases. URL: <https://www.linde-gas.com/industries/electronics/gases-and-services/specialty-gases>.

Manager Magazin (2024): ASML-Chipausrüster hält trotz US-Embargo gegen China Exporte an Prognose fest. URL: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/tech/asml-chipausruester-haelt-trotz-us-embargo-gegen-china-exporte-an-prognose-fest-a-9eb186b8-3ec5-4104-9a35-6482d47cdb5a>.

Microchip USA (2025): Recycling Semiconductors: The Key to a Greener Tech Future. URL: <https://www.microchipusa.com/industry-news/semiconductor-industry/recycling-semiconductors-the-key-to-a-greener-tech-future/>.

Moeritz, G. (2024): Neues Werk in Dresden: Infineon überholt GlobalFoundries. Wirtschaft in Sachsen. URL: <https://www.wirtschaft-in-sachsen.de/de/neues-werk-in-dresden-infineon-ueberholt-globalfoundries/>.

MordorIntelligence (o. D.): Industry Reports. URL: www.mordorintelligence.com.

Neudert, Philipp et al. (2025): So kann Deutschland eine neue Chipindustrie aufbauen. Zeit Online. URL: <https://www.zeit.de/wirtschaft/2025-01/halbleiterindustrie-microchips-subvention-energiewende-produktion/komplettansicht>.

NXP (2024): Annual Report 2023. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/supporting-information/NXPFRS2023.pdf>.

NXP (2024): ESMC Breaks Ground on Dresden Fab. URL: <https://www.nxp.com/company/about-nxp/newsroom/NW-ESMC-BREAKS-GROUND-ON-DRESDEN-FAB>.

Orbit & Skyline (2023): Top 5 Ways to Bring Efficiency Semiconductor Inventory Management. URL: <https://orbit skyline.com/blog/mastering-efficiency-best-practices-in-semiconductor-inventory-management/>.

Pai, Ajay Poonjal (2020): Leistungshalbleiter-Technologien für die Elektromobilität. URL: <https://www.all-electronics.de/e-mobility/reichweite/leistungshalbleiter-technologien-fuer-die-elektromobilitaet-220.html>.

Pasqual, Gianni / Ullrich, Kathrin (2024): Deutschland in der Halbleiterlieferkette: verletzliche Importseite. KfW Research. URL: <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Volkswirtschaft-Kompakt/One-Pager-2024/VK-Nr.-246-Juli-2024-Halbleiterlieferkette.pdf>.

Patton, D. (2023): China export curbs choke off shipments of gallium, germanium for second month. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/world/china/china-export-curbs-choke-off-shipments-gallium-germanium-second-month-2023-10-20/>.

Potter, Brian (2024): How to Build a \$20 Billion Semiconductor Fab. Construction Physics. URL: <https://www.construction-physics.com/p/how-to-build-a-20-billion-semiconductor>.

PV Magazine (2023): Wacker baut Produktion von Poly-Silicium in Deutschland aus. URL: <https://www.pv-magazine.de/2023/06/14/wacker-baut-produktion-von-poly-silicium-in-deutschland-aus/>.

Reuters (2023): What are Gallium and Germanium and which countries are producers? URL: <https://www.reuters.com/markets/commodities/where-are-strategic-materials-germanium-gallium-produced-2023-07-04/>.

Reuters (2024): Wolfspeed shelves plans to build chip factory in Germany. URL: <https://www.reuters.com/technology/wolfspeed-shelves-plans-build-chip-factory-germany-ft-reports-2024-10-23/>.

Rohleder, Nicholas (2024): Fluorspar: The Hidden Mineral Fueling the Semiconductor Revolution. The SCIF. URL: <https://thescif.org/fluorspar-the-hidden-mineral-fueling-the-semiconductor-revolution-be33e23824bf>.

Saks D. & Huang, S. (2024) Onshoring semiconductor production: National security versus economic efficiency. Council on Foreign Relations. URL: <https://www.cfr.org/article/onshoring-semiconductor-production-national-security-versus-economic-efficiency>.

Samsung CNT (2024): Essential chemicals: How sulfuric acid is used to make electronics. URL: <https://news.samsungcnt.com/en/features/trading-investment/2024-09-essential-chemicals-how-sulfuric-acid-is-used-to-make-electronics/>.

ScienceBusiness (2024): Strengthening Europe's Chips Industry: Key Insights from the Industrial Alliance at EF ECS 2024. URL: <https://sciencebusiness.net/news/strengthening-europes-chips-industry-key-insights-industrial-alliance-efecs-2024>.

SEMI (2021): SEMI Comments to Risks in the Semiconductor Manufacturing and Advanced Packaging Supply Chain Notice of Request for Public Comments; 86 FR 14308; RIN 0694-XC073; Docket Number BIS-2021-0011. URL: https://downloads.regulations.gov/BIS-2021-0011-0053/attachment_1.pdf.

sgl carbon (2020): Why Silicon-Carbide Semiconductors Have a Bright Future. URL: <https://www.sglcarbon.com/en/newsroom/stories/why-silicon-carbide-semiconductors-have-a-bright-future/>.

Shackell, S. (2023): Why all the buzz around silicon carbide (SiC)? EETimes. URL: <https://www.eetimes.com/why-all-the-buzz-around-silicon-carbide-sic/>.

Sharma, S. (2024): RISC-V Architecture: A Comprehensive Guide to the Open-Source ISA. Wevolver. URL: <https://www.wevolver.com/article/risc-v-architecture>.

Shilov, Anton (2023): SMIC Stockpiles Raw Materials Ahead of Possible U.S. Sanctions: Report. URL: <https://www.tomshardware.com/news/smic-stockpiles-raw-materials-ahead-of-possible-us-sanctions-report>.

Shivakumar, S. & Wessner, C. (2022): Semiconductors and national defense: What are the stakes?. Center for Strategic and International Studies. URL: <https://www.csis.org/analysis/semiconductors-and-national-defense-what-are-stakes>.

Shivakumar, S.; Yoon, J. & Sirkar, T. (2024): Gallium Nitride: Strategic Opportunity for the Semiconductor Industry. Center for Strategic and International Studies. URL: <https://www.csis.org/analysis/gallium-nitride-strategic-opportunity-semiconductor-industry>.

Shivarkar, A. (2024): Semiconductor Market Size to Surpass USD 1,137.57 Billion by 2033. Precedence Research. URL: <https://www.precedenceresearch.com/semiconductor-market>.

SIAD (o. D.): Semiconductor Gases. URL: <https://www.siad.com/products/specialty-pure-and-very-pure-gases/semiconductor-gases>.

Siemens (2017): Siemens closes acquisition of Mentor Graphics. URL: <https://press.siemens.com/global/en/event/siemens-closes-acquisition-mentor-graphics>.

Silicon Saxony (o. D.): New semiconductor materials in comparison: A journey through the periodic table. URL: <https://silicon-saxony.de/en/new-semiconductor-materials-in-comparison-a-journey-through-the-periodic-table/>.

Siltronic (2024): Geschäftsbericht 2023. URL: https://www.siltronic.com/fileadmin/investorrelations/HV_2024/03_DE_Siltronic_Geschaeftsbericht_2023.pdf.

Siltronic (2024): Geschäftsbericht 2023. URL: https://www.siltronic.com/fileadmin/investorrelations/HV_2024/03_DE_Siltronic_Geschaeftsbericht_2023.pdf.

Siltronic (o. D.): History. URL: <https://www.siltronic.com/en/our-company/history.html>.

Simpson, J. (2024): ASML halts hi-tech chip-making exports to China reportedly after US request. The Guardian. URL: <https://www.theguardian.com/technology/2024/jan/02/asml-halts-hi-tech-chip-making-exports-to-china-reportedly-after-us-request>.

Singleton, Craig et al. (2024): Targeting Taiwan. Beijing's Playbook for Economic and Cyber Warfare. URL: <https://www.fdd.org/analysis/2024/10/04/targeting-taiwan/>.

South China Morning Post (2024): Chip war: China is 5 years behind global leading-edge production, report says. URL: <https://finance.yahoo.com/news/chip-war-china-5-years-093000707.html?guccounter=1>.

Spanjersberg, M. (2024): Semiconductor Fabs and Raw Materials: Strategies to Manage the Growing Risk of Supply Bottlenecks. Sustainalytics. URL: <https://www.sustainalytics.com/esg-research/resource/investors-esg-blog/semiconductor-fabs-and-raw-materials--strategies-to-manage-the-growing-risk-of-supply-bottlenecks>.

strategy& (2023): Nachhaltige Mikroelektronikstrategie braucht Investitionen von mindestens 115 Mrd. Euro. URL: <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/digitale-souveraenitaet-deutschlands.html>.

Stroh, Iris (2023): Viel Kritik am European Chips Act und IPCEI ME/CT. URL: <https://www.elektroniknet.de/halbleiter/viel-kritik-am-european-chips-act-und-ipcei-me-ct.212858.html>.

Table.Media (o. D.): Rohstofffonds: Wie Unternehmen Förderung bekommen. URL: <https://table.media/esg/news/recycling-und-bergbauprojekte-wie-unternehmen-foerderung-bekommen/>.

Tembey, Gaurav et al. (2023): Navigating the Costly Economics of Chip Making. BCG. URL: <https://www.bcg.com/publications/2023/navigating-the-semiconductor-manufacturing-costs>.

Thadani, A. / Allen G. (2023): Mapping the Semiconductor Supply Chain: The Critical Role of the Indo-Pacific Region. Center for Strategic and International Studies. URL: <https://www.jstor.org/stable/resrep53721?seq=1>.

TrendForce (2024): ASML CEO: China might be able to produce 5nm and 3nm chips amid U.S. export restrictions. [News]. URL: <https://www.trendforce.com/news/2024/10/24/news-asml-ceo-china-might-be-able-to-produce-5nm-and-3nm-chips-amid-u-s-export-restrictions/>.

TrendForce (2024): China might be able to produce 5nm and 3nm chips amid U.S. export restrictions. URL: <https://www.trendforce.com/news/2024/10/24/news-asml-ceo-china-might-be-able-to-produce-5nm-and-3nm-chips-amid-u-s-export-restrictions/>.

TrendForce (2024): China's gallium and germanium export restrictions risk chip production shortages. URL: <https://www.trendforce.com/news/2024/08/28/news-chinas-gallium-and-germanium-export-restrictions-risk-chip-production-shortag-es/#:~:text=According%20to%20the%20U.S.%20Geological,double%20over%20the%20past%20year.>

Trumpf (o. D.): Erzeugung von EUV-Strahlung mittels CO₂-Hochleistungslasersystem und Zinn. URL: https://www.trumpf.com/de_INT/loesungen/anwendungen/euv-lithografie/.

TSMC (2023): TSMC, Bosch, Infineon, and NXP Establish Joint Venture to Bring Advanced Semi-conductor Manufacturing to Europe. URL: <https://pr.tsmc.com/english/news/3049>.

TSMC (2024): ESMC breaks ground on Dresden Fab. NXP Semiconductors. URL: <https://www.nxp.com/company/about-nxp/newsroom/NW-ESMC-BREAKS-GROUND-ON-DRESDEN-FAB>.

U.S. Department of State (2024): The Minerals Security Partnership Welcomes New Deal in Minerals Offtake and Processing Between STL in the Democratic Republic of the Congo and Umicore in Belgium. URL: <https://2021-2025.state.gov/the-minerals-security-partnership-welcomes-new-deal-in-minerals-offtake-and-processing-between-stl-in-the-democratic-republic-of-the-congo-and-umicore-in-belgium/>.

U.S. Department of State (o. D.): The U.S. Department of State International Technology Security and Innovation Fund. URL: <https://www.state.gov/the-u-s-department-of-state-international-technology-security-and-innovation-fund/>.

United States Geological Survey (2024): Mineral Commodity Summaries 2024. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>.

Valerio, Pablo (2025): The Great Chip Stockpile. EE|Times. URL: <https://www.eetimes.com/the-great-chip-stockpile/>.

Varadarajan, Raj et al. (2024): Emerging Resilience in the Semiconductor Supply Chain. URL: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2024/05/Report_Emerging-Resilience-in-the-Semiconductor-Supply-Chain.pdf.

VDI|VDE|IT (2024): Meilenstein für Europa: Erstes IPCEI Mikroelektronik brachte Innovationen und Arbeitsplätze. URL: <https://vdivde-it.de/de/meilenstein-fuer-europa-erstes-ipcei-mikroelektronik-brachte-innovationen-und-arbeitsplaetze>.

Verified Market Research (2024): GaN Substrate and GaN Wafer Market. URL: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/gan-substrate-and-gan-wafer-mar-ket/#:~:text=GaN%20Substrate%20And%20GaN%20Wafer%20Market%20size%20was%20valued%20at,16.07%25%20from%202024%20to%202031.>

VerifiedMarketResearch (2024): GaN Substrate And GaN Wafer Market Size And Forecast. URL: <https://www.verifiedmarket-research.com/product/gan-substrate-and-gan-wafer-market/>.

Vitrum Magazin (2023): Glassubstrate für die Zukunft der Halbleiter. URL: <https://www.vitrumlife.it/de/Glassubstrate-f%C3%B-Cr-die-Zukunft-der-Halbleiter/>.

Wacker Chemie (2024): Annual Report 2023. URL: https://www.wacker.com/cms/media/de/asset/about_wacker/wacker_at_a_glance/annual_report/annual_report_23.pdf.

Zeiss SMT (o. D.): Märkte und Partner. URL: <https://www.zeiss.de/semiconductor-manufacturing-technology/produkte/maerkte-und-partner.html>.

Vivoda, Vlado (2023): Friend-shoring and critical minerals: Exploring the role of the Minerals Security Partnership. Energy Research & Social Science Volume 100, June 2023, 103085. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629623001457>.

Wacker (2014): Wenn die Chemie stimmt. URL: <https://www.wacker.com/h/de-cn/medias/7087-DE.pdf>.

Wafer World (2024): The Rise of Silicon Wafer Recycling in Semiconductor Manufacturing. URL: <https://www.waferworld.com/post/the-rise-of-silicon-wafer-recycling-in-semiconductor-manufacturing>.

Xiong, Wei et al. (2023): Semiconductor supply chain resilience and disruption: insights, mitigation, and future direction. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2024.2387074#d1e171>.

Yang, Heeyong et al. (2024): Exclusive: Chinese firms stockpile high-end Samsung chips as they await new US curbs, say sources. URL: <https://www.reuters.com/technology/chinese-firms-stockpile-high-end-samsung-chips-they-await-new-us-curbs-say-2024-08-06/>.

Yang, Zeyi (2022): Inside the software that will become the next battle front in US-China chip war. MIT Technology Review. URL: <https://www.technologyreview.com/2022/08/18/1058116/eda-software-us-china-chip-war/>.

Zühlke, Karin (2024): EMS für ein starkes Mikroelektronik-Ökosystem in Europa! URL: <https://www.elektroniknet.de/elektronikfertigung/ems/ems-fuer-ein-starkes-mikroelektronik-oekosystem-in-europa.221717.html>.

ZVEI (2022): Positionspapier EU Chips Act. URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2022/Juni/Positionspapier_EU_Chips_Act/ZVEI_PP_EU_Chips_Act_End.pdf.

ZVEI (2023): Position Paper. The general restriction of PFAS endangers the semiconductor industry in Europe and the goals of the European Chips Act as well as the ecological and digital transformation in Germany and Europe! URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2023/August/Positionspapier_PFAS-HL/2023-05-08_OnePager_Positionspapier_PFAS_final_engl.pdf.

ZVEI (2024a): Von Chips zu Chancen: Die Bedeutung und Wirtschaftlichkeit der Mikroelektronikförderung. URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Pressebereich/2024-092_ZVEI-Studie_Halbleiterfoerderung-rechnet-sich-volkswirtschaftlich/ZVEI_Mikroelektronik_Studie_v19.pdf.

ZVEI (2024b): Resilientes Ökosystem Mikroelektronik aufbauen. URL: <https://www.zvei.org/presse-medien/pressebereich/resilientes-oekosystem-mikroelektronik-aufbauen>.

Literaturverzeichnis Windkraftanlagen

Bundesministerium der Justiz (2024): Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz - WindSeeG). URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/windseeg/BJNR231000016.html>.

Bundesnetzagentur (07.06.2024): Erneut dynamisches Gebotsverfahren bei Ausschreibung von Offshore-Windenergie. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240607_OffshoreBK6.html.

Bundesnetzagentur (2024): Offshore / EEG Ausschreibungen. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK06/BK6_72_Offshore/BK6_offshore.html.

Bundesnetzagentur (2024): Zubau Erneuerbarer Energien im ersten Halbjahr 2024. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240719_EEZubauHJ1.html?nn=659670.

Bundesverband WindEnergie (08.10.2024): Windenergie in Deutschland - Zahlen und Fakten. URL: <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/>.

BWE (17.09.2024): Ausschreibungen im August überzeichnet. Pressemitteilung. URL: <https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/de-tail/ausschreibung-im-august-ueberzeichnet/>.

Deutsche Welle (29.07.2024): Chinesische Windräder vor deutscher Küste. URL: <https://www.dw.com/de/chinesische-windr%C3%A4der-vor-deutscher-k%C3%BCste/a-69640721>.

Deutsche Windguard (2024): (Erwartete) Entwicklung der Offshore-Windenergieleistung in Deutschland. URL: https://www.windguard.de/Statistik-1-Halbjahr-2024.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2024/Halbjahr/Download%20Grafiken%20Off-shore%20Halbjahr%202024/Seite_3_%20Abbildung_%28Erwartete%29%20Entwicklung%20der%20Offshore-Windenergieleistung%20in%20Deutsch-land.pdf.

Deutscher Bundestag (25.04.2024): Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der EU-Erneuerbaren-Richtlinie in den Bereichen Windenergie auf See und Stromnetze und zur Änderung des Bundesbedarfsplangesetzes. URL: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/112/2011226.pdf>.

EIT (2021): Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action URL: https://eit.europa.eu/sites/default/files/2021_09-24_ree_cluster_re-port2.pdf.

Seite 4

EIT RawMaterials (14.11.2023): PASSENGER's Rare Earth-free magnets prototypes set to transform industries. URL: <https://eitrawmaterials.eu/passengers-rare-earth-free-magnets-prototypes-set-to-transform-industries/>.

EIT RawMaterials (14.12.2020): UPGRADE – Optimised process for new permanent magnet grades with low content of heavy rare earth. URL: <https://ei-trawmaterials.eu/upgrade-optimised-process-for-new-permanent-magnet-grades-with-low-content-of-heavy-rare-earth/>.

European Commission (2024). Critical Raw Materials Act. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>.

European Commission: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M. and Veeh, C. (2023): Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>.

Hans Böckler Stiftung (03.2023): Branchenanalyse Windindustrie: Perspektiven vor dem Hintergrund von Globalisierung, Energiewende und Digitalisierung. URL: https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008564/p_fofoe_WP_273_2023.pdf.

IRENA (2023): Geopolitics of the energy transition: Critical materials. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_Geopolitics_energy_transition_critical_materials_2023.pdf.

WindEurope (06.2024): The resilience criterion in the Net-Zero Industry Act. URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/position-papers/20240628-WindEurope-position-on-resilience.pdf>.

Kiel Institute for the World Economy (04.2024): Foul Play? On the Scale of Industrial Subsidies in China. URL: https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/fis-import/bc6aff38-abfc-424a-b631-6d789e992cf9-KPB173_en.pdf.

Loan Programs Office (16.08.2023). Transforming Clean Energy Financing and Supply Chains in the United States: LPO One Year after the IRA. URL: <https://www.energy.gov/lpo/articles/transforming-clean-energy-financing-and-supply-chains-united-states-lpo-one-year-after>.

Rystad Energy (2023): The State of the European Wind Energy Supply Chain. URL: <https://www.rystadenergy.com/insights/the-state-of-the-european-wind-energy-supply-chain>.

Sahu, B. K. (2018). Wind energy developments and policies in China: A short review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 1393-1405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.183>.

Schönfeldt, M., Diehl, O., & Gassmann, J. (2024): Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/rohstoffinformationen-60.pdf;jsessionid=926FBBA9E89B8E9F81E15769F18FA398.internet991?__blob=publicationFile&v=2.

Schönfeldt, M., Diehl, O., & Gassmann, J. (2024): Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/rohstoffinformationen-60.pdf;jsessionid=926FBBA9E89B8E9F81E15769F18FA398.internet991?__blob=publicationFile&v=2.

Stiftung Klimaneutralität (2023): Souveränität Deutschlands sichern. URL: https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf.

Tripathi, S. M., Tiwari, A. N., & Singh, D (2015): Grid-integrated permanent magnet synchronous generator-based wind energy conversion systems: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1288–1305. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.060>.

VDMA (2024): Resiliente Windindustrie in Europa. URL: https://www.vdma.org/documents/34570/15233942/Pospapier_Windindustrie_Deutsch.pdf/b16c34ed-4653-ed23-b560-877eaf1311e4?t=1705075620861.

WindEurope (03.01.2022): A cybersecurity framework for wind energy; Interview mit Herstellerunternehmen. URL: <https://windeurope.org/policy/position-papers/a-cybersecurity-framework-fit-for-wind-energy/>.

Seite 5

WindEurope (03.01.2022): A cybersecurity framework for wind energy. URL: <https://windeurope.org/policy/position-papers/a-cybersecurity-framework-fit-for-wind-energy/>.

WindEurope (06.2024): The resilience criterion in the Net-Zero Industry Act. URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/position-papers/20240628-WindEurope-position-on-resilience.pdf>.

Literaturverzeichnis Titan in der Verteidigungswirtschaft

Abuljadayel, Fahad / Martin, Matthew (2024): Boeing, Airbus working with Saudi-Arabia on metals for planes. AJOT 20.5.2024. URL: <https://www.ajot.com/news/boeing-airbus-working-with-saudi-arabia-on-metals-for-planes>.

Airbus (2024): Airbus Annual Report 2023. Shaping the future. URL: <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2024-03/Airbus-Annual-Report-2023.pdf>.

Argus (2020a): Titanium scrap shortage could last until 2H21. URL: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2146814-titanium-scrap-shortage-could-last-until-2h21>.

Argus (2020b): Titanium 2021. A year of scrap shortages? URL: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2171673-titanium-2021-a-year-of-scrap-shortages>.

Baoji Zhongyang Metal Materials Co., Ltd. (2019) Die Arten und Eigenschaften der wichtigsten verformten Titanlegierungsmaterialien, die in der Luft- und Raumfahrt in China verwendet werden. URL: <https://www.zy-titanium.com/industry-news/1039.html>

Brennan, David (2023): The Battle for Ukraine's Titanium. Newsweek 30.01.2023. URL: <https://www.newsweek.com/battle-ukraines-titanium-1777106>.

Bundesministerium der Verteidigung (2023): Nationale Sicherheitsstrategie: Wehrhaft. Resilient. Nachhaltig. Integrierte Sicherheit für Deutschland. URL: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/2217452/cb77f128072c53a-203f8e938e9bb19fa/nationale-sicherheitsstrategie-data.pdf>.

Bundesministerium der Verteidigung (2024): Entwurf der Nationalen Sicherheits- und Verteidigungsindustriestrategie. URL: https://www.politico.eu/wp-content/uploads/2024/08/12/Entwurf_Strategie-Starkung-SVI-clean.pdf.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024): Sicherheits- und Verteidigungsindustrie. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-sicherheits-und-verteidigungsindustrie.html>.

Bundeswehr (2024a): Technische Lieferbedingungen der Bundeswehr. URL: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/ausruistung-baainbw/vergabe/technische-lieferbedingungen>.

Bundeswehr (2024b): Wehrtechnische Normen zur Beschaffung von Wehrmaterial. URL: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/ausruistung-baainbw/vergabe/normen>.

Burns, Stuart (2022): Titanium Market Facing Major Supply Constraints. MetallMiner. URL: <https://agmetallminer.com/2022/04/20/titanium-market-facing-major-supply-constraints/>.

Bykhovskii, L. / Tiginov, L. (2011): Titanium Raw Materials of Russia. Russian Journal of General Chemistry. 81, S. 1328-1344. URL: https://www.researchgate.net/publication/226809479_Titanium_Raw_Materials_of_Russia.

Deutscher Bundeswehrverband (2022): Bundesregierung beschließt Sondervermögen Bundeswehr und plant Verteidigungsetat bis 2026, URL: <https://www.dbwv.de/aktuelle-themen/politik-verband/beitrag/eckpunkte-fuer-die-entwicklung>.

Diehl (2024): Annual Report 2023. URL: <https://www.diehl.com/annual-report-2023/>.

Grohol, M. and Veeh, C. (2023): Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report, Publications Office of the European Union, 2023, URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>.

Fiott, Daniel (2024): Security of Supply: How Can the EU Help Ensure Defence Preparedness?, CSDS Policy Brief 24/ 2024, URL: <https://csds.vub.be/publication/security-of-supply-how-can-the-eu-help-ensure-defence-preparedness/>.

Georgitzikis, K. / D'elia, E. / Eynard, U. (2022): Titanium metal: Impact assessment for supply security, European Commission, 2022, JRC129594. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129594>.

Gentzmann, Marie (2023): Titan. Informationen zur Nachhaltigkeit. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/Titan.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

Girardi, Benedetta et al. (2023): Strategic raw materials for defence. Mapping European industry needs. The Hague Centre for Strategic Studies. URL: <https://hcss.nl/report/strategic-raw-materials-for-defence/>.

GNEE Metal (April 2024) Der Einsatz von Titanlegierungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie wächst stetig. URL: <https://www.alloys-china.com/info/the-use-of-titanium-alloys-in-the-aerospace-in-99232256.html>.

GTAI (2023): Europa kann Metallimport aus Russland noch nicht völlig ersetzen. URL: <https://www.gtai.de/de/trade/russland/branchen/europa-kann-metallimporte-aus-russland-noch-nicht-voellig-ersetzen-1004584>.

Hensel, Nayantara D. (2022). The impact of COVID-19 on the U.S. defense industrial base. National Defense University Press. URL: https://ndupress.ndu.edu/Portals/68/Documents/prism/prism-19/prism-19_52-76_Hensel.pdf?ver=v6j_ZJrRECT64eZZu-vz8yw%3d%3d.

Hensoldt (2024): Annual Report Combined Management Report and Consolidated Financial Statements 2023. URL: https://annualreport.hensoldt.net/resource/PDF/HENSOLDT_GB_Finance_E_2023.pdf.

Hilgers et al. (2021): Ist die deutsche Ressourcenstrategie resilient? Bergbau – Verhüttung – Recycling, THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien, S. 22. URL: [Hilgers_Kolb_Becker_2021_THINKTANK_Brosch.pdf](https://www.thinktank.de/Dateien/Hilgers_Kolb_Becker_2021_THINKTANK_Brosch.pdf)

Industrie- und Handelskammer Schwaben (2022): Sicherheits- und Verteidigungsindustrie Kurzbericht. URL: <https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/5716716/fc3d570a9559ca6a44ef124342df1b29/2023-02-svi-kurzbericht-data.pdf>.

Institut der deutschen Wirtschaft (2022): Deutsche Verteidigungsindustrie: Eine Branche im Umbruch. URL: <https://cutt.ly/IFwceq8>.

Jaganmohan, Madhumitha (2024): Global titanium mining industry - statistics & facts. Statista 22.05.2024. URL: <https://www.statista.com/topics/11141/titanium-industry-worldwide/#topicOverview>.

Jakimów, Malgorzata / Samokhalov, Vsevolod / Baldassarre, Brian (2024): Achieving European Union strategic autonomy: circularity in critical raw materials value chains, International Affairs, Volume 100, Issue 4, July 2024, S. 1735–1748. URL: <https://doi.org/10.1093/ia/iaae127>.

Jones, Florence (2023): China to operate in the development of Russian arctic titanium mine. Mining Technology 06.02.2024. URL: <https://www.mining-technology.com/news/china-russia-titanium-mine/?cf-view>.

Kommersant (2022): На производстве “ВСМПО-Ависма” произошел инцидент. 14.02.2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5216281>.

Kullik, Jakob et al. (2024): Von Titan bis Taurus. Ukrainische Rohstoffe und europäische Lieferketten-Resilienz in Zeiten des Krieges. Konrad Adenauer Stiftung, Analysen & Argumente Nr. 532 / August 2024. URL: <https://www.kas.de/documents/d/guest/von-titan-bis-taurus>.

Lampert, Allison & Shepardson, David (Juli 2024) Exclusive: Boeing asks suppliers for decade-long titanium paper trail as check for forgeries widens. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/boeing-asks-suppliers-decade-long-titanium-paper-trail-check-forgeries-widens-2024-07-26/>.

Lopez, Juan Mejino / Wolff, Guntram B. (2024): What role do imports play in European defence? Bruegel 04.07.2024. URL: <https://www.bruegel.org/analysis/what-role-do-imports-play-european-defence>.

MBDA (2024): Sustainability Report 2023. URL: <https://www.mbda-systems.com/wp-content/uploads/2024/09/MBDA-Sustainability-Report-2023.pdf>.

Mining Metals (Mai 2024): C919-Großaufträge Treiben Die Nachfrage Nach Titanmetall In Eine Neue Ära. URL: <http://de.milling-metal.com/news/c919-large-orders-drive-titanium-metal-demand-77300956.html>.

Norwegian Ministry of Trade and Industry (2023): Norway will develop the world's most sustainable mineral industry. Presserklärung 06.07.2023. URL: <https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/-norway-will-develop-the-worlds-most-sustainable-mineral-industry/id2986277/>.

Pavel, Claudiu C. / Tzimas, Evangelos (2016): Raw materials in the European defence industry. JRC Science for Policy Report. European Commission. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC98333>.

Reckordt, Michael (2022): Überlegungen zur Bevorratung. Strategische Reserven von Rohstoffen. URL: <https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2022/12/Factsheet-Strategische-Reserven-PowerShift-BUND.pdf>.

Reich, H. (2022): 100 Milliarden Euro Investitionen. Welche Firmen von der Aufrüstung der Bundeswehr profitieren. Manager Magazin 28.02.2022. URL: <https://www.manager-magazin.de/politik/deutschland/100-milliarden-euro-investitionen-wer-von-der-aufruestung-der-bundeswehr-profitiert-a-73cfac0f-5471-429e-944a-857a441b9f24>.

Rheinmetall (2024): Geschäftsbericht 2023. URL: <https://ir.rheinmetall.com/media/document/a9487e35-b9f1-49da-8433-ec-9664da7672/assets/Rheinmetall-Jahresabschluss-2023.pdf>.

Tasnee (2024): Advanced Metals. Future Projects. URL: <https://www.tasnee.com/en/products/advanced-metals>.

Thyssenkrupp (2024): Annual Report 2022/2023. URL: https://www.thyssenkrupp.com/_binary/UCPthyssenkruppAG/370e5e3b-9068-4437-8820-5b3530b02868/Annual-Report-2022_2023_thyssenkrupp.pdf.

Trading Economics (2024) United Kingdom Imports from Russia of Titanium. URL: <https://tradingeconomics.com/united-kingdom/imports/russia/titanium-including-waste-scrap>.

U.S. Department of Defense (2022): Securing Defense-Critical Supply Chains. URL: <https://media.defense.gov/2022/Feb/24/2002944158/-1/-1/1/DOD-EO-14017-REPORT-SECURING-DEFENSE-CRITICAL-SUPPLY-CHAINS.PDF>.

U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (2024): Mineral Commodity Summaries 2024. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>.

Venger, V. et. al. (2024): Development of Titanium Production in Ukraine: Evolving Prospects Based on National R&D. Science and Innovation Mai 2024. 20(3):40-52. URL: <https://scinn-eng.org.ua/ojs/index.php/ni/article/view/664>.

Wellmer FM, Dalheimer M, Wagner M (2008): Economic evaluations in exploration, Springer, S. 56.

ZDF Heute (2024): Haushalt: Bundeswehr droht massive Unterfinanzierung. URL: <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/deutschland/bundeswehr-haushalt-2025-finanzierung-pistorius-nato-100.html>.

Impressum

Industrielle Resilienz und strategische Souveränität Deutschlands

Studie im Auftrag des Netzwerk Zukunft der Industrie e.V.

Herausgeber

Prognos AG
Goethestraße 85
10623 Berlin
Telefon: +49 30 52 00 59-210
Fax: +49 30 52 00 59-201
E-Mail: info@prognos.com
www.prognos.com
www.linkedin.com/company/prognos-ag

Autoren

Michael Astor
Paul Möhlmann
Tim Bichlmeier
Jakobus Kai Jaspersen
Leonard Krampe
Bianca Derya Neumann
Helena Seide
Miguel Wahle

Kontakt

Michael Astor (Projektleitung)
Telefon: +49 30 52 00 59-250
E-Mail: michael.astor@prognos.com

Satz und Layout: Prognos AG

Druck: DCM Digitaldruck

Bildnachweis(e): 1 © iStock - kozmoat98, 2 © iStock - AvigatorPhotographer, 3 © iStock - 77studio, 4 © Fotolia - netzfrisch.de, 5 © iStock - vinzo, 6 © iStock-Louis-Michel, 7 © Fotolia.com - phonlamaipphoto

Stand: April 2025

Copyright: 2025, Prognos AG

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere Texte, Abbildungen und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei der Prognos AG. Jede Art der Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung oder andere Nutzung bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Zustimmung der Prognos AG.

Zitate im Sinne von § 51 UrhG sollen mit folgender Quellenangabe versehen sein: Prognos AG (2025): Industrielle Resilienz und strategische Souveränität Deutschlands.

