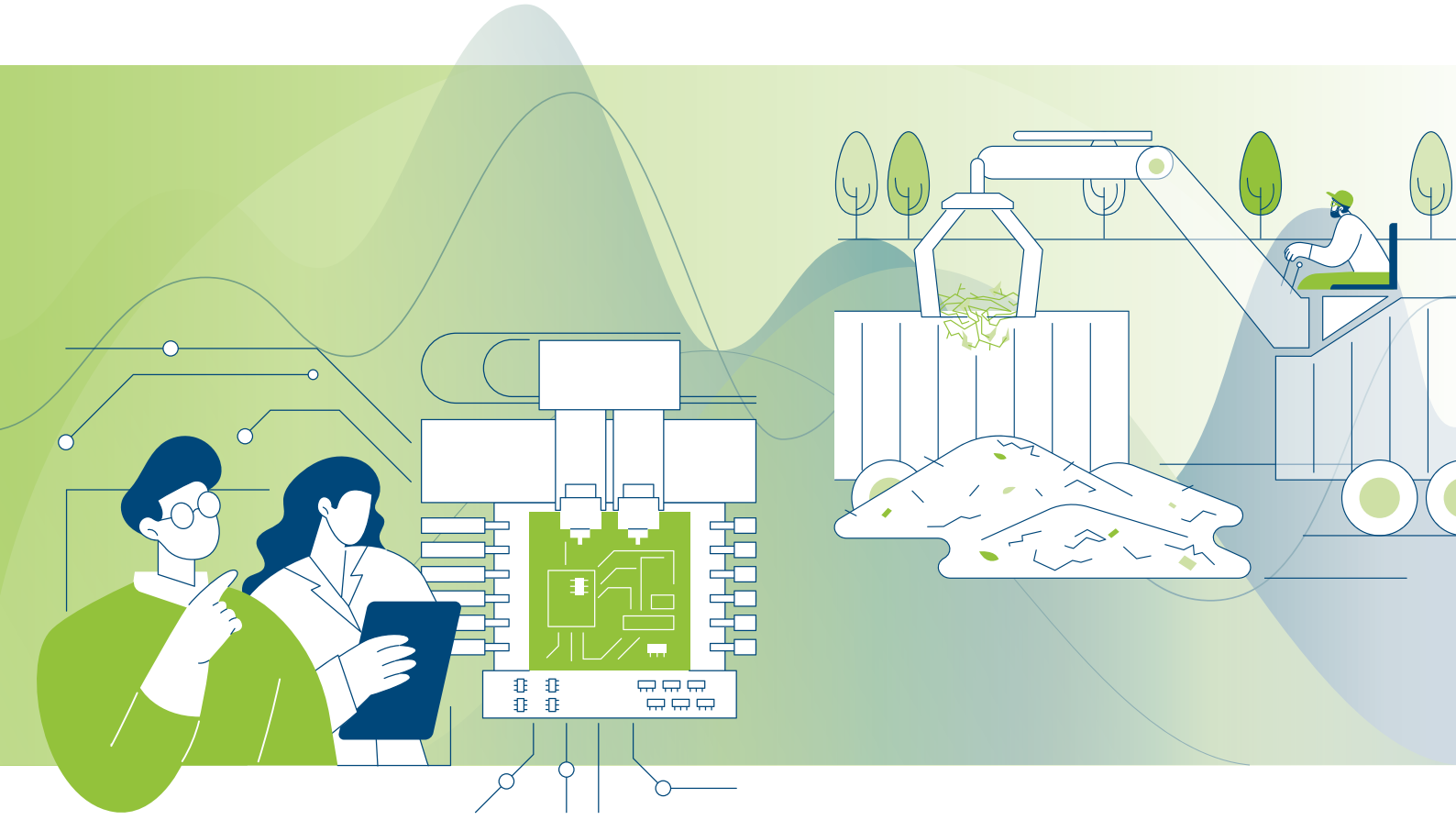
Silicium, Seltene Erden & Co.

Rohstoffstrategien für die Halbleiterproduktion



Think Tank | Netzwerk | Beratung

ARBEIT UND UMWELT
STIFTUNG DER IGBCE

Impressum

Silicium, Seltene Erden & Co.:
Rohstoffstrategien für die Halbleiterproduktion

ERSTELLT IM AUFTRAG VON
Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE
Inselstraße 6, 10179 Berlin
Königsworther Platz 6, 30167 Hannover
Telefon +49 30 2787 1325

PROJEKTLEITUNG
Dr. Regina Weber

AUTOR:INNEN
Dr. Steffen Manzer, Stephan Kraft,
excellence in change GmbH & Co. KG

REDAKTION
Dr. Regina Weber, Verena Frank, Lena Kollmuß,
Max Leyendecker

LEKTORAT
Gisela Lehmeier, Feinschliff

SATZ UND LAYOUT
Atelier Hauer + Dörfler GmbH

BILDNACHWEIS
Grafikelemente: shutterstock.com

VERÖFFENTLICHUNG
Juli 2025

BITTE ZITIEREN ALS
Stiftung Arbeit und Umwelt (Hg.), Silicium, Seltene Erden & Co.:
Rohstoffstrategien für die Halbleiterproduktion, Berlin 2025.

Copyright Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

Inhalt

Vorwort 5

Zusammenfassung 6

1 Einführung 8

2 Rohstoffe in Deutschland und der EU 9

3 Die Halbleiterindustrie 12

3.1 Chips – Herstellung und Einsatz 12

3.2 Branchenüberblick und Arbeitsmarkt 13

3.3 Geopolitische Lage 15

3.4 Kritische Rohstoffe – Import und Substitutionsmöglichkeiten 17

3.5 Ein Blick in die Zukunft 20

3.6 SWOT-Analyse der deutschen Halbleiterindustrie 22

4 Rohstoffstrategien für die Halbleiterindustrie 24

4.1 Blickpunkt Länder: Importkonzentration und Diversifikationsmöglichkeiten 24

4.2 Blickpunkt Bergbau: heimische Rohstoffvorkommen und Explorationsmöglichkeiten 26

4.3 Blickpunkt Rohstoffe: Substitutionsmöglichkeiten und Materialeffizienz 28

4.4 Blickpunkt Lebenszyklus: Kreislaufwirtschaft und Recyclingmöglichkeiten 30

4.5 Blickpunkt Strategie: Rohstoffsicherung durch eine EU-Rohstoffagentur 32

5 Fazit und Ausblick 33

Glossar 34

Literaturverzeichnis 36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Lieferländer kritischer Rohstoffe der deutschen Halbleiterindustrie, 2021–2023 10
Abbildung 2 Sektoren der globalen Halbleiterindustrie im Überblick 13
Abbildung 3 Netzwerke sowie Fertigungs- und Forschungsstandorte der Halbleiterindustrie in Deutschland 14
Abbildung 4 Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in der Halbleiterindustrie nach Berufshauptgruppe 15
Abbildung 5 Kritische Rohstoffe der Halbleiterindustrie, ihre Verwendung und das jeweils wichtigste Lieferland der EU . . 16
Abbildung 6 Rohstoffsituation in der Halbleiterindustrie 18
Abbildung 7 Zukunftstechnologien im Transformationsprozess 21
Abbildung 8 SWOT-Analyse der deutschen Halbleiterindustrie im Kontext der industriellen Transformation 23
Abbildung 9 Rohstoffkooperationsmodelle im Rahmen einer strategischen Rohstoffaußenpolitik 25
Abbildung 10 Mögliche Substitute für Silicium als Basismaterial für Wafer 29
Abbildung 11 Zuordnung von Rohstoffen der Halbleiterindustrie zu Recyclingklassen 30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Strukturgrößen von Halbleitern im Überblick 12
Tabelle 2 Rohstoffgruppenbildung mittels Zulieferkonzentration und Anwendungsvielfalt 20
Tabelle 3 Kritische Rohstoffe für die Produktion von Zukunftstechnologien im Transformationsprozess 22
Tabelle 4 Importkonzentration ausgewählter Rohstoffe im Überblick 24
Tabelle 5 Vorkommen kritischer Rohstoffe innerhalb der EU (Auszug) 26
Tabelle 6 Mögliche Substitute für Rohstoffe der Halbleiterindustrie nach Anwendungsfall (Auswahl) 28

Vorwort

Die Halbleiterindustrie ist zentraler Bestandteil industrieller und technologischer Wertschöpfungsketten. Als Basistechnologie für zahlreiche Sektoren – von Energie über Medizintechnik bis zur Kommunikationsinfrastruktur – ist ihre Relevanz angesichts der Digitalisierung sowie der Energie- und Mobilitätswende in den vergangenen Jahren stetig gestiegen. Gleichzeitig steht die Branche vor erheblichen Herausforderungen: Lieferkettenrisiken, geopolitische Spannungen und ein wachsender Bedarf setzen Produktion und Rohstoffversorgung zunehmend unter Druck.

Diese Studie analysiert die Branchenlage und die Rohstoffsituation der Halbleiterindustrie aus gewerkschaftlicher Perspektive. Dabei geht es nicht nur um die Verfügbarkeit kritischer Materialien wie Silicium, Gallium oder seltene Erden, sondern auch um die Frage, welche industriellen Strategien und politischen Maßnahmen die Souveränität und Stabilität dieser Schlüsselbranche stärken können.

Für Industriebeschäftigte ist die Analyse der Halbleiterbranche besonders relevant, da deren Produkte nicht nur die technologische Wettbewerbsfähigkeit unserer Industrien sichern, sondern auch untrennbar mit der Zukunft von Arbeitsplätzen und Qualifikationen verbunden sind. Versorgungssicherheit und eine nachhaltige industrielle Entwicklung sind daher zentrale Anliegen, die sowohl soziale als auch wirtschaftliche Dimensionen umfassen.

Die Studie bietet einen Überblick über die aktuelle Situation und zeigt, welche Chancen und Risiken sich für die Halbleiterbranche und ihre Beschäftigten ergeben. Die Ergebnisse verdeutlichen die Schwierigkeiten bei der Rohstoffversorgung, zeigen jedoch auch mögliche Lösungsansätze: Rohstoffpartnerschaften und die verstärkte Förderung von Innovationen in der Kreislaufwirtschaft sind entscheidende Ansatzpunkte. Doch auch der heimische Abbau und die Weiterverarbeitung von Rohstoffen muss wieder mehr in den Fokus unserer Aufmerksamkeit rücken. All dies wird nicht umsonst zu haben sein: Umwelt- und Sozialstandards kosten Geld. In globalen Märkten wird immer wieder versucht, sie zu unterlaufen, doch sie sollten uns als Gesellschaft etwas wert sein. Angesichts globaler Unsicherheiten müssen wir uns gemeinsam für eine resiliente und zukunftsfähige Industrie einsetzen.

Mein besonderer Dank gilt allen, die mit ihrer Expertise und ihrem Engagement zur Entstehung dieser Untersuchung beigetragen haben. Ich bin überzeugt, dass die Ergebnisse wichtige Impulse für eine nachhaltige, resiliente und sozial gerechte Industriepolitik liefern.

In diesem Sinne wünsche ich viel Spaß beim Lesen und freue mich auf den weiteren Dialog!

Dr. Regina Weber

Bereichsleiterin Transformation der Industrie, Klima-, Energie- und Strukturpolitik
Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

Zusammenfassung

Wirtschaftliche Bedeutung und strategische Abhängigkeiten

Die Halbleiterindustrie bildet das Rückgrat zahlreicher Zukunftstechnologien und ist essenziell für die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas. Ihr strategischer Stellenwert nimmt mit der Digitalisierung, der Energiewende und der industriellen Transformation weiter zu. Gleichzeitig ist die Branche in hohem Maß auf den Import kritischer Rohstoffe angewiesen, die in der Regel aus wenigen, teils geopolitisch riskanten Herkunftsländern stammen. Diese strukturelle Abhängigkeit stellt ein zentrales Risiko für die Versorgungssicherheit dar und gefährdet mittel- bis langfristig die technologische Souveränität Europas.

Globale Konzentration und verwundbare Lieferketten

Die Wertschöpfungskette der Halbleiter ist hochgradig globalisiert, spezialisiert und von geopolitischen Dynamiken geprägt. Kritische Stufen innerhalb der Lieferkette, an denen einzelne Regionen marktbeherrschende Positionen einnehmen, machen das System besonders störanfällig. Teils dominieren einzelne Staaten die Förderung und Verarbeitung für die Halbleiterproduktion unerlässlicher Materialien. Der Zugang zu diesen Rohstoffen ist zunehmend Gegenstand machtpolitischer Interessen und wirtschaftlicher Auseinandersetzungen.

Rohstoffpolitik zwischen nationalen Interessen und europäischer Koordination

Mit dem European Chips Act und dem Critical Raw Materials Act wurden erste Schritte unternommen, um die europäische Halbleiterindustrie zu stärken und eine eigenständigere Rohstoffstrategie zu etablieren. Diese Initiativen zielen unter anderem auf den Ausbau der Produktion, den Aufbau strategischer Vorräte sowie die Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit mit rohstoffreichen Drittstaaten. Gleichzeitig existieren innerhalb der Europäischen Union (EU) noch keine ausreichend koordinierten Strukturen, um eine gemeinsame Rohstoffpolitik effektiv umzusetzen.

Handlungsansätze: Partnerschaften, neue Technologien und Ressourceneffizienz

Neben politischen Maßnahmen ist auch ein technologischer Wandel erforderlich, um die Importabhängigkeit zu verringern. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die Diversifizierung der Rohstoffquellen durch neue internationale Partnerschaften sowie die Erschließung bislang ungenutzter heimischer Vorkommen. Auch die Reduktion des Rohstoffverbrauchs spielt eine entscheidende Rolle. Fortschritte im Bereich der Materialsubstitution, ressourceneffiziente Fertigungsverfahren und die Etablierung kreislauffähiger Produktdesigns leisten hierzu einen Beitrag. Insbesondere der Ausbau der Kreislaufwirtschaft wird als strategisch relevant eingestuft, auch wenn Recycling allein den steigenden Bedarf perspektivisch nicht kompensieren kann.

Vorschlag einer EU-Rohstoffagentur

Zur Bündelung bestehender Maßnahmen und zur strategischen Weiterentwicklung wird die Einrichtung einer europäischen Rohstoffagentur empfohlen. Eine solche Institution könnte zentrale Aufgaben im Bereich Monitoring, Risikovorsorge, Bevorratung, Projektunterstützung und strategischer Koordination übernehmen. Abhängig von ihrer Ausgestaltung könnte sie unterschiedliche Akteure wie Industrie, Forschung, Gewerkschaften und Zivilgesellschaft in die Entwicklung einer gemeinsamen europäischen Rohstoffpolitik einbinden.

Globale Wettbewerbsverzerrungen

Ein wesentliches Hindernis für die Umsetzung nachhaltiger Rohstoffstrategien ist die globale Wettbewerbsverzerrung durch niedrigere Umwelt- und Sozialstandards in vielen Förderländern. Staatlich subventionierte Rohstoffpolitik sowie die Missachtung internationaler Arbeits- und Umweltvorgaben führen dazu, dass europäische Alternativen im direkten Kostenvergleich häufig benachteiligt sind. Die Folge ist ein struktureller Nachteil für verantwortungsbewusst betriebene Produktion. Um dem entgegenzuwirken, bedarf es gezielter industriepolitischer Instrumente – unter anderem in Form von Förderprogrammen, strategischen Investitionen und Schutzmaßnahmen.

Schlussfolgerung: Souveränität braucht politischen Gestaltungswillen

Die Versorgungssicherheit der Halbleiterindustrie ist ein industriepolitisches Schlüsselthema mit strategischer Relevanz für die Zukunftsfähigkeit Europas. Nur ein koordiniertes Zusammenspiel aus politischem Gestaltungswillen, technologischer Innovation und gesellschaftlicher Mitwirkung ist in der Lage, eine sozial gerechte, ökologisch tragfähige und wirtschaftlich stabile Rohstoffpolitik zu realisieren.

1 Einführung

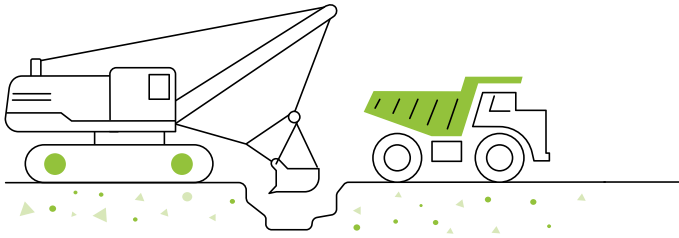
Halbleiter zählen zu den technologischen Grundbausteinen der letzten Jahrzehnte. Heute sind sie als „Allzwecktechnologie“ ein integraler Bestandteil nahezu aller technischen Produkte und sind unverzichtbar für Elektromobilität, erneuerbare Energien und die digitale Infrastruktur. Auch bei der industriellen Transformation wird ihre Bedeutung weiter zunehmen.

Vor diesem Hintergrund streben Politik und Industrie an, die Abhängigkeit von internationalen Lieferketten zu reduzieren. Der Ausbau von Fertigungskapazitäten in Deutschland und Europa wird politisch gefördert und finanziell unterstützt. Dennoch steht die deutsche Halbleiterindustrie vor erheblichen Herausforderungen: Fachkräftemangel und ökonomische Unsicherheiten verzögern den Aufbau neuer Fertigungsanlagen, was zuletzt zu Rückschlägen bei einigen prominenten Projekten führte. Parallel dazu ist die zuverlässige Versorgung der Produktion mit notwendigen Rohstoffen nicht gesichert.

Die sichere Versorgung mit kritischen Rohstoffen ist komplex: Die wachsende globale Nachfrage nach Halbleitern verschärft den Wettbewerb auf dem Rohstoffmarkt. Die Lieferkette ist hochgradig spezialisiert und geografisch konzentriert. Studien identifizieren über 50 sogenannte „Staupunkte“, an denen einzelne Regionen mehr als 65 % Marktanteil halten (Varas et al., 2021). Umso dringlicher ist es, alternative Strategien für die Rohstoffversorgung zu entwickeln und weitere Rohstoffquellen zu erschließen.

Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit werden immer bedeutsamer, doch aktuell entsprechen Abbau und Verarbeitung vieler Rohstoffe weder internationalen Klimazielen noch Sozialstandards. Die Erschließung zusätzlicher Primärquellen, der Ausbau der Kreislaufwirtschaft und besseres Produktdesign sind wichtige Hebel, um die Umweltbelastung zu reduzieren sowie die Verfügbarkeit kritischer Materialien durch verbesserte Recyclingfähigkeit zu erhöhen.

Der Schwerpunkt dieser Studie liegt auf der Rohstoffversorgung der deutschen und europäischen Halbleiterindustrie. Sie betrachtet deren Bedeutung für die technologische Souveränität sowie als Bestandteil einer strategischen Industriepolitik. Kapitel 2 skizziert die allgemeine Rohstoffsituation in Deutschland und der EU. Kapitel 3 analysiert branchenspezifische Entwicklungen und Rohstoffbedarfe der Halbleiterindustrie. Kapitel 4 zeigt konkrete Herausforderungen und Lösungsstrategien. Kapitel 5 fasst die zentralen Ergebnisse zusammen und gibt einem kurzen Ausblick.

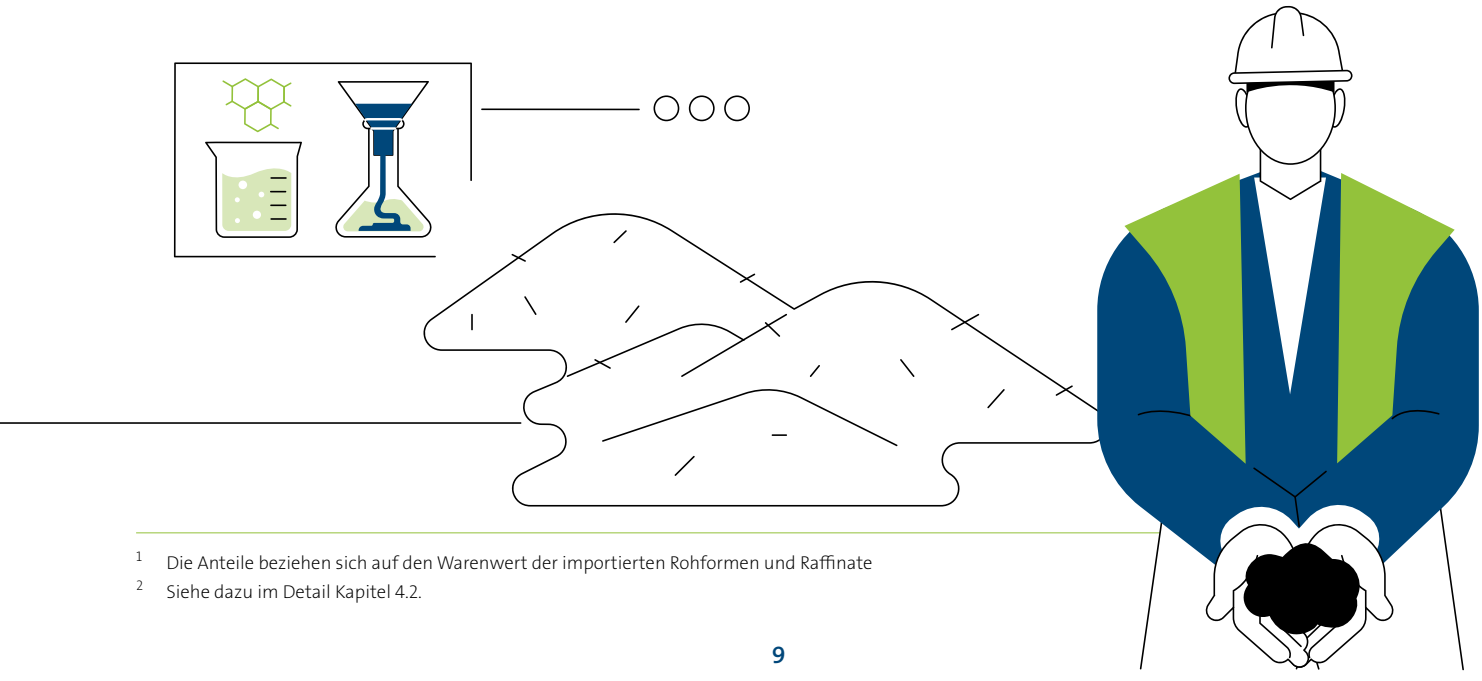


2 Rohstoffe in Deutschland und der EU

Rohstoffe sind als Ausgangsmaterialien für industrielle Produktionsprozesse unverzichtbar. Einige können in Deutschland oder Europa in größeren Mengen wirtschaftlich gefördert werden, doch viele Schlüssel- und Zukunftstechnologien sind auf Rohstoffimporte angewiesen. Die Europäische Union veröffentlicht alle drei Jahre eine Liste der sogenannten kritischen Rohstoffe: Das sind wirtschaftsstrategische Rohstoffe, die in vielen Industrien, über die gesamte Wertschöpfungskette und für moderne sowie ökologische Technologien benötigt werden, deren Versorgung jedoch aufgrund monopolartiger Strukturen, geopolitischer Spannungen oder anderer sozialer und wirtschaftlicher Differenzen als gefährdet gilt (Europäische Kommission, 2023e). Abbildung 1 zeigt, die wichtigsten Herkunftsländer kritischer Rohstoffe für die deutsche Halbleiterindustrie.[1]

Einige dieser kritischen Rohstoffe sind prinzipiell auch in Deutschland oder in der EU verfügbar. Bislang war jedoch ihre heimische Förderung unwirtschaftlicher als ihr Import.[2] Das liegt hauptsächlich an geringeren Umwelt- und Sozialstandards der heute dominierenden Herkunftsländer. Zudem erschweren geologische Gegebenheiten in Deutschland den Abbau: Manche kritischen Rohstoffe sind nur schwer zu extrahieren, enthalten nur geringe Konzentrationen oder weisen niedrige Materialqualitäten auf.

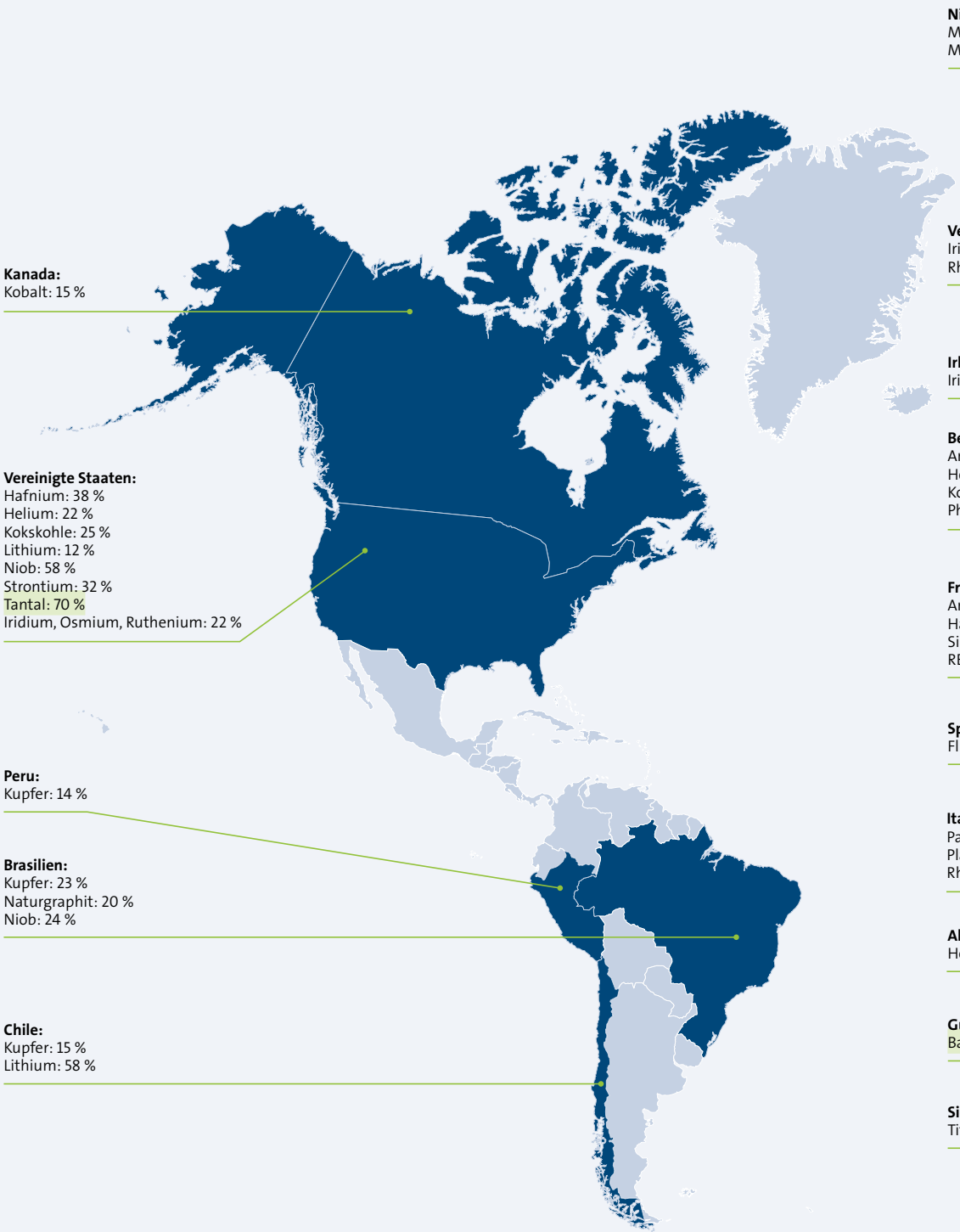
Dank technologischer Fortschritte und der stetigen Erforschung potenzieller Bergbaugebiete wurden in den vergangenen Jahren neue Vorkommen in Deutschland und der EU entdeckt, deren Abbau zukünftig wirtschaftlich sein kann. In Kapitel 4.2) werden diese Vorkommen und ihre Explorationsmöglichkeiten dargestellt.



1 Die Anteile beziehen sich auf den Warenwert der importierten Rohformen und Raffinate

2 Siehe dazu im Detail Kapitel 4.2.

Abbildung 1 **Lieferländer kritischer Rohstoffe der deutschen Halbleiterindustrie, 2021 – 2023**



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten des Statistischen Bundesamtes, Statistik 51000-0016.

Hinweise:

REE = Rare Earth Elements (= Metalle der seltenen Erden).

Lieferländern entsprechen nicht zwangsläufig den Förderländern.

Mehr als 65 % aus einem Land gleich kritische Versorgungslage.

3 Die Halbleiterindustrie

3.1 Chips – Herstellung und Einsatz

Der hoch spezialisierte Herstellungsprozess in der Halbleiterindustrie umfasst typischerweise die drei Prozessschritte Entwurf (u. a. Architektur, Chipdesign), Fertigung (u. a. Waferproduktion, Belichtung, Ätzen) sowie Montage und Prüfung der Chips (Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE, 2022). Die Wertschöpfungskette hängt dabei vom Produkt ab: Vergleichsweise kostengünstig können heutzutage Chips mit einer Strukturbreite von 65 nm von vielen Halbleiterherstellern mit eigener Fabrik (IDM[3]) entworfen und produziert werden. Modernste Hochleistungschips hingegen, mit Strukturbreiten von derzeit unter 10 nm, können in der Regel nur von spezialisierten Auftragsfertigern (Foundries) hergestellt werden, da ihre Entwurfs- und Fertigungskosten erheblich sind.[4] Auf solchen Foundries basiert das Fabless-Modell: Es ermöglicht Halbleiterherstellern, das Chipdesign vorzugeben, ohne kostspielige Produktionsstätten errichten zu müssen.[5] Und es trägt dazu bei, die Fertigungsanlagen auszulasten und so die hohen Fixkosten zu verteilen. Neben der reinen Fertigung können auch Montage und Tests der Halbleiterchips (OSAT[6]) sowie die gesamte Entwicklung und Produktion (ASIC, FPGA)[7] ausgelagert werden.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die aktuell üblichen Strukturgrößen von Halbleitern und ihre Einsatzzwecke. Für viele Bereiche und Produkte sind teure Hochleistungshalbleiter mit geringen Strukturbreiten nicht erforderlich, das gilt auch für die Kernabnehmerindustrien der deutschen Halbleiterindustrie (BMWK, 2024). Deshalb kann die europäische

Tabelle 1 Strukturgrößen von Halbleitern im Überblick

Strukturbreite	Klassifizierung	Anwendungsbeispiele	Produzenten in der EU
< 10 nm	Hochleistungshalbleiter, teuer	High-Performance-Computing (Desktop-/Server-CPUs), KI-/ML-Anwendungen, mobile Endgeräte (hohe Energieeffizienz)	Keine
ca. 10 – 28 nm	Guter Kompromiss aus Leistungsfähigkeit und Kosten	Automobilindustrie, hochwertige Mikrocontroller, Netzwerktechnik, Low-End-Smartphones	ESMC (>= 12 nm, im Bau) Globalfoundries (>= 12 nm) STMicroelectronics (>= 22 nm)
ca. 40 – 130 nm	Günstige, zuverlässige Technik	Automobilindustrie, einfachere IoT-Geräte wie Sensoren oder Wearables, günstige Mikrocontroller, z.T. Leistungselektronik	Infineon (>= 65 nm) NXP (>= 40 nm)
> 130 nm	Spezialanwendungen	Leistungselektronik (IGBTs, MOSFETs zur Steuerung hoher Ströme bzw. Spannungen)	X-FAB (>= 130 nm)

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

3 Integrated device manufacturer.

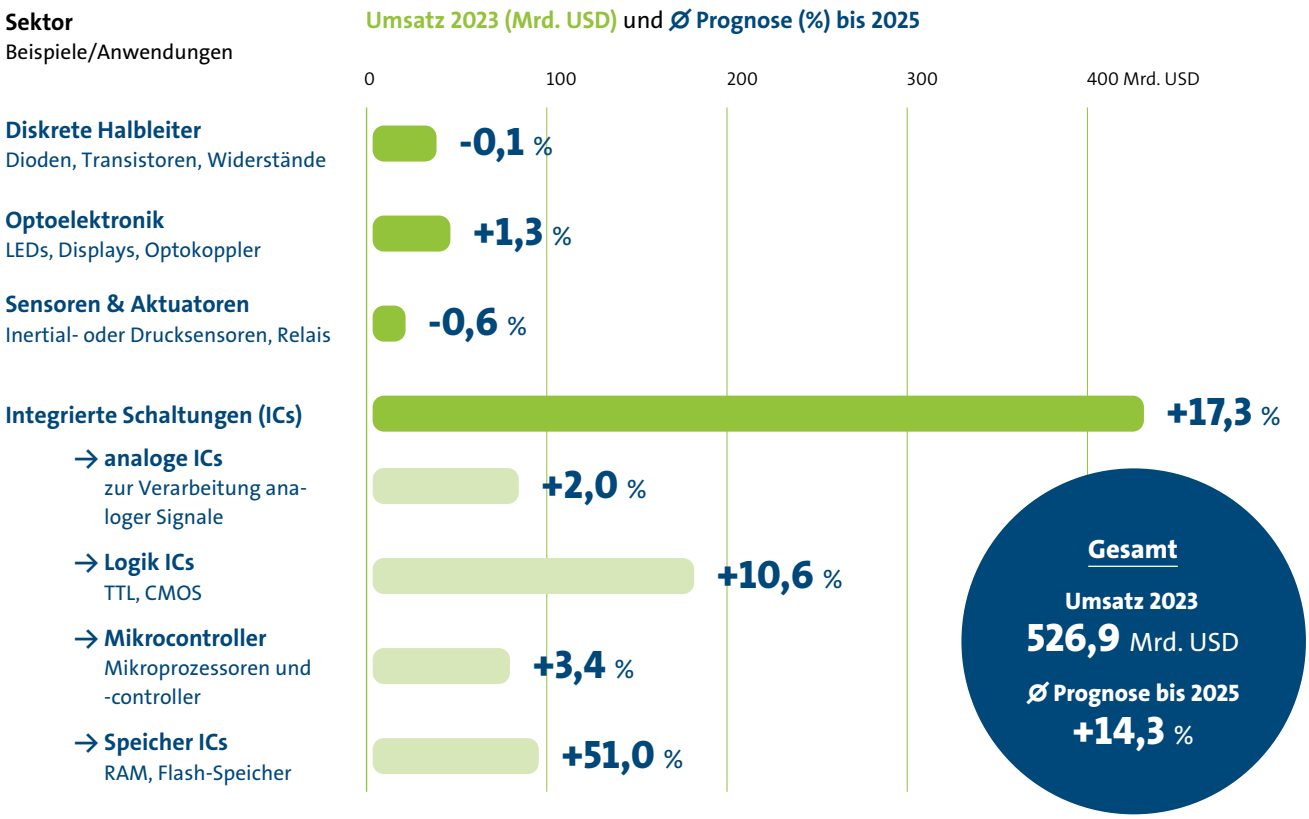
4 Nennenswerte Ausnahmen sind Intel und Samsung. Der weltgrößte Auftragsfertiger ist mit Abstand TSMC (Taiwan) vor GlobalFoundries (USA). In Europa sind beispielsweise X-FAB (Deutschland, Frankreich) und LFoundry (Italien) tätig.

5 Bekannte Fabless-Unternehmen sind Apple, AMD (durch Ausgründung von GlobalFoundries), Nvidia oder Qualcomm.

6 Outsourced semiconductor assembly and tests.

7 Application-specific integrated circuits bzw. field programmable gate arrays.

Abbildung 2 **Sektoren der globalen Halbleiterindustrie im Überblick**



Quelle: WSTS, 2024. Die Prognose stellt den durchschnittlich erwarteten Year-on-Year-Growth 2024 und 2025 dar. Rundungsbedingte Abweichungen möglich.

Halbleiterindustrie oftmals auf eigene Fertigung (IDM) setzen, lediglich für die Herstellung von High-End-ICs muss sie auf die Dienste externer Foundries wie TSMC zurückgreifen (Infineon Technologies AG, 2022). Branchenverbände fordern deshalb, dass nicht ausschließlich Hochleistungshalbleiter subventioniert werden (ZVEI e. V., 2024b).

3.2 Branchenüberblick und Arbeitsmarkt

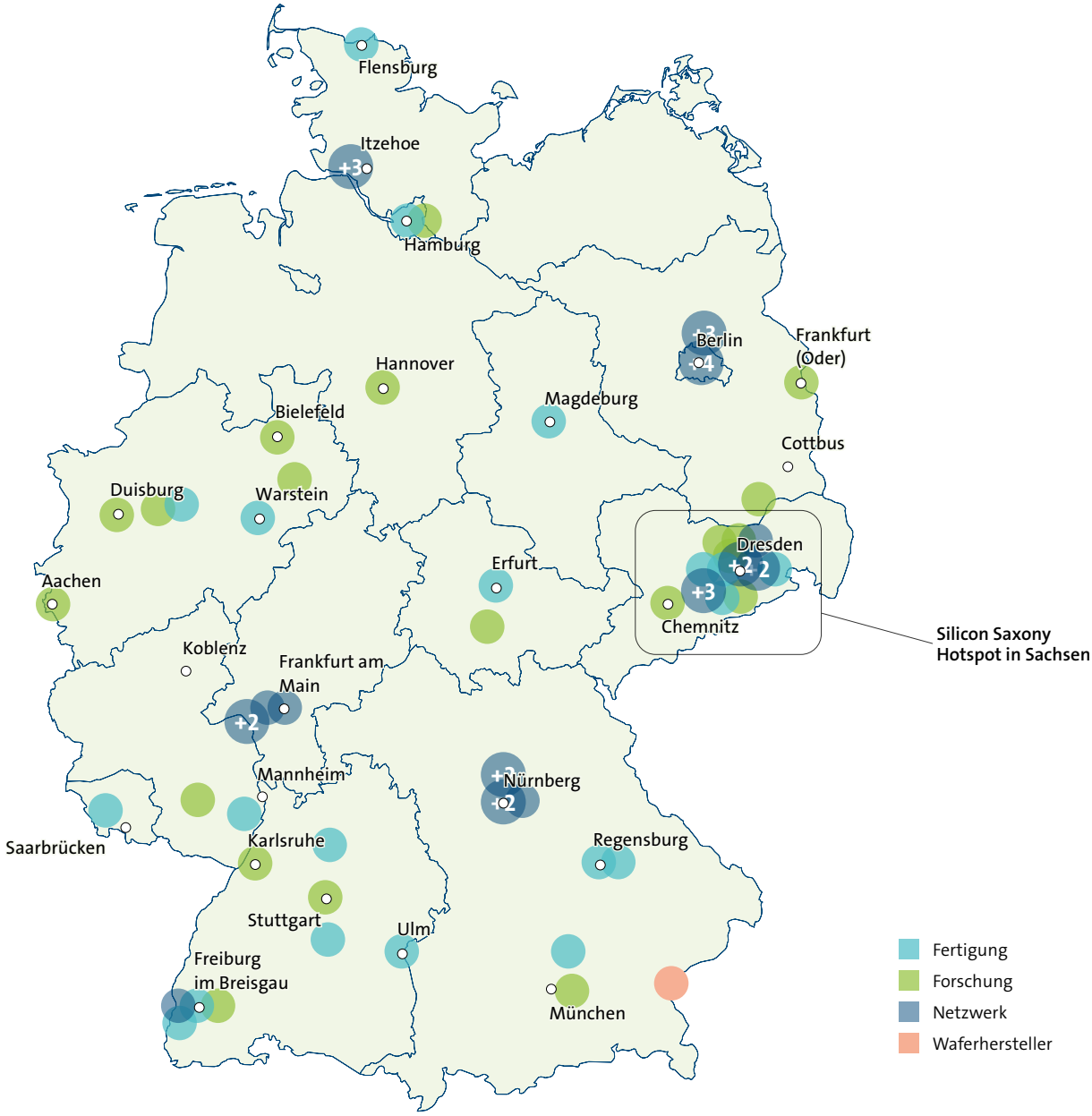
Die Halbleiterindustrie spielt eine zentrale Rolle für die deutsche und europäische Wirtschaft und Industrie. Halbleiter aus heimischer Produktion sind essenziell für zahlreiche Technologien und Anwendungen, vor allem in der Automobilindustrie und Medizintechnik, für die Energiebranche und leistungselektronische Anwendungen sowie für die Sensorik und Photonik (BMWK, 2024).

Global entwickelte sich der Umsatz der Halbleiterindustrie in den vergangenen Jahren stark positiv, wenngleich der Markt im Jahr 2023 mit einem Volumen von 527 Milliarden US-Dollar leicht rückläufig gegenüber dem Vorjahr war (574 Mrd. US-Dollar) (WSTS, 2024). Mehr als die Hälfte der weltweiten Halbleiterproduktion fand im asiatisch-pazifischen Raum statt (290 Mrd. US-Dollar), der Anteil Europas lag mit etwa 56 Milliarden US-Dollar bei rund 10,6 Prozent. Abbildung 2 veranschaulicht den Umsatz und die Wachstumsprognosen der einzelnen Halbleiter-Produktsektoren im Überblick.

In Europa belegte Deutschland beim Export von integrierten Schaltkreisen den ersten Platz: Im Jahr 2022 lag der Exportwert mit knapp 20 Milliarden US-Dollar deutlich vor Irland (11,9 Mrd. US-Dollar) und Frankreich (9,8 Mrd. US-Dollar) (Zandt, 2023). Die Halbleiterindustrie ist in mehreren deutschen Regionen vertreten, eine starke Unternehmenskonzentration gibt es in Sachsen, im sogenannten Silicon Saxony (Bovenschulte et al., 2024; Wintergerst, 2023; Silicon Saxony, 2023a). Dort wird seit August 2024 auch ein Halbleiterwerk von ESMC[8] gebaut (Silicon Saxony, 2023b; Krempl, 2024).

[8] European Semiconductor Manufacturing Company ist ein Joint Venture von TSMC, Bosch, Infineon und NXP Semiconductors.

Abbildung 3 **Netzwerke sowie Fertigungs- und Forschungsstandorte der Halbleiterindustrie in Deutschland**



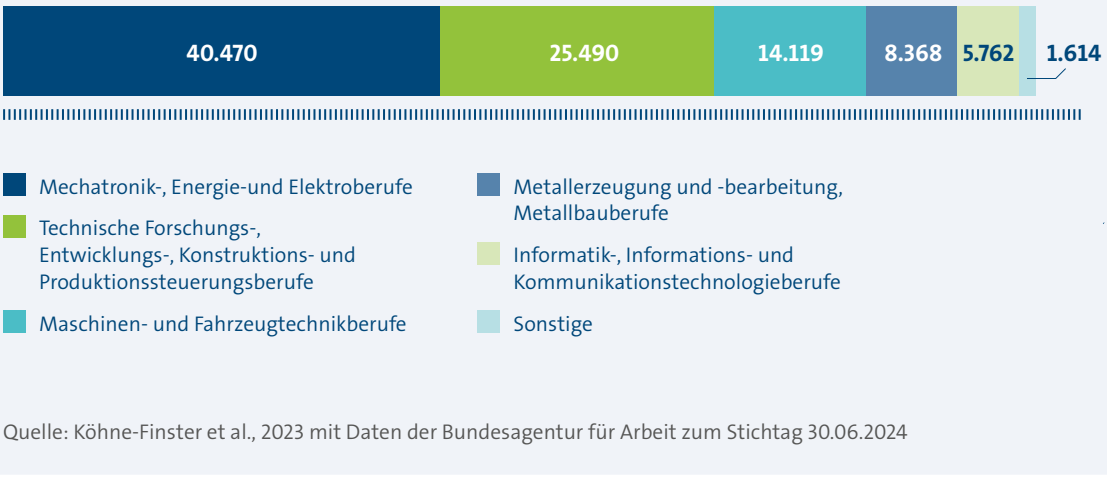
Quelle: Large & Silicon Saxony, 2024.

Ein weiterer wichtiger Standort für die Halbleiterindustrie ist Bayern; rund ein Drittel der Branchenbeschäftigten arbeitet hier. Abbildung 3 zeigt die Standorte der Halbleiterindustrie in Deutschland im Überblick.

Umsatzstarke Marktteilnehmer mit Hauptsitz und Werken in Deutschland sind Infineon (Umsatz 2023: 16,3 Mrd. €), Bosch (91,6 Mrd. €), TDK Micronas (12,7 Mrd. €), Elmos (575 Mio. €) und Diotec Semiconductor (40 Mio. €).[9] Auch mehrere internationale Unternehmen, etwa GlobalFoundries, Nexperia, X-FAB oder Littelfuse, haben Produktionsstandorte in Deutschland.

[9] Unternehmensangaben. Die Umsätze von Bosch und TDK (hier für das Geschäftsjahr 2024) umfassen jeweils den gesamten Mischkonzern. Diese exemplarische Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Abbildung 4 **Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in der Halbleiterindustrie nach Berufshauptgruppe**



Quelle: Köhne-Finster et al., 2023 mit Daten der Bundesagentur für Arbeit zum Stichtag 30.06.2024

Zum Stichtag 30.06.2024 arbeiteten in der Halbleiterindustrie in Deutschland knapp 95.800 sozialversicherungspflichtig Beschäftigte.[10] Abbildung 4 zeigt die Aufteilung der Beschäftigten nach Berufshauptgruppe. Der Fachkräftemangel zeigt sich auch in dieser Branche deutlich und wird sich in den kommenden Jahren noch verschärfen: Bereits 2022 konnte rechnerisch jede zweite offene Stelle nicht besetzt werden (ZVEI e. V., 2024a; Köhne-Finster et al., 2023).

3.3 Geopolitische Lage

Die Halbleiterwertschöpfungskette ist komplex, stark spezialisiert und global verteilt. Diese Struktur macht die Branche anfällig für geopolitische Spannungen, technologische Abhängigkeiten und logistische Störungen. Um solchen Risiken langfristig entgegenzuwirken und die eigene Position zu stärken, hat die **Europäische Union** im September 2023 den *European Chips Act* verabschiedet. Mit einem Gesamtbudget von 43 Milliarden Euro aus öffentlichen und privaten Mitteln verfolgt die EU mehrere Ziele (Europäische Kommission, 2023c):

- Stärkung der europäischen Führungsrolle in Forschung und Technologie
- Ausbau der Produktionskapazitäten auf 20 Prozent bis 2030
- Förderung von Innovation entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Design, Fertigung, Packaging)
- Verbesserung des Verständnisses und der Resilienz globaler Halbleiterlieferketten

Außerdem stellte die EU-Kommission im Februar 2025 den *Clean Industrial Deal (CID)* vor. Dieser industriepolitische Plan zielt unter anderem auf eine gemeinsame Rohstoffbeschaffung in der EU. Hinzu kommen Initiativen zur Senkung der Energiepreise und zur Förderung der Kreislaufwirtschaft – beides relevante Faktoren für die ressourcen- und energieintensive Halbleiterproduktion. Durch die Integration von Nachhaltigkeits- und Resilienzkriterien in öffentliche Ausschreibungen soll zudem die Nachfrage nach europäisch produzierten Halbleitern stimuliert werden (Europäische Kommission, 2025).

Auch international intensivierten führende Industrieländer ihre Förderstrategien:

- In den **USA** wurde 2022 der *CHIPS and Science Act* mit einem Budget von rund 280 Milliarden US-Dollar verabschiedet, der ähnliche Zielsetzungen wie der EU-Chips-Act verfolgt (Mantel, 2022).
- **Taiwan** stärkte seine Halbleiterbranche mit dem *Statute for Industrial Innovation* (2023) durch steuerliche und regulatorische Erleichterungen. Ziel ist die Absicherung

[10] Basierend auf einer Sonderauswertung der Bundesagentur für Arbeit. Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte der Berufshauptgruppen 26.11, 26.12 und 33.13 der WZ 2008 nach aggregierten Berufshauptgruppen der KldB 2010 in Anlehnung an Köhne-Finster et al., 2023.

seiner Schlüsselrolle als Produktionsstandort – ein strategischer Faktor im geopolitischen Konflikt mit China, bekannt unter dem Begriff „Silicon Shield“ (Huang, 2021; Garreffa, 2024).

- **China** verstärkte 2024 mit dem *Big Fund III* seine Bemühungen, technologische Eigenständigkeit zu erreichen und sich im Bereich Hochleistungshalbleiter international zu behaupten (Bork, 2024b).

- **Japan** kündigte zuletzt umfangreiche Subventionen zur Stärkung seiner Halbleiterindustrie an (Knobloch, 2024).

Die geopolitischen Spannungen verstärken den Handlungsdruck. Seit der US-Präsidentschaft Donald Trumps ist die Halbleiterbranche verstärkt von Handelskonflikten betroffen. Zölle auf Halbleiter und Fertigungsmaschinen wurden teils abrupt eingeführt und wieder aufgehoben. China reagierte mit Gegenzöllen und gezielten Ausnahmen für US-Produkte, um eigene strategische Interessen zu wahren. Zusätzlich erschwerten chinesische Exportkontrollen für seltene Erden die globale Versorgungslage und erhöhten die Unsicherheit insbesondere für US-amerikanische Unternehmen (Hofer, 2025; Reuters, 2025).

Vor diesem Hintergrund ist die Umsetzung der europäischen Ziele unsicher. Mehrere Großprojekte – etwa die Fabriken von Intel in Magdeburg oder Wolfspeed im Saarland – haben sich verzögert. Gleichzeitig erschwert der globale Subventionswettbewerb die Positionierung Europas

Abbildung 5 **Kritische Rohstoffe der Halbleiterindustrie, ihre Verwendung und das jeweils wichtigste Lieferland der EU**

Antimon

63 % aus der Türkei
Dotierung (III-V-Verbindungshalbleiter: Detektoren, LED, PV)

Arsen

60 % aus Belgien
GaAs-Halbleiter (III-V), u. a. für Hochfrequenzanwendungen; Wafer

Bauxit/Aluminium

62 % aus Guinea
Chipoberflächen, Verdrahtung

Beryllium

n. a.
als Legierungsbestandteil zur Kontaktierung

Germanium

45 % aus China
Hochfrequenztechnik, Detektoren, Solarzellen, Glasfaserkabel

Hafnium

49 % aus Frankreich
Hafnium(IV)-oxid als Dielektrikum, Hafniumnitrid zur Erhöhung der Stabilität von Dioden, Transistoren und Schaltkreisen

Helium

34 % aus Quatar
Kühlmittel, Lecksuche, Laseranlagen, Festplatten, (Atemgas), MRT

Kobalt

n. a.
Akkus, Medizintechnik (Tracer, Krebstherapie)

Mangan

41 % aus Südafrika
Verbindungshalbleiter, LEDs

Naturgraphit

40 % aus China
als Graphen zukünftig ggf. Ersatz für Silicium; Lithium-basierte Akkus

Niob

n. a.
Kondensatoren

Phosphor

65 % aus Kasachstan
zur Dotierung (bspw. LEDs), Ätzen von Wafern

Titanmetall

36 % aus Kasachstan
für Varistoren; als Leiter, Halbleiter oder Isolator; in Sensoren

Wolfram

31 % aus China
Elektrodenmaterial, Kontaktierung

PGM

n. a.
Elektrische Kontakte, Kristalle, Thermoelemente, Implantate

REE

n. a.
LEDs, Legierungen, Motoren/Generatoren

als führenden Produktionsstandort. Mehrere Studien fordern eine Überarbeitung der EU-Strategie, etwa in Bezug auf Zielsetzung, Fördervolumen und Koordination (Mantel, 2024; Röhl & Rusche, 2024; Sokolov, 2024b). Im April 2025 kam der Europäische Rechnungshof zu dem Schluss, dass die Ziele des Chips Act voraussichtlich nicht erreicht werden. Die Umsetzung ist derzeit stark von den Investitionsentscheidungen einzelner Unternehmen geprägt; außerdem mangelt es an verbindlicher Finanzierung und einer klaren Governance-Struktur (European Court of Auditors, 2025).

Ob die europäischen Maßnahmen ausreichen, um dauerhaft wettbewerbsfähig und souverän zu bleiben, wird entscheidend durch ihre Umsetzung sowie durch internationale Entwicklungen bestimmt.

3.4 Kritische Rohstoffe – Import und Substitutionsmöglichkeiten

Die Halbleiterindustrie ist beim Herstellungsprozess von Wafern, Chips oder anderen elektronischen Komponenten auf zahlreiche spezifische Rohstoffe angewiesen, als Ausgangsstoff oder als Prozesshilfsmittel. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die kritischen Rohstoffe der EU, die in der Halbleiterindustrie verwendet werden, sowie über das jeweils wichtigste Lieferland der EU mit seinem Lieferanteil (Europäische Kommission, 2023e).

Die meisten dieser Rohstoffe muss die EU derzeit importieren. Abbildung 6 zeigt die Importabhängigkeit, den Ersetzbarkeitsindex sowie die End-of-Life-Recycling-Einsatzquote der relevanten kritischen Rohstoffe der Halbleiterindustrie. Zwar werden je nach gewünschter Halbleitereigenschaft

Bismut

50 % aus China
Bismut-Zinn als Ersatz bleihaltiger Lote

Borate

99 % aus der Türkei
Flussmittel, Planarisierung der Wafer-Oberfläche

Flussspat

33 % aus Mexiko
Im Herstellungsprozess von Si-Halbleitern und -Solarmodulen

Gallium

71 % aus China
III-V-Verbindungshalbleiter, u.a. für Hochfrequenzanwendungen

Kokskohle

26 % aus Polen
Hochreine CFC-Außentiegel für Kristallzucht, Elektroden für Akkus

Kupfer

19 % aus Polen
Verdrahtung

Lithium

79 % aus Chile
Lithium-Polymer-Akkus, Lithiumniobate für Laser

Magnesiummetall

97 % aus China
als Reduktionsmittel, Kommunikationstechnologie, Implantate

Phosphorit

27 % aus Marokko
zur Herstellung von Phosphor

Siliciummetall

33 % aus Norwegen
Grundstoff zur Waferherstellung für Halbleiter, Solarmodule u. a.

Strontium

99 % aus Spanien
LC-Displays, Ferritmagnete

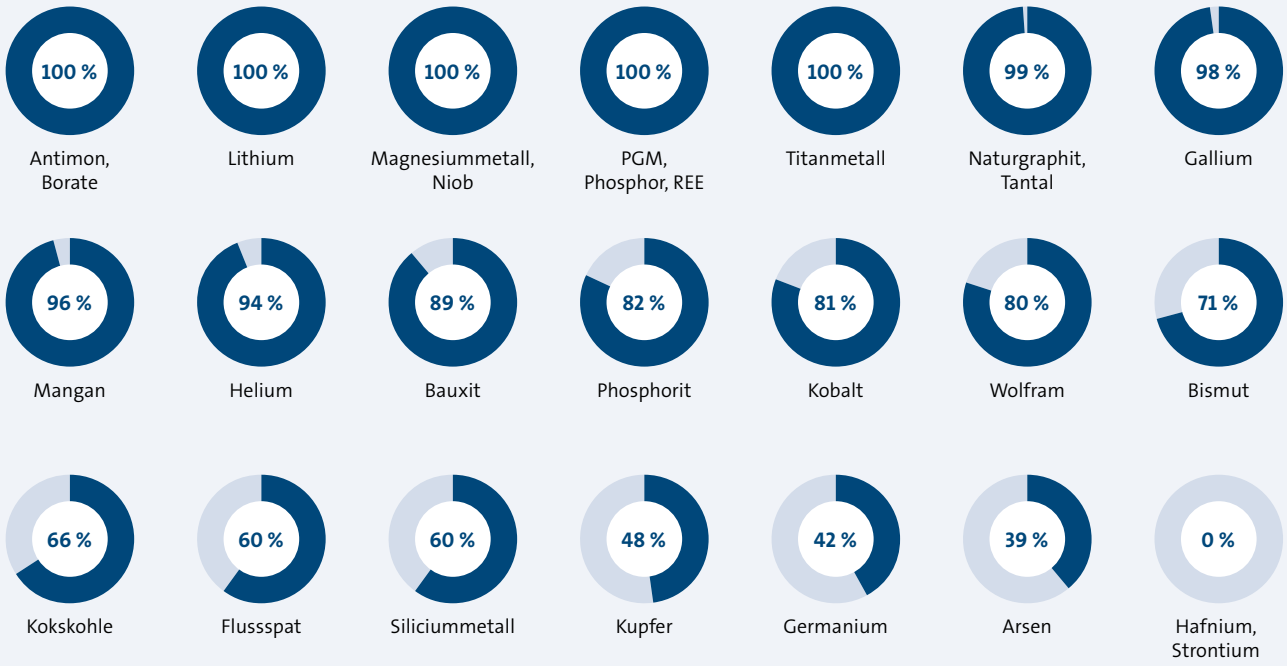
Tantal

n. a.
Kondensatoren

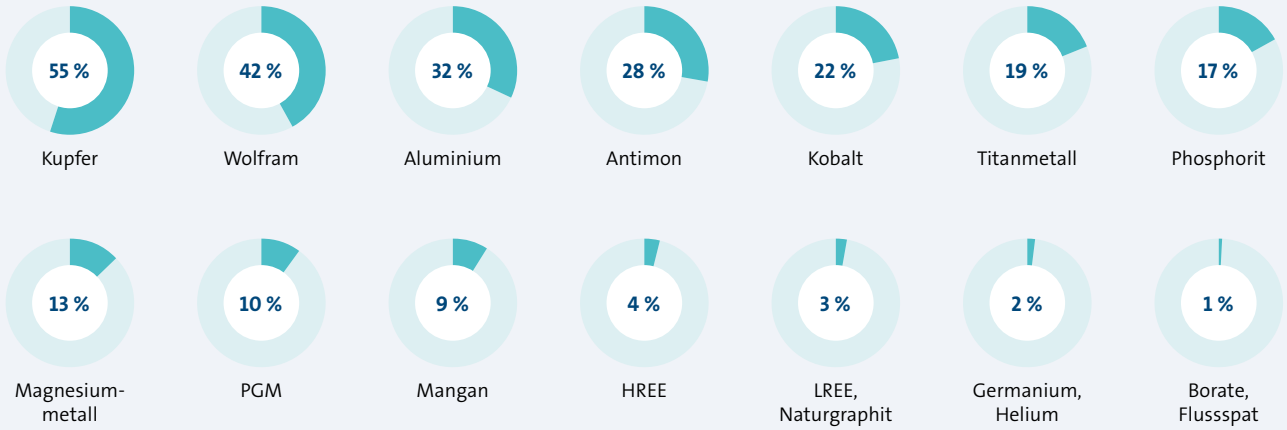
Quelle: Europäische Kommission, 2023d, eigene Zusammenstellung.

Abbildung 6 **Rohstoffsituation in der Halbleiterindustrie**[11]

Importabhängigkeit der EU



End-of-Life-Recycling-Einsatzquote



Quelle: Europäische Kommission, 2023e.

[11] Für nicht genannte Rohstoffe waren keine öffentlichen Daten verfügbar. Eine Erläuterung der dargestellten Indizes und Quoten erfolgt im Glossar. Der Ersetzbarkeitsindex für leichte (LREE) und schwere (HREE) seltene Erden basiert auf dem Mittelwert der jeweiligen seltenen Erden.

Ersetzbarkeitsindex

unterschiedliche Rohstoffe benötigt, doch die grundsätzliche Abhängigkeit von vielen kritischen Primärrohstoffen lässt sich nicht ohne Weiteres reduzieren. In Spezialanwendungen können verschiedene Substitute herangezogen werden, sie zählen jedoch entweder ebenfalls zu den kritischen Rohstoffen und haben schlechtere technische Eigenschaften, oder sie sind erheblich teurer. Kapitel 4.3) betrachtet die verfügbaren Substitutionsmöglichkeiten in der Halbleiterindustrie im Detail. Technisch ist heute auch das Recycling von Halbleitern zur Wiedergewinnung von Rohstoffen möglich, in der Praxis ist es jedoch aufwendig und oft nur begrenzt wirtschaftlich. Der Stand der Kreislaufwirtschaft in der Halbleiterindustrie wird in Kapitel 4.4) erläutert.

3.5 Ein Blick in die Zukunft

Moderne Schlüssel- und Zukunftstechnologien des Transformationsprozesses basieren auf Halbleitern, die viele neuartige Techniken und Prozesse erst möglich machen: Halbleiter und vor allem Mikrochips gelten als „Rohstoff des 21. Jahrhunderts“ (Bundesregierung, 2023; Schneid, 2021). Die Entwicklung der Elektromobilität, die Energiewende, moderne Kommunikationsnetze oder Anwendungen mit künstlicher Intelligenz wären ohne Halbleiter und Mikrochips kaum realisierbar. In vielen Bereichen ermöglichen sie die Weiterentwicklung bestehender Prozesse hinsichtlich Geschwindigkeit, Effizienz, Komfort und Sicherheit. Moderne Sensor- und Steuerungstechnik ist nötig für automatisiertes bis autonomes Fahren sowie eine flexible, vernetzte Fertigung und Produktion. Mit moderner Leistungs- und Optoelektronik lässt sich beispielsweise die Energieeffizienz in der Energiewandlung und in Beleuchtungsanwendungen erheblich steigern. Intelligente Verkehrssteuerungssysteme können den Verkehrsfluss verbessern und damit Wartezeiten und Energieverbrauch reduzieren. Auch im Bereich der Medizintechnik bieten kleine, leistungsfähige Halbleiter viele Chancen, etwa smarte Implantate. Abbildung 7 (S. 21) zeigt diese zukunftsweisenden Schlüsseltechnologien im Überblick.

Die Halbleiterindustrie liefert wesentliche Vorprodukte für zahlreiche nachgelagerte Abnehmerindustrien, die Schlüsseltechnologien herstellen. Deshalb ist deren Rohstoffverwendung ein geeignetes Kriterium, um die Kritikalität eines Rohstoffs auf der Anwendungsseite einzustufen: Je mehr Schlüsseltechnologien den Rohstoff benötigen, umso bedeutsamer ist er für den Transformationsprozess.

Hilfreich ist zudem ein Blick auf die Beschaffungsseite: Je geringer die Diversifikation[12] der Lieferländer eines Rohstoffs ist, umso größer sind die Importabhängigkeiten von einzelnen Ländern. Ist es zudem kaum möglich, einen Rohstoff durch qualitativ und preislich vergleichbare oder besser verfügbare Stoffe zu ersetzen, erhöht dies die Rohstoffkritikalität zusätzlich.

Kombiniert man die beiden ersten Kriterien, lässt sich die Kritikalität von Rohstoffen in moderat, erhöht und hoch einteilen. Die Rohstoffe mit einer besonders hohen Kritikalität werden in zahlreichen Schlüsseltechnologien eingesetzt und wegen ihrer geringen Diversifikation gibt es zugleich vergleichsweise große Beschaffungsrisiken. Tabelle 2 zeigt

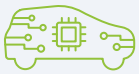
Tabelle 2 **Rohstoffgruppenbildung mittels Zulieferkonzentration und Anwendungsvielfalt**

Kritikalität	Lieferquellen Deutschlands	Verwendung in Schlüsseltechnologien	Rohstoffe
Moderat	Diversifiziert	Gering (< 50 %)	Helium, Kobalt, Mangan, Naturgraphit, PGM
Erhöht	Konzentriert	Gering (< 50 %)	Germanium, Lithium, Magnesiummetall
	Diversifiziert	Hoch (≥ 50 %)	Antimon, Flussspat, Hafnium, Kupfer, Phosphor, Siliciummetall, Tantal, Titanmetall, Metalle der seltenen Erden
Hoch	Konzentriert	Hoch (≥ 50 %)	Arsen, Bauxit, Beryllium, Bismut, Borate, Gallium, Kokskohle, Niob, Strontium, Wolfram

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2023, Statistik 51000-0010/-0016, Daten für 2023

[12] Die Diversifizierung wurde hier anhand des Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) bestimmt. Werte von 0,3 oder höher wurden als konzentriert, Werte unter 0,3 als diversifiziert interpretiert (Flach et al., 2022).

Abbildung 7 **Zukunftstechnologien im Transformationsprozess**



Automatisiertes Fahren

Die stetige Weiterentwicklung von Fahrassistenzsystemen hin zum autonomen Fahren birgt auf der Basis von Halbleitertechnologien das Potenzial, den Verkehrssektor sicherer und effizienter zu gestalten.

Fertigungsprozesse

Die Umstellung der industriellen Produktion auf intelligente, vernetzte und flexible Abläufe („Digitalisierung“) erfordert heute vielfältige Sensortechnik und halbleitergestützte Steuerungen.

Kommunikation

Moderne Kommunikationsnetze wie LTE+/5G, WLAN und Bluetooth und die zugehörigen Endgeräte (bspw. PCs/ Laptops, Smartphones, IoT) benötigen mikroelektronische Komponenten aus dem Bereich der Hochfrequenztechnik, Opto- und Leistungselektronik sowie Prozessoren.

Künstliche Intelligenz

Training und Betrieb einer KI erfordern immense Rechenleistung und Energie. Für eine breite Anwendung sind daher spezialisierte, energieeffiziente Hochleistungshalbleiter erforderlich.

Medizintechnik

Halbleiter sind Grundlage moderner diagnostischer und therapeutischer Medizingeräte (bspw. MRT, implantierbare Sensoren, Insulinpumpen, bionische Augen).

Elektromobilität

Der Ausbau der Elektromobilität ist ein wichtiger Baustein in der Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Elektroautos erfordern Halbleitertechnologien beispielsweise zur Ansteuerung der Motoren oder für eine leistungsfähige Laderegelung.

Energiewende

Die Energiewende basiert wesentlich auf der Nutzung erneuerbarer Energiequellen (Photovoltaik, Windkraft). Ein weiterer Erfolgsfaktor ist die intelligente Bereitstellung von Speicher- und Regelleistung zum Ausgleich von Schwankungen auf Last- und Erzeugungsebene sowie eine daran angepasste Netzsteuerung (Smart Grid).

Intelligente Energienutzung

Moderne Leistungs- und Optoelektronik spielt eine bedeutende Rolle bei der adaptiven Laststeuerung (Smart Meter) und Steigerung der Energieeffizienz, bspw. bei der Ansteuerung von Motoren, in Beleuchtungsanwendungen (LEDs) oder bei der Energieübertragung (HGÜ*).

Verkehr und Logistik

Die intelligente und bedarfsgerechte Steuerung von Warenströmen kann dazu beitragen, Transportwege zu verkürzen und unnötige Fahrten vermeiden. Intelligente Verkehrssteuerungssysteme (bspw. Ampeln, Bahnsignalanlagen) können den Verkehrsfluss situativ steuern, Wartezeiten reduzieren und die Unfallgefahr reduzieren.

* Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, ein Verfahren zur Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen und damit eine Alternative zur verbreiteten Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung.

Quelle: Eigene Zusammenstellung aufbauend auf Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE, 2022, S. 14.

die Zuordnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe der Halbleiterindustrie in diese Rohstoffgruppen anhand der direkten Lieferländer Deutschlands (ohne Betrachtung verketteter Abhängigkeiten).

Zehn der für die Halbleiterindustrie relevanten kritischen Rohstoffe der EU haben eine besonders hohe Kritikalität. Tabelle 3 veranschaulicht ihre EU-Importabhängigkeit, ihre Substitutionsfähigkeit sowie ihre Bedeutung für die oben genannten Schlüsseltechnologien.

3.6 SWOT-Analyse der deutschen Halbleiterindustrie

Um die Gesamtsituation der deutschen Halbleiterindustrie beurteilen zu können, wird im Folgenden die beschaffungs- und anwendungsseitige Rohstoffkritikalität aus deutscher Perspektive in einer SWOT-Analyse (S. 23) zusammengefasst.

Die Analyse der brancheninternen und -externen Aspekte der industriellen Transformation erlaubt es, strategische Handlungsmaßnahmen abzuleiten. Ihre Umsetzung ist erforderlich, um die Rohstoffversorgung der Halbleiterindustrie in Deutschland dauerhaft zu gewährleisten, damit sie ihre zentrale Rolle im Transformationsprozess wahrnehmen kann. Die verschiedenen Handlungsoptionen werden im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

Tabelle 3 **Kritische Rohstoffe für die Produktion von Zukunftstechnologien im Transformationsprozess**

Kritische Rohstoffe der Halbleiterindustrie mit Anwendung in fünf oder mehr Schlüsseltechnologien	Indikatoren			Schlüsseltechnologien								
	Import-abhängigkeit	Substitution (SI_{EI})	Substitution (SI_{SR})	Automatisiertes Fahren	Elektromobilität	Energiewende	Fertigungsprozesse	Intelligente Energienutzung	Kommunikation	KI	Medizintechnik	Verkehr und Logistik
Arsen	39 %	0,86	0,96	●		●	●	●	●			●
Bauxit / Aluminium	89 %	0,82	0,86	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Beryllium	n. a.	0,99	0,99	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bismut	71 %	0,95	0,92	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Borate	100 %	0,99	0,99	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Gallium	98 %	0,98	0,98	●		●	●	●	●			
Kokskohle	66 %	1,00	1,00	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Niob	100 %	0,93	0,96	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Strontium	0 %	0,98	0,97		●	●	●		●		●	
Wolfram	80 %	0,95	0,96	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Quelle: Europäische Kommission, 2023e, eigene Zusammenstellung.

Abbildung 8 **SWOT-Analyse der deutschen Halbleiterindustrie im Kontext der industriellen Transformation**

Stärken (Strength)

Beschaffungsseitig:

+ Maßnahmen zum Rohstoffrecycling und zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft werden intensiviert
+ Zunehmende Wahrnehmung der Abhängigkeiten stärkt die gesellschaftliche Akzeptanz für heimischen Rohstoffabbau

Anwendungsseitig:

+ Starke Basis in der Forschung und enge Zusammenarbeit mit Unternehmen fördert Entwicklungen im Bereich neuer Materialien, Fertigungstechnologien und Energiemanagement
+ Führungsrolle im Bereich von Leistungshalbleitern und Automotive-Chips

Schwächen (Weaknesses)

Beschaffungsseitig:

- Hohe Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen (i. e. mit gleichzeitig hoher Marktkonzentration und hoher Bedeutung für Zukunftstechnologien)
- Hohe Abhängigkeit von Weltmarktpreisen für Rohstoffe, die aufgrund von Ereignissen mit Einfluss auf das beschränkte Angebot sehr volatil sein können
- Abhängigkeit im Bereich moderner Strukturbreiten (< 10 nm)

Anwendungsseitig:

- Hohe Abhängigkeit von Transformationstrends und Anwenderindustrien (z. B. Elektromobilität: Automobilindustrie; Energiewende: Photovoltaikindustrie)

Chancen (Opportunities)

Beschaffungsseitig:

+ Diversifikation der Lieferländer durch Aufbau neuer Rohstoffpartnerschaften i. V. m. neuen Lieferverträgen
+ Exploration / Exploitation heimischer Rohstoffvorkommen zur Steigerung der Unabhängigkeit
+ Substitution kritischer Rohstoffe durch Werkstoffe mit vergleichbaren Eigenschaften / Kosten

Anwendungsseitig:

+ Wachstum in Kernanwenderindustrien durch zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs (Automotive-Chips) und Energiewende (Leistungshalbleiter)
+ Wiederansiedlung von Anwenderindustrien der Schlüsseltechnologien (z. B. PV, Chipproduktion durch Infineon, Batterieherstellung/-recycling durch BASF)

Risiken (Threats)

Beschaffungsseitig:

- Geopolitische Konflikte mit Handelssanktionen (Russland) und Spannungen (China) mit Exportbeschränkungen, Rohstoffverknappung, -verteuerung
- Fragilität globaler Lieferketten, die z. B. während der Pandemie zu Lieferengpässen führte

Anwendungsseitig:

- Standortbedingungen (z. B. Energiepolitik, Umweltauflagen, Regulierungen) bergen das Risiko der Abwanderung der Halbleiterindustrie ins Ausland
- Abwanderung von Anwenderindustrien aus Deutschland und der EU ins Ausland (z. B. Photovoltaik, Windenergie)
- Weltweit erheblicher Konkurrenzdruck, verstärkt durch beträchtliche staatliche Förderungen
- Wachstumsprognose für Sensorik leicht negativ

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

4 Rohstoffstrategien für die Halbleiterindustrie

4.1 Blickpunkt Länder: Importkonzentration und Diversifikationsmöglichkeiten

Die Kapitel 3.4) und 3.5) verdeutlichen die Abhängigkeit der (deutschen) Halbleiterindustrie von den kritischen Rohstoffen, die für den erfolgreichen Transformationsprozess erforderlich sind, unter anderem für die Produktion von Schlüsseltechnologien. Viele davon werden auch in absehbarer Zukunft vollständig oder größtenteils in die EU und nach Deutschland importiert werden müssen.

Besonders problematisch ist dies bei Rohstoffen, die nur aus wenigen oder gar einzelnen Ländern bezogen werden, da geopolitische Spannungen, Exportbeschränkungen oder Lieferunterbrechungen die Produktion in der deutschen Halbleiterindustrie massiv beeinträchtigen können. Ein aktuelles Beispiel ist die zunehmende Exportbeschränkung von Gallium und Germanium durch China: Abhängigkeiten können wiederkehrend gezielt eingesetzt werden, um politische Forderungen durchzusetzen (Henke, 2024; BGR, 2023; Sokolov, 2023). Dass sich die Importkonzentrationauch bei Zwischenprodukten erhöht, etwa bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren, steigert das Risiko für die deutsche Wirtschaft zusätzlich (Bernhart et al., 2024).

Tabelle 4 zeigt exemplarisch einige kritische Rohstoffe der Halbleiterindustrie mit hoher Importkonzentration und dem zugehörigen Länderrisiko[13] des hauptsächlichen Herkunftslandes. Zwar muss eine hohe Importabhängigkeit einzelner Länder nicht zwangsläufig mit einem (besonders) kritischen Länderrisiko einhergehen, wie das Beispiel Lithium zeigt. Doch bei vielen wirtschaftsstrategischen Rohstoffen der EU ist das der Fall (Europäische Kommission, 2023a).

Ein wesentlicher Ansatz zur Reduktion derartiger Konzentrationsrisiken ist es, neue Rohstoffpartnerschaften mit weiteren Ländern aufzubauen und bestehende zu vertiefen (Bernhart et al., 2024). Die EU sieht im Rahmen des Europäischen Gesetzes zu kritischen Rohstoffen (CRMA[14]) vor, bis zum Jahr 2030 nicht mehr als 65 Prozent eines Rohstoffs aus einer einzigen Quelle zu beziehen (Europäische Kommission, 2023b).

Tabelle 4 **Importkonzentration ausgewählter Rohstoffe im Überblick**

Rohstoff	Importabhängigkeit (EU)	Lieferland (Anteil an Lieferungen an die EU)	Länderrisiko
Antimon	100 %	Türkei (63 %)	- 0,53
Bauxit	89 %	Guinea (62 %)	- 1,00
Borate	100 %	Türkei (63 %)	- 0,53
Gallium	98 %	China (71 %)	- 0,29
Lithium	100 %	Chile (79 %)	0,73
Magnesiummetall	100 %	China (97 %)	- 0,29

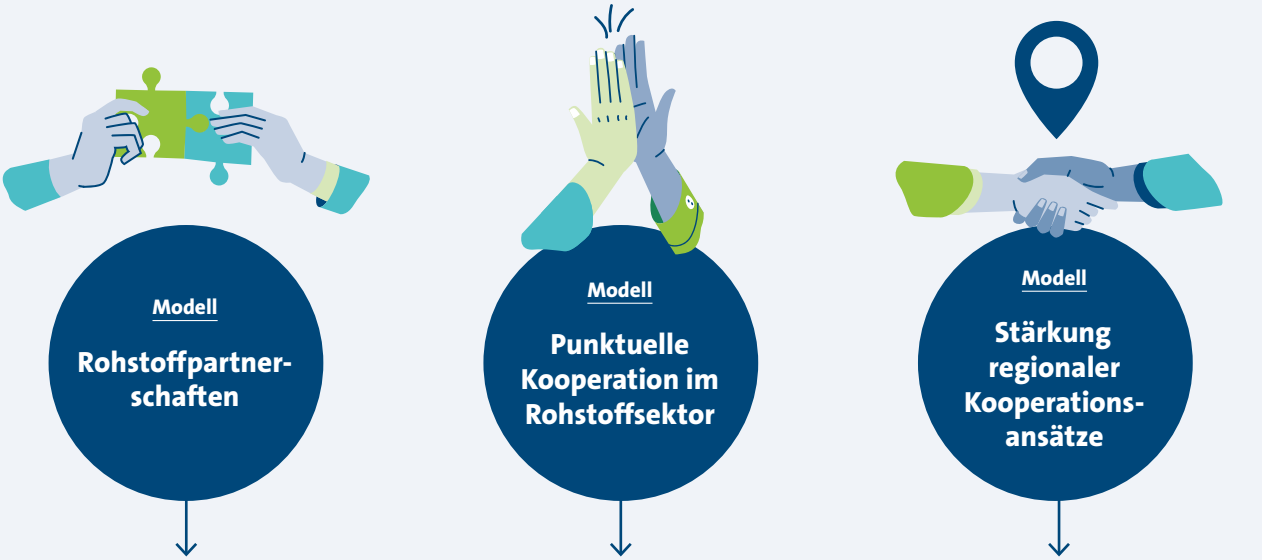
Quelle: Europäische Kommission, 2023e; Weltbank, 202

[13] Das Länderrisiko wird anhand der Worldwide Governance Indicators der Weltbank bestimmt. Siehe zur Berechnung und Interpretation das Glossar.
[14] Critical Raw Materials Act.

Abbildung 9 zeigt verschiedene Kooperationsmodelle, die je nach Ausgangssituation, Rohstoffvorkommen und politischer Situation des jeweiligen Partnerlandes sinnvoll sein können (Ansari et al., 2023; Schulze, 2024). Das könnten beispielsweise bilateral ausgehandelte Handelsabkommen und gezielte Investitionen in die Förderinfrastruktur der jeweiligen Länder sein. Auch die gezielte Förderung neuer Produktionskapazitäten in unterrepräsentierten Regionen hat das Potenzial, weitere Lieferquellen zu erschließen: Deutschland könnte etwa zusammen mit der EU technologische und finanzielle Ressourcen bereitstellen, um die Entwicklung der Rohstoffförderung in Schwellenländern wie Indien oder Bolivien zu unterstützen. Solche Initiativen würden nicht nur die lokale Wertschöpfung steigern, sondern auch die Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards sicherstellen und die Integration dieser Länder in globale Lieferketten erleichtern.

Eine multilaterale Kooperation auf EU-Ebene scheint für diese Vorhaben sinnvoll zu sein. Eine solche Allianz würde es den Mitgliedsstaaten ermöglichen, ihre Nachfrage zu konsolidieren, um potenziell bessere langfristige und stabile Liefervereinbarungen mit Förderstaaten auszuhandeln. In Kapitel 4.5) werden mögliche Gestaltungsformen einer EU-weiten Zusammenarbeit auf Rohstoffebene diskutiert.

Abbildung 9 **Rohstoffkooperationsmodelle im Rahmen einer strategischen Rohstoffaußenpolitik**



Quelle: Ansari et al., 2023; Schulze, 2024, eigene Überlegungen.

4.2 Blickpunkt Bergbau: heimische Rohstoffvorkommen und Explorationsmöglichkeiten

Die Versorgung mit Primärrohstoffen kann flankiert werden durch eine verstärkte Nutzung heimischer Rohstoffe. Das 2023 verabschiedete EU-Gesetz zu kritischen Rohstoffen (CRMA) sieht vor, 10 Prozent der benötigten strategischen Rohstoffe bis zum Jahr 2030 aus heimischen Quellen zu gewinnen und 40 Prozent selbst zu verarbeiten (Europäische Kommission, 2023b).

Einige der für die Halbleiterindustrie relevanten Rohstoffe, etwa Lithium, Wolfram oder Germanium, sind auch in Europa zu finden, wenngleich in meist geringen Konzentrationen oder in schwer zugänglichen Lagerstätten. Tabelle 5 zeigt einige Rohstoffvorkommen in der EU im Überblick. Darüber hinaus sind auch in unmittelbarer Nachbarschaft der Europäischen Union Rohstoffvorkommen bekannt, zum Beispiel Lithium in Serbien oder seltene Erden in der Ukraine (Blum et al., 2024; Momčilović, 2024).

Der Nutzung dieser Rohstoffe stehen jedoch wirtschaftliche, soziale, ökologische und gesellschaftliche Hürden entgegen (zusammenfassend Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE, 2023a).

Wirtschaftliche Hürden

Für eine konkurrenzfähige Nutzung sind die aktuell bekannten Rohstoffvorkommen in der EU oftmals zu gering, die Wertmineralgehalte des Rohstofflagers zu niedrig oder die geologischen Rahmenbedingungen unpassend. Zudem wären die technologischen Anforderungen hoch und der Erkundungsbedarf vor einer tatsächlichen Nutzung immens (Lewicka et al., 2021; Werner, 2012).

Zusätzlich liegen die Rohstoffe teilweise nicht in der benötigten Reinheit vor: So wird in Deutschland zwar Quarz als Ausgangsstoff für Silicium in verschiedensten Formen abgebaut (Elsner, 2016). Vorkommen mit einer praktisch erzielbaren Reinheit von über 99,9999 Prozent oder mehr, wie sie in der Halbleiterindustrie überwiegend erforderlich ist, sind jedoch gering (Kurlemann, 2022).

Gesellschaftliche Hürden

Die Widerstände basieren hier häufig auf sozialen und ökologischen Problemen bei der Exploration neuer Lagerstätten. Beispiele sind der seit 2021 schwelende Konflikt um den Lithiumabbau in Serbien oder jüngst ähnliche Diskussionen in Portugal (Burazer, 2024; Wandler, 2024).

Beispiele für aktuelle Explorationsprojekte in Deutschland sind Lithiumvorkommen im Oberrheingraben und im sächsischen Erzgebirge. An beiden Standorten wurden bedeutende Vorkommen entdeckt, die die Lithiumversorgung innerhalb der EU erheblich verbessern könnten. Im

Tabelle 5 Vorkommen kritischer Rohstoffe innerhalb der EU (Auszug)

Rohstoff	Länder	Anmerkungen und Besonderheiten
Antimon	Deutschland, Portugal, Schweden, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik	Spanien ist größter Antimonproduzent der EU
Flussspat	Deutschland, Spanien	Abbau in Deutschland seit 2013 im Erzgebirge
Kupfer	Bulgarien, Finnland, Polen, Portugal, Spanien, Schweden	
Lithium	Deutschland, Finnland, Österreich, Portugal, Schweden, Serbien, Spanien	Im Oberrheingraben liegt Schätzungen zufolge das größte Lithiumvorkommen Europas
Niob	Finnland, Norwegen, Schweden	Finnland verfügt über eines der größten (kommerziell nicht genutzten) Niobvorkommen Europas
Wolfram	Österreich, Portugal, Spanien, Tschechische Republik	Angesichts wachsender Nachfrage und Knappheit ist der Wolfram-Bergbau in Europa wieder rentabel
Seltene Erden	Finnland, Schweden	In Schweden wurde 2023 das vermutlich größte Vorkommen Seltener Erden in Europa entdeckt

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Oberrheingraben startete die Lithiumgewinnung vor Kurzem. Der Betreiber Vulcan Energy plant, sie durch geothermische Verfahren besonders umweltschonend durchzuführen und mit einer Nutzung der (geothermischen) Wärme zu kombinieren, was sich positiv auf die Akzeptanz in der Bevölkerung auswirkt (Hochwarth, 2024; Lismann, 2024). Im Erzgebirge wird mit einem Beginn des Lithium-Abbaus nicht vor 2028 gerechnet (Geißler, 2024).

Die Erschließung neu entdeckter heimischer Vorkommen ist in der Regel eine mittel- bis langfristige Lösung. So wird beispielsweise der Abbau der 2023 im schwedischen Kiruna entdeckten Seltenerd-Vorkommen aufgrund der notwendigen Erkundungen und vielfältigen Genehmigungsverfahren frühestens in einem Jahrzehnt beginnen (Neubert, 2023). Im Durchschnitt vergehen fast 16 Jahre von der Entdeckung neuer Rohstoffvorkommen bis zum Betriebsbeginn eines Bergwerks. Dies ergab eine vergleichende Analyse weltweiter Bergbauprojekte (Manolo, 2023). Um die Rohstoffsituation kurzfristig zu verbessern, sind daher weitere Lösungsansätze zu berücksichtigen.

Hürde Konkurrenz

Auch wegen der globalen Bergbaukonkurrenz ist der (nachhaltige) wirtschaftliche Abbau von Rohstoffen in Deutschland und der EU in vielen Fällen kaum zu realisieren. Das hat im Wesentlichen zwei Ursachen (Röhrlich, 2022): Sozial- und Umweltstandards sind in vielen anderen Ländern deutlich niedriger und die Rohstoffförderung wird in einigen dominierenden Abbauländern teils erheblich staatlich subventioniert.

Spotlight

Lithiumabbau in Serbien

Am Beispiel der im Juli 2024 unterzeichneten Absichtserklärung zwischen der EU und Serbien zum Lithiumabbau zeigen sich die Schwierigkeiten bei der Förderung heimischen Rohstoffabbaus wie unter einem Brennglas. Um ein großes Lithium-Vorkommen in der Region Jadar hat sich ein komplexer Konflikt entwickelt, bei dem die Rollen der einzelnen Akteure teils ambivalent sind. Die serbische Regierung sieht nach politischen Kehrtwenden in der Förderung nun eine historische Chance für die serbische Wirtschaft. Deutschland und die EU haben ein erhebliches Interesse daran, den für die Energiewende unabdingbaren Rohstoff Lithium in unmittelbarer geografischer Nähe verfügbar zu machen. Außerdem könnte damit der EU-Beitrittskandidat Serbien näher an die EU geführt werden. Dies ist trotz oder gerade wegen autoritärer Tendenzen und einer taktischen Russland- und Chinapolitik der serbischen Regierung ein wichtiges Ziel der EU (Burazer, 2024; Dzihic, 2024).

Gleichzeitig protestieren vor Ort Bürger:innen und Umweltgruppen vehement, da erhebliche Umweltschäden wie Wasserverschmutzung und die Zerstörung von Lebensräumen befürchtet werden (Giebel, 2024). Zudem wird bezweifelt, dass in Serbien über den reinen Rohstoffabbau hinaus ein größerer Teil der Wertschöpfung stattfinden wird. In diesem Fall hätte das Land allenfalls geringe wirtschaftliche Vorteile, aber erhebliche ökologische Nachteile, während die „saubere“ Weiterverarbeitung der Rohstoffe in anderen Ländern stattfindet. Das sinkende demokratische Vertrauen in die Regierung wirkt sich hier konkret aus als Misstrauen gegenüber einem solchen Großprojekt (Momčilović, 2024).

Auch die Gewerkschaften haben bisher keine eindeutige Position in dieser Frage. Das beteiligte Bergbauunternehmen Rio Tinto ist ein globaler Konzern. Die IGBCE steht als Bergbaugewerkschaft dazu im Austausch mit den Gewerkschaften in Serbien und den europäischen sowie globalen Verbänden. Dabei wurde bisher deutlich, dass das Spannungsfeld von Rohstoffsicherheit für die Transformation, Beteiligungsrechten von Gewerkschaften und dem gesellschaftlichen Diskurs erheblich ist.

Nach massivem öffentlichem Druck setzte die serbische Regierung das Projekt im Januar 2022 vorerst aus, 2024 wurde diese Entscheidung durch das Verfassungsgericht jedoch annulliert und eine entsprechende Absichtserklärung zwischen Serbien und der EU unterzeichnet. Im Frühjahr 2025 hat die EU das Projekt in ihre Rohstoffstrategie aufgenommen und damit ihre zukünftige Unterstützung unterstrichen. Die Debatte blieb bis zuletzt ungelöst und prägt den gesellschaftlichen Diskurs weiterhin.

Eine staatliche Subventionierung kann auch hierzulande dazu beitragen oder sogar dafür nötig sein, die Versorgungssicherheit mit ausgewählten nationalen Zukunftsrohstoffen zu verbessern (Ernst & Young, 2022). Davon könnte auch die deutsche Berg- und Maschinenbauindustrie profitieren: Sie trägt erheblich dazu bei, Exploration und Abbau von Rohstoffen durch Automation und Digitalisierung wirtschaftlicher und besonders sicher und möglichst umweltfreundlich zu gestalten, beispielsweise durch den Einsatz von Elektromobilität und modernen Fördertechniken (Langefeld, 2024).

Insgesamt kann die Exploration heimischer Vorkommen dazu beitragen, die Importabhängigkeit zu verringern. Realisierbar und tragfähig ist sie jedoch nur in Kombination mit weiteren Lösungsansätzen und, je nach Rohstoff, zusätzlichen umfassenden Investitionen in technologische Innovationen zum Arbeits- und Umweltschutz oder mit staatlichen Subventionen. In allen Fällen erfordert die Umsetzung neuer Bergbauprojekte die aktive Einbindung aller beteiligten Stakeholder, um eine Balance zwischen wirtschaftlichen Anforderungen und sozialen wie ökologischen Auswirkungen zu erreichen.

4.3 Blickpunkt Rohstoffe: Substitutionsmöglichkeiten und Materialeffizienz

Die Versorgungssicherheit wird auch erhöht durch Möglichkeiten der Substitution und einen möglichst effizienten Materialeinsatz, der wertvolle Ressourcen schont. Viele Rohstoffe können jedoch wegen ihrer spezifischen technischen, physikalischen oder chemischen Eigenschaften nur begrenzt substituiert werden. Das Beispiel Silicium als Hauptrohstoff für die Halbleiterindustrie zeigt das sehr deutlich. Abbildung 10 zeigt verschiedene Substitute für Siliciummetall als Basismaterial für die Herstellung von Halbleiterwafern (Bork, 2024a; Klinkusch, 2024; Mischler, 2021).

Die heute bekannten Alternativen haben andere technische Eigenschaften als die klassische Siliciumtechnik und können je nach Anwendungsgebiet potenzielle Vorteile mit sich bringen. Sie kommen aus diesem Grund unter anderem in der Hochleistungs- oder Hochfrequenztechnik oder in LEDs und Solarzellen zum Einsatz und sind Gegenstand aktueller Forschung (Sokolov, 2024a). Allerdings sind sie der bewährten und gut erforschten Siliciumtechnik häufig preislich, in der Produktionstechnik oder der Lebensdauer unterlegen. Zusätzlich basieren viele dieser Alternativen ebenfalls auf kritischen Rohstoffen. Das gilt auch für andere Rohstoffe. Tabelle 6 zeigt einige Rohstoffe und deren potenzielle Substitute für Anwendungen in der Halbleiterindustrie.

In vielen Anwendungsbereichen ist der sinnvolle Ersatz kritischer Rohstoffe bei aktuellem Stand der Technik nicht oder nur unter starken Einschränkungen möglich. Auch zukünftig bleibt damit eine weitere intensive Forschung zu möglichen Ersatzstoffen zwingend erforderlich, um perspektivisch eine höhere Unabhängigkeit von einzelnen kritischen Rohstoffen zu erzielen. Staatliche Förderungsansätze können die Bemühungen von Unternehmen um Effizienzsteigerungen und Substitutionsmöglichkeiten flankieren, etwa im Bereich der Grundlagenforschung (Buchert et al., 2019).

Tabelle 6 Mögliche Substitute für Rohstoffe der Halbleiterindustrie nach Anwendungsfall (Auswahl)

Rohstoff	Anwendungsfall in der Halbleiterindustrie	Potentielle Substitute
Antimon	Dotierungsmaterial in Transistoren	Bismut, Zinn
Gallium	LEDs, Leistungshalbleiter	Indium, Siliziumkarbid
Germanium	Infrarotsensoren, Glasfasern	Silizium-Germanium-Legierungen
Hafnium	Gate-Dielektrika in Transistoren	Zirkonium
Helium	Reinigungs- und Trägergas	Stickstoff, Argon
Kobalt	Kontakte, Verbindungshalbleiter	Nickel, Aluminium
Kupfer	Kontakte	Aluminium
Lithium	Akkumulatoren	Natrium-Ionen-Akkumulatoren
Lithium	Waferherstellung	Natrium, Kalium (spezielle Anwendungen)
Seltene Erden	Permanentmagnete, optische Bauteile	Eisen-Nickel-Legierungen
Wolfram	Verbindungen, Hochleistungselektronik	Molybdän, Tantal

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Abbildung 10 **Mögliche Substitute für Silicium als Basismaterial für Wafer**

Galliumarsenid (GaAs)

+ Vorteile gegenüber Siliziummetall:

+ Höhere Elektronenbeweglichkeit, dadurch schnellere Schaltungen möglich (damit Ideal für Hochfrequenz- und Mikrowellenanwendungen wie Kommunikation, Radar, ...)
+ Effizienter bei der Umwandlung von Licht (Photonen) in Strom und umgekehrt (LEDs, Solarzellen)

≈ Vergleichbar mit Siliziummetall:

≈ Gallium und Arsen sind ebenfalls kritische Rohstoffe gemäß EU

- Nachteile gegenüber Siliziummetall:

- Deutlich teurer
- Mechanisch spröder, schwieriger zu bearbeiten

Galliumnitrid (GaN)

+ Vorteile gegenüber Siliziummetall:

+ Höhere Wärmeleitfähigkeit, größere Bandlücke (damit Ideal für Hochleistungselektronik → Verwendung u. a. in LEDs, Lasern, Hochspannungsschaltungen)

≈ Vergleichbar mit Siliziummetall:

≈ Gallium ist ebenfalls ein kritischer Rohstoff gemäß EU

- Nachteile gegenüber Siliziummetall:

- Hohe Kosten und begrenzte Verfügbarkeit von Substratmaterialien
- Verarbeitungstechnologien weniger ausgereift als für Silizium

Siliziumcarbid (SiC)

+ Vorteile gegenüber Siliziummetall:

+ Robust bei hohen Temperaturen und Spannungen (damit ideal für Leistungselektronik, z.B. Elektromobilität oder Wechselrichter)

- Nachteile gegenüber Siliziummetall:

- Teurer
- Produktionsprozess aufwendiger (und damit teurer)

Indiumphosphid (InP)

+ Vorteile gegenüber Siliziummetall:

+ Vergleichbar mit GaAs, noch besser bei sehr hohen Frequenzen (Anwendung daher in der Glasfasertechnik und bei optoelektronischen Bauelementen)

≈ Vergleichbar mit Siliziummetall:

≈ Phosphor ist ebenfalls ein kritischer Rohstoff gemäß EU

- Nachteile gegenüber Siliziummetall:

- Sehr teuer, auf Nischenanwendungen beschränkt

Organische Halbleiter (Bspw. OLED)

+ Vorteile gegenüber Siliziummetall:

+ Flexibel, leicht

- Nachteile gegenüber Siliziummetall:

- Begrenzte Lebensdauer gegenüber Silizium
- Leistung noch geringer
- Aktuell nicht für Hochfrequenz- und Leistungselektronik geeignet

Diamant

+ Vorteile gegenüber Siliziummetall:

+ Hervorragende Eigenschaften als Halbleiter (Wärmeleitfähigkeit, Bandlücke, hohe elektrische Durchbruchfestigkeit)

- Nachteile gegenüber Siliziummetall:

- Viel zu teuer für Massenproduktion, insbesondere in der notwendigen hochreinen Qualität

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

4.4 Blickpunkt Lebenszyklus: Kreislaufwirtschaft und Recyclingmöglichkeiten

Neben der Nutzung von Substituten spielt auch die Wiederverwertung bereits geförderter Rohstoffe im Sinn der Kreislaufwirtschaft eine entscheidende Rolle. Das Recycling von Abfallströmen reduziert die Abhängigkeit von Primärrohstoffen und potenziell auch die Umweltbelastung durch die Rohstoffgewinnung. Deshalb sieht das EU-Gesetz zu kritischen Rohstoffen (CRMA) vor, mindestens 20 Prozent der benötigten strategischen Rohstoffe bis zum Jahr 2030 durch Recycling bereitzustellen (Europäische Kommission, 2023b).

Aktuell ist die Wiedergewinnung von Ressourcen je nach Ausgangsmaterial und Rohstoff unterschiedlich gut entwickelt und nur in einigen Fällen technisch beherrschbar und wirtschaftlich. Entsprechend lassen sich die Rohstoffe der Halbleiterindustrie in vier Gruppen einordnen (Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE, 2023a; Werner, 2012). Abbildung 11 zeigt die Zuordnung einiger Rohstoffe der Halbleiterindustrie in diese Recyclingkategorien.

Das Recycling von Rohstoffen für eine Verwendung in der Halbleiterindustrie ist zwar technisch grundsätzlich oft möglich, wirtschaftlich jedoch eine besondere Herausforderung (Hoferichter, 2023; Bernhart et al., 2024):

- Die Trennung und Wiedergewinnung der vielen (oft chemisch und physikalisch ähnlichen) Einzelmaterialien aus den teils sehr geringen Mengen in heutigen Halbleiterchips ist aufgrund der fortschreitenden Miniaturisierung und der komplexen Schichtstrukturen technisch anspruchsvoll.

Abbildung 11 **Zuordnung von Rohstoffen der Halbleiterindustrie zu Recyclingklassen**

Kategorie 1:
Recycling wirtschaftlich möglich

Recyclingverfahren sind technisch beherrschbar und qualitativ wie wirtschaftlich konkurrenzfähig. Je nach Situation auf dem Markt für Primärrohstoffe ist Recycling mehr oder weniger stark verbreitet.

Rohstoffe:
- Aluminium
- Bismut aus niedrigschmelzenden Loten
- Borate (boroxidhaltige Gläser)
- Fluorit aus der Herstellung von Primäraluminium
- Kobalt
- Kupfer
- Lithium
- Magnesiummetall aus Neuschrott
- Naturgraphit
- Platingruppenmetalle aus Autoabgaskatalysatoren
- Siliciummetall für Solarindustrie
- Tantal aus Neuschrott
- Wolfram aus Hartmetallen

Beispiel:
Der Energieaufwand für das Recycling von Aluminium und Magnesiummetall beträgt nur 3–5 % gegenüber der Primärproduktion

Kategorie 2:
Recycling nicht oder nur begrenzt wirtschaftlich

Aktuelle Recyclingverfahren sind technisch anspruchsvoll, energieaufwendig oder aus anderen Gründen bei aktuellen Marktpreisen gegenüber der Primärrohstoffgewinnung nicht wirtschaftlich. Weitere Forschung kann die Prozessabläufe unter Umständen optimieren und Recycling potentiell konkurrenzfähig machen.

Rohstoffe:
- Beryllium (geringe Abfallvolumina)
- Borate (Nd-Fe-B-Permanentmagnete)
- Gallium (abh. von Konzentration im Ausgangsstoff)
- Germanium (geringe Abfallvolumina)
- Hafnium (geringe Abfallvolumina)
- Niob
- Platingruppenmetalle (sonstige Anwendungen)
- Metalle der Seltenen Erden (geringe Abfallvolumina)
- Siliciummetall (sonstige Anwendungen)
- Tantal aus Altschrott

Beispiel:
Aufgrund der hohen Langlebigkeit von niobhaltigen Stählen findet Recycling aktuell nur in geringem Maßstab statt, da viele dieser Stähle noch in ihrem ersten Lebenszyklus gebunden sind

- Die Aufbereitung der extrahierten Sekundärrohstoffe in der erforderlichen Qualität und Reinheit ist aufwendig und nicht in allen Fällen möglich.[15]
- Strukturelle (mechanische bzw. chemische) Veränderungen im Recyclingprozess machen die Verwendung in bestimmten Anwendungsfällen unmöglich.
- Die Wirtschaftlichkeit hängt stark von den Weltmarktpreisen für Primärrohstoffe ab. Derzeit ist deren Einsatz vielfach noch günstiger.

Schwerpunkte der aktuellen Forschung sind daher unter anderem die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit von Recyclingprozessen (Nicholls, 2023). Vor allem Fortschritte beim Trennen (ähnlicher) Rohstoffe könnten die Ausbeute und Effizienz drastisch erhöhen, während bessere Prozesse zur Reinigung beziehungsweise Rekristallisation von Silicium neue Anwendungsbereiche etwa für Sekundärsilicium wie auch für Primärsilicium aus weniger hochreinen Quellen erschließen würden.

Damit Sekundärrohstoffe Importabhängigkeiten effektiv reduzieren können, muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass viele europäische Länder Elektronikschrott zur Aufbereitung in Länder mit niedrigeren Umwelt- und Recyclingstandards sowie geringeren Energie- und Arbeitskosten exportieren. Neben dem Risiko, wertvolle Rohstoffe durch ineffiziente Recyclingprozesse zu verlieren, besteht durch diese Verlagerung das Risiko, neue Abhängigkeiten bei Sekundärrohstoffen aufzubauen. Um neben ökologischen auch wirtschaftliche Vorteile aus der Kreislaufwirtschaft ziehen zu können, ist deshalb eine Stärkung der Recyclingkapazitäten innerhalb der EU essenziell.

Kategorie 3: **Recycling nur mit Qualitätsverlust (Downcycling)**

Diese Sekundärrohstoffe weisen verfahrensbedingte Verunreinigungen oder strukturelle Unterschiede auf, wodurch sie nicht mehr für alle Einsatzzwecke geeignet sind. Sie können u. U. mit Preisabschlägen gehandelt werden, was Recycling schneller unwirtschaftlich macht. Weitere Forschung kann möglicherweise bessere Recyclingverfahren ohne diese Nachteile hervorbringen.

Rohstoffe:
- Magnesiummetall aus Altschrott
- Fluorit aus Uranabfällen, Erdölalkylierung und Stahl

Beispiel:
Magnesiummetall in Altschrott ist schwer von Verunreinigungen, bspw. durch andere Metalle, zu trennen

Kategorie 4: **Keine (industriellen) Recyclingverfahren bekannt**

Es sind keine bzw. keine im industriellen Maßstab anwendbare Recyclingverfahren bekannt. Intensive Forschung ist grundsätzlich aussichtsreich, sofern zumindest theoretische Verfahren bekannt bzw. im Labormaßstab durchführbar sind. In einigen Fällen ist Recycling jedoch nach heutiger Kenntnis nicht möglich, etwa bei nicht lösbaren chemischen oder mineralischen Verbindungen.

Rohstoffe:
- Antimon aus metallurgischen Anwendungen
- Borate (sonstige Anwendungen)
- Fluorit (sonstige Anwendungen)
- Kokskohle
- Phosphor/Phosphat
- Strontium

Beispiel:
Recycling-Verfahren für Phosphat sind in Entwicklung, wirtschaftliche Umsetzungen jedoch nicht in Aussicht

Quelle: DECHEMA e.V., 2015; USGS, 2024; Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE, 2023b.

[15] Analog zur Verfügbarkeit von geeignetem Quarzsand in Deutschland, Kapitel 4.2.

4.5 Blickpunkt Strategie: Rohstoffsicherung durch eine EU-Rohstoffagentur

Die Sicherstellung einer langfristigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen ist nicht nur eine nationale, sondern eine gesamteuropäische Herausforderung. Viele EU-Mitgliedsstaaten stehen vor der Aufgabe, die Resilienz ihrer Industrie durch einen zuverlässigen und bezahlbaren Zugang zu zentralen Rohstoffen zu stärken. Um Wettbewerbsnachteile durch unkoordinierte Einzelmaßnahmen zu vermeiden, wird ein gemeinsames europäisches Vorgehen zunehmend wichtiger.[16]

Ein strategisches Rohstoffmanagement auf EU-Ebene umfasst vielfältige Handlungsfelder entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Dazu zählen insbesondere das Monitoring weltweiter Ressourcenvorkommen und Handelsströme, der Ausbau internationaler Handelsbeziehungen, die Koordination von Abbauprojekten im In- und Ausland, die Förderung von Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft sowie die Entwicklung von Rohstoffsubstitute durch gezielte Forschung und Entwicklung.

Eine wichtige Rolle spielt der institutionelle Rahmen einer EU-Rohstoffagentur. Denkbar sind unterschiedliche Modelle – von einer rein beratenden Monitoringstelle mit begrenzten Kompetenzen bis hin zu einer umfassend befugten Agentur.[17] Im Rahmen eines Multi-Stakeholder-Dialogs hat sich ein breiter Konsens für eine mittlere Ausbaustufe herausgebildet, die vergleichsweise kosteneffizient ist, aber dennoch wesentliche Beiträge zur Stärkung der europäischen Industrie leisten könnte.

Diese bevorzugte Variante sieht unter anderem folgende Aufgaben vor:

- Aufbau von Rohstoffüberwachungskapazitäten
- Koordinierung strategischer Vorratshaltung innerhalb der EU
- Unterstützung der unternehmerischen Risikovorsorge
- Durchführung strategischer Projekte entlang der Wertschöpfungskette
- Förderung der Kreislaufwirtschaft sowie Entwicklung von Industriestandards für industrielle Prozesse und zur Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks

Eine solche Agentur könnte ihre Wirksamkeit durch klar zugeordnete Aufgaben entfalten:

- *Steuernde Aufgaben* wie die Bereitstellung von Daten, das Monitoring von ESG-Standards und die Koordinierung strategischer Aktivitäten
- *Operative Aufgaben* wie Projektbegleitung, Investitionsmanagement und die Umsetzung von Kreislauflösungen
- *Unterstützende Aufgaben* im Bereich Risikoanalyse, Beschaffung, Bevorratung und Forschungsförderung

In diese Struktur sollten auch die geplanten Maßnahmen des Clean Industrial Deal (CID) integriert werden, insbesondere jene zur gemeinsamen Rohstoffbeschaffung und zur Diversifizierung der Lieferketten.

Für die Umsetzung eines solchen Vorhabens ist eine breite institutionelle und gesellschaftliche Unterstützung erforderlich. Die Interessen der beteiligten Akteure – Industrie, Politik, Zivilgesellschaft und Beschäftigte – sind jedoch teils divergierend. Der im Rahmen des EU-Critical Raw Materials Act eingerichtete Board könnte einen Ausgangspunkt für koordinierte Governance bilden. Bislang setzt sich dieses Gremium jedoch ausschließlich aus Vertreter:innen der Mitgliedstaaten, der EU-Kommission sowie parlamentarischen Beobachter:innen zusammen (Europäische Kommission, 2024). Eine handlungsfähige Agentur mit eigenem Budget und breiter gesellschaftlicher Beteiligung existiert bislang nicht – bleibt jedoch ein zentrales Ziel im Kontext einer strategisch orientierten europäischen Rohstoffpolitik.

[16] Die Potenziale und mögliche Ausgestaltung einer EU-Rohstoffagentur werden umfassend in der Studie „Rohstoffe für Europas Zukunft: Gestaltung einer EU-Rohstoffagentur“ erläutert (Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE, 2024). Dieser Abschnitt ist eine stark verkürzte Zusammenfassung der dort dargestellten Inhalte.

[17] Nennenswerte Beispiele für Letzteres sind die japanische JOGMEC oder die südkoreanische KOMIR.

5 Fazit und Ausblick

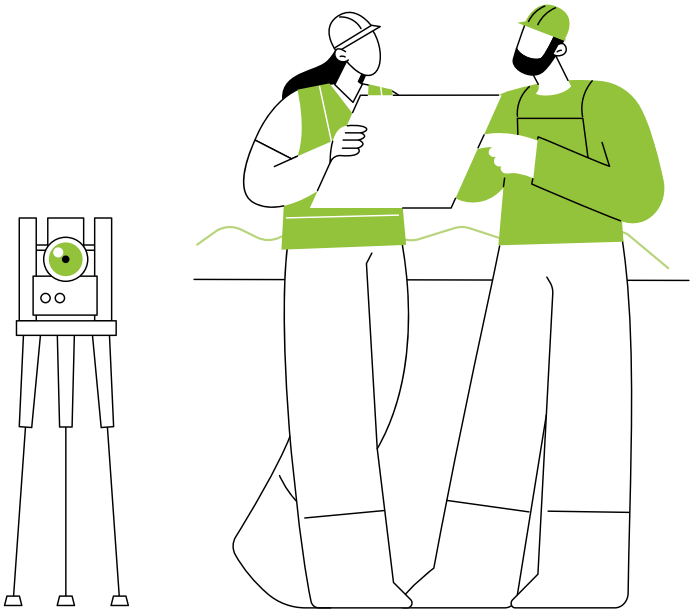
Die Halbleiterindustrie ist ein zentraler Treiber für die wirtschaftliche und technologische Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas. Ihre Produkte sind unverzichtbar für zahlreiche Schlüssel- und Zukunftstechnologien. Die Versorgung mit den benötigten Rohstoffen ist jedoch stark abhängig von wenigen Herkunftsländern. Diese Situation gefährdet die Stabilität der Industrie und schwächt ihre Resilienz.

Um diese Abhängigkeit zu verringern, ist ein Maßnahmenmix erforderlich. Ein erster Hebel ist die Diversifikation der Primärrohstoffquellen. Strategische Partnerschaften mit rohstoffreichen Staaten können ebenso dazu beitragen wie der verstärkte Abbau heimischer Ressourcen, etwa von Lithium oder seltenen Erden. Technologische Fortschritte könnten künftig bislang als unwirtschaftlich geltende Vorkommen erschließbar machen – mit positiven Effekten für Beschäftigung und Wertschöpfung in der deutschen Rohstoffwirtschaft.

Parallel dazu muss der Bedarf an Primärmaterialien gesenkt werden. Technologische Innovationen bieten dabei mehrere Ansatzpunkte: Durch die Entwicklung alternativer Materialien können bestimmte Primärrohstoffe substituiert werden. Gleichzeitig ermöglichen effizientere Fertigungsverfahren eine sparsamere Nutzung von Ressourcen. Eine weitere zentrale Rolle spielt der Ausbau der Kreislaufwirtschaft. Bereits bei der Produktentwicklung sollten Aspekte wie Recyclingfähigkeit und Wiederverwertbarkeit systematisch berücksichtigt werden, um wertvolle Materialien gezielt zurückzugewinnen und die Abhängigkeit von Neumaterial zu verringern. Trotz dieser Potenziale ist absehbar, dass die wachsende Nachfrage nach Rohstoffen auf absehbare Zeit nicht allein durch Substitution, Recycling und Effizienzmaßnahmen gedeckt werden kann (Schröder, 2022; Ernst & Young, 2022).

Um diese Lösungsansätze effektiv umzusetzen, ist die EU-weite Zusammenarbeit essenziell. Eine gemeinschaftlich organisierte Rohstoffagentur könnte strategische Lieferverträge aushandeln, gemeinsame Sicherheitsreserven aufbauen, Forschung und Entwicklung fördern sowie Unternehmen bei der Risikovorsorge unterstützen. Initiativen wie der European Chips Act und der Critical Raw Materials Act leisten bereits Beiträge zur strategischen Rohstoffversorgung, müssen jedoch kontinuierlich an geopolitische und wirtschaftliche Entwicklungen angepasst werden.

Die Umsetzung alternativer Versorgungsstrategien wird erheblich erschwert durch globale Wettbewerbsverzerrungen. Viele rohstoffreiche Länder operieren mit niedrigen Umwelt- und Sozialstandards oder stark subventionierten Förderstrukturen. Dadurch erscheinen europäische Alternativen oft wirtschaftlich unattraktiv – obwohl sie ökologisch und sozial nachhaltiger wären (Röhrlich, 2022; Bernhart et al., 2024). Um dennoch langfristige Versorgungssicherheit und technologische Souveränität zu gewährleisten, sind gezielte Subventionen und politische Steuerungsmaßnahmen unverzichtbar. Nur so lässt sich die Verhandlungsposition Europas im Rohstoffsektor nachhaltig stärken.



Glossar

CFC (carbon fiber carbon composite) bezeichnet kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe, ein Verbundwerkstoff mit hoher mechanischer Stabilität, der vollständig aus Kohlenstoff besteht.

CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) ist ein Halbleiterprozess zur Realisierung von Integrierten Schaltungen (ICs) auf Basis von (gegenläufig geschalteten) p- und n-Kanal-Transistoren.

End-of-Life-Recycling-Einsatzquote (EoL-RIR)

- Die „End-of-Life-Recycling-Einsatzquote bzw. -Inputrate“ (EoL-RIR) ist der Prozentsatz der Gesamtnachfrage, der durch Sekundärrohstoffe („Post-Consumer-Rohstoffe“) gedeckt wird.
- Die EoL-RIR misst das Verhältnis der Wiederverwertung von Schrott (aus der EU) zur EU-Nachfrage nach einem bestimmten Rohstoff, die Nachfrage entspricht dabei der primären und sekundären Rohstoffversorgung in der EU.
- Die EoL-RIR stellt den Istzustand des Recycling-Einsatzes eines Rohstoffs dar.

Ersetzbarkeitsindex (SI, SI_{EI}, SI_{SR})

- Der „Ersetzbarkeitsindex“ (engl. Substitutionsindex, SI) ist ein für alle Anwendungszwecke bewertetes und gewichtetes Maß für die Schwierigkeit, einen Rohstoff zu ersetzen. Die Werte liegen im Bereich von 0 bis 1, wobei 1 die schwierigste Ersetzbarkeit ist.
- Die wirtschaftliche Bedeutung (EI = Economic Impact) wird durch den Teilindex SI_{EI} ausgedrückt. Er spiegelt die technische Leistung und die Kosten möglicher Ersatzstoffe im Vergleich zum Originalrohstoff wider.
- Das Versorgungsrisiko (SR = Supply Risk) wird durch den Teilindex SI_{SR} ausgedrückt. Er spiegelt die weltweite Produktion, die Kritikalität und die Ko-/Nebenproduktion möglicher Ersatzstoffe wider.

Fabless bezeichnet Unternehmen der Halbleiterindustrie, die über keine eigenen Fertigungsstätten verfügen und auf Auftragsfertiger (Foundries) angewiesen sind.

Foundries sind Auftragsfertiger, die Mikrochips nach Kundenvorgaben produzieren.

ICs (Integrated circuits) sind integrierte Schaltkreise, typischerweise eine Kombination aus verschiedenen Komponenten wie Widerständen, Kondensatoren, Dioden und weiteren aktiven oder passiven Bauelementen, zur Realisierung verschiedenster Funktionen.

IDMs (Integrated Device Manufacturers) sind Halbleiterhersteller, die Halbleiterbauteile vollständig selbst entwickeln, aber auch produzieren und vermarkten.

IGBTs (Insulated-gate bipolar transistors) sind eine spezielle Form von Transistoren mit isolierter Gate-Elektrode, die insbesondere in der Leistungselektronik verwendet werden.

Importabhängigkeitsquote (IR)

- Die Importabhängigkeitsquote (engl. Import Reliance, IR) berücksichtigt die weltweite Versorgung und die tatsächlichen Quellen der EU bei der Berechnung des Versorgungsrisikos.
- Sie wird wie folgt berechnet:

$$\frac{\text{EU-Nettoimporte}}{\text{EU-Nettoimporte} + \text{heimische Produktion (EU)}}$$

bzw.

$$\frac{\text{Einfuhr} - \text{Ausfuhr}}{\text{Einfuhr} - \text{Ausfuhr} + \text{Inlandsproduktion}}$$

Länderrisiko

- Die Weltbank bewertet jährlich in einem Set von sechs Indikatoren (Worldwide Governance Indicators, WGI) die Regierungsführung von mehr als 200 Staaten.
  Die Indikatoren:
  1. Mitspracherecht und Rechenschaftspflicht
  2. politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt
  3. Leistungsfähigkeit der Regierung
  4. Regulierungsqualität
  5. Rechtsstaatlichkeit
  6. Korruptionsbekämpfung

- Durch die (ungewichtete) Aggregation der Einzelindikatoren ergibt sich das Länderrisiko (LR), das Werte annimmt zwischen
  - + 2,5 (theoretisch beste Regierungsführung) und
  - - 2,5 (theoretisch schlechteste Regierungsführung).

- Weiterführende Informationen im Internet unter http://info.worldbank.org/governance/wgi/.

MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor) bezeichnet die Bauform eines Transistors auf der Basis von Metall-Isolator-Halbleiter-Strukturen. Das ist der heute meistverwendete Transistortyp in integrierten Schaltungen.

Seltene Erden (Rare Earth Elements, REE)

- Als Seltenerdmetalle werden die Elemente der dritten Nebengruppe des Periodensystems sowie Lanthanoide zusammengefasst:
  - **leichte seltene Erden**: Scandium, Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium
  - **schwere seltene Erden**: Dysprosium, Erbium, Gadolinium, Holmium, Lutetium, Terbium, Thulium, Ytterbium, Yttrium

- Diese 17 Elemente kommen aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften stets vergesellschaftet vor und können auch nur gemeinsam abgebaut werden.
- In der Literatur ist die Unterscheidung zwischen leichten (LREE = Light Rare Earth Elements) und schweren (HREE = Heavy Rare Earth Elements) seltenen Erden im Detail nicht immer einheitlich.

OSAT (Outsourced Semiconductor Assembly and Test) bezeichnet die Auslagerung von Chipmontage und Tests in der Halbleiterfertigung.

Platingruppenmetalle (Platin Group Metals, PGM)

- Unter dem Begriff der Platingruppenmetalle werden chemisch sehr ähnliche Metalle zusammengefasst.

- Ruthenium, Rhodium und Palladium werden aufgrund ihrer im Vergleich geringeren Atommasse als leichte Platinmetalle bezeichnet.

- Osmium, Iridium und Platin werden den schweren Platinmetallen zugeordnet.

- Alle Platinmetalle sind Edelmetalle mit einer hohen Dichte und fallen bei der Kupfer- und Nickelherstellung als Nebenprodukt an.

TTL (Transistor-Transistor-Logik) bezeichnet eine Familie von logischen Schaltungen, in der Transistoren sowohl die Logikverarbeitung als auch die Signalverstärkung übernehmen.

Literaturverzeichnis

Ansari, D.; Carry, I.; Godehardt, N.; Heiduk, F.; Hörter, A.; Jall, V.; Maihold, G.; Müller, M.; Schrolle, M.; Schulze, M. & Wagner, C. (2023): Auf Partnersuche: Neue Allianzen im Rohstoffsektor. Stiftung Wissenschaft und Politik. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Bernhart, W.; Hader, M.; Vogt, P. & Geering, S. (2024): Wege aus der Abhängigkeit: Wie Deutschland die Rohstoffe für eine zukunftsfähige Wirtschaft sichert. Roland Berger und Bundesverband der deutschen Industrie e. V. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

BGR (2023): Chinesische Exportkontrollen für Gallium und Germanium könnten sich auf die globale Halbleiterindustrie auswirken. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Letzter Zugriff: 24.02.2025.

BMWK (2024): Der Herzschlag der digitalen Welt: Warum die Halbleiterindustrie ein entscheidender Wirtschaftsfaktor für Deutschland und Europa ist. Schlaglichter 10(24). S. 13–17. Letzter Zugriff: 24.02.2025.

Bork, H. (2024a): China fertigt Diamant-Chips in Serie. elektronikpraxis. Letzter Zugriff: 24.02.2025.

Bork, H. (2024b): China pumpt noch deutlich mehr Geld in seine Chipindustrie. elektronikpraxis. Letzter Zugriff: 24.02.2025.

Bovenschulte, M.; Parton, F. & Bernardt, F. (2024): Analyse und Prognose volkswirtschaftlicher und regionalökonomischer Wachstumseffekte des Halbleiterökosystems in Sachsen. Institut für Innovation und Technik & Specialists in Empirical Economic Research. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Blum, U.; Borg, G.; Kropp, N.; Liventseva, H. & Rozhkova, I. (2024): Analyse: Die Rohstoffe der Ukraine und ihre strategische Bedeutung. Bundeszentrale für politische Bildung: Ukraine-Analysen Nr. 296. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Buchert, M.; Degreif, S.; Bulach, W.; Schüler, D.; Prakash, S.; Möller, M.; Köhler, A.; Behrendt, S.; Nolte, R. & Röben, A. (2019): Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen. Umweltbundesamt. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Bundesregierung. (2023): „Rohstoff des 21. Jahrhunderts“. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Burazer, N. (2024): Mine des Anstoßes. IPG Journal. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

DECHEMA e.V. (2015): Anorganische Rohstoffe — Sicherung der Rohstoffbasis von morgen. Positionspapier des temporären ProcessNet-Arbeitskreises „Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft“, DECHEMA e. V. & VDI. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Dzihic, V. (2024): Serbiens autoritärer Kurs: Wie der Lithium-Deal mit der EU das Land von Europa entfernt. Heinrich-Böll-Stiftung. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Elsner, H. (2016): Quarzrohstoffe in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Ernst & Young (2022): Staatliche Instrumente zur Erhöhung der Versorgungssicherheit. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

European Court of Auditors (2025): Special report 12/2025: The EU's strategy for Microchips. Letzter Zugriff: 30.04.2025.

Europäische Kommission (2023a): Critical raw materials. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Europäische Kommission (2023b): Critical Raw Materials Act. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Europäische Kommission (2023c): Europäisches Chip-Gesetz. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Europäische Kommission (2023d): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020. Letzter Zugriff: 25.02.2025

Europäische Kommission (2023e): Study on the critical raw materials for the EU 2023: Final report. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Europäische Kommission (2024): European Critical Raw Materials Board. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Europäische Kommission (2025): Clean Industrial Deal. Letzter Zugriff: 30.04.2025.

Flach, L.; Teti, F.; Gourevich, I.; Scheckenhofer, L. & Grandum, L. (2022): Wie abhängig ist Deutschland von Rohstoffimporten? Eine Analyse für die Produktion von Schlüsseltechnologien. IHK für München und Oberbayern. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Hofer, J. (2025): Handelskonflikt: Trump lässt Chiphersteller aus den USA verzweifeln. Handelsblatt vom 15. April. Letzter Zugriff: 30.04.2025.

Garreffa, A. (2024): TSMC „forbidden“ from making 2nm chips outside of Taiwan, worries of future TSMC-US relations. TweakTown. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Geißler, R. (2024): Lithium-Abbau im Erzgebirge frühestens ab 2028. Mitteldeutscher Rundfunk. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Giebel, K. (2024): Serbien: Offener Dialog-Versuch zu Lithium führt zu Morddrohungen. Heinrich-Böll-Stiftung. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Henke, J. (2024): Gallium, Germanium: China stoppt Ausfuhr von Halbleiter-Rohstoffen in die USA. Handelsblatt. Letzter Zugriff: 25.02.2025.

Hochwarth, D. (2024): Es geht los: Lithiumförderung im Oberrheingraben. VDI nachrichten. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Hoferichter, A. (2023): Seltene Erden: „Über die Recyclingquote von einem Prozent hinauskommen". Heise Online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Huang, J. (2021): Can Taiwan's Silicon Shield Protect It against China's Aggression? VOA. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Infineon Technologies AG (2022): Infineon und TSMC präsentieren RRAM-Technologie für die AURIXTM TC4x-Produktfamilie für Automotive-Anwendungen. Infineon Technologies. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Klinkusch, J. (2024): Was sind Halbleiter und wo werden sie angewendet? Ingenieur.de. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Knobloch, A. (2024): Japan: Milliarden-Plan zur Unterstützung der heimischen Chipindustrie. Heise Online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Köhne-Finster, S.; Seyda, S. & Werner, D. (2023): Fachkräftemangel in Berufen der Halbleiterindustrie. Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Krempl, S. (2024): ESMC-Chipfabrik Dresden: Alle öffentlichen und privaten Gelder sind beisammen. Heise Online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Kurlemann, U. R. (2022): Silizium: Kann Europa sich selbst mit dem wichtigen Rohstoff versorgen? Heise Online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Langefeld, O. (2024): 11. Kolloquium Fördertechnik im Bergbau: Tagungsband. TU Clausthal. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Large, M. & Silicon Saxony (2024): Alles zur Halbleiterindustrie in Deutschland. all-electronics. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Lewicka, E.; Guzik, K. & Galos, K. (2021): On the Possibilities of Critical Raw Materials Production from the EU's Primary Sources. Resources 10(5), 50. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Lismann, O. (2024): Vulcan hebt den Pfälzer Lithium-Schatz. Die Rheinpfalz. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Manalo, P. (2023): Discovery to production averages 15.7 years for 127 mines. S&P Global. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Mantel, M. (2022): US Chips Act: Milliardenschwere Halbleiterförderungen kommen endlich. Heise online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Mantel, M. (2024): Europas Halbleiterziel: Von unrealistisch zu fast unmöglich. Heise online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Mischler, G. (2021): Wie neue Materialien Halbleiter revolutionieren. Technik+Einkauf. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Momčilović, P. (2024): Raw materials – perspectives from Serbia. in: Heinrich-Böll-Stiftung (Hrsg.): The Raw Materials Situation in Neighbouring European Countries: Bosnia and Herzegovina, Serbia, Georgia, Armenia. S. 21–32. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Neubert, H.-J. (2023): Seltene Erden in Europa: „Das Vorkommen zu nutzen, wird 20 bis 30 Jahre dauern". Heise online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Nicholls, I. (2023): New method for recycling lithium-ion batteries reduces energy needs and environmental harm. Linnaeus University. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Republic of China (Taiwan) (2023): Statute for Industrial Innovation. Laws & Regulations Database of The Republic of China (Taiwan). Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Reuters (2025): China hits back at US tariffs with export controls on key rare earths Reuters Media as of 4th April 2025. Letzter Zugriff: 30.04.2025.

Röhl, K.-H. & Rusche, C. (2024): IW-Kurzbericht 45/2024: Wo steht die EU im globalen Chip-Wettrennen? Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Röhrlich, D. (2022): Silizium, Kobalt, Lithium: Der globale Kampf um Rohstoffe der Zukunft. Deutschlandfunk. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Schneid, H. (2021): Chips – das Gold des 21. Jahrhunderts. Die Presse. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Schröder, T. (2022): Kritische Metalle für die Energiewende: Der neue Rohstoffrausch. Deutschlandfunk. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Schulze, M. (2024): Rohstoffversorgung in Zeiten geoökonomischer Fragmentierung. Die EU muss die außenpolitische Dimension ihrer Rohstoffpolitik stärken. SWP-Aktuell 22. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Silicon Saxony (2023a): Karte Mikroelektronik — Mai 2023 [Ohne Titel]. Silicon Saxony. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Silicon Saxony (2023b): TSMC: Spatenstich für neue ESMC-Fabrik in Dresden. Silicon Saxony. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Sokolov, D. (2023): China beschränkt Export wichtiger Metalle für die Energiewende. Heise online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Sokolov, D. (2024a): Infineon Austria meldet Durchbruch bei Galliumnitrid-Wafern. Heise online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Sokolov, D. (2024b): Intel pausiert Chipfabrik in Magdeburg, Werk in Breslau. Heise online. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Statistisches Bundesamt (2023): GENESIS-Online Datenbank. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (2022): Branchenausblick 2030+: Die Halbleiterindustrie. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (2023a): Zukunftsperspektiven Transformation: Rohstofflage in der chemischen Industrie. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (2023b): Zukunftsperspektiven Transformation: Rohstofflage in IGBCE-Branchen. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (2024): Rohstoffe für Europas Zukunft: Gestaltung einer EU-Rohstoffagentur. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

USGS (2024): Mineral commodity summaries 2024. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Varas, A.; Varadarajan, R.; Goodrich, J. & Yinug, F. (2021): Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era. Boston Consulting Group & Semiconductor Industry Association. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Wandler, R. (2024): Lithiumabbau in Portugal: Die Zukunft wird abgebaggert. Taz. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Weltbank (2023): Worldwide Governance Indicators. World Bank Group. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Werner, W. (2012): Schätze unter dem Boden: Was wissen wir über die tiefliegenden Rohstoffe in Baden-Württemberg? Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau 102. S. 37–92. Letzter Zugriff: 26.02.2025

Wintergerst, R. (2023): Halbleiter-Versorgung in Deutschland. Bitkom. Letzter Zugriff: 26.02.2026.

WSTS (2024): The World Semiconductor Trade Statistics (WSTS) has released its latest forecast for the global semiconductor market, anticipating robust growth in 2024 and 2025. . World Semiconductor Trade Statistics. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Zandt, F. (2023): Mikrochip- und Halbleiterfertigung: Welches europäische Land exportiert die meisten Halbleiter? Statista. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

ZVEI e. V. (2024a): Deutsche Elektro- und Digitalindustrie – Beschäftigung und demografische Entwicklung. Zvei electrifying ideas. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

ZVEI e. V. (2024b): Von Chips zu Chancen: Die Bedeutung und Wirtschaftlichkeit der Mikroelekronikförderung. Zvei electrifying ideas. Letzter Zugriff: 26.02.2025.

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

Inselstraße 6
10179 Berlin
Telefon +49 30 2787 1325

Königsworther Platz 6
30167 Hannover
Telefon +49 511 7631 472

E-Mail: arbeit-umwelt@igbce.de
Internet: www.arbeit-umwelt.de