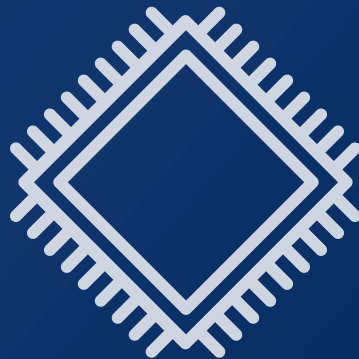


Von Chips zu Chancen

Die Bedeutung und Wirtschaftlichkeit der Mikroelektronikförderung





Inhalt

1	Die Mikroelektronikindustrie und ihre Entwicklung	8
1.1	Die Rolle der Mikroelektronik für die Anwendungsindustrien	8
1.2	Die Mikroelektronik-Wertschöpfungskette	10
1.3	Wachstum des Halbleitermarkts zur Billionen-Dollar-Industrie	12
1.4	Halbleiter als Schlüsselbaustein moderner Technologien	14
2	Chip-Knappheiten und ihre Auswirkungen	16
2.1	Chip-Knappheiten, ein wiederkehrendes Phänomen	17
2.2	Wirtschaftliche Auswirkungen der Chip-Knappheit	19
3	ROI der Mikroelektronikförderungen	24
3.1	Förderung in der Mikroelektronikindustrie	24
3.2	Der globale Förderwettbewerb in der Mikroelektronik	26
3.3	Halbleiter nicht gleich Halbleiter	30
3.4	Input-Output-Modell: Berechnung der Effekte von Förderprojekten	33
3.5	Beitrag der Mikroelektronik zur globalen Wertschöpfung	39
4	Mikroelektronik als Motor der Nachhaltigkeitsziele	42
4.1	Die ambitionierten Klimaziele der EU und Deutschlands	42
4.2	Mit Hilfe von Klimatechnologien zur Nachhaltigkeit	43
4.3	Die Rolle der Mikroelektronik in den Klimatechnologien	46
4.4	Der Weg zur Klimaneutralität	49
4.5	Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Produktion	56
5	Die Mikroelektronik als Kernbaustein der Technologiesouveränität	58
5.1	Technologietrends als Treiber der Transformation	58
5.2	Relevanz der einzelnen Wertschöpfungskettenschritte für die Technologietrends	61
5.3	Die Bedeutung der Technologiesouveränität	69
5.4	Analyse der europäischen Technologiesouveränität	72
6	Schlussfolgerung	83

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Mikroelektronikindustrie ist ein zentraler Pfeiler der europäischen Wirtschaft und bildet das Rückgrat der Digitalisierung und Elektrifizierung. Sie treibt Innovationen voran und stärkt das wirtschaftliche Wachstum in Europas Schlüsselindustrien sowie entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Durch ihre Produkte und Innovationen ermöglicht sie es den Endindustrien, leistungsstarke, kosteneffiziente und wettbewerbsfähige Systeme zu entwickeln und erfolgreich am Markt zu platzieren. Damit ist sie ein entscheidender Faktor für Europas zukünftige Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität.

Die vorliegende Studie unterstreicht und quantifiziert die Bedeutung der Mikroelektronikindustrie für die europäische Wirtschaft, Gesellschaft und technologische Souveränität.

Chip-Knappheiten verursachen einen erheblichen Schaden für die europäische Wirtschaft

Die Chip-Knappheit in den Jahren 2021–2023 führte allein in Deutschland zu einem geschätzten BIP-Verlust von 102 Milliarden Euro, was 2,4 % des deutschen Jahres-BIPs im Jahr 2022 entspricht. Die Analyse verdeutlicht die Abhängigkeit der europäischen Anwendungsindustrien von der Mikroelektronik. Zusätzlich haben die Nachwirkungen der Chip-Knappheit und der Corona-Pandemie die globalen Marktverhältnisse verändert, bedingt durch hohe Lagerbestände und den anschließenden starken Preisverfall in der Mikroelektronikindustrie. Dies belastet insbesondere europäische Leiterplatten-Hersteller und EMS-Dienstleister (Electronic Manufacturing Services) im globalen Wettbewerb. Bedingt durch die Dynamiken der Mikroelektronikindustrie wird es auch in Zukunft zu Verknappungen kommen. Maßnahmen zur Verbesserung der Bedarfstransparenz und Stärkung der Wertschöpfungskette sind weiterhin notwendig, um bei wiederkehrenden Situationen die negativen Effekte weitestgehend zu reduzieren.

Aktuelle Mikroelektronikförderung ein erster Schritt für das Wirtschaftswachstum in der EU

Die aktuellen Förderprogramme werden zu einer jährlichen Steigerung der Bruttowertschöpfung von 33 Milliarden Euro in der EU beitragen. Dies führt bei Umsetzung aller geplanten Projekte zu zusätzlichen Steuereinnahmen von 7,9 Milliarden Euro pro Jahr, die in zukünftiges Wachstum investiert werden können. Darüber hinaus werden durch die Förderung 65.000 neue Arbeitsplätze entlang der Wertschöpfungskette und in anderen Industrien entstehen – auf einen Arbeitsplatz bei den Halbleiterherstellern folgen damit etwa 6 weitere Arbeitsplätze in deren Umfeld und entlang Wertschöpfungskette. Allerdings zeigt die Studie auch deutlich, dass die derzeit geplanten Maßnahmen nicht ausreichen, um die ambitionierten Ziele der EU zu erreichen. Sofern keine weiteren Investitionen kommen, wird der Anteil der europäischen Produktionskapazitäten voraussichtlich von heute 8,1 % auf 5,9 % bis 2045 fallen. Nur eine Verstärkung der aktuellen Fördermaßnahmen könnte Europa in die Lage versetzen, seinen globalen Anteil an den Fertigungskapazitäten nahezu konstant zu halten, nachdem dieser in der Vergangenheit kontinuierlich gesunken ist.

Nachhaltigkeit als Chance und Herausforderung

Um bis 2050 eine vollständige Klimaneutralität in Europa zu erreichen, werden bis zu 25 % der europäischen Produktionskapazitäten für Halbleiter beziehungsweise Chips für den Eigenbedarf benötigt. Allein für Deutschland wird die Elektrifizierung der Industrie und Gesellschaft bis zu 6 % der europäischen Produktionskapazitäten beanspruchen. Gleichzeitig bietet dies eine enorme Chance: Europa kann nicht nur die Entwicklung und Produktion von Klimatechnologien maßgeblich gestalten, sondern auch als globaler Vorreiter für nachhaltige Halbleiterproduktion auftreten. Der hohe Anteil erneuerbarer Energien und die Umweltstandards schaffen hierfür ideale Voraussetzungen. Doch um diese Chancen zu nutzen, sind gezielte Maßnahmen in die Energie-Infrastruktur und eine enge Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfung erforderlich, um die Standortbedingungen nicht zu einem Nachteil im globalen Wettbewerb zu machen.

Die Stärkung der Mikroelektronik eine notwendige Bedingung für Europas Technologiesouveränität

Technologische Souveränität ist der Schlüssel zur Sicherung von nationalen Wohlstand und Selbstbestimmung. Sie bedeutet, in der Lage zu sein, Schlüsseltechnologien zu verstehen, herzustellen, weiterzuentwickeln und diese international aktiv mitzugestalten. Die Mikroelektronik spielt hierbei eine zentrale Rolle, da sie kritische Kontrollpunkte für die technologische Souveränität der EU bietet. Europa verfügt in den Wertschöpfungsschritten Halbleiterdesign und -fertigung über Stärken in den Bereichen Leistungshalbleiter, Mikrocontroller und Sensorik, mit globalen Marktanteilen von bis zu 54 %. Zusätzlich haben europäische Unternehmen in den Wertschöpfungsschritten Maschinen und, Werkzeuge sowie Materialien große Marktanteile. Diese Stärken müssen gezielt gefördert werden, um die Position Europas in der globalen Wertschöpfungskette zu sichern und auszubauen. Gleichzeitig müssen diese Stärken für zukünftige Differenzierungsmerkmale genutzt werden. Dies gelingt, indem sie mit weiteren Technologien und Anforderungen kombiniert werden. Stellenweise sind noch vorhandene strategische Lücken zu schließen, etwa in den Bereichen Design und Advanced Packaging. Das gilt auch in Bezug auf Kompetenzen im Bereich der Fertigung von Halbleitern für KI und High-Performance-Computing, solange diese entweder entlang der Markt- und Nachfragesituation Europas getätigt werden oder von besonderer Bedeutung für zukünftige Stärken sind. Darüber hinaus besteht Nachholbedarf bei Leiterplatten und EMS. Besonders im Materialbereich ist Europa stark von Importen aus Südostasien abhängig und hat dadurch einen wichtigen Kontrollpunkt verloren. Zudem sind die Leiterplattenfertigungs- und EMS-Kapazitäten in Europa über die letzten Jahre stark zurückgegangen, was die Resilienz langfristig gefährdet. Nur durch die Kombination aus der Weiterentwicklung der bestehenden Kompetenzen und der gezielten Investition in neue strategische Fähigkeiten kann Europa seine technologische Souveränität nachhaltig sichern und die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit in einer zunehmend digitalisierten und vernetzten Welt gewährleisten.



Einleitung

Mikroelektronik ist in unserer Wirtschaft und Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Ob in der Automobilindustrie, im Maschinenbau, in der Medizintechnik, in der Verteidigungsindustrie, in der Luft- und Raumfahrt oder der Elektronikindustrie – sie ist als essenzielles Vorprodukt in nahezu allen Industriezweigen die Grundlage für Innovationen. Um die technologischen Fortschritte zu sichern und den anderen globalen Akteuren auf Augenhöhe zu begegnen, planen die europäischen Staaten in den kommenden Jahren über 32¹ Milliarden Euro in die heimische Mikroelektronikbranche zu investieren. Damit schließen sie sich einem globalen Trend an, dem auch Regionen wie die USA, China, Japan und Südkorea folgen. Das Ziel ist es, ihre technologische Souveränität zu sichern sowie die Wettbewerbsfähigkeit, Kosteneffizienz und Innovationsgeschwindigkeit langfristig zu stärken.

Besonders deutlich zeigt sich das Potenzial der Mikroelektronik in der grünen Transformation. Hier wird sie in Klimatechnologien wie Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen, Windkraftwerken und der Elektromobilität eingesetzt. Als Rückgrat des digitalen und ökologischen Wandels ermöglicht sie den Übergang zu einer klimaneutralen und digitalen Gesellschaft.

In Europa hat die Halbleiterknappheit im Zuge der Corona-Pandemie das politische Bewusstsein für eine sichere Versorgung und Innovationsförderung geschärft. Dies führte zu Maßnahmen wie dem zweiten IPCEI (Important Projects of Common European Interest)² und dem EU Chips Act³. Diese Förderinstrumente sollen sowohl der Mikroelektronikbranche als auch der gesamten Wirtschaft einen langfristigen Nutzen und einen gesellschaftlichen Mehrwert bringen.

Doch wie zielsicher sind diese Maßnahmen? Die vorliegende Studie untersucht diese Frage und legt einen besonderen Fokus auf den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Nutzen der Mikroelektronik als Schlüsseltechnologie.



Zielstellung der Studie

Im Rahmen dieser Studie sollen die Auswirkungen der Mikroelektronikförderung in Deutschland und Europa umfassend analysiert und quantifiziert werden. Ziel ist es, die Wirksamkeit der bisherigen Maßnahmen zu bewerten und potenzielle zusätzliche Schritte zur Stärkung des Mikroelektronikstandorts Europa zu identifizieren. Mit den Ergebnissen soll eine fundierte Debatte über die Weiterentwicklung und Anpassung der Förderinstrumente angeregt sowie der Mehrwert der Mikroelektronik für die europäische Wirtschaft und Gesellschaft aufgezeigt werden.

Zu Beginn gibt die Studie in Kapitel Eins einen umfassenden **Überblick über die Mikroelektronikindustrie** und ihre zentrale Rolle in der modernen Wirtschaft. Sie beleuchtet die Bestandteile des Mikroelektronik-Ökosystems entlang der Wertschöpfungskette sowie deren Wechselwirkungen. Darüber hinaus wird die Entwicklung der Mikroelektroniknachfrage anhand der verschiedenen Produktkategorien dargestellt.

Im Mittelpunkt des zweiten Kapitels stehen die **globalen Lieferketten sowie die Auswirkungen der Chip-Knappheit** zwischen 2021 und 2023, die erheblichen Einfluss auf die deutsche Wirtschaft hatten. Zudem werden die durch die Knappheit verursachten Schäden für das Bruttoinlandsprodukt (BIP) der deutschen Wirtschaft berechnet, zukünftige Risiken für die Lieferkette bewertet und mögliche Maßnahmen zur Risikominderung aufgezeigt.

Das dritte Kapitel befasst sich mit dem **Return on Investment (ROI) der Mikroelektronikförderung**. Die durch die Förderung gestiegene Produktionskapazität führt mittelbar auch zu höheren Steuereinnahmen. In der Studie wird der erwartete Zuwachs an Steuereinnahmen pro investiertem Euro in die Halbleiterförderung berechnet. Ebenso wird die voraussichtliche Steigerung der Produktionskapazität in Deutschland und Europa für Halbleiterprodukte pro Fördersumme abgeschätzt und mit den erwarteten, zusätzlichen Steuereinnahmen in Verhältnis gesetzt. Eine ähnliche Quantifizierung wird auch für die Schaffung neuer Arbeitsplätze vorgenommen.

Der Fokus in Kapitel Vier liegt auf der Analyse der **Bedeutung der Mikroelektronik für die Erreichung der Klimaziele** in Deutschland und Europa. Mikroelektronik ist essenziell für Klimatechnologien wie Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen und Elektrofahrzeuge. Basierend auf den deutschen und europäischen Klimazielen wird der Bedarf für entsprechende Technologien ermittelt und das dafür erforderliche Volumen der Mikroelektronikproduktion abgeschätzt. Zusätzlich werden die Standortvorteile Europas für eine nachhaltige Halbleiterproduktion analysiert und die notwendigen Rahmenbedingungen zur weiteren Förderung der Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Europa diskutiert.

Abschließend wird in Kapitel Fünf untersucht, welche **Teile der Mikroelektronik-Wertschöpfungskette** entscheidend für die technologische Souveränität eines Staates sind. Dafür wird die aktuelle strategische Positionierung der EU in diesen Bereichen analysiert und darauf basierend mögliche Handlungsfelder identifiziert, die sowohl zur Stärkung der Resilienz als auch der langfristigen Wettbewerbsfähigkeit Europas beitragen können.



1 Die Mikroelektronikindustrie und ihre Entwicklung

Technologische Entwicklungen verändern Wirtschaft und Gesellschaft grundlegend. Der unaufhaltsame Vorstoß in die digitale Ära transformiert Geschäftsmodelle und Produktionsprozesse, da immer mehr Daten verarbeitet und vernetzte Systeme in alle Lebensbereiche integriert werden. Viele Branchen, wie Energie und Mobilität, setzen zudem auf eine zunehmende Elektrifizierung. Automatisierte Systeme und Künstliche Intelligenz (KI) sind längst ein fester Bestandteil moderner industrieller und gesellschaftlicher Strukturen und fördern Effizienz sowie Innovation. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Mikroelektronik – sie ist die Grundlage der digitalen Transformation und Elektrifizierung.

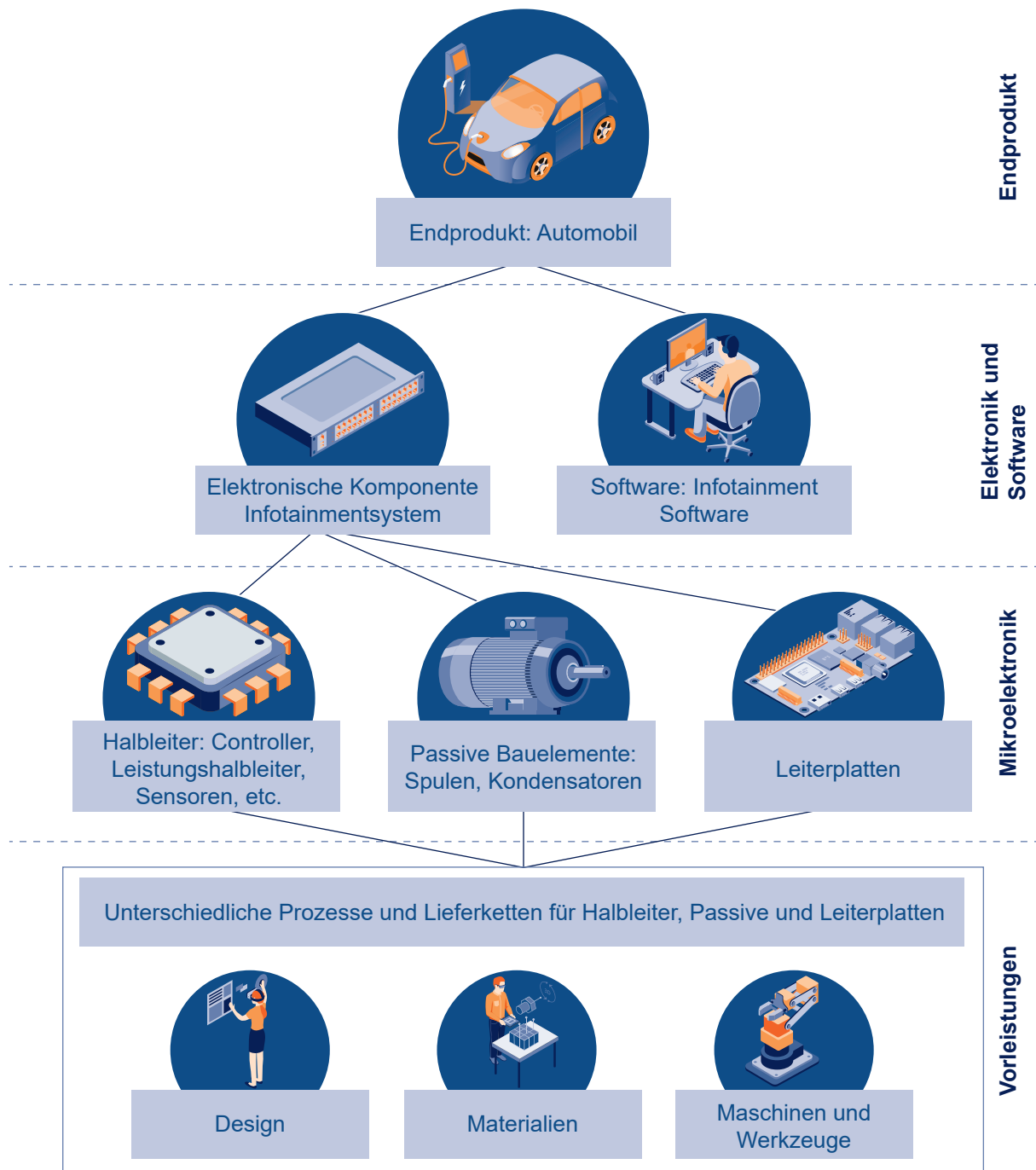
1.1 Die Rolle der Mikroelektronik für die Anwendungsindustrien

Mikroelektronik umfasst eine Vielzahl von elektronischen Bauteilen, die für nahezu alle technologischen Anwendungen essenziell sind. Diese Bauteile bilden das Rückgrat moderner Systeme – von Konsumgütern bis hin zu industriellen Hochtechnologien. Ein Beispiel, das die zentrale Bedeutung der Mikroelektronik aufzeigt, ist die Automobilindustrie (siehe Abbildung 1.1). Moderne Fahrzeuge sind stark von Elektronik und Software abhängig. Systeme wie Infotainment, Fahrerassistenz und Motorsteuerung basieren auf elektronischen Bestandteilen, die in Echtzeit Datenmengen verarbeiten. Dadurch können Sicherheit, Effizienz und Komfort gewährleistet werden. Die dafür benötigten Komponenten setzen sich aus Halbleitern, passiven Bauelementen und Leiterplatten zusammen.

- **Halbleiter** sind zentrale Bauteile in der Elektronik und Elektromechanik. Sie steuern, schalten und messen elektrische Signale und sind für die Funktionalität von elektrischen sowie elektromechanischen Systemen zuständig. Ohne Halbleiter wären Rechen- sowie Kommunikationssysteme, Sensorik und Aktuatorik undenkbar.
- **Passive Bauelemente** wie Widerstände und Kondensatoren regulieren elektrische Ströme und Spannungen, ohne diese aktiv zu verstärken oder zu steuern.
- **Leiterplatten (oder Printed Circuit Boards, PCBs)** dienen als Träger für elektronische Bauteile und verbinden diese über leitfähige Bahnen. Sie ermöglichen die Strom- und Signalübertragung zwischen einzelnen Komponenten und gewährleisten so deren reibungslose Zusammenarbeit.

Die Fertigung dieser Bauteile erfordert spezielle Materialien, anspruchsvolle Designs, komplexe Maschinen und Werkzeuge. Mikroelektronik spielt jedoch nicht nur im Automobilsektor eine zentrale Rolle, sondern ist auch für zahlreiche andere Sektoren wie Telekommunikation, Luft- und Raumfahrt, Verteidigung sowie industrielle Automatisierung unverzichtbar. Ihre Schlüsselfunktion in diesen Industrien macht sie zu einem Motor für zukünftige Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität.

Abb. 1.1: Mikroelektronik als Bestandteil der europäischen Wirtschaft



■ Produkttyp: Beispiel

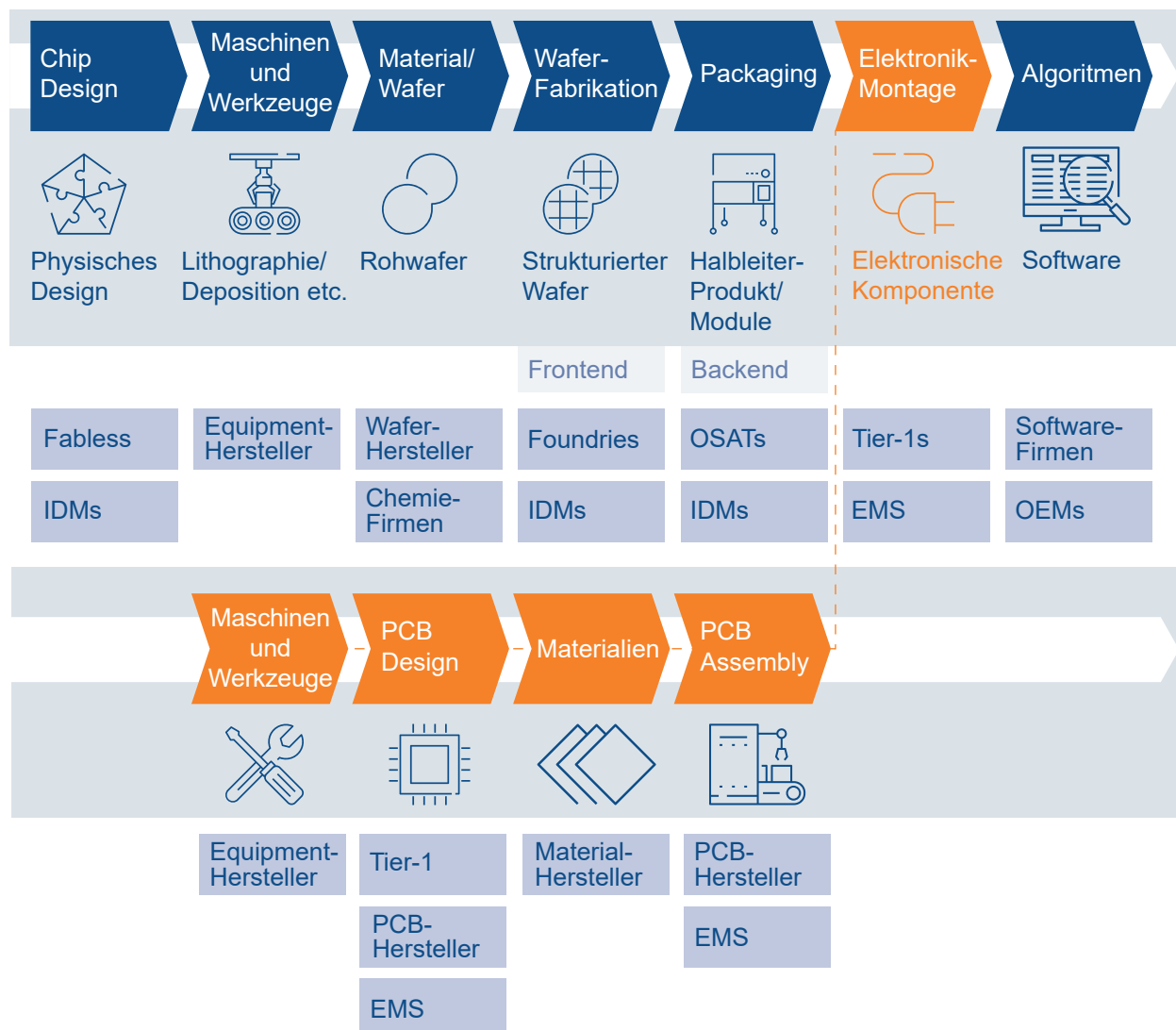
Quelle: Strategy& Analyse

1.2 Die Mikroelektronik-Wertschöpfungskette

Das Mikroelektronik-Ökosystem ist ein hochkomplexes Netzwerk mit verschiedenen Segmenten und Akteuren entlang der Wertschöpfungskette. Jedes einzelne Modul spielt eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung, Produktion und Integration von mikroelektronischen Komponenten und Systemen (siehe Abbildung 1.2). Die Mikroelektronikindustrie ist zudem stark globalisiert: Die unterschiedlichen Bereiche der Wertschöpfungskette sind weltweit verteilt und regional unterschiedlich stark vertreten. Das bedeutet, dass die Endkunden von Elektronikprodukten auf Materialien und Prozessschritte aus verschiedenen Regionen der Welt angewiesen sind (mehr dazu im Kapitel Technologiesouveränität).

Das Chipdesign bildet den ersten Schritt der Wertschöpfungskette in der Mikroelektronik und umfasst eine detaillierte Konzeption und Entwicklung von Halbleiterschaltungen, die die Funktion eines Chips definieren. Das Design beeinflusst die Leistungsfähigkeit, Energieeffizienz und Herstellbarkeit eines Chips. In diesem Bereich erstellen Unternehmen Blaupausen für die spätere Produktion. Insbesondere Fabless-Unternehmen wie beispielsweise NVIDIA oder AMD sind auf die Entwicklung spezialisiert, während ihre Partner die Produktion übernehmen. Integrierte Hersteller (Integrated Device Manufacturers, IDMs) vereinen wiederum Design und Produktion in ihrem Unternehmen. Zu den bedeutendsten Vertretern in diesem Bereich zählen Intel, Infineon, NXP, STMicroelectronics und Texas Instruments.⁴

Abb. 1.2: Übersicht über das Mikroelektronik-Ökosystem



Für die Herstellung von Halbleitern ist eine Vielzahl spezieller Rohmaterialien notwendig, wobei insbesondere Wafer und Prozesschemikalien essenziell sind. Wafer sind dünne Scheiben aus hochreinem Silizium oder einer Kombination von Silizium mit anderen Materialien (siehe Technologietrends in Kapitel 5), die als Grundlage für die Produktion von Mikrochips dienen. Da bereits kleinste Verunreinigungen die Funktionalität eines Chips beeinträchtigen können, sind in der Herstellung aufwendige Verfahren für die Gewährleistung der notwendigen Reinheit und Präzision notwendig. Prozesschemikalien und -gase werden in verschiedenen Stufen der Halbleiterfertigung eingesetzt, etwa zur Reinigung der Wafer oder zur Strukturierung von Schaltungen auf den Wafern. Die Qualität der Rohmaterialien ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Halbleiter. Führende Anbieter von Siliziumwafern sind Siltronic, Shin-Etsu Chemical und SUMCO⁴, während BASF und Linde im Bereich der Prozesschemikalien und -gase eine bedeutende Rolle spielen.

Die Frontend-Produktion, bei der Halbleiterchips auf Siliziumwafern gefertigt werden, ist ein hochkomplexer und technologisch anspruchsvoller Prozess, der bis zu 800 Produktionsschritte umfasst. Diese enorme Komplexität unterscheidet die Halbleiterproduktion signifikant von der Fertigung anderer Industriegüter (mehr Details in Kapitel 2). Die Produktion erfolgt zum einen durch spezialisierte Auftragsfertiger (Foundries), zum anderen durch IDMs, die ihre eigenen Chips fertigen. Foundries wie TSMC, Samsung Electronics, GlobalFoundries oder X-Fab konzentrieren sich auf die Fertigung von Chips für externe Kunden, während sich Unternehmen wie Infineon, NXP, Texas Instruments und STMicroelectronics auf die Eigenproduktion fokussieren.⁴ Die Technologien und Produktionsprozesse variieren dabei je nach Anwendung und spezifischen Anforderungen der jeweiligen Chips.

Nach der Frontend-Fertigung durchlaufen die Halbleiterchips den Backend-Prozess (Packaging). Dabei werden die einzelnen Chips, sogenannte Bare Dies, aus dem Siliziumwafer herausgeschnitten und anschließend in ein schützendes Gehäuse integriert. Dadurch wird der Chip vor äußeren Einflüssen und mechanischen Beschädigungen geschützt. Darüber hinaus spielt das Package eine zentrale Rolle bei der Herstellung der elektrischen Verbindungen zu anderen Komponenten. Das Packaging stellt sicher, dass der Chip in Endprodukte integriert werden kann und seine Funktion optimal erfüllt. Im Bereich des Backends wird der Markt vor allem von asiatischen Unternehmen wie der ASE Group oder JCET, jedoch auch von einigen amerikanischen Firmen wie Amkor dominiert.⁴

Im nächsten Schritt werden die verpackten Halbleiterchips auf Leiterplatten (Printed Circuit Board, PCB) montiert. Leiterplatten sind Trägermaterialien für elektronische Komponenten wie passive Elemente sowie Halbleiterchips und stellen die Grundlage für die Verbindung und Kommunikation ebendieser dar. Führende PCB-Anbieter sind Zhen Ding Technology, DSBJ und Unimicron.⁴

Passive Bauelemente wie Kondensatoren, Spulen und Widerstände, die im Gegensatz zu aktiven Bauelementen nicht aktiv gesteuert werden können, sind ebenfalls für die Fertigung von elektronischen Systemen essenziell. Sie regulieren elektrische Ströme und Signale, was für die Funktionsfähigkeit jedes elektronischen Geräts grundlegend ist. Führende Unternehmen in diesem Bereich sind Murata Manufacturing und TDK Corporation.

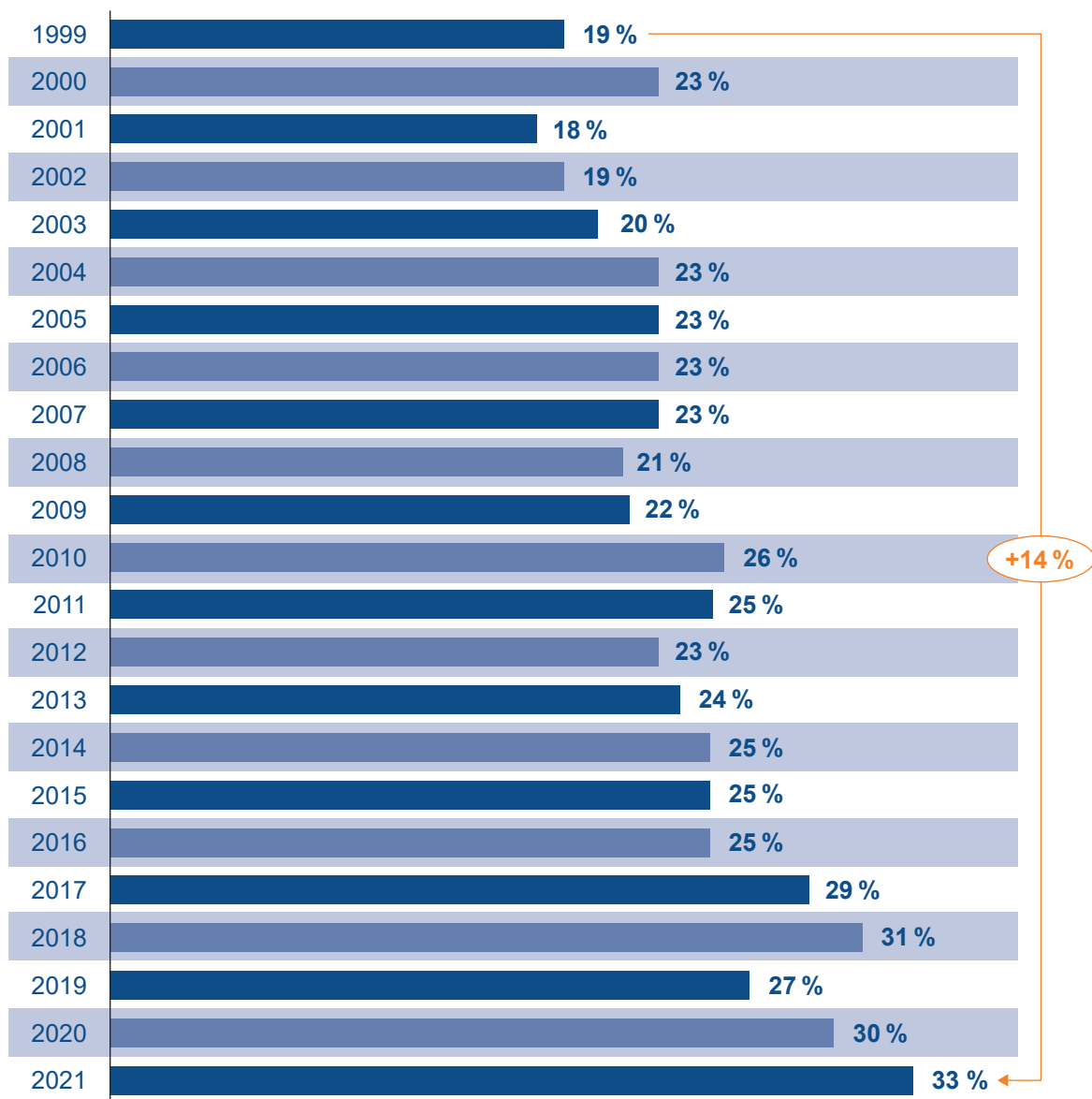
Die Bestückung der Leiterplatten und deren Integration in elektronische Systeme wird oft von Electronics Manufacturing Service (EMS) Firmen übernommen, die als Auftragsfertiger agieren. Dieser Schritt ist von hoher Relevanz, da die Qualität der Bestückung und Integration die Zuverlässigkeit sowie Leistung der Endprodukte maßgeblich beeinflusst. Zu den großen globalen EMS-Anbietern gehören Foxconn (bekannt für die Fertigung des iPhones) sowie Jabil und Flex.⁴ Parallel entwickeln entweder die Endkunden oder Drittanbieter die notwendigen Algorithmen und die Software, die die Funktionalitäten der Endprodukte steuern.

Bis ein Halbleiterchip letztendlich alle Produktionsschritte durchlaufen hat, legt er im Durchschnitt eine Strecke zurück, die dem 2,5-fachen des Erdumfangs entspricht. So erstrecken sich die Wertschöpfungsketten der Halbleiterindustrie über zahlreiche Länder und Kontinente.

1.3 Wachstum des Halbleitermarkts zur Billionen-Dollar-Industrie

In den letzten Jahren hat die Mikroelektronik stetig an Bedeutung gewonnen, da sie eine technologische Grundlage für viele globale Entwicklungen darstellt. Megatrends wie Digitalisierung, Elektrifizierung und Automatisierung sowie der Einsatz von Technologien wie KI treiben diesen Wandel voran. Diese Schlüsseltechnologien, die beispielsweise in erneuerbaren Energien, elektrischen Fahrzeugen oder smarten Industrieanwendungen eingesetzt werden, sind ohne Halbleiter undenkbar. Ein deutliches Zeichen für die wachsende Bedeutung der Mikroelektronik ist der steigende Anteil an Halbleitern in elektronischen Systemen, der von rund 20 % am Anfang der 2000er Jahre auf über 30 % in diesem Jahrzehnt gestiegen ist (siehe Abbildung 1.3).

Abb. 1.3: Wertanteil der Halbleiter an den Elektronikbauteilen, 1999-2021, in Prozent



Quelle: Statista 2023: Wertanteil von Halbleitern in elektronischen Systemen von 1999 bis 2021

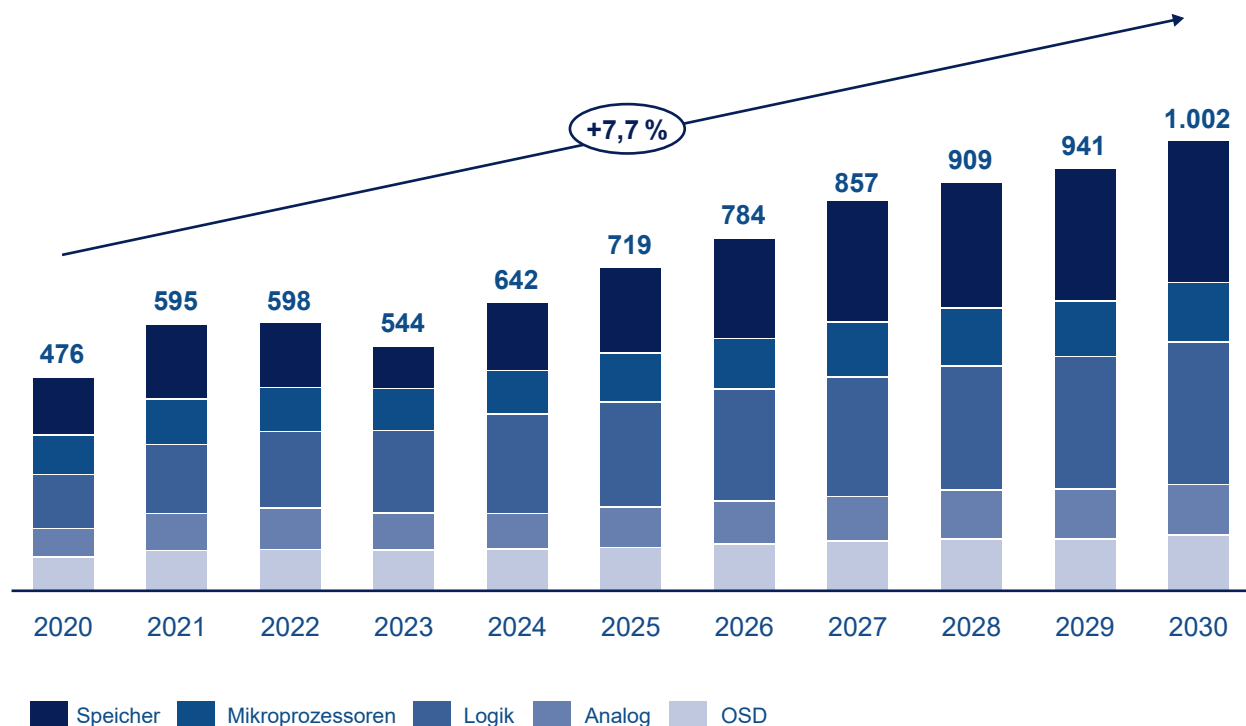
Dies spiegelt sich auch in der Entwicklung des Halbleitermarkts wider. Die genannten Megatrends treiben die Nachfrage nach Halbleitern an und sorgen für ein stetiges Wachstum der Branche. Laut der Technologie-Forschungs- und Beratungsgruppe Omdia erreicht der globale Halbleitermarkt im Jahr 2024 etwa 650 Milliarden Dollar und wird bis 2030 auf über 1 Billion Dollar anwachsen (siehe Abbildung 1.4).

Der Halbleitermarkt setzt sich aus sieben Arten von Komponenten zusammen: Speicher, Logik, Mikrokomponenten, Analog, Optoelektronik, Sensoren und diskrete Bauelemente. Davon werden Speicher- und Logikprodukte weiterhin den größten Anteil am Halbleiterumsatz ausmachen, da der Bedarf an Rechenleistung in der Datenverarbeitung sowie die Nachfrage nach schnelleren und effizienteren Speicherlösungen weiter ansteigt. Die zunehmende Verbreitung von KI, dem Internet der Dinge (IoT), Rechenzentren und Cloud-basierten Lösungen erfordert die Verarbeitung großer Datenmengen in Echtzeit. Dieser hohe Bedarf an leistungsfähigen Logik- und Speicherchips spiegelt sich entsprechend in den Herstellungskosten sowie Verkaufspreisen wider und erklärt deren dominanten Anteil am Gesamtmarkt.

Im Hinblick auf Stückzahlen dominieren weiterhin andere Komponenten wie zum Beispiel diskrete Bauelemente, die für die zunehmende Elektrifizierung eine Schlüsselrolle spielen und eine stetig wachsende Nachfrage verzeichnen. Diskrete Halbleiter wie Dioden, Transistoren und Leistungsschalter sind für eine effiziente Energieumwandlung und -steuerung essenziell und daher unverzichtbar für Anwendungen in der Elektromobilität sowie in den Bereichen erneuerbare Energien und industrielle Antriebstechnik.

Dies gilt auch für Sensoren und analoge Halbleiter, die für die Entwicklung autonomer Fahrzeuge, das IoT und moderne Kommunikationsanwendungen zentral sind. Diese Komponenten ermöglichen eine präzise Erfassung und Verarbeitung von Daten in Echtzeit, was für die Sicherheit, Vernetzung und Effizienz in einer zunehmend digitalisierten und vernetzten Welt unerlässlich ist. Der anhaltende Fortschritt in diesen Bereichen wird die Nachfrage nach diesen Technologien weiter steigern.

Abb. 1.4: Entwicklung der Halbleitermarktes nach Komponente, 2020-2030 in Milliarden Dollar



Quelle: Omdia Q3 2024

1.4 Halbleiter als Schlüsselbaustein moderner Technologien

Ein Beispiel für die zahlreichen Anwendungsbereiche der Mikroelektronik bietet das eigene Zuhause sowie dessen schrittweise Entwicklung hin zu verstärkter Effizienz und Vernetzung (siehe Abbildung 1.5). Der Einsatz von Mikroelektronik beginnt bereits bei der Energieversorgung – sei es durch selbst erzeugten Grünstrom über Photovoltaik-Paneele auf dem Dach oder durch Strom aus dem öffentlichen Netz, das zunehmend auf erneuerbare Energien wie Photovoltaik- und Windkraftanlagen setzt. Mikroelektronik ermöglicht hier die Steuerung, Überwachung und Optimierung der Energieerzeugung und -verteilung.

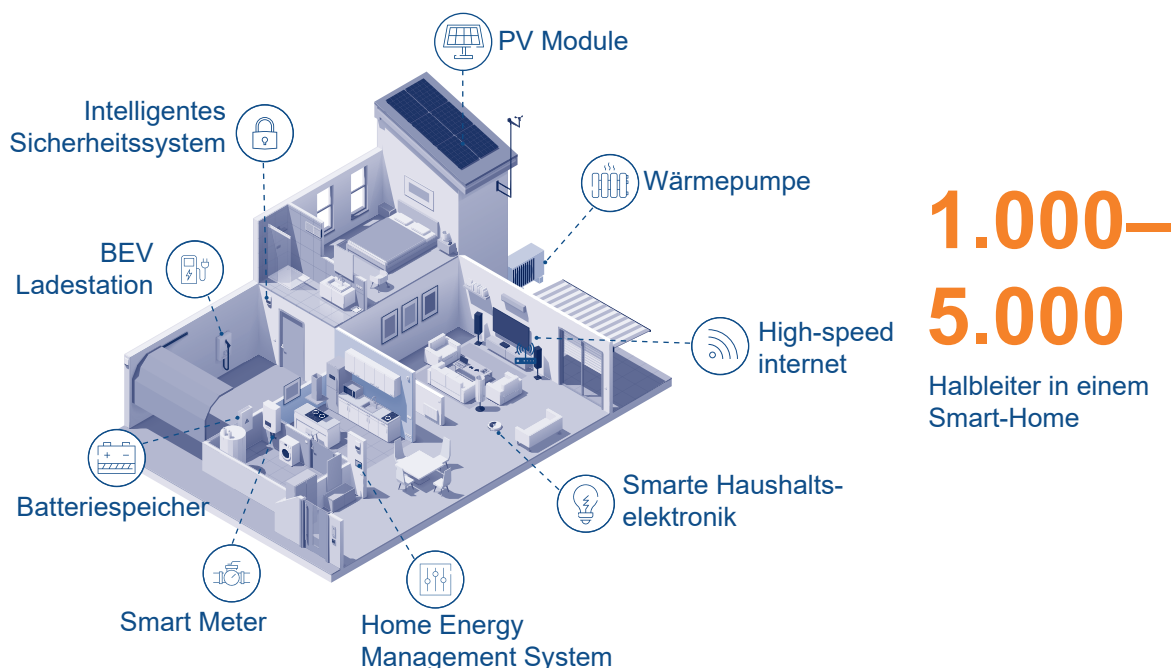
Batteriespeichersysteme speichern überschüssige Energie und nutzen Halbleiter, um das Energiemanagement und die Laderegulation zu steuern. Dadurch wird eine zuverlässige und effiziente Energieversorgung sichergestellt. Intelligente Stromzähler (Smart Meter) erfassen und analysieren den Energieverbrauch in Echtzeit – Energiemanagementsysteme nutzen diese Daten, um den Energieverbrauch zu optimieren.

Auch moderne Wärmelösungen wie Wärmepumpen, die für eine effiziente Heizung und Kühlung sorgen, integrieren Mikrokomponenten zur präzisen Steuerung und Anpassung der Temperatur. Sicherheitssysteme im Haushalt, darunter Überwachungskameras und Alarmsysteme, basieren ebenfalls auf Mikroelektronik, die für die Bildverarbeitung und Datenkommunikation unverzichtbar ist. In vielen Haushalten sind inzwischen auch vernetzte Geräte wie intelligente Kühlschränke und Waschmaschinen zu finden, für deren Funktionen – beispielsweise Fernsteuerung und Energieeffizienz – Halbleiter genutzt werden.

Darüber hinaus werden Ladestationen für batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs), die in immer mehr Haushalten Einzug halten, ebenfalls von Halbleitern gesteuert, um eine sichere und effiziente Energieübertragung zu gewährleisten. Diese vielfältigen Anwendungen zeigen, dass Mikroelektronik in vielen modernen Haushalten bereits eine zentrale Rolle spielt. Mikroelektronik trägt wesentlich zu Komfort, Sicherheit, Nachhaltigkeit und Energieeffizienz bei und wird in den nächsten Jahren weiter an Relevanz gewinnen.

Ein weiteres Beispiel für den wachsenden Einfluss der Mikroelektronik sind moderne Fahrzeuge, die zunehmend digitalisiert und vernetzt werden (siehe Abbildung 1.6). Bereits heute kommen zahlreiche elektronische Systeme zum Einsatz, die für eine Vielzahl von Funktionen unerlässlich sind. Infotainment-Systeme basieren auf leistungsstarken Mikrocontrollern und Prozessoren und integrieren verschiedene

Abb. 1.5: Übersicht der elektronischen Komponenten in Smart Home Anwendungen



Quelle: Strategy& Analyse

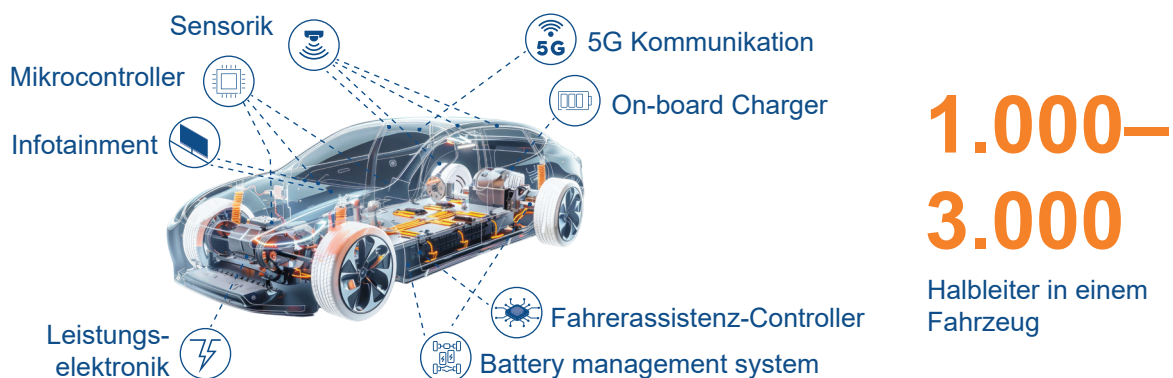
Medien- sowie Navigationsdienste. Moderne Fahrassistenzsysteme wie adaptive Tempomaten, Spurhalteassistenten oder Notbremsassistenten, verarbeiten Daten, die von Sensoren erfasst werden, in Echtzeit, um die Sicherheit zu gewährleisten.

Auch die 5G-Kommunikation gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie eine schnelle und latenzarme Vernetzung ermöglicht – dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Weiterentwicklung autonomer Fahrzeuge. Diese Technologien sind für ein effizientes Management der komplexen Datenströme zwischen Fahrzeugen und ihrer Umgebung unverzichtbar.

Noch stärker zeigt sich der Einfluss bei der Elektrifizierung von Fahrzeugen. In Elektrofahrzeugen wird der Energiefluss von der Batterie zu den Motoren und anderen Systemen von der Leistungselektronik gesteuert. Neben dem On-Board Charger, der den Wechselstrom (AC) in Gleichstrom (DC) umwandelt, um die Batterie effizient aufzuladen, spielt der Hauptumrichter eine zentrale Rolle. Dieser wandelt den von der Batterie gespeisten Gleichstrom in Wechselstrom um, der die Elektromotoren antreibt und so die Bewegung des Fahrzeugs überhaupt erst ermöglicht. Das Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht und optimiert dabei die Batterieleistung und sorgt für deren Sicherheit.

Dieser Trend zur Digitalisierung und Elektrifizierung wird durch die Einführung von Software-definierten Fahrzeugen (SDVs) weiter verstärkt. SDVs ermöglichen es, Fahrzeugfunktionen weitgehend durch Software zu implementieren, die regelmäßig aktualisiert und verbessert werden können. Dies führt zu einer stärkeren Individualisierung, mehr Flexibilität für Verbraucherinnen und Verbraucher sowie schnelleren Innovationszyklen, da Hardware und Software weitgehend unabhängig voneinander entwickelt werden.

Abb. 1.6: Übersicht der Halbleiteranwendungen in einem Elektroauto



Quelle: Strategy& Analyse

2 Chip-Knappheiten und ihre Auswirkungen

Die Mikroelektronikindustrie ist von einem hohen Investitionsbedarf geprägt. Das beginnt mit dem Bau von Halbleiterfabriken (Fabrication Plants, kurz Fabs): Von der Planung bis zur Inbetriebnahme einer neuen Produktionsstätte vergehen in der Regel drei bis fünf Jahre. Die Kosten liegen dabei im ein- bis zweistelligen Milliardenbereich. Unternehmen müssen somit bereits im Voraus Investitionsentscheidungen treffen, ohne die künftige Marktentwicklung zuverlässig vorhersehen zu können.

Wesentliche Faktoren für den hohen Investitionsaufwand sind die enorme Komplexität der Fertigungsprozesse sowie die damit verbundene Infrastruktur. Halbleiterfabriken müssen unter strengen Reinraumbedingungen betrieben werden, um Verunreinigungen in der Produktion zu vermeiden. Die Reinheitsanforderungen dieser Räume übertreffen jene von Operationssälen um ein Vielfaches. Zudem erfordern die Anlagen den Einsatz von Spezialchemikalien und sind auf einen hohen Automatisierungsgrad angewiesen. Der Vergleich mit anderen Industrien verdeutlicht dies: Eine moderne Halbleiterfabrik, wie beispielsweise das geplante Werk der European Semiconductor Manufacturing Company (ESMC) in Dresden, kostet etwa das Zehnfache einer hochmodernen Automobilproduktionsstätte, wie der Tesla Giga-Factory in Brandenburg (siehe Abbildung 2.1).

Abb. 2.1: Vergleich einer State-of-the-Art Automobil- und Halbleiterproduktion

Automobilproduktion in Brandenburg

TESLA		Fläche 700.000 m²
 ~ €1 Mrd. Investment	 €1.500/m²	
 500.000 Autos/Jahr	 12.000 Mitarbeitende	

ESMC Dresden Fab

esmc		Fläche 40.000 m^{2*}
 ~ €10 Mrd. Investment	 €250.000/m ²	
 >200 Mio. Chips/Jahr	 2.000 Mitarbeitende	

*Reinraumfläche (Produktionsfläche für Chip-Fabrikation);

Quelle: Pressemitteilungen von TESLA, NXP, Infineon, Bosch, TSMC

Die vielen Innovationen in der Halbleiterindustrie verlängern die Planungszeiträume. Neue Technologien erfordern nicht nur finanzielle Ressourcen, sondern auch jahrelange Forschung und Entwicklung. So durchlaufen Chips umfangreiche Test- und Optimierungsphasen, bevor sie in Massenproduktion hergestellt werden können. Dies spiegelt sich auch in den Kosten für das Halbleiterdesign wider, die je nach Technologie im zwei- bis dreistelligen Millionenbereich liegen.

Diese Faktoren zwingen die Hersteller dazu, große Stückzahlen eines Produkts zu verkaufen, um profitabel zu sein. Die enormen Entwicklungs-, Investitions- und Produktionskosten erschweren es der Halbleiterindustrie, flexibel auf kurzfristige Nachfrageschwankungen, die stark von der Automobilbranche, der Unterhaltungselektronik und der industriellen Automatisierung geprägt sind, zu reagieren.

Die beschriebenen Dynamiken führen zu den typischen Schweinezyklen der Halbleiterindustrie. In Phasen hoher Nachfrage stoßen die Kapazitäten schnell an ihre Grenzen, was zu Lieferengpässen und Preisanstiegen führen kann. Sobald neue Kapazitäten aufgebaut sind und die Nachfrage abnimmt, entstehen zyklische Überkapazitäten und Preiskorrekturen bei einzelnen Technologien. In diesen Anpassungsphasen wird die Produktion reduziert oder es kommt zu Marktberichtigungen, um das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage wiederherzustellen. Außerdem bauen Unternehmen in wirtschaftlich starken Phasen oft ihre Lagerbestände auf, wodurch die Nachfrage nach Halbleitern kurzfristig weiter steigt. In schwächeren Phasen greifen diese Unternehmen zunächst auf ihren Lagerbestand zurück, bevor neue Bestellungen aufgegeben werden, was zusätzliche Schwankungen im Markt auslöst.

Die globale Vernetzung der Halbleiterindustrie bringt zusätzliche Herausforderungen mit sich, da geopolitische Spannungen und Handelsbeschränkungen einen erheblichen Druck auf die globalen Lieferketten ausüben. Lokale Beeinträchtigungen wie zum Beispiel Naturkatastrophen oder pandemiebedingte Lockdowns belasten die Lieferketten zusätzlich und verschärfen bestehende Markteffekte.

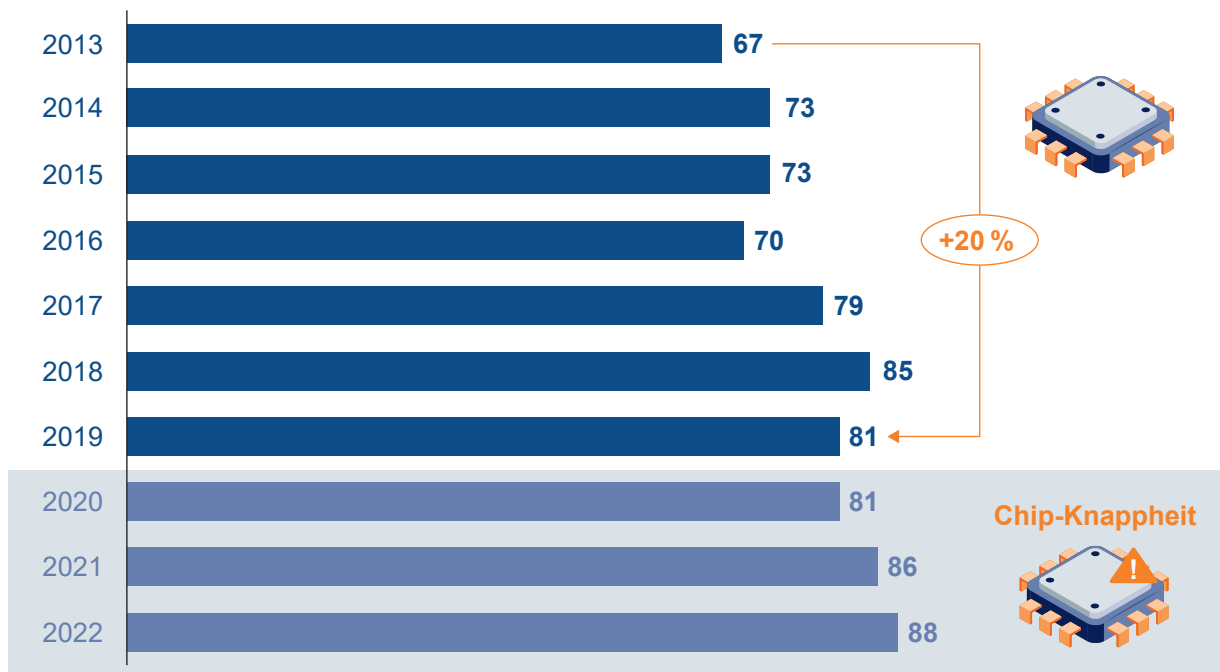
2.1 Chip-Knappheiten, ein wiederkehrendes Phänomen

Chip-Knappheiten sind kein neues Phänomen und haben die Halbleiterindustrie bereits in der Vergangenheit mehrfach betroffen: Immer dann, wenn technologische Durchbrüche oder globale Ereignisse die Nachfrage nach Halbleitern unerwartet stark befeuerten, gerieten die Lieferketten unter Druck. So führte beispielsweise der Boom der Personal Computer in den 1980er Jahren⁵ sowie die rasante Verbreitung von Mobiltelefonen in den 2000er Jahren zu erheblichen Engpässen.⁶ Auch Naturkatastrophen, wie das Erdbeben und der Tsunami in Japan im Jahr 2011⁷, hatten in der Vergangenheit Auswirkungen auf die Lieferketten.

Die bisher schwerwiegendste Chip-Knappheit dauerte von Ende 2020 bis 2023.⁸ Durch die stark angestiegene Nachfrage kam es zu in diesem Zeitraum zu einer weltweiten Verknappung von Halbleiterchips. Dies führte zu weitreichenden Produktionsunterbrechungen in verschiedenen Industrien und hatte tiefgreifende Auswirkungen auf die globale Wirtschaft. Von dieser Knappheit betroffen waren insbesondere die Automobilindustrie sowie zum Teil der Maschinen- und Anlagenbau.

Doch bereits vor dieser Chip-Knappheit stieß die Halbleiterversorgung aufgrund der stetig wachsenden Nachfrage in verschiedenen Sektoren allmählich an ihre Kapazitätsgrenzen. Diese Entwicklung wurde durch die zunehmende Digitalisierung und Elektrifizierung beschleunigt (siehe Abbildung 2.2). Die COVID-19-Pandemie wirkte dabei als Jahrhundertstoch, wodurch das globale BIP im Jahr 2020 so stark einbrach wie seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs nicht mehr. In Erwartung eines deutlichen Rückgangs der Automobilverkäufe veranlasste dieser Einbruch viele Autohersteller Anfang 2020 dazu, Teile ihrer zugeteilten Halbleiterkapazitäten in einem größeren Umfang freizugeben.

Abb. 2.2: Durchschnittliche Auslastung von US-Halbleiterunternehmen, 2013–2022 in Prozent



Gleichzeitig wurde zunehmend im Homeoffice gearbeitet und Verbraucher:innen nutzten während der Lock-downs vermehrt Streaming-Dienste und Videospiele. Dies führte zu einer überproportionalen Nachfrage an Chips für Datenverarbeitungs- und Kommunikationstechnologien. Auch durch das rasche Wachstum des Internets der Dinge (Internet of Things, IoT) wurden vernetzte Geräte und Sensoren verstärkt in Haushalten und Unternehmen eingesetzt. Die Halbleiterhersteller reagierten darauf, indem sie die freigewordenen Kapazitäten anderen Industrien, beispielsweise der Unterhaltungselektronik, zuwiesen, um ihre Fabs weiterhin auszulasten. Entgegen den Erwartungen fiel der Rückgang des Bedarfs an Halbleitern in der Automobilbranche allerdings geringer aus. Stattdessen führte das rasch wachsende Interesse an Elektrofahrzeugen zu einer anhaltenden Steigerung der Nachfrage nach Halbleitern. Dabei ist zu beachten, dass europäische Kernindustrien, wie die Automobil- sowie die Maschinen- und Anlagenbauindustrie, nur einen kleinen Anteil des globalen Halbleiterbedarfs ausmachen. So ist zum Beispiel die weltweite Automobilbranche für weniger als 10 % der Halbleiter-Stückzahlen verantwortlich.⁹

Doch auch geopolitische Faktoren trugen zur Verschärfung der Chip-Knappheit bei. Handelskonflikte behinderten die Beschaffung von Halbleitern und führten in einigen Ländern und Unternehmen zu einer strategischen Vorratshaltung, was den globalen Druck auf die Lieferketten weiter erhöhte. Naturkatastrophen wie eine Dürre in Taiwan, mehrere Fabrikbrände in Japan und ein Wintersturm in den USA zwischen 2019 und 2022, verschärften die Knappheit zusätzlich.

Allerdings betraf die Chip-Knappheit nicht alle Produktkategorien gleichermaßen, sondern konzentrierte sich auf spezifische Segmente, die jedoch besonders kritisch für viele Anwendungen im Automobil- und Industriebereich sind. Ein Hauptgrund hierfür ist, dass diese Chips häufig auf sogenannten „mature nodes“ basieren. Diese Chips sind optimal für ihre jeweiligen Anwendungen geeignet, waren jedoch aufgrund geringerer Investitionen in die Produktionskapazitäten der letzten Jahre nicht ausreichend verfügbar und konnten die sprunghaft gestiegene Nachfrage somit nicht decken.

Insbesondere bei Mikrocontrollern und Prozessoren gab es signifikante Engpässe, diese sind jedoch essenziell für die Steuerung und Verarbeitung einer Vielzahl an Geräten und Systemen. Leistungshalbleiter, die für eine effiziente Energieübertragung und -verwaltung in Anwendungen wie Elektrofahrzeugen und industriellen Maschinen benötigt werden, waren ebenfalls stark betroffen. Auch programmierbare Logik-ICs (Field

Programmable Gate Arrays, FPGAs), die für Flexibilität und Anpassungsfähigkeit in der Hardwareentwicklung sorgen, erlebten erhebliche Verknappungen – genauso wie Spannungsversorgungsmanagement-Komponenten wie Gate-Treiber und LED-Treiber.

Im Gegensatz dazu blieben andere Halbleiterkategorien weitgehend verfügbar. So waren analoge Halbleiter, die zur Verarbeitung von kontinuierlichen Signalen verwendet werden sowie Standard-Transistoren und -Dioden, die grundlegende Schaltelemente in vielen elektronischen Schaltungen darstellen, weniger von der Knappheit betroffen. Auch Standard-Logikbausteine und Speicherchips konnten weitgehend ohne signifikante Unterbrechungen geliefert werden.

2.2 Wirtschaftliche Auswirkungen der Chip-Knappheit

Die Chip-Knappheit hat besonders die Industriegüter- und Automobilsektoren betroffen. Andere deutsche Branchen, wie beispielsweise die Konsumgüterelektronik waren vergleichbar weniger stark betroffen und wurden daher auch in der Analyse nicht berücksichtigt. In der Luft- und Raumfahrt führte der pandemiebedingte Nachfragerückgang zu Stornierungen von Flugzeugbestellungen, was die Auswirkungen der Chip-Knappheit dort überlagerte. In weiteren Bereichen wie der Dienstleistungsbranche, der Chemieindustrie oder der Medizintechnik waren keine wirtschaftlich messbaren, chipbedingten Ausfälle zu verzeichnen.

Analyse der BIP-Schäden

Zur Berechnung der BIP-Schäden wurde 2019 als Basisjahr herangezogen, da in diesem Jahr weder die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie noch die Chip-Knappheit zu spüren war. Im Hinblick auf die Automobilindustrie wurde die Anzahl der in Deutschland produzierten PKWs in den Jahren 2021 bis 2023 mit dem Produktionsvolumen von 2019 verglichen. Diese Differenz wurde mit der vom Statistischen Bundesamt ermittelten Bruttowertschöpfung pro produziertem Fahrzeug multipliziert, um den BIP-Schaden zu berechnen. Im Bereich der Industriegüterindustrie wurde der BIP-Beitrag der Jahre 2021 bis 2023 mit dem des Jahres 2019 verglichen, um die entsprechenden Verluste zu kalkulieren.

Die Analyse der BIP-Schäden, die durch Lieferengpässe in der Mikroelektronikindustrie entstanden sind, zeigt, dass insbesondere die Automobilindustrie von 2021 bis 2023 stark betroffen war. In diesem Sektor führte der Produktionsausfall zu einem BIP-Schaden von insgesamt 99 Milliarden Euro für die deutsche Wirtschaft. Allerdings hängt das Ergebnis der Analyse stark von der zugrunde liegenden Zahl der Produktionsausfälle ab. Die in dieser Studie verwendete Methodik bezieht sich auf die Produktionszahlen des Verbands der Automobilindustrie (VDA) und geht davon aus, dass der Rückgang nach 2019 primär auf die Knappheit zurückzuführen ist. Daher liegt der berechnete BIP-Schaden am oberen Ende der möglichen Ergebnisskala. Auf der anderen Seite spiegeln diese Zahlen nicht das gesamte Ausmaß des Schadens wider, da in den Endanwendungsindustrien zusätzlich versteckte Kosten entstanden sind. Neben den Produktionsausfällen in der Automobilindustrie ist auch im Maschinenbau ein wirtschaftlicher Schaden in Höhe von etwa 4 Milliarden Euro entstanden (siehe Abbildung 2.3). Damit beläuft sich der Gesamtverlust – basierend auf der zugrunde liegenden Methodik – auf mindestens 102 Milliarden Euro, was 2,4 % des deutschen Jahres-BIPs im Jahr 2022 entspricht.

Abb. 2.3: Quantifizierung des BIP-Schadens durch die Chip-Knappheit, 2021-2023 in Milliarden Euro



Quelle: Strategy&Analyse

Versteckte Kosten durch Bullwhip-Effekt, Lagerbestände und anderes

Ein zentraler Faktor für die zusätzlich versteckten Kosten ist der Peitschen- bzw. Bullwhip-Effekt, bei dem es durch Unsicherheiten und Verzögerungen in der Lieferkette zu überproportionalen Schwankungen in den Bestellmengen kommt. Unternehmen reagierten auf die Halbleiterknappheit, indem sie versuchten, ihre Unterbelieferung durch überproportional erhöhte Bestellungen zu kompensieren. Dies führte jedoch zu zusätzlichen Unsicherheiten auf Seiten der Halbleiterhersteller und erschwerte es, die tatsächlichen Bedarfe der Unternehmen präzise einzuschätzen.

Um die Knappheit zu bewältigen, stellten viele Unternehmen Task Forces zusammen, die sich gezielt mit der Beschaffung und dem Management von Halbleiterlieferungen befassten. Diese spezialisierten Teams arbeiteten intensiv daran, alternative Lieferquellen zu identifizieren und bestehende Lieferverträge zu optimieren. Allerdings gingen mit der Einrichtung solcher Task Forces auch erhebliche Kosten einher. Die Abstellung von Personal aus regulären Abteilungen beeinträchtigte die Produktivität in anderen Bereichen, außerdem wurden oftmals externe Berater:innen oder Expert:innen hinzugezogen, was zu zusätzlichen Ausgaben führte. Zudem erforderten die von den Task Forces initiierten Sofortmaßnahmen oft kurzfristige Investitionen in die Logistik und Optimierung der Lieferketten, um die Situation zu entschärfen.

Eine dieser Maßnahmen war die Aufstockung der Lagerbestände – Unternehmen haben sich größere Vorräte an kritischen Komponenten beschafft, um zukünftigen möglichen Engpässen vorzubeugen. Dies führte zu erheblichen zusätzlichen Kosten für Lagerhaltung und Logistik. Auch der Aufwand für Re-Designs und die Beschaffung alternativer Komponenten nahm stark zu, da Unternehmen ihre Produkte anpassen mussten, um andere Halbleiter oder Ersatzteile nutzen zu können. Diese Anpassungen waren oft zeitaufwendig und kostspielig, da sie umfangreiche Tests und Validierungen erforderten. Gleichzeitig mussten alternative Halbleiterhersteller qualifiziert werden, was zusätzliche administrative Kosten verursachte. Unternehmen waren zunehmend auf Zwischenhändler angewiesen, um dringend benötigte Chips zu beschaffen. Diese Broker verlangen jedoch oft hohe Aufschläge, wodurch die Produktionskosten weiter in die Höhe stiegen.

Unternehmen durch Chip-Knappheit unter Druck

Die Kombination dieser Faktoren führte zu einer erheblichen Belastung der betroffenen Industrien. Produktionskapazitäten wurden eingeschränkt, gleichzeitig stiegen die Kostenstrukturen – dies spiegelte sich in höheren Endverbraucherpreisen wider. Darüber hinaus führten die Nachwirkungen der Chip-Knappheit und der Corona-Pandemie zu einer Verschiebung der globalen Marktverhältnisse. Die hohen Lagerbestände, die während der Chip-Knappheit aufgebaut wurden, führten anschließend zu einem starken Preisverfall in der Mikroelektronikindustrie. Durch diese Kostensenkungen gerieten europäische Unternehmen, besonders in den Bereichen Leiterplatten und EMS, die ohnehin unter Druck standen, noch stärker in Bedrängnis. Gleichzeitig verstärkte dieser Markttrend die Dominanz asiatischer Akteure in diesen Bereichen, da europäische Unternehmen in den Endanwendungsindustrien während der Re-Designs bei der Chip-Knappheit vermehrt asiatische Alternativen qualifiziert haben. Diese Entwicklung hat die Position asiatischer Marktteilnehmer in einigen Bereichen gestärkt und den europäischen Markt langfristig geschwächt. Die massiven Auswirkungen der Chip-Knappheit verdeutlichen die Dringlichkeit, eine robustere und flexiblere Lieferkette aufzubauen, um zukünftige Störungen besser abfedern zu können.

Notwendige Stärkung der Halbleiter-Lieferketten

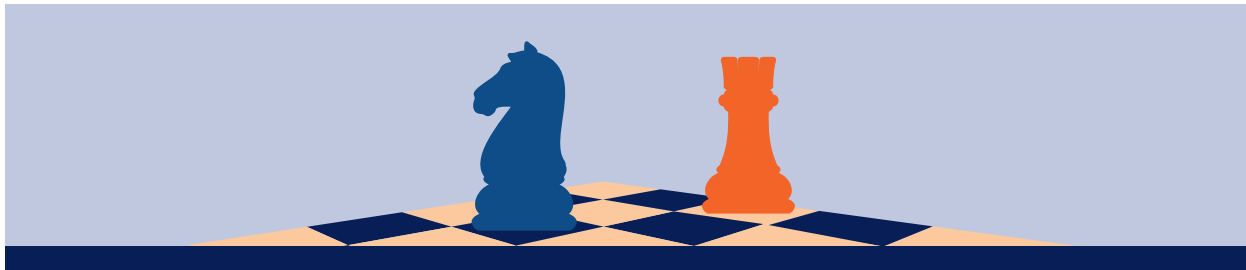
Der Blick in die Zukunft lässt vermuten, dass es auch weiterhin zu Engpässen in der Halbleiterbranche kommen wird, da solche Verknappungen ein wiederkehrendes Phänomen darstellen. Zwar sind zukünftige Engpässe in der Halbleiterindustrie wahrscheinlich, doch dürften sie punktueller auftreten und weniger gravierend ausfallen. Diese Entwicklung ist das Ergebnis gezielter Investitionsentscheidungen, die unter anderem durch staatliche Förderprogramme ermöglicht werden und zur Diversifizierung sowie Flexibilität der globalen Halbleiterproduktion beitragen.

Dennoch stellen großflächige Risiken wie geopolitische Spannungen, Naturkatastrophen, Handelskriege und militärische Konflikte weiterhin eine erhebliche Bedrohung dar. Die steigende Bedeutung von Mikroelektronik in nahezu allen Industriezweigen und die fortlaufende Zunahme von Anwendungen – von KI über IoT bis hin zu autonomen Fahrzeugen – verstärken die Auswirkungen solcher Risiken. Diese zunehmende Abhängigkeit macht die globale Wirtschaft anfälliger für Störungen in der Halbleiterlieferkette. Die vergangene Chip-Knappheit von 2021 bis 2023 war von globalem Ausmaß. So waren weltweit Regionen betroffen, allerdings hatten insbesondere die US-amerikanische und europäische Industrie – speziell die Automobilindustrie – mit den größten Auswirkungen zu kämpfen.

Im Falle einer lokalen Knappheit, die ausschließlich Europa beträfe, wären die Auswirkungen noch gravierender. Europa ist stark in die internationale Halbleiterversorgungskette eingebunden – sowohl als Abnehmer als auch als Anbieter spezialisierter Technologien und Ausrüstungen. Eine solche Unterbrechung könnte zu erheblichen Produktionsausfällen und mittelbar zum Verlust von Marktanteilen in Schlüsselindustrien wie der Automobilbranche, dem Maschinenbau und weiteren wichtigen Sektoren führen.

Aus der Chip-Knappheit lassen sich mehrere Lehren ziehen, die zur Risikominimierung beitragen können. Abbildung 2.4 zeigt und erläutert eine Übersicht möglicher Maßnahmen, die dazu beitragen können, die Probleme in den Halbleiterlieferketten zu reduzieren. Durch die Umsetzung dieser Maßnahmen können zukünftige Krisen besser bewältigt und die Widerstandsfähigkeit der Industrie gestärkt werden. Aufgrund der strukturellen Herausforderungen der Mikroelektronikindustrie, gewinnt eine verlässlichere Prognose der Bedarfe durch die Abnehmerindustrien weiter an Relevanz.

Abb. 2.4: Maßnahmen für ein langfristiges, ganzheitliches Halbleitermanagement



Maßnahmen



Effekt

1

**Verbesserung der
Bedarfstransparenz**

Eine verbesserte Bedarfsplanung kann maßgeblich dazu beitragen, Knappheiten zu vermeiden. Präzisere Plandaten ermöglichen es, die Notwendigkeit zukünftiger Investitionen besser abzuschätzen und Kapazitäten rechtzeitig zu sichern.

2

**Investitionen in
Produktionskapazitäten**

Umfassende Investitionen in Produktionskapazitäten, insbesondere im Bereich der Schlüsseltechnologien, tragen dazu bei, die Abhängigkeit von außereuropäischen Lieferanten zu reduzieren und geopolitische Risiken minimieren zu können.

3

**Design for resilience/
sourcing**

Durch die bereichsübergreifende Zusammenarbeit von F&E, Einkauf und Lieferkettenmanagement in Partnerschaft mit den Lieferanten können Endabnehmerindustrien eine höhere Designflexibilität sicherstellen.

4

**Aufbau von langfristigen
Partnerschaften**

Langfristige Partnerschaften entlang der Mikroelektronik-Wertschöpfungskette sorgen für einen besseren Austausch und eine frühzeitige Weitergabe wichtiger Daten.

5

Aufbau von Arbeitskräften

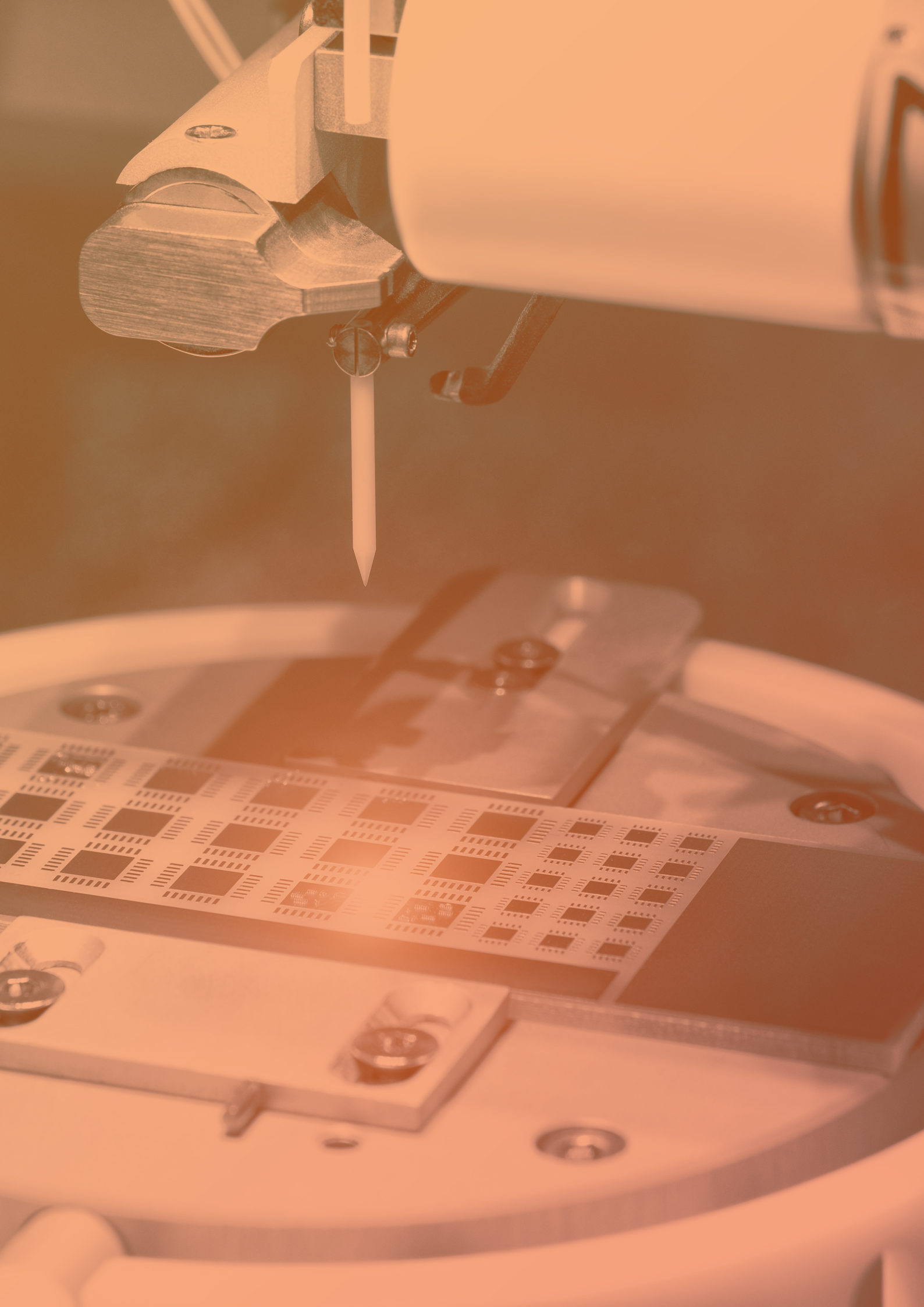
Die steigende Nachfrage nach Mikroelektronik wird die Nachfrage nach qualifizierten Fachkräften kontinuierlich erhöhen. Eine solide Strategie zur Förderung und Entwicklung dieser Arbeitskräfte ist daher unerlässlich.

6

Multi-Fab/Multi-Sourcing

Multi-Fab- und Multi-Sourcing-Strategien können helfen Unterbrechungen in der Lieferkette zu minimieren. Durch die Diversifizierung ihrer Produktionsstandorte und Lieferanten können sie das Risiko verringern, dass geopolitische Ereignisse Geschäftsabläufe beeinträchtigen.

Quelle: Strategy& Analyse



3 ROI der Mikroelektronikförderungen

Durch die globale Chip-Knappheit von 2021 bis 2023 und aufgrund geopolitischer Herausforderungen haben viele Nationen beschlossen, ihre Mikroelektronikindustrie verstärkt mit staatlichen Mitteln zu fördern. Ihr Ziel ist es, Abhängigkeiten zu reduzieren, um nicht zum Spielball geopolitischer Entwicklungen zu werden. Zu den positiven Effekten durch staatliche Förderungen der Mikroelektronikindustrie zählen:

Wirtschaftswachstum und Arbeitsplätze	Gezielte Fördermittel kurbeln das Wirtschaftswachstum an und schaffen neue Arbeitsplätze, indem mehr Wertschöpfung im eigenen Land generiert wird.
Stärkung von Forschung und Entwicklung	Die Förderung von Forschung und Entwicklung treibt Innovationen voran. Diese stärken sowohl die Technologiesouveränität als auch die Wettbewerbsfähigkeit der Mikroelektronikindustrie und der globalen Endmärkte. Insbesondere die forschungsintensive Mikroelektronik, die durch einen hohen Innovationsgrad und umfangreiche Investitionen in Forschung und Entwicklung geprägt ist, kann von solchen Maßnahmen erheblich profitieren.
Digitale und grüne Transformation	Ein wichtiges Ziel der EU ist es, die digitale und grüne Transformation voranzutreiben. Hierbei stehen die Entwicklungen innovativer Mikroelektronik- und Kommunikationslösungen sowie energieeffizienter und ressourcenschonender Systeme und Fertigungsmethoden im Fokus. Diese Fortschritte werden Schlüsseltechnologien wie 5G/6G, autonomes Fahren, künstliche Intelligenz und Quantencomputing maßgeblich vorantreiben. Gleichzeitig tragen sie wesentlich zur grünen Transformation bei – sowohl bei der Erzeugung erneuerbarer Energien als auch durch die Elektrifizierung der Industriesektoren sowie des privaten und öffentlichen Lebens.
Stärkung der nationalen Sicherheit	Förderprogramme stärken die nationale Sicherheit durch die Entwicklung neuer Technologien für die Verteidigungsindustrie. So wird sichergestellt, dass Staaten technologisch konkurrenzfähig bleiben und das Risiko von Datenmanipulation und Spionage verringert wird. Um die Datensicherheit zu fördern, sind außerdem Investitionen in die Kommunikationsindustrie und Hardwaresicherheit von Relevanz.

3.1 Förderung in der Mikroelektronikindustrie

Als „Important Projects of Common European Interest (IPCEI)“ werden strategische Fördermaßnahmen in enger Koordination der Mitgliedstaaten und der Europäischen Kommission bezeichnet. Das Ziel ist es, nachhaltiges Wirtschaftswachstum zu fördern, neue Arbeitsplätze zu schaffen sowie die Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Autonomie in der EU zu stärken. Hierzu sollen Innovationen und Infrastrukturvorhaben im Rahmen einer grenzübergreifenden Zusammenarbeit ermöglicht werden, die positive Spillover-Effekte auf den Binnenmarkt und die ganze Gesellschaft haben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Förderung hochinnovativer Produktionsprozesse und Produkte, die bis zur ersten gewerblichen Nutzung entwickelt und umgesetzt werden sollen.

2018: Das erste IPCEI für Mikroelektronik

Das erste IPCEI für Mikroelektronik wurde 2018 ins Leben gerufen, um die Entwicklung energieeffizienter Chips und Leistungshalbleiter, smarter Sensoren, Optischen Komponenten und Verbundmaterialien zu fördern. Insgesamt 32 Unternehmen aus den fünf Mitgliedsstaaten Österreich, Frankreich, Deutschland, Italien und dem Vereinigten Königreich verfolgten dabei 43 Projekte zur Stärkung der Produktinnovationen innerhalb der Mikroelektronik. Unter den geförderten Unternehmen befanden sich führende Betriebe wie STMicroelectronics, Bosch, Infineon, NXP, GlobalFoundries oder OSRAM. Das staatliche Fördervolumen betrug 1,9 Milliarden Euro und soll weitere 6,5 Milliarden Euro an privaten Investitionen angestoßen haben.²

2021: Innovation und technologischen Fortschritt fördern durch IPCEI ME/CT

Die positive Resonanz und der Erfolg des ersten IPCEI im Bereich der Mikroelektronik sorgte dafür, dass im Jahr 2021 ein weiteres IPCEI für die Mikroelektronik und Kommunikationstechnologie (IPCEI ME/CT) initiiert und 2023 genehmigt wurde. Das Ziel des IPCEI ME/CT ist die Stimulierung von Innovation und technologischem Fortschritt, um die Gesellschaft in der EU grüner, digitaler, sicherer, resilienter und souveräner zu gestalten. Hierzu wurden Unternehmen in folgenden Bereichen unterstützt: neue Sensorik, Cybersicherheit, energieeffiziente Chips zur Datenspeicherung und -prozessierung, ausführende mikroelektronische Systeme, sowie schnelle, sichere und verlässliche Datenübertragung. Am IPCEI ME/CT nehmen insgesamt 56 Firmen aus 14 Mitgliedsstaaten teil, die 68 Forschungs- und Projekte der ersten gewerblichen Entwicklung vorantreiben. Die teilnehmenden Mitgliedsstaaten sind Österreich, Tschechien, Finnland, Frankreich, Deutschland, Griechenland, Irland, Italien, Malta, Niederlande, Polen, Rumänien, Slowakei und Spanien. Für das IPCEI ME/CT für Mikroelektronik und Kommunikationstechnologie stellen die beteiligten EU-Staaten 8,1 Milliarden Euro Fördergelder bereit und erhoffen sich dadurch weitere 13,7 Milliarden Euro private Investitionen zu aktivieren. Auch am IPCEI ME/CT sind renommierte Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette beteiligt – vom Materialhersteller Soitec über IDMs wie STMicroelectronics, NXP und Infineon oder innovative Foundries wie X-FAB und GlobalFoundries bis zu Firmen aus den Anwendungsindustrien wie die Automobilzulieferer ZF Friedrichshafen oder Valeo.²

2023: Der European Chips Act

Im Jahr 2023 wurde der European Chips Act (ECA) verabschiedet. Dieses Gesetz stellt die Antwort der EU auf die zunehmende Abhängigkeit von anderen globalen Nationen in der Halbleiterfertigung dar, die in den Jahren 2021 bis 2023 sichtbar wurde. Eine von der Europäischen Kommission durchgeführte Umfrage unter den Anwendungsindustrien zeigte, dass bis 2030 mit einer Verdopplung der Nachfrage nach Mikrochips gerechnet wird. Mit dem European Chips Act verfolgt die EU das Ziel, ihre technologische Führungsrolle zu stärken und zukünftige Unterbrechungen der Lieferketten entweder zu verhindern oder besser darauf reagieren zu können.

Dazu gehören die bisherigen Projekte, die im Rahmen des ECA angekündigt wurden. So wurde STMicroelectronics ein Projekt zur Herstellung von Siliziumkarbid-Substraten in Catania, Italien, genehmigt. Das Investitionsvolumen beträgt 750 Millionen Euro, wovon über 290 Millionen Euro aus staatlicher Förderung stammen. Zusätzlich dazu hat STMicroelectronics in Catania eine zusätzliche Fab zur Herstellung von Siliziumkarbid-Leistungselektronik geplant, welche mit 2 Milliarden Euro subventioniert wird. Ein weiteres Projekt von STMicroelectronics, gemeinsam mit GlobalFoundries, soll in Crolles in Frankreich entstehen: Hier soll für 7,4 Milliarden Euro, davon 2,9 Milliarden Euro Subventionen, eine gemeinsame Fab entstehen, in der 300mm Siliziumchips für Automobil-, Industrie-, IoT- und Telekommunikationsanwendungen gefertigt werden. Außerdem entsteht in Dresden eine Fab von TSMC, die als Joint Venture unter dem Namen ESMC gemeinsam mit NXP, Infineon, und Bosch betrieben werden soll. Diese neue Fabrik wird insgesamt 10 Milliarden Euro kosten, davon werden 5 Milliarden Euro aus staatlichen Fördermitteln bezogen. Auch hier ist der Betrieb einer 300-mm-Silizium-Fab geplant, die Produkte für die europäische und globale Automobil-, Industrie- und Telekommunikationsbranche liefern soll.

Ein weiteres bedeutendes Projekt in Dresden ist das neue Modul für die Smart Power Fab von Infineon, die ebenfalls im Rahmen des European Chips Act unterstützt werden soll. Mit einem Investitionsvolumen von 5 Milliarden Euro und einer angestrebten Förderung von rund einer Milliarden Euro trägt das Werk zur Stärkung der europäischen Halbleiterfertigung bei. Die Fab soll ab 2026 Halbleiter produzieren, die Schlüsselindustrien wie die Automobilbranche und den Bereich der erneuerbaren Energien unterstützen. Laut Angaben des Halbleiterunternehmens sollen dort 1.000 neue Arbeitsplätze entstehen.

Weiterhin kündigte Intel 2022 den Bau einer Mega-Fab für 2-nm-Technologien in Deutschland an. Das Projekt wurde jedoch zunächst gestoppt und um zwei Jahre verschoben, was auf die aktuelle Situation des Unternehmens zurückzuführen ist. In einer ersten Phase plante Intel, rund 30 Milliarden Euro, davon 10 Milliarden Euro an Subventionen, in den Fertigungsstandort Magdeburg, Deutschland, zu investieren.

Bislang belaufen sich die zugesagten öffentlichen Fördermittel für europäische Mikroelektronikprogramme auf über 32 Milliarden Euro.¹ Bei den offiziell kommunizierten 43 Milliarden Euro bis 2030 für die Mobilisierung öffentlicher und privater Investitionen durch den ECA ist noch nicht definiert, welcher Anteil auf öffentliche Fördergelder entfallen wird.³ Daher wird in der Studie der Betrag von 32 Milliarden als Referenzwert verwendet.

3.2 Der globale Förderwettbewerb in der Mikroelektronik

Doch wie bereits erwähnt, sind sich auch die anderen Nationen der Relevanz der Mikroelektronikindustrie bewusst und investieren in einem großen Umfang. Hierzu gehören unter anderem die USA, China, Südkorea, Japan, Taiwan, Singapur oder Indien – diese Länder haben verschiedene Förderprogramme entwickelt, die unterschiedliche Schwerpunkte setzen.

Taiwan und Südkorea setzen beispielsweise primär auf steuerliche Anreize in Form von steuerlichen Gutschriften für Forschung und Entwicklung sowie für die Beschaffung von Produktionsanlagen (Tooling). Japan legt seinen Fokus vor allem auf die Entwicklung und Produktion von Chips für Anwendungen in den Bereichen KI und High-Performance-Computing. Dies soll zum Beispiel durch das staatlich geförderte Chip-Venture-Unternehmen Rapidus möglich gemacht werden, welches unter anderem die Produktion von Halbleitern unterhalb von 2nm entwickelt.

Die USA stellen 53 Milliarden US-Dollar, China sogar 143 Milliarden US-Dollar und Japan voraussichtlich 65 Milliarden US-Dollar für die Förderung der Halbleiterindustrie bereit (siehe Abbildung 3.1), wobei ein Teil der japanischen Investitionen auch in die Förderung der KI-Industrie fließen soll.

Abb. 3.1: Übersicht Mikroelektronik-Förderprogramme der führenden Halbleiterregionen (Stand Q3 2024)

US	EU	China	Südkorea	Japan	Taiwan
Chips for America	EU Chips Act & IPCEI	Semicon package	K-Chips Act	Semicon ecosystem strategy	Taiwan chip act
					
>\$53 Mrd. bis 2026 ¹	>\$30 Mrd. bis 2030	\$143 Mrd. ² bis 2028	Steuervorteile bis 2032	\$65 Mrd. bis 2030 ³	Steuervorteile bis 2029
Zusätzliche Steuergutschriften und -anreize					
Gutschrift		Befreiung	Gutschrift		Gutschrift
25% der Investmentkosten		Befreiung von der Einkommenssteuer für 2-10 Jahre in Abhängigkeit der Technologie	20% der Investmentkosten 50% der F&E-Kosten		15-25% F&E 5% Tooling Keine Begrenzung für steuerliche Aufwendungen

1) Quantifizierung nationaler, regionaler und Distrikt-Ebene mit Kollaboration privater Investments; Fördermittel noch in Planungsphase;

2) Zahl inkludiert öffentliche Direktinvestments und einen kleinen Anteil gemeinsamer Investments mit dem privaten Sektor;

3) Enthält Förderung von Halbleiter- und KI-Industrie (Programm aktuell unter Finalisierung)

Quelle: Strategy& Analyse basierend auf öffentlich verfügbaren Informationen (Q4 2024)

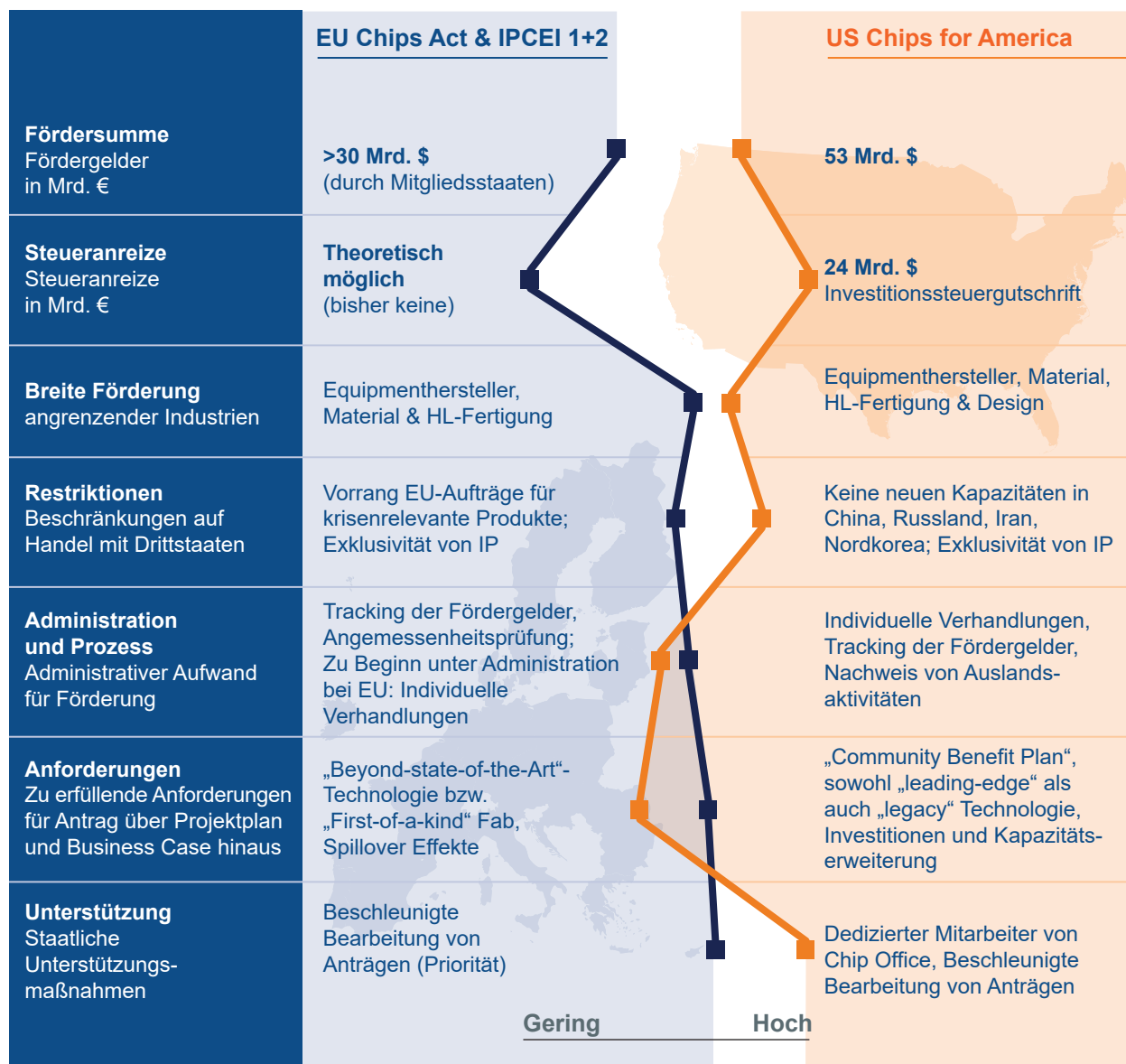
3.2.1 Ein Vergleich von USA und der EU

Die europäische Halbleiterförderung wird häufig mit dem US-amerikanischen „CHIPS for America Act“ verglichen. Der Grund dafür liegt in ähnlichen Ausgangsbedingungen: Beide Regionen haben mit einem Rückgang ihrer Marktanteile zu kämpfen und verfolgen vergleichbare Ziele bei der Förderung der Halbleiterindustrie. In Abbildung 3.2 werden die europäischen und amerikanischen Förderprogramme entlang ihrer wichtigsten Merkmale miteinander verglichen.

Die USA streben mit dem CHIPS for America Act einen globalen Anteil von 30 % an der Halbleiterfertigung nach Wert an und stellen dafür in einem ersten Schritt 52,7 Milliarden US-Dollar bereit. Davon sind 11 Milliarden US-Dollar für Forschung und Entwicklung vorgesehen.

Im Vergleich dazu hat die EU ursprünglich ein Ambitionsniveau von 20 % an der globalen Produktionskapazität ausgerufen und bisher etwas über 32 Milliarden Euro für neue Projekte im Bereich der Halbleiterentwicklung und -fertigung reserviert. Dabei ist zu betonen, dass die Gelder von den Mitgliedsstaaten der EU kommen und nicht von der EU selbst. Letztere gibt lediglich das Rahmenwerk vor, das es den Mitgliedsstaaten

Abb. 3.2: Vergleich der europäischen und amerikanischen Förderprogramme für Mikroelektronik



Quelle: Strategy& Analyse basierend auf öffentlichen Daten und eigenen Hochrechnungen

erlaubt, die Mikroelektronik zu fördern. Dies bedeutet auch, dass bestimmte Aspekte der Förderbedingungen zu einem großen Teil von den Mitgliedstaaten festgelegt werden. Eine genaue Aufteilung zwischen F&E-Förderung sowie der Unterstützung neuer Fertigungskapazitäten ist in der EU schwierig, da IPCEI-Projekte oft beide Bereiche abdecken. Abseits der Fördersumme unterscheiden sich der US CHIPS Act und der ECA auch hinsichtlich der verwendeten Förderinstrumente. Während die USA im Wesentlichen auf Steuergutschriften setzen, ist das Förderinstrument der Wahl der EU-Mitgliedstaaten vor allem der Direktzuschuss. Auch wenn theoretisch möglich, wurden bis jetzt noch keine Beihilferegeln zu Steuervergünstigungen von der Europäischen Kommission genehmigt. Die USA gewähren hingegen Steuergutschriften in Höhe von 25 % auf die Aufwendungen für Halbleiterfabriken und Fertigungsequipment. Dadurch können Unternehmen 25 % der Aufwendungen direkt mit ihrem zu versteuernden Einkommen verrechnen und somit ihre Steuerlast reduzieren.

Durch den US CHIPS Act soll außerdem ein „USA Semiconductor Institute“ entstehen, welches einerseits den Rahmen für Partnerschaften zwischen der Industrie, Universitäten, der Regierung und Forschungsinstitutionen bilden und andererseits die Erforschung der Virtualisierung von Halbleiterequipment vorantreiben soll. Außerdem sollen durch gemeinsame Projekte die Assembly-, Testing- und Packaging-Fähigkeiten der USA weiter verstärkt werden. Auf der anderen Seite wurde innerhalb des European Chips Act ein European Semiconductor Board aufgesetzt¹⁰, das die Europäische Kommission bei der Umsetzung des Chips-Acts sowie der Förderung der Zusammenarbeit der Mitgliedsstaaten unterstützt. Zusätzlich wird das European Semiconductor Board die Produktion und Halbleiterversorgung überwachen und sicherstellen, dass im Falle einer Krise Informationen aus den Mitgliedsstaaten schnell verfügbar sind, um mögliche Maßnahmen einzuleiten.¹¹

Ein großer Unterschied zeigt sich beim Thema der Handelsrestriktionen. Beim US CHIPS Act ist es geförderten Unternehmen verboten, die nächsten 10 Jahre nach der Förderung weitere Produktionskapazitäten in China, Russland, Iran und in Nordkorea für First-of-a-kind-Technologien aufzubauen. Zusätzlich dürfen neue Fabriken für reife Technologieknoten in diesen Ländern nur aufgebaut werden, wenn diese Produktionskapazitäten primär für den Markt des Herstellungslandes bestimmt sind. Weiterhin ist es geförderten Unternehmen verboten, gemeinsame Forschungsprojekte oder Technologielizenzierungen mit Institutionen einzugehen, die Verbindungen zu diesen Staaten haben. Die EU hat einen anderen Ansatz im European Chips Act verfolgt, der das Gut des freien Handels auf den Weltmärkten sowie die Investitionsfreiheit schützen soll. So gibt es im Allgemeinen keine Restriktionen in Bezug auf den Aufbau weiterer Produktionskapazitäten in anderen Ländern und die EU darf im Falle einer Krise in die Halbleiterlieferketten intervenieren. So sind geförderte Unternehmen dazu verpflichtet, im Falle einer schwerwiegenden Störung der Lieferkette oder eines Vorfalls, der die nationale Sicherheit betrifft, vorrangig Aufträge für krisenrelevante Produkte anzunehmen und diese bevorzugt zu fertigen, um die Stabilität der Lieferketten innerhalb der EU zu gewährleisten.¹²

Sowohl die EU-Förderprogramme als auch der US CHIPS Act verursachen einen erheblichen administrativen Aufwand für geförderte Unternehmen, wenn auch auf eine andere Art und Weise. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass Unternehmen für die USA nachweisen müssen, dass keine Aktivitäten in Ländern wie China geplant sind, die den Förderbedingungen widersprechen. Bei beiden Förderprogrammen ist über die gesamte Projektlaufzeit hinweg ein detailliertes Tracking der Fördergelder erforderlich. Bei der EU kommt hinzu, dass die Förderungen nach dem geltenden Recht des jeweiligen Mitgliedstaates beantragt und entsprechend bewilligt werden müssen, wodurch die Dauer der Antragsbearbeitung europaweit variiert.

Es gibt unterschiedliche Anforderungen an die Förderbarkeit in beiden Programmen. In den USA wird ein „Community Benefit Plan“ benötigt, welcher sicherstellt, dass das geförderte Unternehmen einen positiven Einfluss auf marginalisierte und benachteiligte Gemeinden hat. Der Antragsteller muss daher nachweisen, dass benachteiligte Gemeinden durch Wertschöpfung, neue Jobs und Bildungsangebote unterstützt und besser in die Gesellschaft integriert werden. Außerdem müssen Firmen darstellen können, wie sie ihren Fabrik-Mitarbeitenden sowie den Bauarbeiter:innen einen Zugang zu Kinderbetreuung ermöglichen, um so deren Familien zu unterstützen. Beim Förderprogramm der EU müssen Partnerschaften und Spillover-Effekte entlang der Wertschöpfungskette nachgewiesen werden. Letztere beinhalten, vergleichbar mit dem Community Benefit Plan, die positiven Effekte des Projektes – wie u.a. die Schaffung von Arbeits- und Ausbildungsplätzen, die Stärkung der Wirtschaft der Region, ein verstärkter Zugang zu Innovationen sowie die Unterstützung von F&E-Einrichtungen, Universitäten und Hochschulen. Zusätzlich wird ein hoher Fokus auf die Vorgabe einer „First-of-a-kind in EU“-Technologie gelegt. Die größte Hürde und der größte Aufwand bei den Förderanträgen liegen bislang im Nachweis des materiellen Anreizeffekts, der eine vertiefte Analyse eines möglichen „counterfactual Scenarios“ sowie detaillierte Nachweise über den Entscheidungsprozess für den europäischen Standort erfordert.

Ein weiterer Unterschied zwischen dem US CHIPS Act und dem European Chips Act ist die Förderung von Talenten und Ausbildung. 200 Millionen US-Dollar sind explizit für den „Chips for America Workforce and Education Fund“ vorgesehen, durch den der Fachkräftemangel in der Halbleiterindustrie gemildert werden soll. Weiters umfasst der US CHIPS Act eine Investition von 13 Milliarden Euro in naturwissenschaftliche Ausbildungen in den Schlüsselfeldern der Mikroelektronik. Beim European Chips Act ist geplant, sogenannte „Centers of Excellence“ aufzubauen, die das Bildungsnetzwerk in Europa stärken sollen, um dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken. Allerdings sind im European Chips Act keine expliziten Mittel zur Investition in die Bildung von Naturwissenschaftler:innen geplant. Stattdessen wird hier auf Spillover-Effekte gesetzt, um die Ausbildung in diesen Bereichen direkt durch die Unternehmen zu fördern.

Sowohl in den USA als auch in der EU sind Förderanträge mit einem Zeitaufwand und Ressourceneinsatz verbunden. Die Komplexität der Anträge kann insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen sowie junge Firmen daran hindern, finanzielle Unterstützung in Anspruch zu nehmen. Die USA haben das „CHIPS Program Office“ eingerichtet, das aus Expert:innen und Sachverständigen besteht, die Antragsteller:innen bei der Erstellung sowie Umsetzung von Förderprojekten unterstützen können. Hierbei wird ein:e Mitarbeiter:in für die Begleitung des gesamten Antragsprozesses bereitgestellt. In der EU übernehmen staatliche Organisationen auf nationaler Ebene diese Aufgaben – allerdings ist hier die Zahl der verfügbaren Mitarbeiter:innen nach Angaben der Industrie geringer als in den USA, was die Unterstützungsmöglichkeiten einschränkt.¹³

Der Vergleich zeigt, dass beide Fördermechanismen sowohl Stärken als auch Schwächen haben, aber viele Gemeinsamkeiten aufweisen. Die EU-Fördermaßnahmen haben die europäische Halbleiterindustrie bereits deutlich gestärkt. Allerdings fehlt bis heute eine umfassende, mitgliedstaatenübergreifende Strategie für die Industriepolitik in der Mikroelektronikförderung. Eine stärkere Verzahnung der Großprojekte innerhalb der EU sowie eine engere Abstimmung mit den strategischen Zielen für den Mikroelektronikstandort Europa könnten zusätzliche Vorteile bringen. Zudem könnte eine intensivere Unterstützung bei der Antragstellung, beispielsweise durch die Einrichtung eines Chip Offices nach dem Vorbild der USA, dazu beitragen, dass insbesondere KMUs und Start-ups häufiger Fördermittel beantragen.



3.2.2 Förderprogramme für Leiterplatte und Elektronikfertigung

Auch im Bereich von Leiterplatten und EMS gibt es nationale Förderprogramme. Indien hat im Jahr 2021 unter dem Namen „Production Linked Incentive Scheme for Large Scale Electronics Manufacturing“ ein Förderprogramm von rund 4,9 Milliarden Euro für die Fertigung von Mobiltelefonen, elektronischen Komponenten, sowie Assembly, Testing und Packaging beschlossen.¹⁴ Weiterhin gab es ein zweites Programm zur Förderung von IT Hardware mit Subventionen in Höhe von 860 Millionen Euro, welches sich auf die Segmente Laptops, Tablets, All-in-One-PCs und Server fokussiert.¹⁴ Um diese Subventionen zu bekommen, müssen Firmen nachweisen, dass sie die Bestückung von Leiterplatten in Indien durchführen. Zusätzlich gibt es in Indien das „Scheme for Promotion of Manufacturing of Electronic Components and Semiconductors (SPECS)“, welches 25 % der Investitionskosten für Gebäude und Equipment sowie der F&E-Kosten erstattet.¹⁴ Ein weiteres Programm ist das „Modified Electronics Manufacturing Clusters Scheme“, das den Bau von Fabrikgebäuden und Fertigungsstätten begünstigt, indem bis zu 50 % der Baukosten erstattet werden. Dieses Förderprogramm hat ein Volumen von rund 400 Millionen Euro und soll den Aufbau von Fertigungsclustern in Indien unterstützen.¹⁴

Auch die Vereinigten Staaten investieren in die Leiterplattenindustrie. 2023 erklärte US-Präsident Joe Biden Leiterplatten zu einer kritischen Technologie für die nationale Sicherheit. Im Rahmen des Defense Production Act (DPA) wurde ein Handlungsbedarf identifiziert, um die heimische Produktion zu fördern. Zunächst wurden dafür 52 Millionen US-Dollar als kurzfristige Hilfen bereitgestellt.¹⁵

China fördert seine Leiterplattenindustrie (PCB) im Rahmen der „Made in China 2025“-Strategie und lenkt Subventionen gezielt in Schlüsselsektoren wie Medizintechnik und elektrischer Übertragungstechnologie. Länder wie Thailand bieten „Investitionsanreize“, um taiwanische PCB-Hersteller anzuziehen, die ihre Produktion aus China verlagern möchten.¹⁶

Die EU hat bislang keine vergleichbaren Programme etabliert und konzentriert ihre Fördermaßnahmen derzeit ausschließlich auf die Halbleiterlieferkette bis hin zum Bereich Packaging.

3.3 Halbleiter nicht gleich Halbleiter

Bevor auf die Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte durch die Halbleiterförderung eingegangen wird, folgt zunächst ein Überblick über die Arten von Halbleiterprodukten. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Typen, die sich sowohl in ihren physikalischen Beschaffenheiten, dem zugrunde liegenden Herstellungsprozess sowie in ihrer Funktionalität unterscheiden.

Um zu verstehen, auf welche Produktkategorien sich die Fördermaßnahmen primär beziehen und inwiefern sich diese auf die Fertigung der einzelnen Produktkategorien auswirken, gibt die Studie nachfolgend einen Überblick über die einzelnen Halbleitertypen sowie deren Funktionalitäten (siehe Abbildung 3.3). Außerdem wird darauf eingegangen, wie sich die Nachfrage entwickelt und mit welcher Technologie die Produkte üblicherweise gefertigt werden.

Der Begriff der Strukturgröße, auch als Technologieknoten bekannt, ist ein zentraler Aspekt der Fertigungstechnologie. Er beschreibt die kleinste Struktur, die zuverlässig auf einem Halbleiterwafer hergestellt werden kann. Einfach ausgedrückt: Je kleiner die Strukturbreite, desto mehr Komponenten können auf derselben Fläche gefertigt werden – dies ermöglicht entweder kleinere oder leistungstärkere Chips bei gleicher Fläche.

Das Spektrum der heute genutzten Halbleiter reicht von Strukturbreiten im Bereich mehrerer Mikrometer bis hin zu 2 Nanometern – eine Größe, die weniger als ein Zehntausendstel der Dicke eines menschlichen Haares beträgt. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass kleinere Strukturbreiten nicht automatisch mit besseren oder innovativeren Produkten gleichzusetzen sind. Die Wahl der geeigneten Technologie für die Entwicklung und Fertigung eines Halbleiters hängt von zahlreichen Faktoren ab. So erfordert beispielsweise die Leistungselektronik größere Strukturen, um elektrische Ströme und Spannungen effizient zu schalten und die entstehende Wärme zuverlässig abzuleiten. Darüber hinaus können Innovationen ebenso durch neuartige Fertigungstechnologien und Materialien oder intelligentes Produktdesign erzielt werden. Im Folgenden wird der Begriff „mittlere Knoten“ für Halbleiter verwendet, die auf Strukturbreiten von etwa 180–40 nm gefertigt wurden. Alles darunter wird als „kleine Knoten“ und darüber als „große Knoten“ bezeichnet.

Abb. 3.3: Übersicht der Halbleiterprodukttypen und ihrer Funktionen

Halbleitertyp		Funktion
Speicher	 Speicher	Speicherung und Abruf von Daten innerhalb eines elektrischen Systems
	 Mikroprozessoren und -controller	Verarbeitung von Daten, Steuerung von Programmen in elektronischen/digitalen Geräten
Logik	 Logik	Steuerung von Geräten und Verarbeitung von digitalen Signalen, Durchführung von Berechnungen
Analog	 Power Management	Kontrolle, Steuerung und Verteilung elektrischer Ströme und Spannungen innerhalb eines elektronischen Systems
	 Andere Analoge	Verarbeitung, Verstärkung oder Filterung von analogen Signalen wie Spannungen, Strömen und Frequenzen
	 Kommunikation	Empfang, Verarbeitung und Versand von Daten innerhalb von Kommunikationssystemen
OSD	 Optoelektronik	Umwandlung von elektrischen Signalen in optische Signale und umgekehrt
	 Nicht-optische Sensoren	Messung nicht-optischer Signale wie Ultraschall, Druck, Temperatur, Feuchtigkeit, Gas, Gesundheitsdaten etc.
	 Leistungs-halbleiter	Schalten, Steuern und Wandeln von hohen elektrischen Spannungen und Strömen
	 Andere Diskrete	Basiselemente (z.B. Dioden und Transistoren) zum Schalten, Steuern und Verstärken von Stromkreisen

Quelle: Strategy&Analyse

Speicherchips

Speicherchips ermöglichen die Speicherung und den Abruf von Daten innerhalb eines elektronischen Systems. Sie finden in nahezu allen Systemen Anwendung und variieren in Größe und Komplexität. Für Einsatzbereiche wie die Automobilindustrie oder den Maschinen- und Anlagenbau werden häufig Speicherkomponenten auf mittleren Technologieknoten verwendet. Besonders kleine Speicherchips sind entscheidend für kompakte Geräte wie Laptops oder Smartphones. Gleichzeitig steigt die Nachfrage nach leistungsstarken und energieeffizienten Speicherchips auf den kleinsten Knoten aufgrund der wachsenden Anforderungen von KI-Anwendungen und Rechenzentren, die zunehmend größere Speichermengen erfordern.

Mikroprozessoren und -controller

Mikroprozessoren und -controller sind darauf ausgelegt, spezifische Aufgaben oder Anwendungen zu steuern und auszuführen. Sie werden in nahezu allen Bereichen angewendet – von der Steuerung von Motoren, Bremsen, Airbags oder Infotainmentsystemen im Automobilbereich bis hin zu Smart-Home-Systemen sowie automatisierten Systemen in der Produktion. Üblicherweise werden sie auf mittleren Technologieknoten produziert, wobei die neuesten in Richtung 22/16 nm gehen.

Logik

Logikkomponenten wie CPUs und GPUs steuern und verarbeiten die grundlegenden Abläufe in elektronischen Geräten. Sie gewinnen durch den KI-Boom und die zunehmende Bedeutung von High-Performance-Computing-Anwendungen, etwa in Rechenzentren, stark an Relevanz. Diese Chips werden aufgrund der hohen Anforderungen an Leistung und Miniaturisierung vor allem auf kleinen Technologieknoten produziert. Neben universellen Logiken wie CPUs gibt es spezialisierte Varianten wie ASICs (Application-Specific Integrated Circuits), die für spezifische Anwendungen optimiert sind sowie FPGAs (Field Programmable Gate Arrays), die flexibel programmierbar sind und in der Prototypentwicklung, Industrieautomation sowie in Kommunikationssystemen wie 5G-Netzen eingesetzt werden.

Analoge Halbleiter

Analoge Halbleiter verarbeiten und verstärken elektrische Signale in kontinuierlicher Form. Sie spielen eine zentrale Rolle in Anwendungen, bei denen Signale wie Ton, Licht oder Temperatur in analoge Spannungen umgewandelt und verarbeitet werden müssen. Eine Kategorie darunter sind die Power-Management-Chips, die elektrische Ströme und Spannungen steuern und verteilen. Diese sind essenziell für batteriebetriebene Geräte in der Unterhaltungselektronik und spielen eine Schlüsselrolle bei der Elektrifizierung. Sie werden in der Regel auf mittleren Technologieknoten gefertigt. Eine weitere Unterkategorie bilden Kommunikationschips, die Daten empfangen, verarbeiten und übertragen können. Sie werden sowohl auf mittleren als auch auf kleinen Technologieknoten produziert. Mit der zunehmenden Internetdurchdringung, der Entwicklung neuer Mobilfunkgenerationen wie 5G und 6G sowie dem wachsenden Bedarf an höheren Bandbreiten steigt die Nachfrage nach Kommunikationschips stetig, da sie die Grundlage für die Kommunikation zwischen einer immer größer werdenden Anzahl von vernetzten Geräten bilden.

Optoelektronik

Unter dem Begriff „OSD“ werden optische, Sensorik- und diskrete Halbleiter zusammengefasst. Bei Optoelektronik werden elektrische Signale in optische umgewandelt oder umgekehrt. Sie ist zentral für die Unterhaltungselektronik, etwa für Displays, hochwertige Sensoren und effiziente Beleuchtungssysteme. In der Automobilindustrie findet Optoelektronik ebenfalls Anwendung – etwa in Displays oder bei Beleuchtung. Im Gesundheitswesen stellt Optoelektronik den Branchenstandard für bildgebende Verfahren dar. Optoelektronik wird typischerweise auf größeren Technologieknoten gefertigt und der Bedarf an diesem Verfahren wächst kontinuierlich, da immer komplexere elektrische Systeme integriert werden.

Nicht-optische Sensoren

Nicht-optische Sensoren sind Halbleiter, die physikalische und chemische Umweltdaten erfassen können. Sie messen beispielsweise Ultraschall, Druck, Temperatur, Gaskonzentrationen, Feuchtigkeit oder spezifische Gesundheitsparameter. Diese Sensoren werden häufig auf größeren Technologieknoten gefertigt. Aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzmöglichkeiten in Branchen wie Industrie, Automobil, Rüstung und Gesundheitswesen ist die Nachfrage nach nicht-optischen Sensoren hoch. Mit der zunehmenden Nutzung datengetriebener Geschäftsmodelle und Algorithmen in diesen Bereichen wächst der Bedarf an solchen Sensoren weltweit. Miniaturisierung spielt hierbei eine immer größere Rolle, da die Zahl der Sensoren pro Gerät zunimmt und die Größe der Geräte abnimmt.

Leistungshalbleiter

Leistungshalbleiter gehören zur Kategorie der Diskreten und dienen dem Schalten, Steuern und Wandeln hoher elektrischer Spannungen sowie Ströme und sind eine Schlüsseltechnologie für die Elektrifizierung. Sie werden vor allem auf mittleren bis größeren Technologieknoten gefertigt. Der Ausbau von Klimatechnologien und elektrischen Fahrzeugen treibt die Nachfrage nach Leistungshalbleitern deutlich an, da sie eine unverzichtbare Komponente für diese Anwendungen darstellen.

Andere Diskrete

Diskrete Halbleiter wie Dioden und Transistoren sind grundlegende Bauelemente zur Steuerung, Schaltung und Verstärkung von Stromkreisen. Diese vergleichsweise einfachen Halbleiter werden hauptsächlich auf mittleren und größeren Technologieknoten produziert. Mit der weltweit wachsenden Anzahl an elektrischen Systemen und Bauteilen steigt auch die Nachfrage nach diesen elementaren Halbleiterkomponenten kontinuierlich.

3.4 Input-Output-Modell: Berechnung der Effekte von Förderprojekten

Um die volkswirtschaftlichen Effekte der Mikroelektronikförderung auf den Wirtschaftsstandort Deutschland und die EU zu untersuchen, wird das Verfahren der Input-Output-Analyse verwendet. Diese Methodik wird in der empirischen Wirtschaftsforschung genutzt, um die Auswirkungen von Änderungen der Wirtschaftstätigkeit innerhalb einer Volkswirtschaft zu quantifizieren. Solche Änderungen können zum Beispiel durch Fördermaßnahmen entstehen.

Die Methodik ermöglicht es, die Effekte wirtschaftlicher Aktivitäten auf Einkommen und Beschäftigung innerhalb einer Volkswirtschaft zu messen. Dazu werden die wirtschaftlichen Aktivitäten entlang der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet und analysiert, wie verschiedene Sektoren einer Volkswirtschaft über Produktionsverflechtungen miteinander verbunden sind.

Im Zusammenhang mit der Mikroelektronikförderung lassen sich grundsätzlich drei Effekte quantifizieren: direkte, indirekte und induzierte Effekte:

- **Direkte Effekte** beziehen sich auf Veränderungen, die unmittelbar in einem Sektor auftreten, der von einer Maßnahme betroffen ist. Ein Beispiel hierfür ist der gesteigerte Produktionswert aufgrund der durch Fördergelder getätigten Investitionen.
- **Indirekte Effekte** betreffen Auswirkungen der Investitionen auf andere Sektoren, die als Zulieferer oder Dienstleister mit dem geförderten Sektor verbunden sind, wie etwa eine erhöhte Nachfrage nach Maschinen für die Halbleiterproduktion. Eingeschlossen ist auch die damit verbundene erhöhte Nachfrage dieser Zulieferer und Dienstleister nach Gütern und Dienstleistungen.
- **Induzierte Effekte** resultieren aus den zusätzlichen Einkommen, die mit der zusätzlichen Beschäftigung verbunden sind und durch die direkten sowie indirekten Effekten der Förderung entstehen. Diese zusätzlichen Einkommen führen zu Veränderungen im Konsum und der allgemeinen Wirtschaftsaktivität.

Mithilfe des Input-Output-Modells lassen sich verschiedene Kenngrößen ermitteln. Diese Studie konzentriert sich auf die Effekte der Mikroelektronikförderung auf die Gesamtwirtschaft, insbesondere auf die Veränderung der Bruttowertschöpfung und der damit verbundenen Wirkungen auf die Steuereinnahmen.

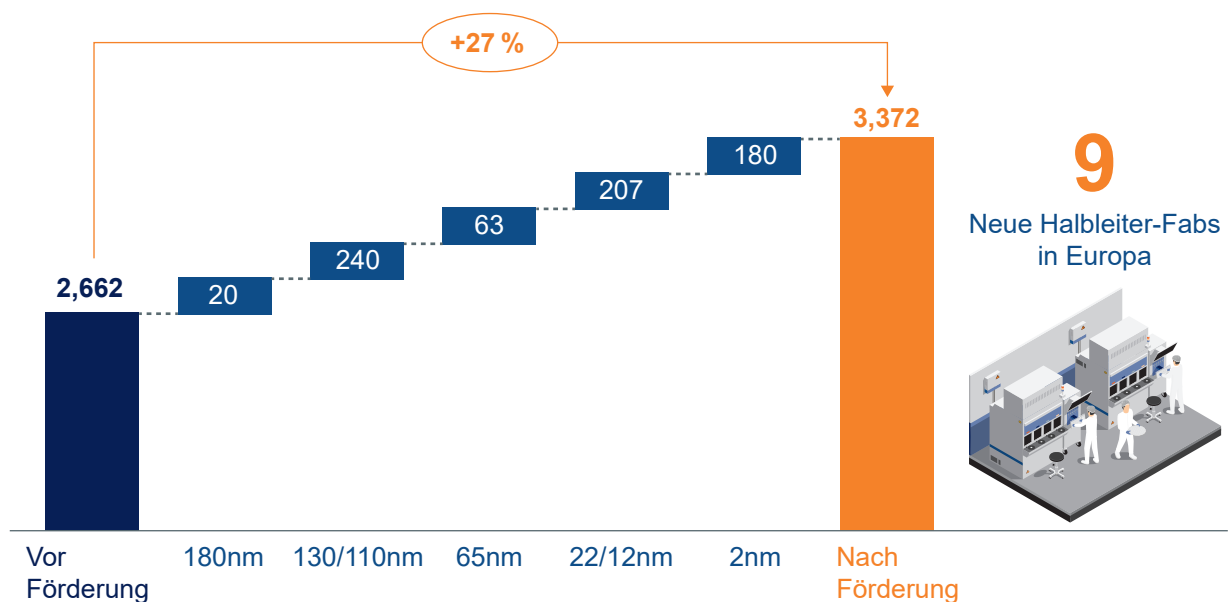
Die Daten für die Analyse wurden in Zusammenarbeit mit den Mitgliedsunternehmen des ZVEI erhoben. Ergänzend flossen öffentlich verfügbare Informationen zu Fördersummen, Produktionskapazitäten und Preisstrukturen sowie eigene Annahmen ein. Auf dieser Basis wurde ein approximierter Produktionswert pro Förderprojekt ermittelt. Die Summe der approximierten Produktionswerte im Zusammenhang mit den Förderungen diente als Grundlage für die Berechnung der indirekten und induzierten Effekte. Diese wurden anhand der in der Input-Output-Tabelle des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2021 ausgewiesenen inländischen Produktionsverflechtungen abgeleitet.¹⁷ Die Vorleistungsnachfrage für die Halbleiterbranche gemäß amtlicher Statistik wurde angepasst, um die spezifische Nachfrage der geförderten Unternehmen abzubilden.

3.4.1 Entwicklung der europäischen Produktionskapazitäten

Für die Analyse des volkswirtschaftlichen Effekts wurden die geplanten Großprojekte zur Errichtung oder Erweiterung von Halbleiterproduktionskapazitäten im Rahmen der IPCEI für Mikroelektronik sowie des European Chips Acts berücksichtigt. Dazu zählen die Fördervorhaben von Bosch, Infineon, NXP, ESMC, STMicroelectronics, GlobalFoundries, Analog Devices und Intel. Die geplanten Fördermittel für diese Projekte belaufen sich insgesamt auf rund 21,4 Milliarden Euro, einschließlich der 10 Milliarden Euro, die für das Intel-Projekt oder eine vergleichbare Alternative vorgesehen sind. Sollten diese Gelder anderweitig genutzt werden, reduziert sich der Betrag auf etwa 11,4 Milliarden Euro. Da weitere geförderte Projekte aufgrund fehlender Daten zur Förderhöhe nicht in die Analyse einbezogen werden konnten, stellt diese Summe einen Minimalwert dar, der in Zukunft noch ansteigen könnte. Das geplante Projekt von Wolfspeed wurde von der Kalkulation ausgeklammert, da hier die Wahrscheinlichkeit eines Projektstopps sehr groß ist, auch in Betracht der vor kurzer Zeit erhaltenen Förderung durch den US CHIPS Act.

Die durch die Förderprojekte initiierten Maßnahmen werden die europäischen Produktionskapazitäten bis 2040 um etwa 27 % gegenüber dem Stand vor Beginn der Förderung ansteigen (siehe Abbildung 3.4).

Abb. 3.4: Zuwachs der europäischen Halbleiter-Produktionskapazitäten durch geförderte Projekte im Rahmen des IPCEI und ECA nach Technologieknoten, 2020-2040 (Millionen Waferstarts im Monat, 200mm äquivalent)



Quelle: Strategy& Analyse basierend auf Daten der ZVEI-Mitgliedsunternehmen und öffentlichen Quellen

Der größte Kapazitätswachstum wird im Bereich der Leistungselektronik (130/110 nm) erfolgen, insbesondere durch die Projekte von STMicroelectronics im Bereich Siliziumkarbid und Infineon in Dresden. Ergänzend dazu leisten die Vorhaben von ESMC sowie die Kooperation zwischen STMicroelectronics und GlobalFoundries einen wesentlichen Beitrag zur Stärkung der europäischen Kompetenzen und Produktionskapazitäten in den Bereichen Mikrocontroller, Powermanagement sowie Analog- und Kommunikationstechnologien. Die Realisierung des geplanten Projekts von Intel würde Europa zudem erstmals eine Produktionsstätte für Technologien von 2 nm verschaffen und die Herstellung modernster Komponenten für KI und High-Performance-Computing ermöglichen. Im Falle eines vollständigen Projektstopps und ohne mögliche Alternativen würde das Wachstum der Produktionskapazitäten lediglich 20 % erreichen.

Es bleibt die Fragestellung, ob die derzeitigen Investitionen ausreichen, um das angestrebte Ziel der Europäischen Kommission von einem 20-prozentigen Anteil an den globalen Produktionskapazitäten zu erreichen. Denn auch andere führende und aufstrebende Halbleiternationen investieren erheblich in den Ausbau ihrer lokalen Fertigungskapazitäten. Vor diesem Hintergrund analysiert die Studie die Entwicklung der europäischen Halbleiterproduktion anhand von drei möglichen Szenarien:

- **Szenario 1 – Keine Förderung:** In diesem Vergleichsszenario wird angenommen, dass die europäischen Produktionskapazitäten ohne staatliche Förderung in einem ähnlichen Tempo wie vor 2019 gewachsen wären. Für die Zeit nach 2030 wurde eine leicht erhöhte Wachstumsrate unterstellt, um der beschleunigten Nachfrage durch Elektrifizierung und Computing Rechnung zu tragen.
- **Szenario 2 – Aktuelles Förderprogramm:** Dieses Szenario basiert auf den derzeitigen Förderprogrammen. Nach Abschluss der geplanten Erweiterungen, etwa Mitte der nächsten Dekade, entwickeln sich die Kapazitäten mit der Wachstumsrate des ersten Szenarios weiter.
- **Szenario 3 – Verstärkung der Förderung:** In diesem Szenario wird angenommen, dass nach Abschluss der aktuellen Projekte zusätzliche Subventionen weitere europäische Großprojekte fördern und den Ausbau der Produktionskapazitäten nachhaltig vorantreiben. Die Höhe der angenommenen Investitionen entspricht im Verhältnis jenen der aktuellen Programme und führt zu einer ähnlichen Wachstumsrate.

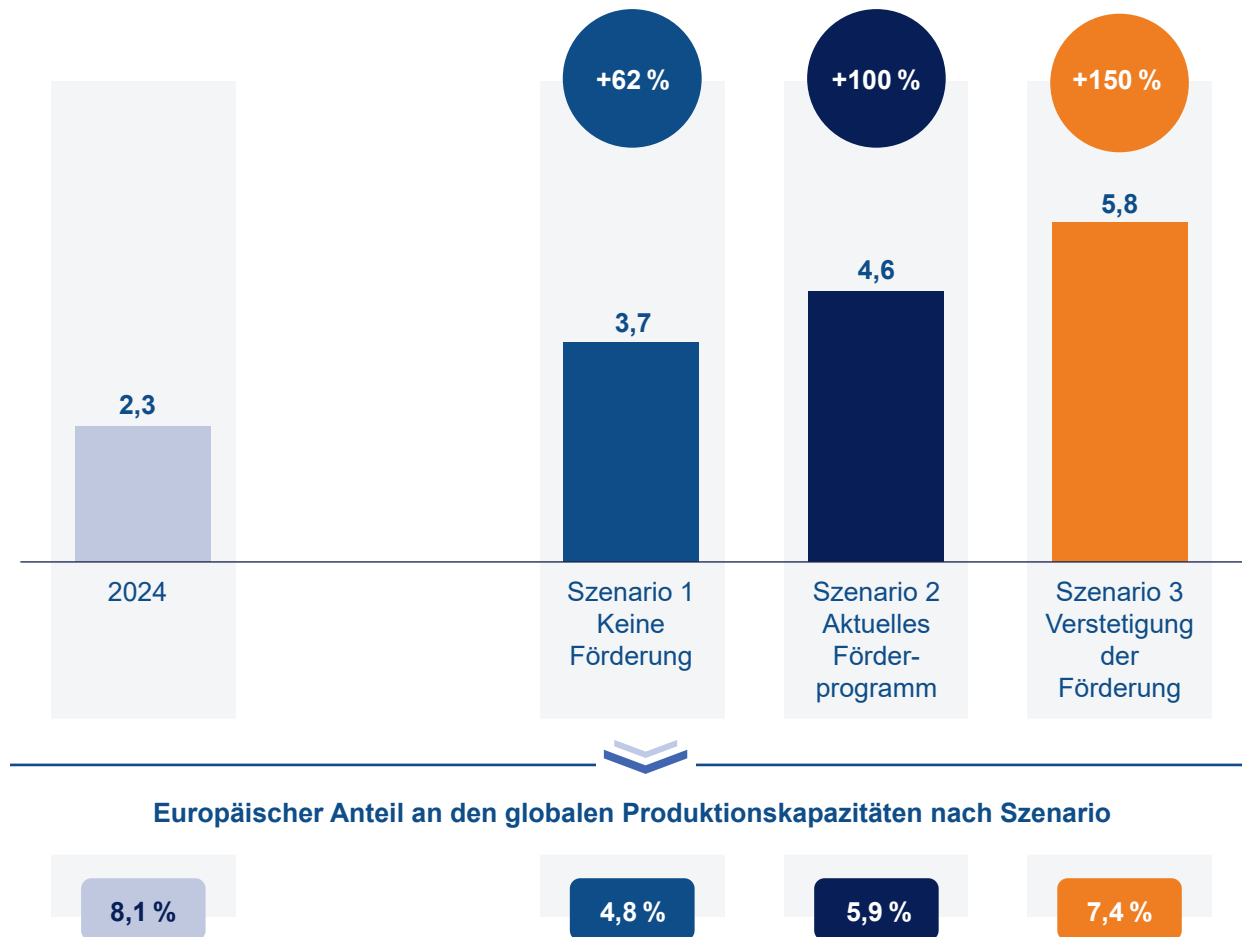
Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Nur eine Verstärkung der aktuellen Fördermaßnahmen könnte Europa in die Lage versetzen, seinen globalen Anteil an den Fertigungskapazitäten nahezu konstant zu halten, nachdem dieser in der Vergangenheit lange gesunken war. Der Anteil würde sich dabei nur geringfügig von derzeit 8,1 % auf voraussichtlich 7,4 % im Jahr 2045 reduzieren. Ohne zusätzliche Maßnahmen und basierend auf den derzeit geplanten Förderprojekten könnte der Anteil jedoch auf knapp unter 6 % sinken. Noch drastischer wäre der Rückgang ohne die bereits getätigten Investitionen ausgefallen, wodurch der Anteil Europas auf unter 5 % gefallen wäre. Dies verdeutlicht, welchen entscheidenden Beitrag staatliche Förderungen in einem kapitalintensiven und strategisch wichtigen Bereich wie der Mikroelektronik für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit dieser Industrie leisten können. Durch solche Maßnahmen können gleiche Wettbewerbsbedingungen geschaffen und damit ein „level playing field“ im internationalen Vergleich erreicht werden.

3.4.2 Volkswirtschaftliches Wachstum durch Mikroelektronikförderung

Für die Input-Output-Analyse wurden in der Studie zwei Szenarien betrachtet: die volkswirtschaftlichen Effekte für Deutschland und die Gesamteffekte für die EU. Dabei basieren die Annahmen zur Verteilung der inländischen Vorleistungsnachfrage auf die Zulieferindustrien im Wesentlichen auf den Daten der Input-Output-Tabelle des Statistischen Bundesamts. Die Effekte auf EU-Ebene wurden darauf aufbauend extrapoliert. Trotz möglicher Abweichungen auf europäischer Ebene gegenüber den Produktionsverflechtungen der deutschen Volkswirtschaft, bietet die Methodik eine valide Approximation. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass fast 80 % der Wertschöpfungseffekte auf deutsche Vorhaben zurückgehen. Auch bei den Unternehmenssteuerquoten zeigt sich eine vergleichbare Situation: Für Deutschland wurde ein Wert von rund 24 % angenommen¹⁸, während die Quoten für Frankreich (knapp 30 %) und Italien (knapp 29 %) nur geringfügig abweichen.¹⁹

Abb. 3.5: Entwicklung der europäischen Halbleiter-Produktionskapazitäten entlang von 3 Szenarien und Anteil an den globalen Kapazitäten, 2024-2045 (Millionen Waferstarts pro Monat, 200mm äquivalent sowie Anteil in Prozent)

Entwicklung europäischer Produktionskapazitäten in Millionen Waferstarts pro Monat im 200mm-äquivalent



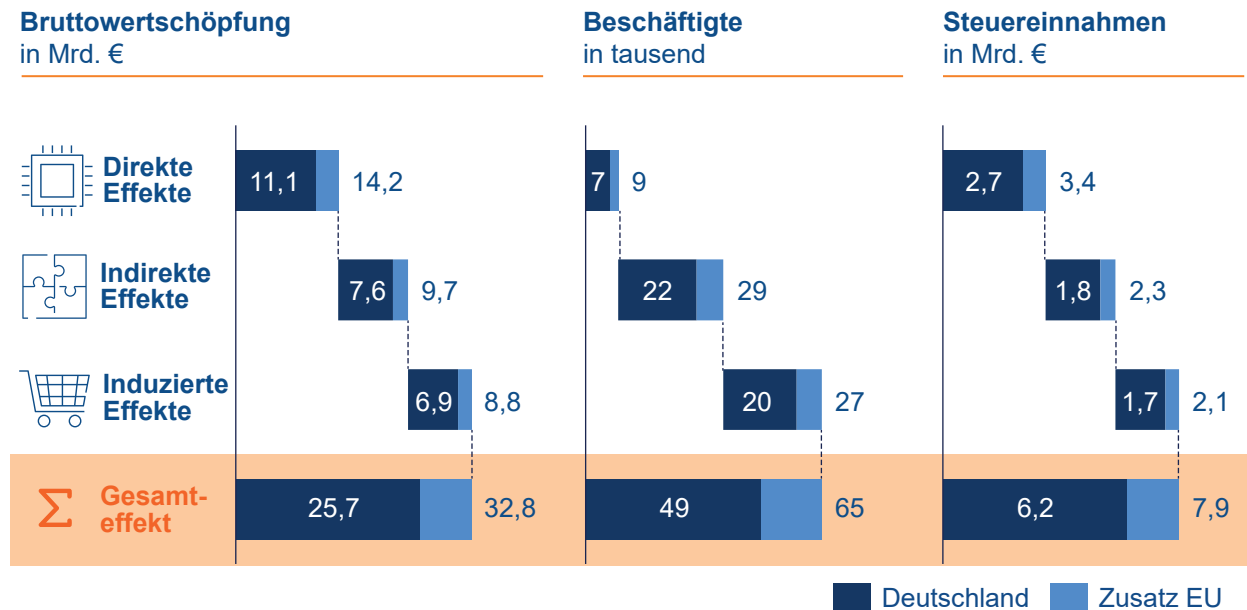
Quelle: Strategy&Analyse

Zuwachs an Bruttowertschöpfung

Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass die Förderprojekte bei erfolgreichem Abschluss ab dem Jahr 2036 zu einer jährlichen Steigerung der Bruttowertschöpfung von 25,7 Milliarden Euro allein in Deutschland führen (siehe Abbildung 3.6). Während der Hochlaufphase der Projekte liegt der Wert zunächst niedriger, erreicht jedoch bereits zu Beginn der nächsten Dekade etwa die Hälfte dieses Betrags. Besonders hervorzuheben ist die Bedeutung des Großprojekts von Intel in Magdeburg: Ohne ein vergleichbares Vorhaben würde der jährliche Zuwachs an Bruttowertschöpfung lediglich etwa 8,3 Milliarden Euro betragen, was nur einem Drittel des Gesamtwerts entspricht.

Von den insgesamt 25,7 Milliarden Euro jährlicher Bruttowertschöpfung entfallen 43 % auf direkte Effekte, die aus der gesteigerten Wertschöpfung im Rahmen der Produktion in den geförderten Fabs resultieren. Dieser Wert umfasst bei den IDMs auch die Wertschöpfung des Chipdesigns, dessen Anteil – basierend auf historischen Erfahrungswerten – auf zwischen 10 % und 30 % geschätzt wird. Darüber hinaus wurde bei der Berechnung ein Preisverfall für die Produkte berücksichtigt, der insbesondere bei Erzeugnissen im Bereich der 2 nm Technologie sowie der Siliziumkarbid-Leistungselektronik erwartet wird. Diese Preisreduktion ist auf signifikante Effizienzsteigerungen bei den Produktionsprozessen und die damit verbundenen Kostensenkungen in den kommenden Jahren zurückzuführen.

Abb. 3.6: Volkswirtschaftliche Effekte der Mikroelektronikförderung pro Jahr nach beendetem Ausbau für Deutschland und Europa



Langfristige Vorteile für europäische Wirtschaft



Quelle: Strategy& Analyse

Weitere 30 % der mit der Förderung verbundenen jährlichen Bruttowertschöpfung betreffen die gesteigerte Wertschöpfung in den Zuliefersektoren, darunter Halbleitermaschinen und -werkzeuge, Materialien sowie Dienstleistungen. Dies entspricht einem signifikanten Beitrag von fast 7,6 Milliarden Euro pro Jahr im vollständig ausgebauten Zustand. Darüber hinaus entfallen 27 %, also rund 6,9 Milliarden Euro, auf induzierte Effekte in anderen Industrien, die im Zusammenhang mit dem Konsum der Beschäftigten generiert werden.

Betrachtet man alle Projekte auf EU-Ebene, beläuft sich der Wert der zusätzlichen Bruttowertschöpfung auf knapp 33 Milliarden Euro. Auch hier entfallen etwa 42 % auf direkte Effekte, die aus der gesteigerten Bruttowertschöpfung der geförderten Produktionsstätten resultieren.

Zuwachs an Beschäftigten

Um die Entstehung der neuen Arbeitsplätze zu untersuchen, wurde ein zweigeteilter Ansatz angewendet. Die direkt entstehenden zusätzlichen Beschäftigtenzahlen basieren auf Daten, die von den Mitgliedsunternehmen bereitgestellt wurden, ergänzt um öffentlich verfügbaren Angaben. Die indirekten Effekte innerhalb der Zulieferindustrie sowie die induzierten Effekte durch den gesteigerten Konsum wurden mit Hilfe empirischer Werte bestimmt, die für die Halbleiterindustrie kalkuliert wurden.²⁰ Allein in Deutschland entstehen durch die Förderung etwa 7.000 neue Arbeitsplätze bei den Halbleiterherstellern. Durch die Vorleistungsnachfrage der Halbleiterhersteller kommen 22.000 Arbeitsplätze in der Zulieferindustrie hinzu (indirekte Effekte) und weitere 20.000 durch den erhöhten Konsum (induzierte Effekte). Insgesamt ergibt sich ein Faktor von etwa sechs – das bedeutet, dass jeder direkte Arbeitsplatz mehr als sechs weitere Stellen entlang der Wertschöpfungskette nach sich zieht. Insgesamt werden damit rund 49.000 nachhaltige Arbeitsplätze in Deutschland und 65.000 in Europa durch die geförderten Projekte entstehen. Dies hilft langfristig den Verlust von Stellen in anderen Bereichen zu kompensieren, die durch vom Strukturwandel betroffen sind.

Somit leisten die Mikroelektronikprojekte einen wesentlichen Beitrag zum Aufbau sowie Erhalt von Arbeitsplätzen und fördern die Entwicklung von innovativem Know-how in der EU. Zudem steigert die erhöhte Nachfrage nach qualifizierten Fachkräften die Attraktivität, gezielte Studien- und Ausbildungsprogramme im Bereich der Mikroelektronik anzubieten. Die steigende Anzahl an Beschäftigten macht es durch Skaleneffekte für Bildungsinstitutionen effizienter, maßgeschneiderte Bildungsangebote bereitzustellen. Diese Dynamik ist besonders wichtig angesichts des drohenden Fachkräftemangels in der EU, der durch den demografischen Wandel noch verstärkt wird. Auch die Mikroelektronikbranche sieht sich diesem Problem gegenüber und könnte bis 2030 ein Fachkräftedefizit von rund 350.000 Arbeitnehmer:innen erwarten.²¹ Um diesem Engpass entgegenzuwirken, sind gezielte Maßnahmen in Bildung, Qualifizierung und Talentförderung notwendig, zur langfristigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit Europas im Mikroelektroniksektor. Dazu gehören nicht nur angepasste Studiengänge, sondern auch geeignete Ausbildungsberufe, insbesondere in den Bereichen Maschinenbau und -instandhaltung. Zudem ist es essenziell, dass Studiengänge und Ausbildungsprogramme besser mit der technologischen Roadmap der Industrie abgestimmt werden, um die zukünftigen Anforderungen klar zu definieren und die benötigten Fähigkeiten gezielt zu fördern.

Zusätzliche Steuereinnahmen

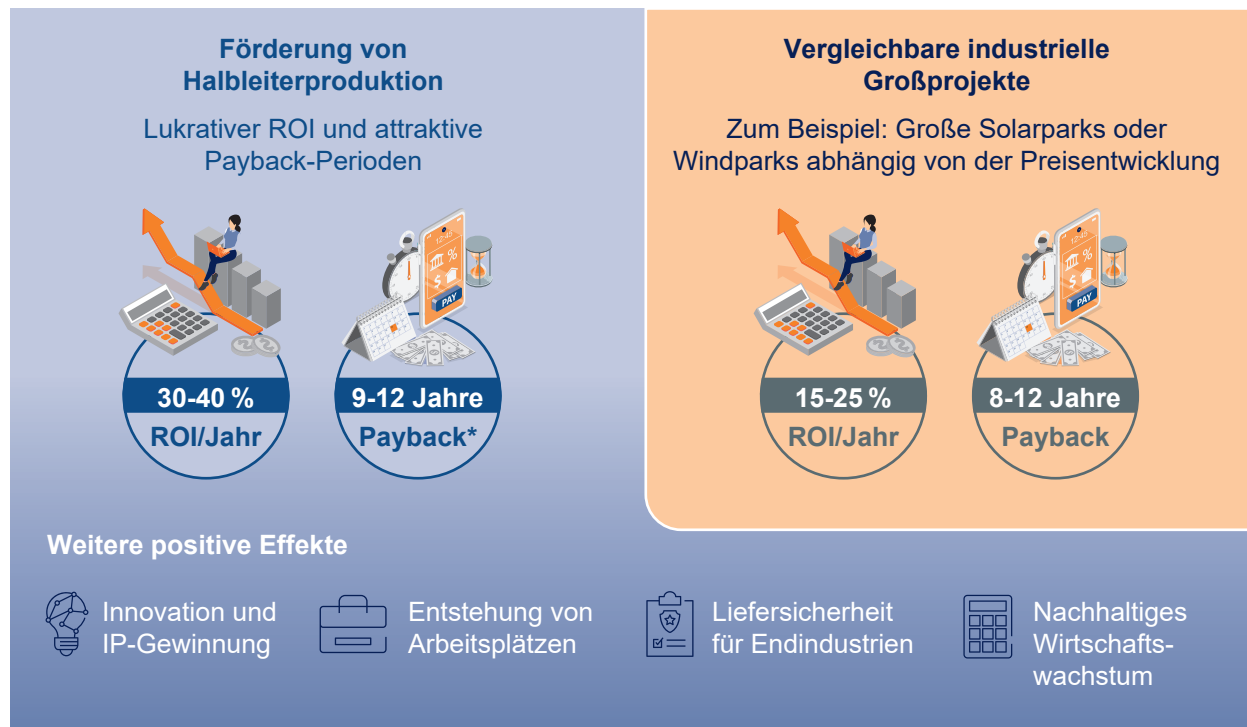
Die direkten, indirekten und induzierten Wertschöpfungseffekte führen nach erfolgreichem Ramp-up aller Projekte zu zusätzlichen Steuereinnahmen von etwa 6,2 Milliarden Euro pro Jahr in Deutschland.²¹ Auf europäischer Ebene belaufen sich die zusätzlichen Steuereinnahmen sogar auf rund 7,9 Milliarden Euro jährlich. An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass diese Werte voraussichtlich Mitte der nächsten Dekade erreicht werden und während des Ramp-ups geringer ausfallen.

3.4.3 Mikroelektronikinvestitionen mit hoher Rendite

Setzt man die erwarteten Steuereinnahmen ins Verhältnis zum investierten staatlichen Fördervolumen, ergibt sich ein ROI-Wert von 30 bis 40 % pro Jahr im voll ausgebauten Zustand (siehe Abbildung 3.7). Zum Vergleich: Unternehmen streben bei Projekten mit hohen Investitionen und entsprechenden Risiken in der Regel ROI-Werte von 15 bis 25 % an. Die Analyse bestätigt daher die wirtschaftliche Attraktivität der geförderten Vorhaben. Im Übrigen hätte der Wegfall des Intel-Projekts keinen großen Einfluss auf den ROI, da die Höhe der Fördersumme ebenfalls signifikant niedriger wäre.

Wie bereits erwähnt, ist der Return on Investment (ROI) nach der erfolgreichen Umsetzung der Projekte zu erwarten. Der Ramp-up von großen Halbleiterfabs stellt dabei einen komplexen und langwierigen Prozess dar. Für die Berechnung der Amortisationsdauer der staatlichen Investitionen wurde eine detaillierte Ramp-up-Kurve auf Projektebene herangezogen, ergänzt durch eine angenommene Diskontierungsrate von rund 10 %.²² Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich eine Amortisationsdauer von 9 bis 12 Jahren. Auch wenn diese Zeitspanne auf den ersten Blick hoch erscheint, entspricht sie den in der Halbleiterindustrie üblichen Werten für vergleichbare Vorhaben und liegt damit im erwartbaren Bereich. Besonders zu betonen ist, dass sich nach dieser Periode die Gewinne einstellen, welche die ursprünglichen Investitionen in kürzester Zeit um ein Vielfaches übertreffen.

Abb. 3.7: Positive Effekte der europäischen Mikroelektronikförderung inklusive ROI und Amortisationsdauer



*Abhängig von genauem Zeitpunkt der Projektstarts;
Quelle: Strategy& Analyse

3.5 Beitrag der Mikroelektronik zur globalen Wertschöpfung

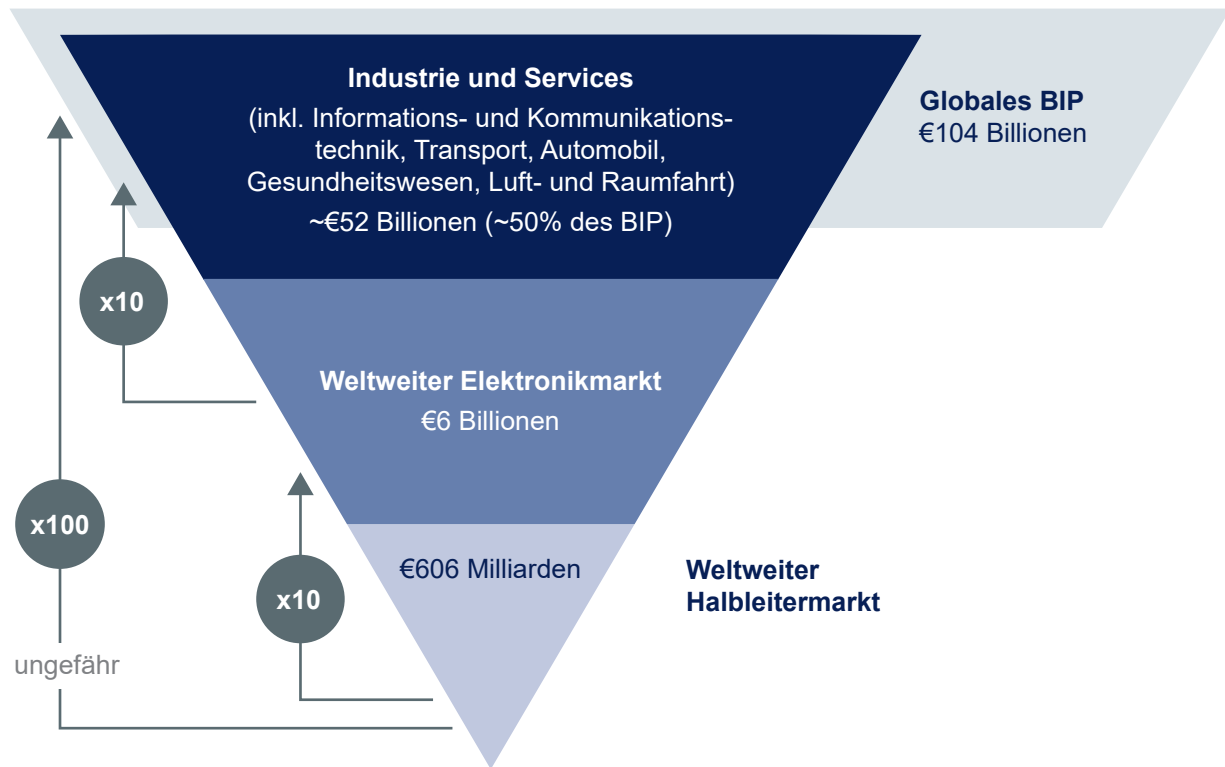
Darüber hinaus stellt die Mikroelektronik einen zentralen Hebel für die Wertschöpfung in den nachgelagerten Anwendungsindustrien dar. Laut einer Analyse von Industrievertreter:innen tragen direkte und indirekte Produkte der Mikroelektronik etwa 50 % zum globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP) bei (siehe Abbildung 3.8). Sie ermöglichen einen Umsatz von 55 Billionen Euro und generieren damit das Hundertfache ihrer eigenen Wertschöpfung in Anwendungsindustrien wie Informations- und Kommunikationstechnologie, Transport, Automobil, Gesundheitswesen und Luft- sowie Raumfahrt.

Dieser immense Einfluss unterstreicht die strategische Bedeutung der Mikroelektronik als Fundament für wirtschaftliches Wachstum, technologische Innovation und gesellschaftliche Entwicklung. Die enge Verknüpfung mit den Anwendungsindustrien zeigt, dass Investitionen in die Mikroelektronik nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit einzelner Regionen stärken, sondern auch globale Wertschöpfungsketten stabilisieren und transformative Technologien in den zentralen Sektoren unserer Gesellschaft ermöglichen.

Die Mikroelektronikförderung ist mehr als eine wirtschaftliche Maßnahme – sie ist ein essenzieller Baustein für Europas Zukunftsfähigkeit. Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen verdeutlichen, wie tiefgreifend die Auswirkungen dieser Förderung sind: Diese stärkt die europäische Industrie entlang der gesamten Wertschöpfungskette, schafft neue Arbeitsplätze und generiert Steuereinnahmen in einer Höhe, die die Investitionen langfristig rechtfertigen. Darüber hinaus adressiert die Förderung zentrale Herausforderungen wie die zunehmende Abhängigkeit von außereuropäischen Halbleiterproduzenten und ist die Grundlage für Innovationen in Schlüsselindustrien wie Mobilität, Kommunikation und Energieversorgung. Denn ohne eine europäische Förderung besteht aufgrund des globalen Förderwettbewerbs eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass Unternehmen Standorte außerhalb Europas mit höheren Anreizen bevorzugen. Die spezifischen Anforderungen der Mikroelektronikindustrie – insbesondere die enormen Investitionssummen und langen Projektlaufzeiten – erhöhen das Risiko von Neuinvestitionen erheblich. Solche Vorhaben werden deutlich wahrscheinlicher umgesetzt, wenn die Nachfrage abgesichert ist oder es Unterstützung durch Förderprogramme gibt.

Die Analyse zeigt deutlich, dass diese Investitionen nicht nur wirtschaftlich sinnvoll sind, sondern auch insgesamt eine transformative Wirkung auf Industrie, Gesellschaft und die europäische Wirtschaft haben. Sie ermöglichen Europa, sich in einem zunehmend globalen Wettbewerb als führende Technologie-Region zu positionieren und eine langfristige Grundlage für Wohlstand und Resilienz zu schaffen.

Abb. 3.8: Positive wirtschaftliche Effekte der Mikroelektronikindustrie in den Anwendungsindustrien



Quellen: DECISION Etudes & Conseil, Deutscher Bundestag, Infineon, S&P Global, WSTS, ZVEI, Omdia Q3 2024



4 Mikroelektronik als Motor der Nachhaltigkeitsziele

Die Auswirkungen des Klimawandels sind global längst spürbar und äußern sich in zerstörerischen Bränden, verheerenden Stürmen und katastrophalen Überschwemmungen. Diese extremen Wetterereignisse treffen Volkswirtschaften und Gesellschaften weltweit mit wachsender Härte und verursachen immense Schäden. Angesichts dieser Entwicklungen rückt die dringende Notwendigkeit, eine klimaneutrale Wirtschaft zu schaffen, immer stärker in den Fokus globaler Maßnahmen.

Am 12. Dezember 2015 einigten sich bei der UN-Klimakonferenz in Paris (Frankreich) 197 Staaten auf ein neues, globales Klimaschutzabkommen.²³ Die Staaten setzten sich das globale Ziel, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf „deutlich unter“ zwei Grad Celsius zu begrenzen, mit Anstrengungen für eine Beschränkung auf 1,5 Grad Celsius.

Um dies zu schaffen, wurden von den nationalen Regierungen Ziele zur Klimaneutralität formuliert. Die Europäische Union strebt an, bis 2050 klimaneutral zu werden.²⁴ Auch andere große Volkswirtschaften verfolgen ähnliche Zielsetzungen: Japan und Südkorea streben dieses Ziel bis 2050 an^{25,26}, während China dies bis 2060 erreichen möchte.²⁷ Nach aktuellem Stand planen die USA ebenfalls bis 2050 CO₂-neutral zu werden.²⁸ Diese Vorgaben sind jedoch nicht nur politischer Natur, sondern senden auch ein klares Signal an die Industrie, dass tiefgreifende Veränderungen unumgänglich sind.

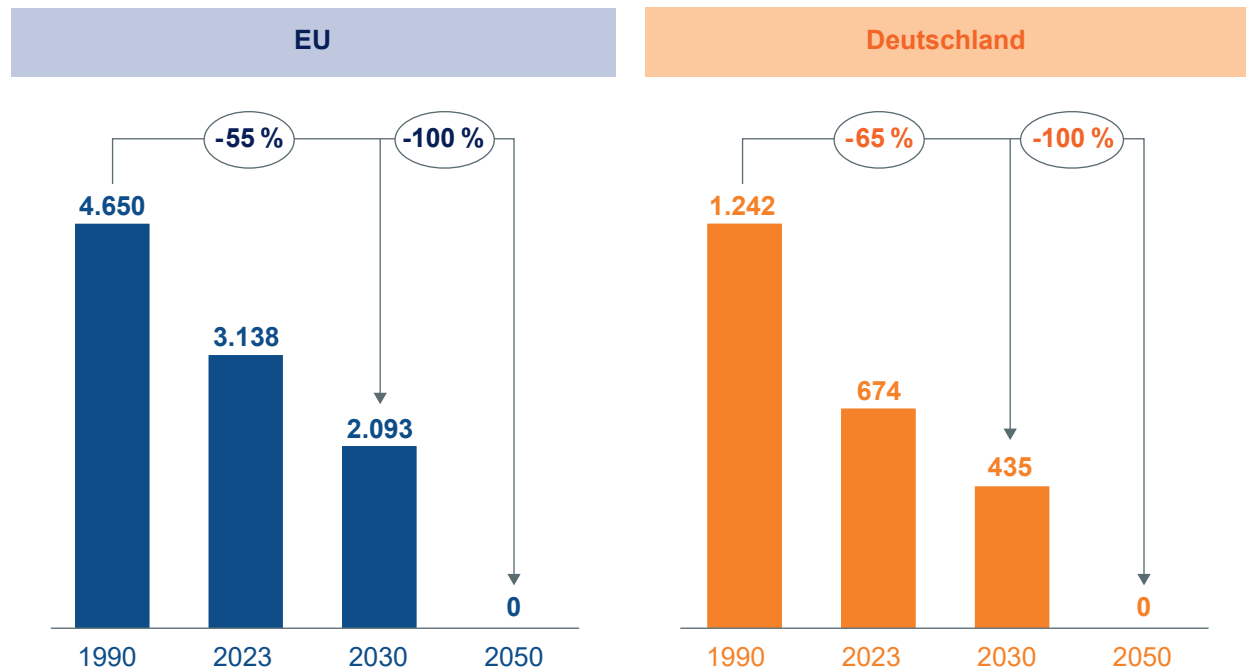
Die Mikroelektronik spielt eine zentrale Rolle als Katalysator für die europäischen und deutschen Klimaziele. Diese Relevanz soll in diesem Kapitel beleuchtet werden, zusätzlich werden die Standortvorteile Europas für eine nachhaltige Halbleiterproduktion untersucht und diskutiert, welche Rahmenbedingungen notwendig sind, um die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts weiter zu fördern.

4.1 Die ambitionierten Klimaziele der EU und Deutschlands

Auf dem Weg zur europäischen Klimaneutralität, will die EU bereits bis 2030 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % gegenüber dem Niveau von 1990 erreichen (siehe Abbildung 4.1). Dieses Zwischenziel ist Teil des „European Green Deal“, einer umfassenden Strategie, die nicht nur die Reduzierung von Emissionen, sondern auch die Förderung einer nachhaltigen Wirtschaft und die Stärkung der europäischen Industrie in den Mittelpunkt stellt.¹⁸

Deutschland, als größtes Industrieland der EU, verfolgt ebenfalls ambitionierte Ziele. Bereits bis 2045 soll das Land klimaneutral werden und damit fünf Jahre früher als in den EU-Zielen vorgesehen.²⁹ Dies bedeutet, dass Deutschland seine Emissionen nicht nur drastisch senken, sondern auch große Schritte in Richtung einer kohlenstofffreien Energieversorgung, Mobilität und Industrie machen muss. Bis 2030 plant Deutschland, die Emissionen um mindestens 65 % zu reduzieren (siehe Abbildung 4.1), was zu umfassenden Veränderungen in der Energieproduktion, dem Verkehr und der industriellen Fertigung führen muss.

Abb. 4.1: Deutsche und Europäische Klimaziele für die Reduktion der Treibhausgasemissionen in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente



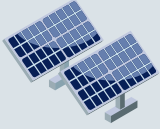
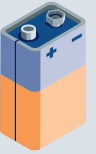
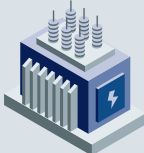
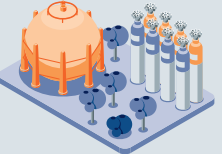
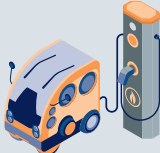
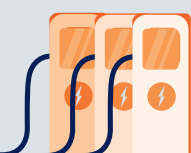
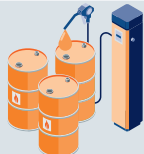
Quelle: Umweltbundesamt; EEA greenhouse gases

4.2 Mit Hilfe von Klimatechnologien zur Nachhaltigkeit

Der angestrebte Wandel von Industrie und Gesellschaft setzt eine umfassende Transformation der Energie-, Wärme- und Mobilitätssysteme voraus. Klimatechnologien wie Photovoltaik, Windkraftanlagen, Batteriespeicher, Wärmepumpen, elektrische Fahrzeuge oder Smart-Home-Systeme spielen dabei eine zentrale Rolle. Diese ermöglichen es, CO₂-Emissionen zu reduzieren, fossile Brennstoffe zu ersetzen und gleichzeitig die Versorgungssicherheit in einer zunehmend elektrifizierten Welt sicherzustellen.

Die Bedeutung von Klimatechnologien geht jedoch weit über einzelne Anwendungen hinaus – denn sie sind Katalysatoren für nachhaltige Innovationen. Sie schaffen Voraussetzungen für neue Geschäftsmodelle und fördern die Integration erneuerbarer Energien in bestehende Systeme. Im Folgenden werden zentrale Klimatechnologien, ihre jeweiligen Anwendungsbereiche sowie ihr Zusammenspiel näher beleuchtet (siehe Abbildung 4.2). In dieser Studie liegt der Fokus auf Technologien, die einen direkten Beitrag zur Elektrifizierung leisten. Auch andere Systeme – wie autonome Anwendungen oder digitale Lösungen – werden langfristig zur Reduzierung von Emissionen beitragen. Allerdings, wurden sie bewusst nicht in die Studie einbezogen, um klare Rahmenbedingungen für die Quantifizierung zu setzen und die Unschärfe der Analyse möglichst zu minimieren.

Abb. 4.2: Überblick der Klimatechnologien sowie eine Auswahl an Anwendungsbeispielen

Klimatechnologie	Anwendungen (Beispiele)
 Photovoltaik	• Strom- und Wärmeerzeugung für den Haushalt • Kommerzielle Energieerzeugung inklusive PV-Parks
 Wind	• Kommerzielle Energieerzeugung an Land (Onshore) und auf See (Offshore)
 Batteriespeicher	• Batteriespeicher in Kombination mit PV-Anlage • Zentrale Batteriespeicher für die Netzregulierung
 Wärmepumpen	• Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung im Haushalt • Großwärmepumpe für Fernwärme und Industrieprozesse
 Elektrolyse	• Wasserstoffherzeugung für Industrieprozesse und Industriewärme, Transportsektor, Energieerzeugung, etc.
 Elektrische Fahrzeuge	• Elektrische Personen- und Lastkraftwagen sowie Busse • Elektrische Nutzfahrzeuge
 Ladesäulen	• Wallboxen • Öffentliche (Schnell)-Ladesäulen
 Smart-Home	• System für Energiemanagement • Intelligente Verbrauchszähler und Verteilerkästen
 Kontrollsysteme für Industrie	• Energiekontrollsysteme in der industriellen Produktion
 E-Antriebe für Industrie	• Elektrische Antriebe in der Produktion für autonome Systeme, Förderbänder, Werkzeugmaschinen, Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren und andere Maschinen

Quelle: Strategy&Analyse

Photovoltaik und Windkraft: Basis der erneuerbaren Energieversorgung	Photovoltaik- und Windkraftanlagen bilden das Rückgrat einer emissionsfreien Energieinfrastruktur. Dank der modularen Bauweise lassen sich PV-Systeme flexibel an unterschiedlichste Anforderungen anpassen – von kleineren dezentralen Heimanlagen bis hin zu großindustriellen PV-Parks. Windkraftanlagen ergänzen die Photovoltaik ideal, da sie häufig zu Zeiten Strom erzeugen, in denen die Sonneneinstrahlung gering ist, wie zu den Abendstunden oder in den Wintermonaten. Sie können sowohl an Land („Onshore“) als auch auf See („Offshore“) installiert werden. Insbesondere Offshore-Windparks bieten ein enormes Potenzial, da dort konstant hohe Windgeschwindigkeiten genutzt werden können. Beide Technologien bieten nicht nur die Möglichkeit zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen, sondern sind essenziell, um die wachsende Nachfrage nach Strom aus nachhaltigeren Quellen zu decken.
Batteriespeicher: Flexibilität für erneuerbare Energien	Batteriespeicher ergänzen die volatilen Energiequellen Wind und Sonne, indem sie überschüssige Energie speichern und bei Bedarf wieder abgeben. Dies stabilisiert das Stromnetz und ermöglicht eine effiziente Nutzung erneuerbarer Energien. Batteriespeicher finden sowohl in Privathaushalten als auch in großangelegten Speichereinrichtungen Anwendung.
Wärmepumpen: Dekarbonisierung der Wärmeversorgung	Wärmepumpen ermöglichen es, Wärme effizient und emissionsarm zu erzeugen. Während kleinere Wärmepumpen vor allem in Privathaushalten eine Alternative zu fossilen Heizsystemen darstellen, kommen Großwärmepumpen in Fernwärmesystemen und der Industrie zum Einsatz. Sie können Abwärme aus industriellen Prozessen oder Wärme aus geothermischen Quellen nutzen, um ganze Stadtteile zu beheizen oder industrielle Prozesse mit der erforderlichen Wärmeenergie zu versorgen. Besonders attraktiv ist ihr Einsatz in der Lebensmittel-, Chemie- oder Papierindustrie, wo große Mengen Prozesswärme benötigt werden.
Elektrolyseanlagen: Wasserstoff als Energieträger	Elektrolyseanlagen ermöglichen die Produktion von grünem Wasserstoff, der als vielseitiger Energieträger in Industrie, Mobilität und Energiespeicherung dient. Wasserstoff bietet insbesondere in schwer zu elektrifizierenden Bereichen wie der Stahlindustrie oder dem Schwerlastverkehr eine nachhaltige Alternative zu fossilen Energieträgern.
Elektromobilität und Ladeinfrastruktur: Zukunft der Mobilität	Elektrische Fahrzeuge und die dazugehörige Ladeinfrastruktur bilden einen wichtigen Pfeiler der klimafreundlichen Mobilität. Sie reduzieren die Abhängigkeit von Verbrennungsmotoren und ermöglichen eine signifikante Minderung von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Dabei wird die Verbindung von E-Mobilität mit erneuerbaren Energien, etwa durch das Laden von Fahrzeugen mit Solarstrom, immer relevanter.
Intelligente Energiemanagementsysteme: Effiziente Nutzung von Ressourcen	Smart-Home-Systeme und intelligente Energie-Kontrollsysteme in der Produktion sorgen für eine effizientere Nutzung von Energie. Sie analysieren und steuern den Energieverbrauch in Echtzeit und ermöglichen eine optimale Verteilung erneuerbarer Energien. Insbesondere intelligente Zähler und Verteilerkästen schaffen eine Grundlage für Smart Grids, die Energieflüsse effizienter gestalten.
Elektrische Antriebe: Förderung einer nachhaltigen Produktion	Elektrische Antriebe ersetzen zunehmend mechanische oder hydraulische Systeme und bieten dabei Vorteile wie eine höhere Energieeffizienz, einen geringeren Wartungsaufwand und reduzierte Emissionen. Besonders in energieintensiven Industrien wie der Metall- und Chemieproduktion, aber auch in der Automobilfertigung oder bei Verpackungsprozessen, ermöglichen elektrische Antriebe eine präzise Steuerung und Anpassung an variable Produktionsanforderungen.

Hinzukommt, dass die zunehmende Vernetzung der Klimatechnologien ihre Wirkung verstärkt. So können Photovoltaikanlagen beispielsweise mit Batteriespeichern und Wärmepumpen gekoppelt werden, um Energie für die Beheizung oder Kühlung von Gebäuden bereitzustellen. Elektrofahrzeuge können als mobile Energiespeicher genutzt werden, die überschüssigen Solarstrom aufnehmen und diesen bei Bedarf ins Netz zurückspeisen (Smart-Charging und Vehicle-to-Grid). Diese Synergien schaffen ein integriertes und flexibles Energiesystem, das nicht nur CO₂-Emissionen reduziert, sondern auch die Effizienz und Stabilität der Energieversorgung erhöht.

4.3 Die Rolle der Mikroelektronik in den Klimatechnologien

Mikroelektronik ist ein elementarer Bestandteil der genannten Klimatechnologien, da sie die Steuerung, Regelung und Optimierung der Energieflüsse ermöglicht. Dieser Prozess beginnt mit der Datenerfassung durch Sensoren, die essenzielle Parameter wie Temperatur, Stromfluss, Sonneneinstrahlung oder Drehzahl messen. Die erfassten Daten bilden die Grundlage, um die Systeme an unterschiedliche Anforderungen anzupassen. In einer PV-Anlage beispielsweise erfassen Sensoren die Sonneneinstrahlung und messen gleichzeitig in einer Wärmepumpe die Umgebungstemperatur, um den Energiebedarf dynamisch zu regulieren. In Produktionsanlagen überwachen Sensoren den Zustand elektrischer Antriebe, um den Betrieb effizient und sicher zu gestalten.

Die gesammelten Daten werden anschließend von Mikrocontrollern, Speichern und anderen Logikkomponenten verarbeitet, die die zentrale Steuerung der Technologien übernehmen. Sie koordinieren Ladezyklen von Elektrofahrzeugen, steuern die Energieumwandlung in PV- und Windanlagen oder optimieren den Betrieb elektrischer Antriebe in der Produktion. Mikrocontroller gewährleisten, dass die Prozesse präzise und anwendungsspezifisch gesteuert werden.

Für die Energieumwandlung und -steuerung spielen Leistungshalbleiter und andere diskrete Halbleiter eine wesentliche Rolle. Sie wandeln zum Beispiel den von Solarzellen erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom um, der ins Stromnetz eingespeist werden kann, und steuern in Elektrofahrzeugen oder elektrischen Antrieben die Energiezufuhr. Leistungshalbleiter tragen maßgeblich zur Effizienz und Anpassungsfähigkeit dieser Technologien bei.

Darüber hinaus steuern die Logikhalbleiter in Kombination mit den Leistungshalbleitern die Aktuatoren, welche die elektrischen Signale wiederum in mechanische Bewegungen umsetzen. Sie öffnen und schließen Ventile in Wärmepumpen, treiben Produktionsmaschinen an oder steuern mechanische Prozesse in industriellen Anwendungen. Auf diese Weise werden digitale Steuerungen in praktische Anwendungen übertragen.

Die Interaktion und Abstimmung zwischen verschiedenen Technologien wird durch Kommunikationshalbleiter ermöglicht. Diese sorgen dafür, dass einzelne Systeme miteinander vernetzt und koordiniert werden können. Beispielsweise arbeiten in einem Smart Home PV-Anlagen, Wärmepumpen und Batteriespeicher zusammen, um den Energieverbrauch zu optimieren. Elektrofahrzeuge können dazu in ein Smart Grid integriert werden und überschüssigen Solar- oder Windstrom zwischenspeichern. Solche vernetzten Systeme unterstützen eine effiziente Energieverteilung und fördern eine nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien. Die Verknüpfung von Sensorik, Steuerung, Energieumwandlung und Kommunikation ermöglicht eine effektive Zusammenarbeit der Klimatechnologien. Mikroelektronik schafft damit die Voraussetzungen, um diese Technologien in integrierte Systeme einzubetten, die den Übergang zu einer nachhaltigeren Energieversorgung unterstützen.

Abb. 4.3: Treibhausgasemissionen der EU und der europäischen Halbleiterproduktion sowie die Ersparnis innerhalb der Endindustrien durch Einsatz der Halbleiterprodukte in 2021

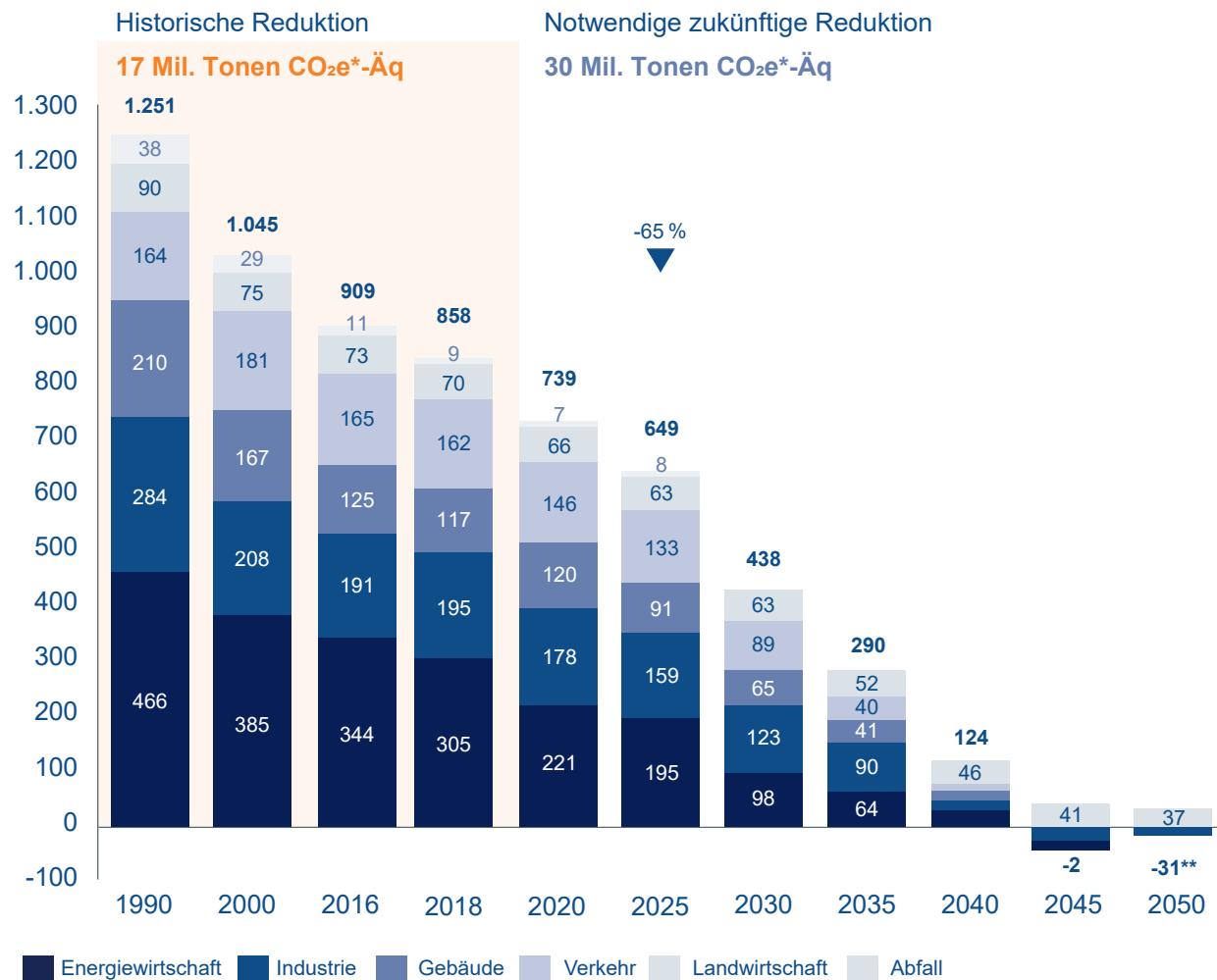


* Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente

Quelle: Strategy& Analyse basierend auf Stiftung Neue Verantwortung (2024) in Julia Christina Hess 2024: Chip Production's Ecological Footprint: Mapping Climate and Environmental Impact, EEA (2024)

Insgesamt tragen die Mikroelektronikindustrie und ihre Produkte bereits heute wesentlich zur Reduktion der europäischen Treibhausgasemissionen bei. Laut einer Studie der Stiftung „Neue Verantwortung“ war die europäische Halbleiterproduktion im Jahr 2021 für Emissionen von bis zu 14 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente verantwortlich, was etwa 0,4 % der gesamten europäischen Treibhausgasemissionen entspricht. Gleichzeitig leisten Mikroelektronikprodukte einen erheblichen Beitrag zur Senkung der Emissionen in den Endindustrien. Basierend auf Schätzungen von Expert:innen aus der Halbleiterindustrie sparen Mikroelektronikprodukte 34-mal mehr Emissionen ein, als bei der Produktion verursacht werden.³⁰ Allein durch die europäische Halbleiterproduktion aus dem Jahr 2021 bedeutet dies eine Einsparung von 465 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente, die im Laufe des Lebenszyklus der Produkte erzielt werden kann. Bei einer Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren – je nach Produkt – entspricht dies einer jährlichen Einsparung von bis zu 50 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Dies macht 1 bis 2 % der jährlichen Gesamtemissionen in Europa aus und unterstreicht bereits heute die Relevanz der Mikroelektronik in Bezug auf die Verfolgung der Nachhaltigkeitsziele. Mit der fortschreitenden Elektrifizierung und der zunehmenden Verbreitung von Klimatechnologien wird dieser Effekt in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen.

Abb. 4.4: Reduktion der deutschen Klimaziele

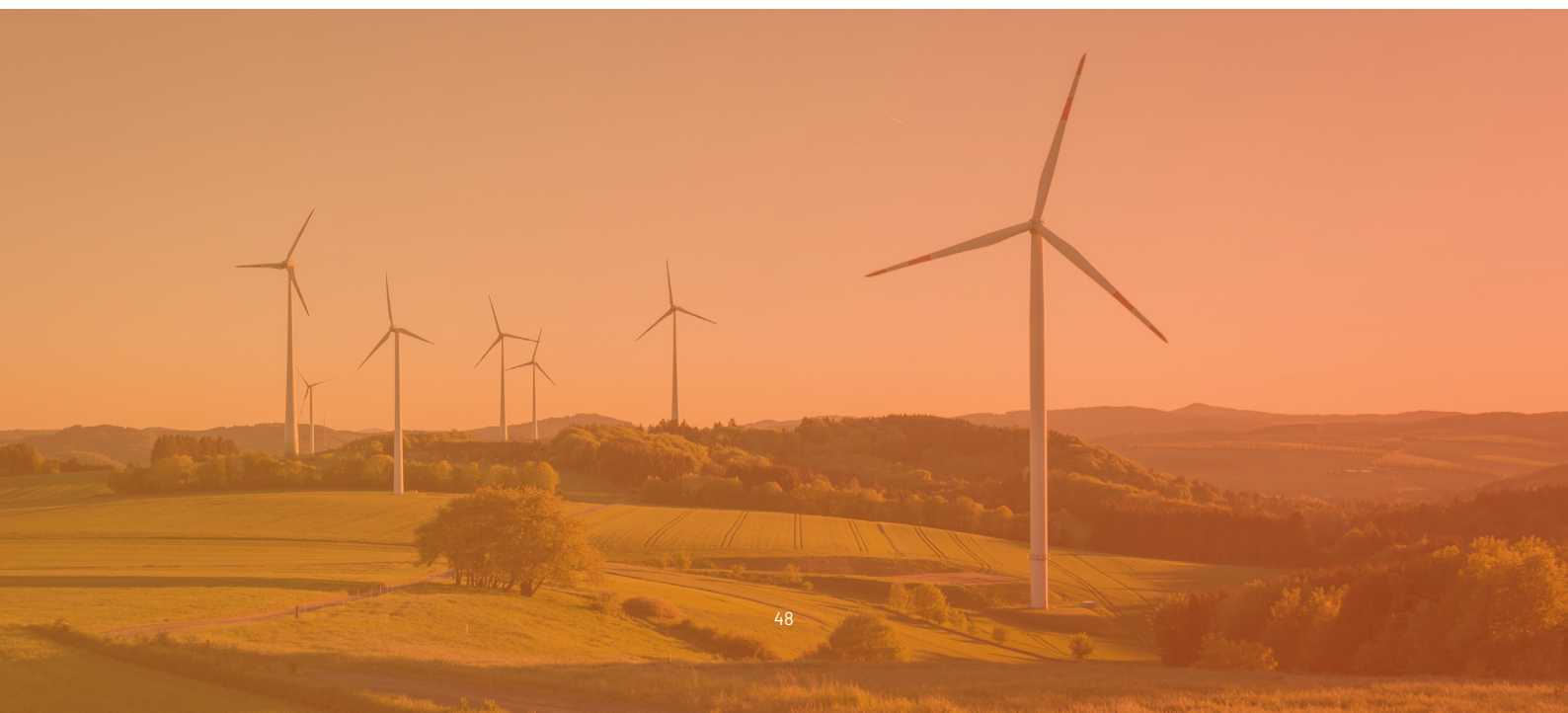


Negative Emissionen werden direkt in den jeweiligen Sektoren berücksichtigt.

* Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente

** Nach 2045 erfolgt nur eine Trendextrapolation, eine weitere Reduktion der Emissionen ist möglich.

Quelle: Agora Klimaneutrales Deutschland 2045 und Prognos, Oka Institute, Wuppertal Institute (2021)



4.4 Der Weg zur Klimaneutralität

Die Erreichung der deutschen Klimaneutralität bis 2045 erfordert umfassende Maßnahmen in allen Sektoren der deutschen Wirtschaft. Die notwendigen Reduktionen verteilen sich auf die Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft. Für die Analyse dieser Studie wurden die grundlegenden Annahmen der Agora-Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (im Folgenden KND2045) herangezogen und mit eigenen Modellen ergänzt, um die Entwicklung von Schlüsseltechnologien in den einzelnen Bereichen zu bewerten. Die Entwicklung der Emissionen für Deutschland laut KND2045 für jeden Sektor ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Im Jahr 2023 lagen die Treibhausgasemissionen Deutschlands bei 673 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente – eine Entwicklung, die innerhalb der Parameter der KND2045-Studie ist.

Energiewirtschaft

Mit einem Anteil von 30 % an den Gesamtemissionen war die Energiewirtschaft in den vergangenen Jahren der größte Verursacher von Treibhausgasen (THG) in Deutschland. Laut den Szenarien der Agora-Studie wird der Stromverbrauch in Deutschland aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung von 575 TWh im Jahr 2020 auf 882 TWh im Jahr 2045 weiter steigen. Da die Annahmen der KND2045 aus dem Jahr 2021 stammen, könnte dieser Wert durch den Zuwachs an Rechenzentren und KI-Anwendungen, der sich in den letzten Jahren abgezeichnet hat, noch weiter steigen. Gleichzeitig wird in diesem Bereich die größte Reduktion der THG-Emissionen erwartet – eine Verringerung um 235 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente zwischen 2020 und 2045. Diese Transformation soll durch eine mehr als vierfache Steigerung der installierten PV-Kapazitäten sowie eine Verdreifachung der Windenergieanlagen erreicht werden. Auch der Einsatz von Batteriespeichern wird im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien erheblich zunehmen.

Industrie

Die Industrie ist mit 178 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr 2020 und einem Anteil von 24 % der zweitgrößte Emittent. Elektrische Antriebe und Großwärmepumpen sollen in diesem Sektor für die Dekarbonisierung industrieller Prozesse sorgen. Zusätzlich wird der Einsatz von grünem Wasserstoff in energieintensiven Industrien vorangetrieben, um fossile Brennstoffe zu ersetzen. Intelligente Energiemanagementsysteme optimiere zudem eine präzisere Steuerung von Energieflüssen und tragen zur Effizienzsteigerung bei.

Gebäude

Der Gebäudesektor ist für rund 16 % der deutschen Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 verantwortlich und erfordert eine Reduktion von etwa 120 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent bis 2045. Eine zentrale Maßnahme zur Emissionssenkung ist der massive Ausbau von Wärmepumpen: Bis 2045 sollen 14 Millionen Wärmepumpen in Wohngebäuden installiert werden. Ergänzend sollen Großwärmepumpen eine Versorgung durch Fernwärme gewährleisten, sowohl in urbanen als auch in industriellen Bereichen. Intelligente Smart-Home-Systeme optimieren den Energieverbrauch, indem sie die Nutzung von Photovoltaik, Batteriespeichern und Wärmepumpen dynamisch aufeinander abstimmen.

Verkehr

Der Verkehr ist mittlerweile der drittgrößte Emittent in Deutschland mit 146 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr 2020. Das war jedoch nicht immer so: In den vergangenen Jahrzehnten ist der Anteil des Verkehrs an den Gesamtemissionen stetig gestiegen. Die Umstellung auf Elektrofahrzeuge, der Ausbau der Ladeinfrastruktur und die Entwicklung emissionsfreier Antriebstechnologien sind zentrale Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen. Vernetzte Mobilitätslösungen und autonome Fahrzeuge können ebenfalls zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung beitragen.

Landwirtschaft

In der Landwirtschaft sanken die Emissionen vor allem in den 1990er-Jahren infolge des Rückgangs der Viehbestände. Im Vergleich zu den anderen Sektoren, waren die Emissionen im Jahr 2020 vergleichsweise gering mit 66 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Die weiteren Reduktionen werden unter anderem durch eine Minderung der Tierbestände und die Vergärung hoher Wirtschaftsdüngeranteile in Biogasanlagen erreicht.

4.4.1 Die Zahl der notwendigen Klimatechnologien

Auf Grundlage der Annahmen der Studie KND2045 wurden Modelle für die Entwicklung der Klimatechnologien erstellt. Um eine detaillierte Kalkulation zu ermöglichen, wurden für jede Technologie Referenzsysteme definiert. Am Beispiel der PV-Anlagen wird dies besonders deutlich: Diese gibt es in verschiedenen Größenklassen, von kleinen Dachanlagen mit einer Leistung von weniger als 10 kW bis hin zu großen PV-Parks mit einer Leistung von über 750 kW. Für die Modelle wurden entsprechende Kategorien pro Klimatechnologie gebildet. Die zukünftige Nachfrage wurde auf Basis aktueller Marktprognosen aus Studien sowie Experteneinschätzungen ermittelt. Die Annahmen der KND2045 dienen dabei als Rahmenbedingung für die in 5-Jahresschritten bis 2045 benötigte Gesamtkapazität. Ein vergleichbarer Ansatz wurde auch für andere Klimatechnologien angewandt.

Für spezifische Technologien – wie Ladeinfrastrukturen, Smart-Home oder elektrische Antriebe für die Industrie – wurden komplementäre Marktmodelle von Strategy& genutzt, da hierzu keine Basisdaten in der KND2045 verfügbar waren. Diese individuellen Ansätze erlaubten eine differenzierte Betrachtung der jeweiligen Technologien.

Die Berechnungen wurden in zwei Szenarien durchgeführt:

- **Szenario-Min:** Dieses Szenario beschreibt den minimal erforderlichen Bedarf an Klimatechnologien, basierend auf den Energiebedarfen der KND2045 und bildet somit die Untergrenze der Anforderungen ab.
- **Szenario-Max:** In diesem Szenario wird von einer deutlich höheren Anzahl an Klimatechnologien ausgegangen, um mögliche Ineffizienzen im System zu kompensieren. Insbesondere im Bereich der erneuerbaren Energien wird berücksichtigt, dass Überkapazitäten erforderlich sein könnten, um Energieengpässe zu überbrücken. Darüber hinaus wird in diesem Szenario ein höherer Elektrifizierungsgrad neuer Produktionsstandorte im Vergleich zu sanierten Standorten angenommen.

Für die Bereiche Wasserstoff und Wärmeerzeugung gilt Ähnliches. Hier wird von einer verstärkten Adaption dieser Technologien ausgegangen, um Ineffizienzen auszugleichen und potenzielle Lücken in der Entwicklung synthetischer Kraftstoffe zu schließen. Das Szenario-Max berücksichtigt somit eine größere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, um den steigenden Anforderungen gerecht zu werden.

Die Analyse zeigt, dass bis zum Jahr 2045 insgesamt 365 bis 552 Millionen Klimatechnologien unterschiedlichster Art erforderlich sein werden, um die deutschen Klimaziele zu erreichen (siehe Abbildung 4.5). Im Bereich der Photovoltaik muss die installierte Kapazität von 2025 bis 2045 auf das 4- bis 5-Fache der bis dahin vorhandenen Anlagen anwachsen, um den zukünftigen Bedarf zu decken. Dies entspricht 11 bis 16 Millionen neuen PV-Anlagen, von denen der Großteil im privaten Sektor installiert wird.

Auch bei Windkraftanlagen wird ein erheblicher Zuwachs erwartet: Die gleiche bis doppelte Anzahl neuer Turbinen wird erforderlich sein, wobei etwa 80 % des Ausbaus durch Onshore-Anlagen gedeckt werden sollen. Besonders markant ist der Anstieg bei Batteriespeichern: Die Zahl dieser Speicher wird von knapp 500.000 im Jahr 2025 auf 10 bis 16 Millionen bis zum Jahr 2045 steigen. Haupttreiber dieses Wachstums ist die zunehmende Verbreitung von Batteriespeichern in Kombination mit privaten PV-Anlagen.

Abb. 4.5: Gesamtbedarf an Klimatechnologien zum Erreichen der deutschen Klimaziele bis 2045 entlang zweier Szenarien sowie ein Vergleich zu der Zahl an installierten Anlagen bis 2025, in Tausend

	2025	2045 Szenario-Min	2045 Szenario-Max
 PV-Anlagen	3.294	10.642	15.963
 Windräder	33	48	97
 Batteriespeicher	483	10.413	15.619
 Wärmepumpen	2	14.001	21.005
 Elektrolyse		0,4	18
 EVs	2.162	132.517	150.218
 Ladesäulen	3.658	22.450	33.674
 Smart Home	2.063	106.591	177.652
 E-Antriebe Industrie	11.742	68.594	137.188
 Kontrollsysteme	49	103	206
 Gesamt	23.486	365.358	551.640

Quelle: Strategy&Analyse

Im Bereich der Wärmepumpen wird im Szenario-Min von den Annahmen der KND2045 ausgegangen, die bis 2045 eine Installation von insgesamt 14 Millionen Anlagen vorsehen. Im Szenario-Max steigt diese Zahl auf 21 Millionen, gestützt auf eine höhere Verbreitung von Wärmepumpen sowie einen deutlich größeren Einsatz im Bereich der Fernwärme und in industriellen Anwendungen.

Bei der Klimatechnologie Wasserstoff bleibt die Zahl der neu hinzukommenden Anlagen im Vergleich relativ gering, was vor allem auf deren Größe zurückzuführen ist. Basierend auf den kommunizierten Wasserstoffprojekten geht die Studie primär von der Errichtung sehr großer, zentraler Wasserstoffanlagen aus. Diese sollen bis 2045 eine Gesamtkapazität von 96 TWh erreichen, entsprechend den Annahmen der KND2045.

Elektrische Fahrzeuge machen einen großen Anteil der betrachteten Technologien aus. Ausgehend von rund 2 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2025 werden bis zum Jahr 2045 insgesamt 130 bis 150 Millionen in Deutschland verkauft – eine Entwicklung um den Faktor 60. Etwa 10 % davon werden elektrische Lkw und Nutzfahrzeuge sein. Dieser Zuwachs wird die Nachfrage nach privaten Ladeboxen, öffentlichen Ladestationen und Schnellladestationen erheblich steigern. Das zugrundeliegende Modell berücksichtigt dabei sowohl den Energiebedarf dieses Sektors als auch eine Verteilung, die auf dem prognostizierten Ladeverhalten der Bevölkerung basiert.

Ein vergleichbares Wachstum zeigt sich bei den Smart-Home-Anwendungen: Bis 2045 werden voraussichtlich 107 bis 178 Millionen Einheiten benötigt. Besonders Home-Energie-Management-Systeme und intelligente Verbrauchszähler stehen hierbei im Fokus. Ebenso wird die Zahl der elektrischen Antriebe für die industrielle Fertigung erheblich zunehmen, mit einer erwarteten Steigerung auf 69 bis 137 Millionen neuer Geräte bis 2045.

4.4.2 Halbleiterkapazitäten für die grüne Transformation

Im nächsten Schritt wurde der Halbleiterbedarf für die definierten Klimatechnologien prognostiziert. Gemeinsam mit den Mitgliedsunternehmen wurden für jede Klimatechnologie der spezifische Halbleiterbedarf auf Basis der Referenzsysteme abgeschätzt. Zur Veranschaulichung kann erneut das PV-System als Beispiel herangezogen werden: Für jede Größenklasse der PV-Anlagen wurde der Halbleiterbedarf pro Halbleiterproduktkategorie ermittelt. So wurde beispielsweise für eine 40-kW-Anlage analysiert, wie viele Leistungshalbleiter (gemessen an der Chip-Fläche) typischerweise in einem System dieser Größe verbaut werden. Die gleiche Methodik wurde für alle weiteren Halbleiterkategorien angewendet (eine Übersicht der betrachteten Kategorien findet sich in Abbildung 3.3 in Kapitel 3).

Dieses Vorgehen wurde analog auch auf die übrigen Größenklassen der PV-Systeme sowie die anderen Klimatechnologien übertragen. Im Anschluss wurde die ermittelte Chip-Fläche in die Anzahl notwendiger Halbleiterwafer umgerechnet, wobei die Berechnungen auf den beiden definierten Szenarien (Szenario-Min und Szenario-Max, siehe Abbildung 4.6) basierten.

Abb. 4.6: Notwendige Halbleiterkapazität zur Umsetzung der Klimaziele pro Klimatechnologie anhand von 2 Szenarien als Anzahl notwendiger Wafer im 200mm-Äquivalent, in Millionen

	2045 Szenario-Min	2045 Szenario-Max
 PV-Anlagen	 4.629	 5.990
 Windräder	 3.240	 6.243
 Batteriespeicher	 1.304	 1.927
 Wärmepumpen	 333	 461
 Elektrolyse	 137	 673
 EVs	 15.192	 17.616
 Ladesäulen	 951	 1.356
 Smart Home	 496	 795
 E-Antriebe Industrie	 2.373	 4.295
 Kontrollsysteme	 0,8	 1,3
 Gesamt	 28.837	 39.356

Quelle: Strategy&Analyse

Bevor auf die Ergebnisse eingegangen wird, werden zunächst die Treiber dieses Bedarfs näher erläutert. Der größte Anteil am Halbleiterbedarf entfällt auf Leistungshalbleiter und andere diskrete Komponenten, die zusammen mehr als 80 % des Gesamtbedarfs ausmachen. Dieses Ergebnis lässt sich über die hauptsächlich eingesetzten Technologien erklären, die eine Elektrifizierung von Industrie und Alltagssystemen ermöglichen. Zudem skaliert die Chip-Fläche dieser Halbleitergruppen direkt mit der elektrischen Größe des jeweiligen Systems. Eine Großwärmepumpe benötigt beispielsweise eine größere Fläche an Leistungshalbleitern als eine Haushaltswärmepumpe, da höhere Ströme und Spannungen geregelt werden müssen.

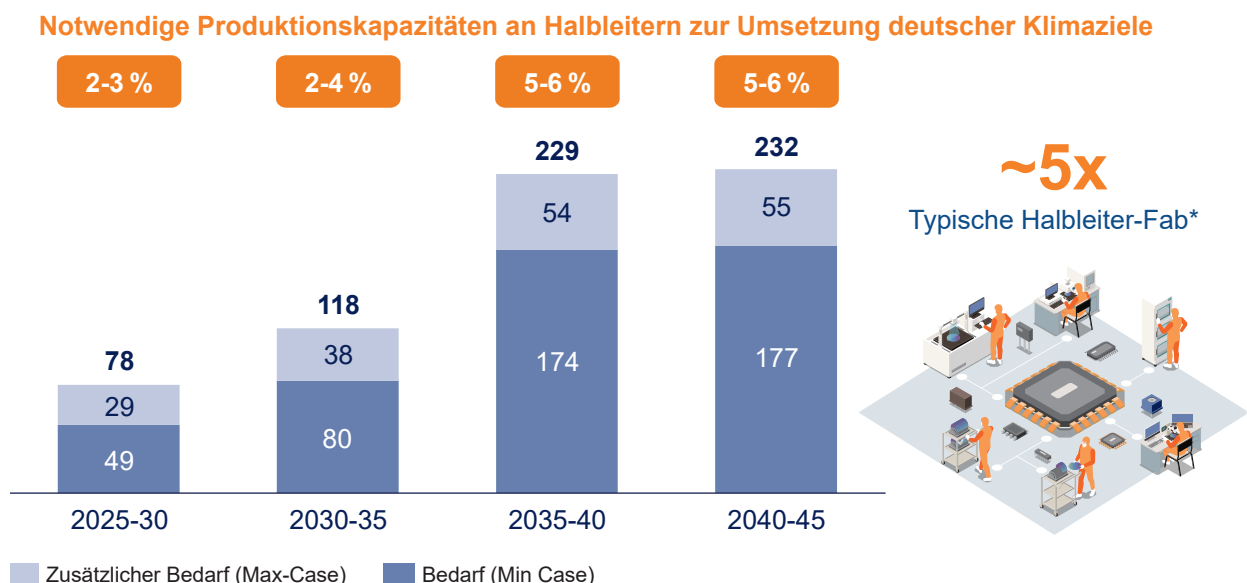
Andere Halbleiterkategorien, wie Mikrocontroller oder Kommunikationshalbleiter, hängen hingegen nicht von der elektrischen Leistung der Anlagen ab, sondern lediglich von der Anzahl der Klimatechnologien. Ein besonderer Unterschied zeigt sich bei modular aufgebauten Technologien wie Photovoltaikanlagen: Selbst große PV-Parks bestehen aus in Reihe geschalteten, autonomen PV-Anlagen, die jeweils über eigene Logik-, Sensor- und Kommunikationskomponenten verfügen.

Auffällig ist der hohe Bedarf an Halbleitern im Mobilitätssektor, der mehr als dreimal so groß ist wie der Bedarf an PV-Anlagen – obwohl diese den zweitgrößten Bedarf ausmachen. Der Grund hierfür liegt in der Kombination aus der Anzahl der Fahrzeuge und der erforderlichen Chip-Fläche, insbesondere im Bereich der Leistungselektronik. Elektrische Fahrzeuge benötigen eine größere Leistungshalbleiter-Fläche als beispielsweise Smart-Home-Systeme oder kleinere elektrische Antriebe in der Industrie, selbst wenn diese in einer vergleichbaren Stückzahl vorkommen.

Andererseits wird die starke Skalierung größerer PV-Anlagen beim Halbleiterbedarf deutlich sichtbar. Obwohl die Anzahl der PV-Anlagen nur etwa ein Zehntel der erforderlichen Fahrzeuge beträgt, ist die benötigte Halbleiterfläche fast ein Drittel so groß. Dies ist vor allem auf die großen PV-Parks zurückzuführen, die den Bedarf in dieser Kategorie erheblich treiben. Ähnlich verhält es sich bei großen Windturbinen, die aufgrund der hohen Ströme ebenfalls eine erhebliche Anzahl an Leistungshalbleitern erfordern. Wärmepumpen zeigen ein vergleichbares Muster, jedoch dominieren hier Haushaltswärmepumpen mit geringerer Leistung, was den Bedarf an Halbleiterfläche reduziert.

Bei Betrachtung der Bedarfe über die Zeit, wird das Ausmaß der erforderlichen Transformation deutlich. Allein für die Erreichung der deutschen Klimaziele im Kontext der Elektrifizierung sind ab 2025 Kapazitäten von fast 80.000 Waferstarts pro Monat notwendig.

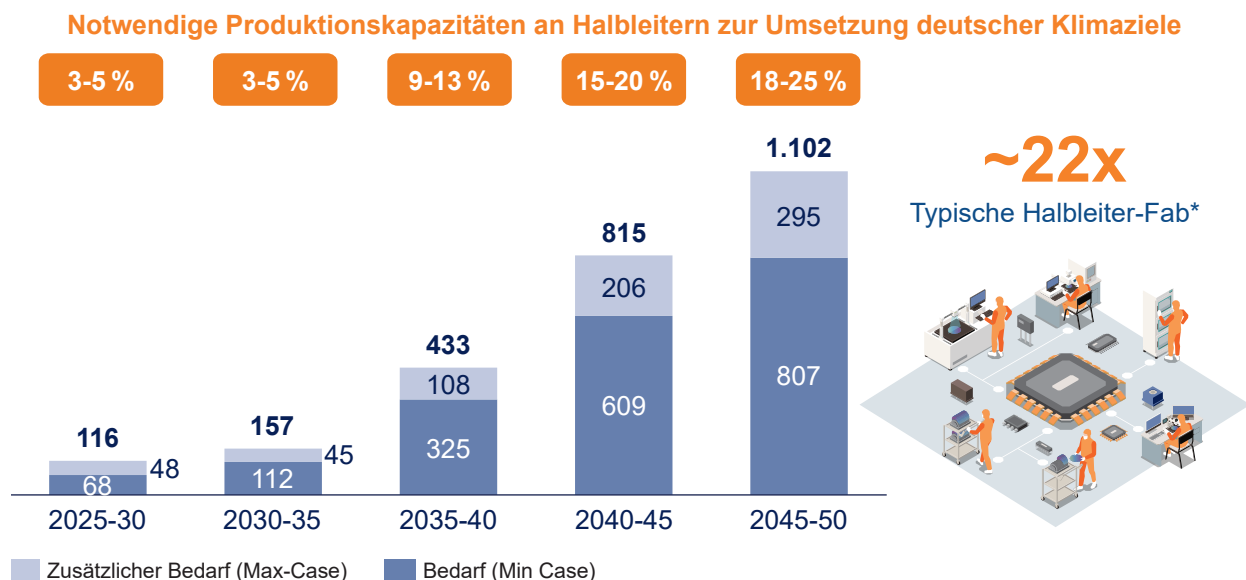
Abb. 4.7: Notwendige Produktionskapazitäten für Halbleiter zur Umsetzung der deutschen Klimaziele in Tausend Waferstarts pro Monat im 200mm-äquivalent und der Anteil dieser Bedarfe an den europäischen Produktionskapazitäten (2025-2045)



*Typische Referenz-Fab mit einer Kapazität von 50.000 Waferstarts im Monat²⁸

Quelle: Strategy&Analyse

Abb. 4.8: Notwendige Produktionskapazitäten für Halbleiter zur Umsetzung der EU-Klimaziele in Tausend Waferstarts pro Monat im 200mm-äquivalent und der Anteil dieser Bedarfe an den europäischen Produktionskapazitäten (2025-2050)



*Typische Referenz-Fab mit einer Kapazität von 50.000 Waferstarts im Monat²⁸
 Quelle: Strategy& Analyse

Diese Zahl wird in den nächsten 15 Jahren deutlich steigen, da die Einführung einiger Klimatechnologien – insbesondere in der zweiten Hälfte der kommenden Dekade – erheblich zunehmen wird. In den letzten fünf Jahren des betrachteten Zeitraums wird der Bedarf auf bis zu 232.000 Waferstarts pro Monat wachsen. Zum Vergleich: Dies entspricht etwa der Kapazität von fünf größeren Fab-Modulen.³¹ Zudem macht dies bis zu 6 % der gesamten europäischen Halbleiterproduktionskapazitäten in diesem Zeitraum aus. Die Schätzung basiert auf dem „Szenario 2 – Aktuelles Förderprogramm“ des vorherigen Kapitels.

Betrachtet man die Transformation auf EU-Ebene, wird der Umfang noch deutlicher. Um das selbstgesteckte Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen, könnten bis zu 25 % der antizipierten europäischen Produktionskapazitäten für die Elektrifizierung benötigt werden (siehe Abbildung 4.8). Dies entspricht der Kapazität von 22 typischen Halbleiterfabriken oder großen Fab-Modulen allein für diesen Bereich. Dabei ist der Bedarf für weitere Anwendungsfelder wie autonome Systeme, Infotainment-Elektronik in Fahrzeugen, Unterhaltungselektronik oder Rechenzentren noch nicht berücksichtigt. Angesichts des zu erwartenden Wachstums durch KI-Anwendungen und cloudbasierte Lösungen wird deutlich, dass der Bedarf für die anstehende industrielle und gesellschaftliche Transformation noch erheblich größer sein wird.

Zusätzlich sollte berücksichtigt werden, dass europäische Produktionskapazitäten nicht nur den Bedarf innerhalb Europas decken, sondern auch einen erheblichen Anteil zur Versorgung außereuropäischer Märkte beitragen. Dies unterstreicht, dass die Sicherstellung der Versorgung langfristig eine zentrale Herausforderung bleiben wird. In diesem Kontext ist eine ausgewogene Balance zwischen regionaler Versorgungssicherheit und der globalen Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Halbleiterindustrie von Bedeutung.

4.5 Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Produktion

Die Mikroelektronik zählt zu den energie- und ressourcenintensivsten Industrien, wodurch Nachhaltigkeit und Effizienz in der Produktion zunehmend an Bedeutung gewinnen. Europa, insbesondere Deutschland, bietet einzigartige Voraussetzungen, um eine führende Rolle in der nachhaltigen Halbleiterproduktion einzunehmen – sei es durch den hohen Anteil erneuerbarer Energien, strenge Umweltauflagen oder gezielte Investitionen in ressourcenschonende Technologien.

Energieversorgung und Volatilität

Moderne Halbleiterfabriken können jährlich bis zu 500 GWh Strom verbrauchen,³² das entspricht dem Energiebedarf von rund 150.000 Haushalten. Europa verfügt über einen der höchsten Anteile erneuerbarer Energien weltweit: 2023 stammten 45 %³³ des Stroms in der EU und sogar 56 %³⁴ des Stroms in Deutschland aus erneuerbaren Quellen. Dies bietet der energieintensiven Halbleiterindustrie ideale Voraussetzungen, um die CO₂-Emissionen signifikant zu senken. Auf der anderen Seite stellt die Volatilität erneuerbarer Energien eine weitere Herausforderung für die Halbleiterindustrie dar. Die schwankende Verfügbarkeit von Solar- und Windenergie sowie die dadurch bedingten Preisschwankungen können erhebliche Auswirkungen auf die Produktionskosten haben. Da Strom einen signifikanten Anteil der Betriebskosten moderner Halbleiterfabriken ausmacht, teilweise über 5 %³⁵, können selbst moderate Preisanstiege oder -schwankungen die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Halbleiterunternehmen beeinträchtigen. Darüber hinaus können Netzinstabilitäten Stromausfälle verursachen, die zu Produktionsausfällen und damit zu Disruptionen in der Lieferkette führen.

Um dieser Volatilität zu begegnen, ist es notwendig die Erweiterung der europäischen Energienetze sowie den Ausbau von Energiespeicherkapazitäten weiter voranzutreiben, um die Integration erneuerbarer Energien zu verbessern und eine gleichmäßige Versorgung sicherzustellen.

Herausforderungen durch PFAS-Regulierungen

Die geplanten Regulierungen für Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS), oft als „Forever Chemicals“ bezeichnet, stellen eine weitere Herausforderung dar. PFAS werden in der Halbleiterproduktion in Schlüsselprozessen wie der Lithografie oder dem Ätzen eingesetzt und sind aufgrund ihrer chemischen Stabilität bisher kaum zu ersetzen. Ein einseitiges Verbot durch die EU könnte die Verfügbarkeit dieser Stoffe einschränken, zu erheblichen Kostensteigerungen führen und die Produktionskapazitäten europäischer Halbleiterhersteller gefährden.

Die Entwicklung von PFAS-Alternativen ist bereits ein Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten, erste Lösungen werden jedoch voraussichtlich erst in 10 bis 20 Jahren marktreif sein. Um den Zielkonflikt zwischen Umweltauflagen und der EU-Chips-Strategie zu entschärfen, sind enge Abstimmungen zwischen Industrie, Politik und Forschung sowie flexible Übergangsregelungen erforderlich. Ein unausgewogenes Vorgehen könnte die europäische Wettbewerbsfähigkeit untergraben und die Abhängigkeit von außereuropäischen Herstellern erhöhen.



Kreislaufwirtschaft in der Halbleiterproduktion

Die Einführung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft bietet der Halbleiterindustrie die Möglichkeit, ihre Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen wie Gallium, Germanium und Tantal zu reduzieren. Diese Rohstoffe sind essenziell für die Chipproduktion, ihre Förderung ist jedoch oft mit hohen Umweltbelastungen und geopolitischen Risiken verbunden.

Ein zentraler Ansatz für mehr Nachhaltigkeit in der Halbleiterindustrie ist die Gestaltung von Produkten mit einem optimierten ökologischen Fußabdruck. Durch kompaktere Designs, die kleinere Volumen und Gewichte ermöglichen, können die Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette nahezu proportional reduziert werden: Eine Verringerung des Volumens oder Gewichts um 50 % führt beispielsweise zu einer entsprechenden Reduktion der Emissionen. Zudem spielt die Integration von Funktionen eine Schlüsselrolle. Hochintegrierte Designs reduzieren den Materialbedarf und steigern gleichzeitig die Energieeffizienz der Endprodukte. Materialien mit einem geringeren CO₂-Fußabdruck, wie Kupfer anstelle von Gold oder Nickel, bieten zusätzliche Einsparpotenziale. Darüber hinaus wird zunehmend auf die Verwendung ungefährlicher Materialien geachtet, um sowohl die Umweltbelastung als auch die Gesundheitsrisiken entlang der Produktionskette zu minimieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Packaging: Der Einsatz von recyceltem Kunststoff für die Verpackung von Halbleiterprodukten trägt dazu bei, den Ressourcenverbrauch und die Abfallmenge zu senken. Diese Ansätze zeigen, wie durch innovative Designentscheidungen nicht nur der ökologische Fußabdruck der Produkte, sondern auch die Nachhaltigkeit der gesamten Halbleiterproduktion verbessert werden kann.

Europas Potenzial als Vorreiter

Europa hat das Potential – durch die Kombination hoher Umweltstandards, einer starken Infrastruktur und technologischen Innovationen – ein globaler Vorreiter in der nachhaltigen Halbleiterproduktion zu werden. Der Ausbau erneuerbarer Energien, die Entwicklung alternativer Chemikalien und die Förderung der Kreislaufwirtschaft sind entscheidende Schritte, um die ökologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen der Branche zu bewältigen. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Politik, Industrie und Forschung wird notwendig sein, um diesen Weg erfolgreich zu gestalten und die Position Europas als nachhaltiger Technologiestandort zu festigen. Nur wenn die Herausforderungen gemeinsam entlang der gesamten Wertschöpfungskette angegangen werden, kann eine nachhaltige Lösung für das gesamte Ökosystem entstehen. Dies schließt auch die Unternehmen in den Endindustrien und deren Anforderungen an die technologischen Lösungen und Lieferketten der Mikroelektronikindustrie ein.



5 Die Mikroelektronik als Kernbaustein der Technologiesouveränität

Die Mikroelektronikindustrie stellt als Rückgrat der digitalen und elektrischen Transformation einen grundlegenden Baustein für wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Nachhaltigkeit dar. Aufgrund dieser Bedeutung entwickelt sich die Mikroelektronik inmitten der veränderten globalen Dynamiken zu einem Brennpunkt geopolitischer Spannungen.

Dabei beeinflussen Exportbeschränkungen und lokale Inhaltsanforderungen die globalen Lieferketten zunehmend. Ein Beispiel hierfür ist der US-amerikanische National Defense Authorization Act (NDAA)³⁶, der Beschränkungen für den Export von Hochtechnologien an bestimmte Länder, insbesondere China, festlegt. Zu den davon betroffenen Technologien gehören unter anderem fortschrittliche KI-Chips sowie bestimmtes Equipment für deren Herstellung. Ähnlich agiert auch China: Hier wurde kürzlich der Export bestimmter kritischer Materialien wie Gallium oder Germanium, die in der Halbleiterfertigung benötigt werden, stark reglementiert.³⁷ Diese Entwicklungen begrenzen den Technologietransfer und verstärken die Abhängigkeit von lokalen Lieferketten. So verändern sich die globalen Märkte und regional agierende Lieferketten gewinnen stetig an Bedeutung. Während einige Regionen eine starke Position festigen, sehen sich andere mit den Herausforderungen konfrontiert, die geopolitische Verschiebungen mit sich bringen.

Technologische Unabhängigkeit, sogenannte Technologiesouveränität, ist der Schlüssel zur Sicherung von Wohlstand und Selbstbestimmung. Das bedeutet, in der Lage zu sein, Schlüsseltechnologien zu verstehen, herzustellen, weiterzuentwickeln und diese international mitzugestalten. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Potenziale dieser Technologien zu nutzen, um hochwertige Arbeitsplätze zu schaffen, während gleichzeitig gesellschaftliche Werte wie Sicherheit, Zuverlässigkeit, Datenschutz und Nachhaltigkeit gewährleistet werden.

Gerade in diesem herausfordernden globalen Wettbewerb ist Technologiesouveränität wichtig, um nicht in Abhängigkeiten zu geraten und die wirtschaftliche und politische Handlungsfähigkeit zu wahren.³⁸

5.1 Technologietrends als Treiber der Transformation

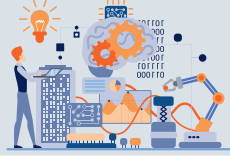
Die Welt befindet sich inmitten eines tiefgreifenden technologischen Wandels. Digitale Technologien und grüne Innovationen verändern die Industrie, das gesellschaftliche Leben und die globale Wirtschaft. Die zunehmende Digitalisierung, die Elektrifizierung von Fahrzeugen und Maschinen sowie die Automatisierung von Produktionsprozessen sind nur einige von vielen Treibern dieser Transformation. Diese Entwicklungen werden wiederum durch globale Technologietrends geprägt. Im Folgenden wird auf die wichtigsten dieser Technologietrends sowie ihre Bedeutung für die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung und gesellschaftliche Transformation näher eingegangen (siehe auch Abbildung 5.1).

Künstliche Intelligenz

KI verändert die Art und Weise, wie Daten analysiert und Entscheidungen getroffen werden. Von der industriellen Fertigung über autonome Fahrzeuge bis hin zur Verteidigung steigert KI die Effizienz und Präzision. Dadurch werden neue Potenziale für die Weiterentwicklung dieser Industrien geschaffen. Insbesondere Edge KI, die Daten lokal auf den Endgeräten verarbeitet und dadurch schnelle, datenschutzfreundliche sowie unabhängige Entscheidungen ermöglicht, wird eine fundamentale Rolle als Ergänzung zu cloudbasiertem High-Performance Computing spielen. Sie ist energieeffizienter, sicherer und ermöglicht durch Anwendungen wie Bild- und Spracherkennung sowie Datenanalyse, schnell auf Veränderungen zu reagieren und Prozesse effizient zu optimieren.

IoT und Sensorik	IoT und Sensorik tragen wesentlich zur umfassenden Vernetzung von Maschinen, Systemen und Geräten bei. Diese Technologien sind besonders in Smart Homes und Smart Cities von zentraler Bedeutung, da sie den Komfort im Alltag erhöhen und gleichzeitig die Energieeffizienz steigern, was zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs führt. In der Industrie verbessern sie die Überwachung und Steuerung von Abläufen, wodurch Industrie 4.0-Anwendungen und automatisierte Prozesse realisiert werden. Vernetzte Fahrzeuge, die untereinander und mit ihrer Umgebung kommunizieren, erhöhen die Verkehrssicherheit und ermöglichen neue Mobilitätslösungen.
Daten-Center und dezentralisiertes Rechnen	Die Integration von Edge-Computing und Cloud-Technologien in Daten-Center sowie dezentrale Rechensysteme verbessern die Datenverarbeitung und -speicherung. Durch diese Technologien profitieren sowohl die industrielle Produktion als auch die Telekommunikation von flexibleren und effizienteren Prozessen. Edge-Computing ermöglicht eine Analyse großer Datenmengen direkt am Ort der Entstehung, während Cloud-Lösungen Unternehmen dabei helfen, ihre Software-as-a-Service (SaaS)-Anwendungen zu skalieren.
Cybersicherheit	Mit der zunehmenden Vernetzung nimmt das Thema Cybersecurity stetig an Bedeutung zu, da der Schutz von Daten und kritischen Infrastrukturen im Mittelpunkt der digitalen Transformation steht. Technologien wie Firewall-Systeme, Verschlüsselung und Authentifizierung spielen eine entscheidende Rolle für die Abwehr von Cyber-Angriffen und die Gewährleistung von Sicherheit. Zukünftig wird ein besonderer Fokus auf der Weiterentwicklung und Implementierung von quantensicherer Verschlüsselung liegen. Die Rechenleistung von Quantencomputern stellt eine ernstzunehmende Herausforderung für die aktuelle Kryptographie und somit für die Cybersicherheit sämtlicher vernetzter Geräte und Infrastrukturen dar.
High-Speed-Kommunikation	Die Weiterentwicklung von High-Speed-Kommunikationstechnologien wie 5G, 6G und Glasfasertechnik eröffnet neue Möglichkeiten für mobile Geräte, Cloud-basierte Services und die Machine-to-Machine-Kommunikation. So ermöglichen die immer weiter steigenden Datenraten und geringeren Latenzzeiten Echtzeitanwendungen in der industriellen Produktion sowie der vernetzten Mobilität. Diese Technologien bilden ein Rückgrat der digitalen Transformation und eröffnen neue Märkte und Geschäftsmodelle.
Virtuelle und erweiterte Realität (AR, VR)	Die Technologien AR und VR bieten in Bereichen wie Bildung, Unterhaltung und Gesundheitswesen neue Möglichkeiten, beispielsweise durch realitätsnahe Trainingsumgebungen oder interaktive Lernerfahrungen. In der Industrie werden AR-Lösungen eingesetzt, um Wartung und Schulung durch die visuelle Überlagerung von Informationen zu erleichtern, während VR immersive Simulationen für Design- und Sicherheitsanwendungen ermöglicht. Sie basieren auf leistungsstarken Logikhalbleitern und Sensoren, die Echtzeitdatenverarbeitung und hochauflösende Grafiken ermöglichen.
Autonome Systeme	Auch autonome Systeme und Robotik treiben die Automatisierung in vielen Branchen voran. So revolutioniert autonomes Fahren die Automobilindustrie, während Roboter in Produktionsstätten und Logistikzentren die Effizienz und Produktivität erhöhen. Durch die Automatisierung komplexer Aufgaben tragen diese Systeme dazu bei, Produktionskosten zu senken und die Qualität zu steigern. Zusätzlich ermöglichen sie eine höhere Präzision und kürzere Produktionszeiten.
Elektrifizierung für die Energiewende	Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt, spielt die Elektrifizierung von Fahrzeugen, Haushalten und Industrieanlagen eine entscheidende Rolle für die Reduktion von CO ₂ -Emissionen. Neue Halbleitermaterialien wie Siliziumkarbid (SiC), Galliumnitrid (GaN) und Graphen bieten dabei erhebliche Vorteile in puncto Leistung, Effizienz sowie Wärmeleitfähigkeit und sind entscheidend für die Entwicklung leistungsstarker elektronischer Komponenten.

Abb. 5.1: Relevante Technologietrends und Anwendungsbeispiele für die Mikroelektronik

Technologietrends	Anwendungen (Beispiele)
 KI	• Bild- und Spracherkennung • Datenanalyse und Simulationen • Automatisierung
 IoT und Sensorik	• Smart Home: Vernetzte Haushaltsgeräte • Smart Cities und vernetzte Fahrzeuge • Industrie 4.0: Automatisierte Produktion durch vernetzte Maschinen und Anlagen
 Rechenzentren und dezentralisiertes Rechnen	• Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen (Kundendaten, Simulationen, etc.) • Blockchain und Kryptowährungen • Software-as-a-Service
 Cybersicherheit	• Firewall-Systeme und Netzwerkschutz • Ver- und Entschlüsselung • Authentifizierung und Autorisierung
 High-Speed-Kommunikation	• 5G- und 6G-Netzwerke für mobile Geräte • Cloud-basierte Services • Machine-to-Maschine-Kommunikation
 Virtuelle und erweiterte Realität (VR, AR)	• Gaming und Unterhaltung • Bildung und Training • E-Commerce und Einzelhandel
 Autonome Systeme	• Autonomes Fahren • Roboter und Drohnen
 Elektrifizierung für die Energiewende	• Elektrische Systeme in Verkehr, Haushalt und erneuerbaren Energien • Energieeffiziente Leistungshalbleiter (SiC/GaN) und schnellere Datenverarbeitung durch Mehrzweck-Graphen-Wafer

Quelle: Strategy&Analyse

5.2 Relevanz der einzelnen Wertschöpfungskettenschritte für die Technologietrends

Die Relevanz einzelner Wertschöpfungsschritte und Mikroelektroniktechnologien variiert je nach nationaler Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit. Somit muss zunächst die grundlegende Frage beantwortet werden, welche Bereiche der Wertschöpfungskette und welche Technologien besetzt werden müssen, um den angestrebten Grad an Technologiesouveränität zu erreichen. Dafür wird im Folgenden die Relevanz der Mikroelektroniktechnologien entlang der Wertschöpfungskette für zukünftige Technologietrends beleuchtet.

5.2.1 Maschinen und Werkzeuge: Kleine Wellenlängen für kleine Bauteile

Die Herstellung von Mikroelektronik-Komponenten erfordert eine Vielzahl hochspezialisierter Prozessschritte und Fertigungsanlagen. Einer der komplexesten Prozesse ist die Photolithographie – hier wird Licht verwendet, um feine Strukturen auf einem Halbleiterwafer abzubilden. Diese Strukturen bestimmen letztlich die Funktionalität und Eigenschaften eines Halbleiters. Zudem spielt Photolithographie eine entscheidende Rolle bei der Miniaturisierung und der präzisen Fertigung moderner Mikroelektronik. Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, gibt die Strukturbreite an, wie klein die einzelnen Schaltkreiselemente auf einem Chip sind. Bei einer geringen Strukturbreite können mehrere Bauelemente auf einem Chip gleicher Fläche untergebracht werden, wodurch die Leistung und Energieeffizienz des Chips um ein Vielfaches gesteigert wird.

Bei der Photolithographie kommen zwei Haupttechnologien zum Einsatz: Deep Ultraviolett (DUV) und Extreme Ultraviolett (EUV) – der Unterschied dieser Technologien liegt hauptsächlich in der Wellenlänge des verwendeten Lichts. So nutzt die DUV-Lithographie Licht mit Wellenlängen von 248 nm sowie 193 nm und ermöglicht die Herstellung von Halbleitern mit Strukturbreiten zwischen 12 nm und über 180 nm (siehe Abbildung 5.2). Die DUV-Lithographie hat sich als konventionellere Technologie durchgesetzt und wird für viele der heute in Europa produzierten Anwendungen jenseits von 10 nm eingesetzt – beispielsweise für Leistungshalbleiter, Mikrocontroller, Batteriemanagementsysteme oder Sensoren.

Allerdings wird der Grad der Komplexität sowie die Leistungsfähigkeit von Halbleiterkomponenten nicht allein durch die Strukturbreite bestimmt. Auch Komponenten mit Strukturbreiten jenseits der 10 nm werden kontinuierlich weiterentwickelt und gewinnen an Effizienz und Leistungsstärke. Insbesondere bei Leistungshalbleitern sind größere Strukturen erforderlich, um hohe Ströme und Spannungen schalten und die Wärme effektiv ableiten zu können.

Die Produktion der kleinsten Halbleiter mit Strukturbreiten von 12 nm bis 3 nm erfordert den Einsatz von EUV-Technologie, da nur extrem kurzwelliges Licht die Herstellung solch feiner Strukturen ermöglicht. Mit herkömmlichen Lichtquellen wäre dies nicht möglich. Die EUV-Technologie ermöglicht erhebliche technische Herausforderungen und ist unverzichtbar für die Produktion von Halbleitern im Bereich KI und High-Performance Computing. Derzeit wird die High-NA-EUV-Technologie entwickelt. Diese nutzt sogar noch kleinere Wellenlängen und soll in der Lage sein, dreimal so viele Strukturen auf der gleichen Fläche wie die aktuelle Generation von EUV-Lithografen zu ermöglichen.

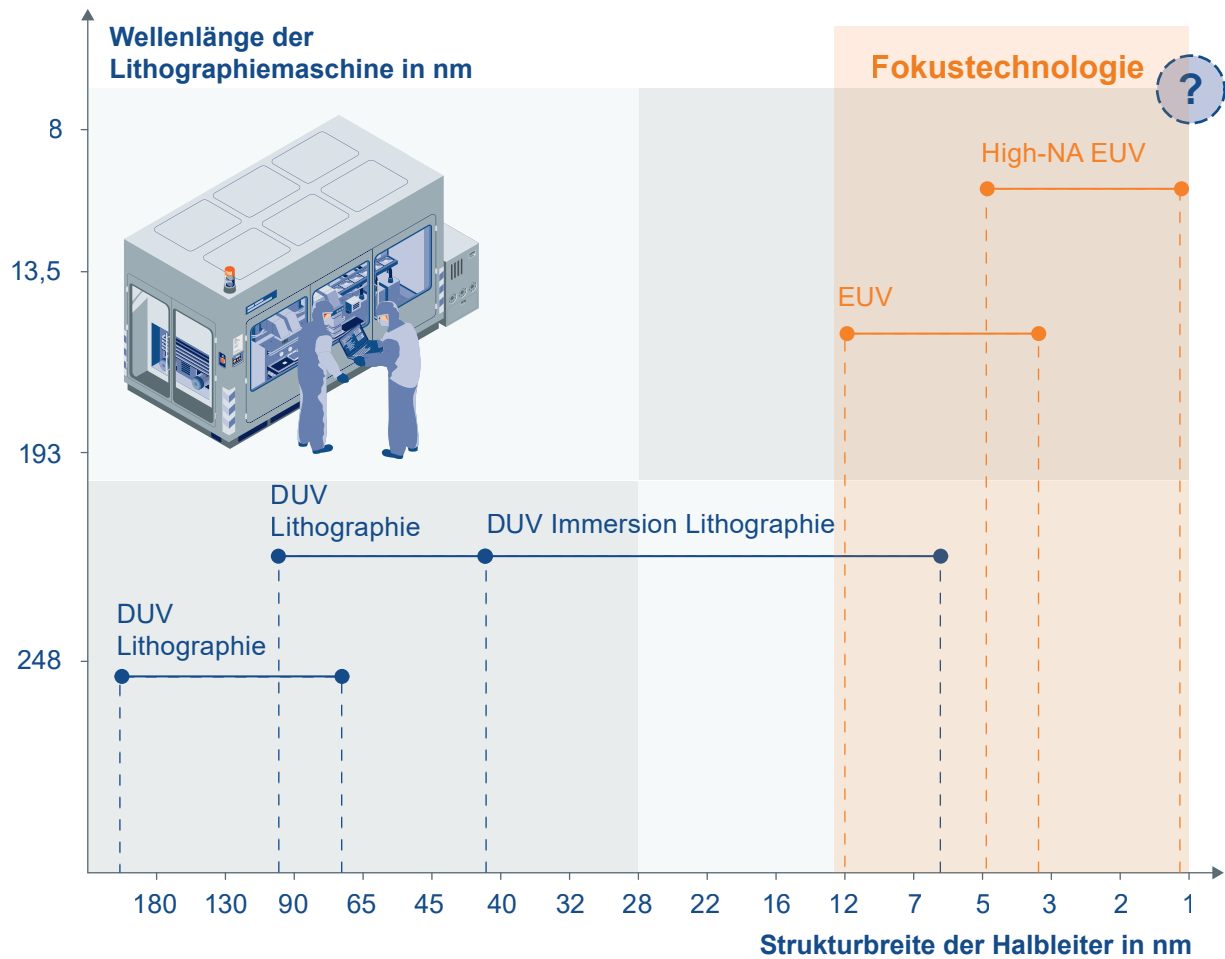
5.2.2 Material: Innovationen durch neue Halbleiterwerkstoffe

Auf Materialebene treiben Wide-Bandgap (WBG)-Halbleiter wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) die technologische Entwicklung voran: Im Vergleich zu herkömmlichem Silizium bieten diese Materialien eine höhere Energieeffizienz, größere Leistungsdichte sowie die Fähigkeit, auch bei hohen Temperaturen zuverlässig zu arbeiten. Durch diese Eigenschaften sind SiC und GaN ideal für Hochleistungsanwendungen in Bereichen wie industrieller Automatisierung, Telekommunikation, Luft- und Raumfahrt sowie Energietechnik.

SiC und GaN bieten spezifische Vorteile, die sie für verschiedene Anwendungen besonders geeignet machen. SiC zeigt seine Stärken vor allem bei Hochspannungsanwendungen (HV), zum Beispiel in Stromnetzen für Umrichter und C-DC-Wandler, in der industriellen Automatisierung und Elektromobilität (siehe Abbildung 5.3). Die hohe Spannungsfestigkeit und ausgezeichnete Wärmeableitung machen SiC zur bevorzugten Wahl für Leistungselektronik mit hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Effizienz.

Mit der Umstellung auf größere 200-mm-Wafer für SiC, anstelle der bisher genutzten 150-mm-Wafer, wird zudem eine weitere Senkung der Produktionskosten erwartet. Dadurch kann eine höhere Anzahl an Chips pro Wafer hergestellt und somit die Zahl der Produktionsschritte sowie die Menge der Materialien gesenkt werden.

Abb. 5.2: Schlüsseltechnologien im Bereich Halbleiter-Equipment für Tech-Souveränität



Quelle: Strategy& Analyse

GaN hingegen ist für allem für Anwendungen, die hohe Schaltgeschwindigkeiten und geringe Energieverluste erfordern, geeignet. Es wird in Hochfrequenztechnologien wie 5G – sowie zukünftig 6G – eingesetzt und ist auch für die Leistungselektronik in niedrigen und mittleren Spannungsbereichen, wie etwa in Ladegeräten, Netzteilen oder On-board Charger im Automobilbereich, besonders attraktiv (siehe Abbildung 5.3). Durch die Kompatibilität mit 300-mm-Wafern lässt sich GaN zudem gut in bestehende Silizium-Infrastrukturen einbinden, was langfristig Skaleneffekte und Kostenvorteile bringen kann. Zukünftige soll GaN auch für Hochspannungsanwendungen im Bereich Automobil (z.B. Hauptumrichter) eingesetzt werden können, wodurch sich das Einsatzspektrum von GaN erweitern wird.

Die Fortschritte im Bereich der WBG-Halbleiter zeigen, dass diese innovativen Materialien nicht nur die Effizienz und Leistung in etablierten Sektoren steigern, sondern auch den Grundstein für die nächste Generation energieeffizienter und leistungsstarker Anwendungen in verschiedenen Industrien legen. Mit dem Ausbau der Produktionskapazitäten und den sinkenden Kosten durch größere Wafergrößen entwickeln sich SiC und GaN zu zentralen Bausteinen moderner Hochleistungstechnologien und fördern zukünftige Innovation, Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit.

Abb. 5.3: Einsatzgebiete von Leistungshalbleitern nach Material



Quelle: Infineon Q4 2024

5.2.3 Halbleiterdesign und -fertigung: Im Zentrum der Technologietrends

All diese globalen Technologietrends bieten Chancen und Risiken für die Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft europäischer Schlüsselindustrien. Werden die dafür notwendigen Halbleitertechnologien nicht selbst entwickelt und großflächig umgesetzt, läuft Europa Gefahr im globalen Wettbewerb ins Hintertreffen zu geraten (siehe Abbildung 5.4).

In rechenintensiven Bereichen wie KI, Edge und Cloud Computing spielen sowohl eine schnelle Datenverarbeitung durch Logikchips (leistungsstarke KI-Chips, GPUs und CPUs) als auch deren Speicherung eine zentrale Rolle.

Beim IoT, autonomen Systemen sowie bei VR und AR, nehmen Mikrocontroller eine Schlüsselrolle ein, da hier eine Echtzeitsteuerung mit einer hohen Zuverlässigkeit unerlässlich ist. Hinzu kommt, dass auch Technologien wie Optoelektronik, Sensorik und Kommunikation für eine effiziente Vernetzung sowie latenzfreie Kommunikation zwischen Systemen und ihrer Umgebung unerlässlich sind.

Im Hinblick auf den zunehmenden Übergang zu Cloud-, Edge- und dezentralem Rechnen wächst der Bedarf an einer schnellen Übertragung großer Datenmengen stetig. Zusätzlich gewinnt der Ausbau sowie die Weiterentwicklung von Mobilfunknetzen, insbesondere 5G und 6G, zunehmend an Bedeutung.

Zudem sind Leistungshalbleiter, Power-Management-Halbleiter und diskrete Bauelemente essenziell für die Umsetzung vieler dieser Technologien und damit für die Implementierung der genannten Technologietrends unverzichtbar. Besonders Leistungshalbleiter sind von entscheidender Bedeutung, da sie gerade im Bereich der Hochvoltanwendungen – wie in der elektrischen Mobilität, industriellen Motoren oder der Stromversorgung – große Potenziale bieten, um den Energieverbrauch weiter zu reduzieren. Dadurch tragen sie entscheidend zur Transformation hin zu einer nachhaltigeren und ressourcenschonenderen Gesellschaft bei.

Eine starke Positionierung innerhalb dieser Technologien ist ein wichtiger Katalysator für die notwendige Transformation der Industrien und des zukünftigen wirtschaftlichen Wachstums.

Abb. 5.4: Relevanz der Halbleitertechnologien für die Umsetzung der Technologietrends

Technologietrends	Benötigte Technologien	Speicher	Mikroprozessoren	Logik	Power Management	Sonstige Analoge	Kommunikation	Optoelektronik	Nicht-opt. Sensoren	Sonstige Diskrete	Leistungshalbleiter
KI	KI-„Beschleuniger“, End-to-End KI-Chips	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch	Moderat	Niedrig	Sehr hoch	Moderat	Moderat	Moderat	Niedrig
IoT und Sensorik	- Analog zu Technologien bei KI - Hochgeschwindigkeits-Kommunikation	Sehr hoch	Sehr hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Hoch	Niedrig
Edge, Cloud, dezentrales Rechnen	- High-performance compute und KI-Chips - Hochgeschwindigkeits-Kommunikation	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch	Hoch	Moderat	Sehr hoch	Moderat	Moderat	Moderat	Hoch
Cybersicherheit	- Verschlüsselung, einschließlich Post-Quantum-Lösungen - Digitale Identität	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Niedrig	Moderat	Moderat	Moderat	Niedrig	Niedrig	Niedrig
Kommunikation	- Fortschrittliche Funk- und optische Kommunikationstechnologien - High-Performance Computing	Niedrig	Moderat	Moderat	Niedrig	Hoch	Sehr hoch	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Moderat
AR und VR	- High-performance Computing, Next-Gen Displays - Fortgeschrittene Sensorik, eingebettete und dezentralisierte KI	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Niedrig	Moderat	Hoch	Sehr hoch	Niedrig	Niedrig	Niedrig
Autonome Systeme	- End-to-End KI, Hochgeschwindigkeits-Kommunikation - Fortschrittliche Sensorik und Aktuatoren	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch	Hoch	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Hoch	Niedrig
Energieerzeugung und -speicherung	- Leistungselektronik inkl. Hochvolt, Energieerzeugung und -speicherung - Embedded Computing, Kommunikationstechnologie	Niedrig	Moderat	Niedrig	Sehr hoch	Hoch	Moderat	Niedrig	Niedrig	Sehr hoch	Sehr hoch

Relevanz Sehr hoch Hoch Moderat Niedrig Nicht anwendbar

Quelle: Strategy&Analyse

5.2.4 Packaging: Verfahren und Methoden bei Halbleitern

Ähnlich vielfältig gestaltet sich die Situation im Bereich des Halbleiter-Packagings (siehe Abbildung 5.5). Das bisher dominierende Wire-Bonding-Verfahren wird zunehmend durch verschiedene Advanced-Packaging-Methoden ergänzt, die Vorteile in Bezug auf Miniaturisierung, Hochintegration, Energieeffizienz und Zuverlässigkeit bieten. Um eine Optimierung des gesamten Systems zu gewährleisten, ist eine enge Zusammenarbeit mit der Leiterplattentechnik erforderlich.

Eine Advanced-Packaging-Methode ist das Flip-Chip-Packaging, bei dem der Chip umgedreht und direkt auf das Trägermaterial, beispielsweise eine Leiterplatte, aufgelötet wird. Diese Methode ermöglicht eine optimierte elektrische Leistung sowie eine effizientere Wärmeableitung. Dadurch ist dieses Packaging-Verfahren besonders für Anwendungen, bei denen ein schneller Stromfluss sowie eine hohe Effizienz benötigt werden, relevant – zum Beispiel in der Elektrifizierung.

Des Weiteren gibt es Verfahren, bei denen die Halbleiter verpackt werden, während sie sich noch auf dem Wafer befinden (Wafer-Level-Packaging, WLP). So wird eine kompaktere Bauweise und somit eine signifikante Miniaturisierung ermöglicht. Das WLP kommt insbesondere bei kleinen, leistungsfähigen Geräten wie Smartphones oder AR- und VR-Brillen zum Einsatz.

Ein weiteres Beispiel für Advanced-Packaging-Verfahren ist das 3D-Packaging. Bei dieser Methode werden mehrere Halbleiterchips vertikal gestapelt und durch direkte Verbindungen miteinander verschaltet. Dadurch wird die Leistungsfähigkeit gesteigert, Platz gespart und die Signalwege verkürzt, was wiederum zu einer erhöhten Geschwindigkeit und Energieeffizienz führt. Dies ist insbesondere für KI, IoT-Anwendungen und Distributed-Infrastructure-Anwendungen, bei denen schnelles und energieeffizientes Rechnen auf begrenztem Bauraum erforderlich ist, von Vorteil.

Eine weitere innovative Packaging-Lösung ist das System-in-Package (SiP), welches insbesondere für eine heterogene Integration eingesetzt wird. Somit ermöglicht es diese Technologie, verschiedene Halbleiter mit unterschiedlichen Funktionen, wie Speicherchips oder Prozessoren, in einem Gehäuse zu kombinieren und so multifunktionale Packages zu schaffen. Dies ist besonders für Technologietrends, bei denen mehrere Funktionen vereint werden – wie KI, IoT, AR und VR sowie fortschrittliche Robotik und autonome Systeme – von Vorteil. Diese heterogene Art der Integration kann in gewissem Maße auch durch 3D-Packaging realisiert werden.

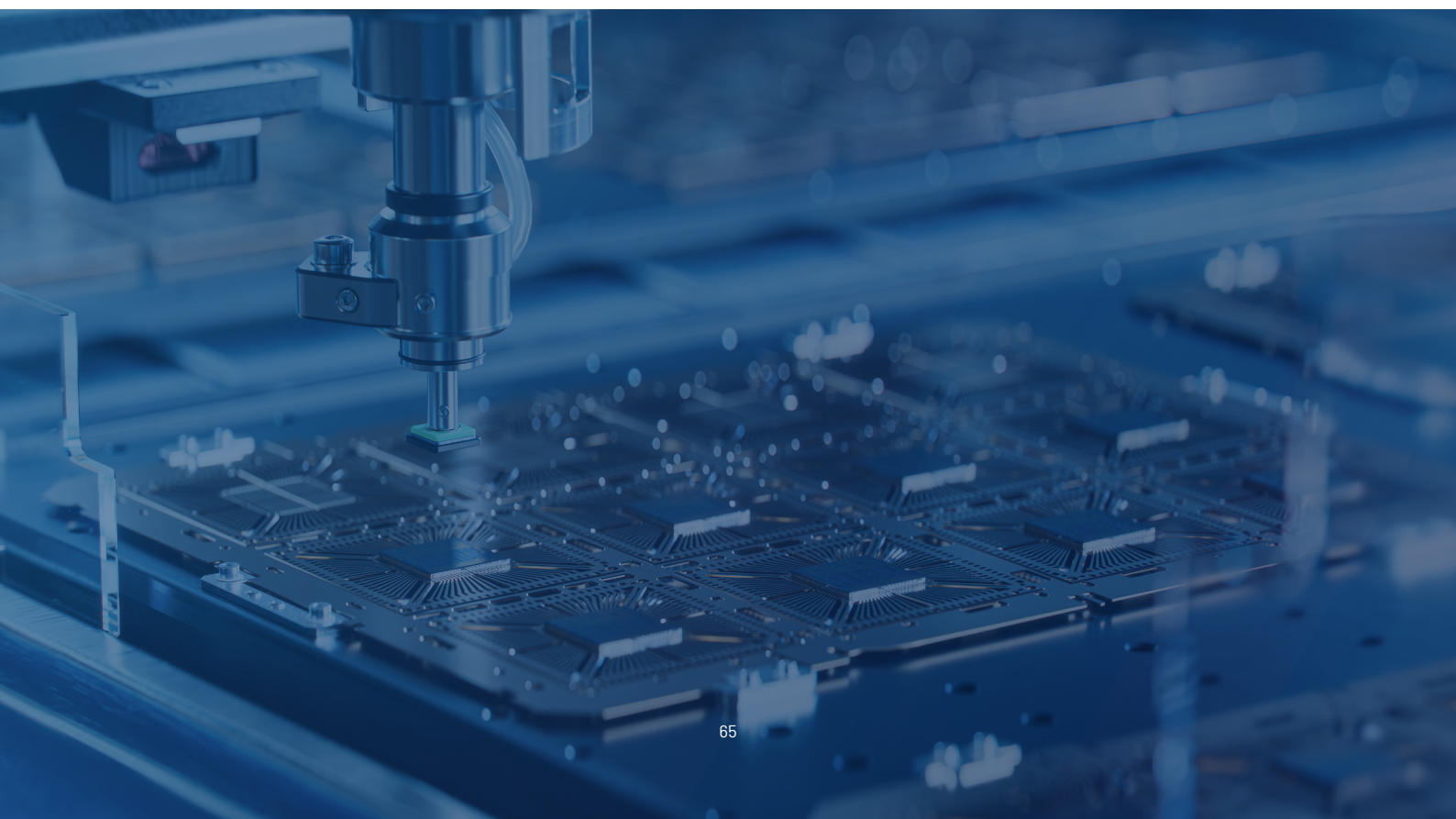


Abb. 5.5: Relevanz der Halbleiter-Packaging Technologien für die Umsetzung der Technologietrends

Technologie-trends	Benötigte Technologien	Wire-bonding	Flip-Chip	Wafer-Level Packaging	3D packaging	System-in-Package
KI	- High-performance compute und KI-Chips - KI-„Beschleuniger“, End-to-End KI-Chips					
IoT und Sensorik	- Analog zu Technologien bei KI - Hochgeschwindigkeits-Kommunikation					
Edge, Cloud, dezentrales Rechnen	- High-performance compute und KI-Chips - Hochgeschwindigkeits-Kommunikation					
Cybersicherheit	- Verschlüsselung, einschließlich Post-Quantum-Lösungen - Digitale Identität					
Kommunikation	- Fortschrittliche Funk- und optische Kommunikationstechnologien - High-Performance Computing					
AR und VR	- High-performance Computing, Next-Gen Displays - Fortgeschrittene Sensorik, eingebettete und dezentralisierte KI					
Autonome Systeme	- End-to-End KI, Hochgeschwindigkeits-Kommunikation - Fortschrittliche Sensorik und Aktuatoren					
Energieerzeugung und -speicherung	- Leistungselektronik inkl. Hochvolt, Energieerzeugung und -speicherung - Embedded Computing, Kommunikationstechnologie					

Relevanz
 Sehr hoch
 Hoch
 Moderat
 Niedrig
 Nicht anwendbar

Quelle: Strategy&Analyse

5.2.5 Leiterplatte und EMS: Rückgrat der Mikroelektronikwertschöpfung

Bei der Herstellung von Leiterplatten und deren Bestückung mit Halbleitern handelt es sich um ein komplexes Netzwerk, das verschiedene spezialisierte Teilindustrien umfasst. Um die Relevanz dieser Prozessschritte für die Technologiesouveränität beurteilen zu können, wird zunächst ein Überblick über die einzelnen Wertschöpfungsschritte dieser Industrien gegeben.

Beschaffung und Design

Bevor die Leiterplatten produziert werden können, beginnt der erste Wertschöpfungsschritt mit der Beschaffung von Rohmaterialien wie Kupfer, Epoxidharz oder Glasfasern. Die hohe Qualität dieser Materialien dient zur Sicherstellung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Leiterplatten. Anschließend folgt das Design der Leiterplatten mithilfe spezialisierter Software, um elektrische Schaltungen und mechanische Anordnungen zu planen. Diese Phase ist maßgeblich für die Funktionalität und Zuverlässigkeit.

Produktion

Im nächsten Schritt erfolgt die Produktion der Leiterplatten. Diese findet in spezialisierten Fabriken statt, in denen die Layouts in physische Leiterplatten umgewandelt werden. Dieser Prozess umfasst das Auftragen von Kupferschichten, das Ätzen der Leiterbahnen und das Erstellen von Durchkontaktierungen. Nach der Herstellung werden elektronische Bauteile wie Widerstände und integrierte Schaltkreise (ICs) auf die Leiterplatten montiert und verlötet. Automatisierte Maschinen sorgen hier für Präzision und Effizienz. Anschließend müssen die bestückten Leiterplatten getestet werden, um sicherzustellen, dass sie den Spezifikationen und Qualitätsstandards entsprechen. Die nahtlose Zusammenarbeit der verschiedenen Teilindustrien ist entscheidend für eine reibungslose Leiterplattenproduktion.

Relevante Technologien und Herstellungsmethoden

Auch bei der Herstellung von Leiterplatten kommen neuartige Technologien zum Einsatz, deren Relevanz in Zukunft weiter steigen wird. Herkömmliche subtraktive Methoden zur Produktion von konventionellen Leiterplatten stoßen – insbesondere bei der Miniaturisierung – an ihre Grenzen. Dies gilt auch für sogenannte High-Density Interconnect (HDI)-Leiterplatten, die eine höhere Dichte an Verbindungen pro Fläche aufweisen und häufig in Smartphones verwendet werden.

Um den steigenden Anforderungen der Elektronikbranche gerecht zu werden, sind fortschrittlichere Prozesse notwendig. Verfahren wie der Semi-Additive-Process (SAP) ermöglichen es mit Breiten von bis zu 5 µm (siehe Abbildung 5.6) noch feinere Leiterbahnen und kleinere Abstände zu erreichen. Dieser Prozess ist insbesondere für die Produktion komplexer Elektronikgeräte wie Smartphones oder Wearables, die eine hohe Integrationsdichte und Leistungsanforderungen erfordern, von Relevanz. Eine höherentwickelte Methode ist die Embedded Traces (ET)-Technologie, bei der die Leiterbahnen direkt in das Material der Leiterplatte eingebettet werden. Dadurch wird nicht nur eine höhere Packungsdichte ermöglicht, sondern auch die elektrische Leistung und die Wärmeableitung verbessert. Mit ET-Technologien können sehr schmale Leiterbahnen von bis zu 1 µm Breite realisiert werden, wodurch sich der Einsatz dieser Technologien besonders für anspruchsvolle Anwendungen in der Miniaturisierung eignet.

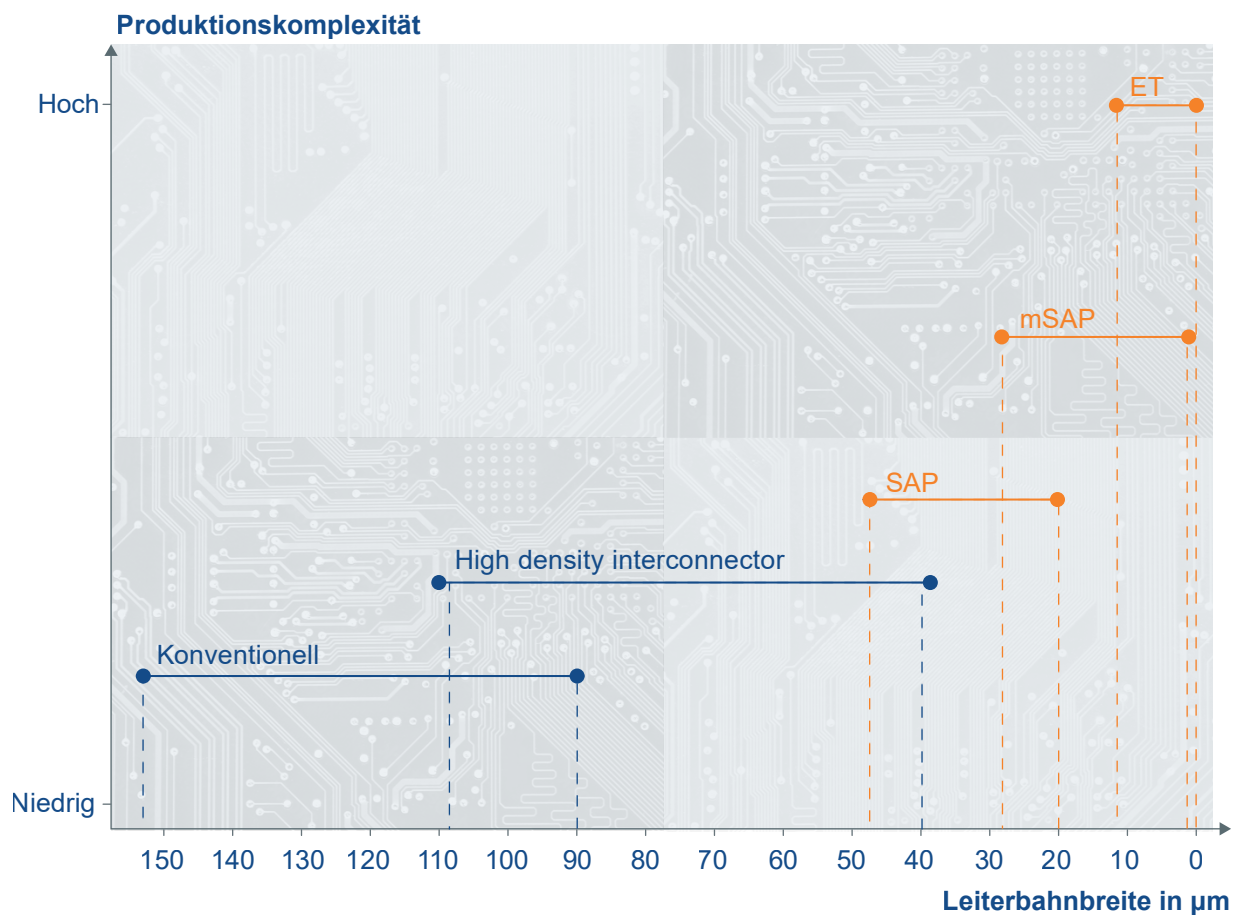
Bestückung der Leiterplatten

Die anschließende Bestückung der Leiterplatten mit fertigen Halbleitern wird oft von Auftragsfertigern übernommen. Diese sogenannten Electronic Manufacturing Services (EMS)-Unternehmen spielen eine große Rolle in der Elektronik-Wertschöpfungskette und übernehmen Aufgaben von der Entwicklung bis hin zum After-Sales-Service. Zunächst erfolgt die Entwicklung, bei der EMS-Anbieter maßgeschneiderte Kundenlösungen schaffen – einschließlich des Schaltungsdesigns, der Komponentenauswahl sowie der Prototypenentwicklung. Anschließend folgt die Industrialisierung, bei der Prototypen für Serienproduktionen optimiert werden.

Ein zentraler Bereich von EMS ist die Beschaffung, bei der EMS-Unternehmen die notwendigen Bauteile von verschiedenen Lieferanten beziehen und dabei globale Lieferketten koordinieren. Die anschließende Bestückung erfolgt größtenteils automatisiert und erfordert hochentwickelte Maschinen, die die elektronischen Bauteile präzise montieren und verlöten.

Im nächsten Schritt findet die Auftragsfertigung statt, die die vollständige Montage von Endprodukten, die oft aus mehreren bestückten Leiterplatten und zusätzlichen mechanischen Komponenten bestehen, umfasst. EMS-Anbieter sind daher auf modernste Maschinen angewiesen, um eine maximale Effizienz zu gewährleisten.

Abb. 5.6: Technologien für die Leiterplattenherstellung



Quelle: Strategy& Analyse

After-Sales-Services

Nach der Fertigung bieten EMS-Unternehmen zudem After-Sales-Services wie Wartung oder Reparatur an, um die Lebensdauer der Produkte zu optimieren. Diese Dienstleistungen sind entscheidend für eine hohe Kundenzufriedenheit sowie die Pflege langfristiger Geschäftsbeziehungen. Insgesamt verdeutlichen diese vielfältigen Aufgaben, dass EMS-Anbieter eine tragende Säule der Elektronikindustrie sind, die Effizienz, Qualität und Innovation entlang der gesamten Wertschöpfungskette fördern.

5.3 Die Bedeutung der Technologiesouveränität

Durch Technologiesouveränität wird vermieden, dass man politisch oder wirtschaftlich vollständig von externen Akteuren abhängig ist und dadurch den eigenen Handlungsspielraum verliert. Um die Relevanz der einzelnen Wertschöpfungsschritte für die Technologiesouveränität beurteilen zu können, wird im Folgenden auf eine Methodik von John Lee & Jan-Peter Kleinhans Bezug genommen.³⁹ Bei dieser Methodik erfolgt die Bewertung der Souveränität anhand von drei strategischen Dimensionen: Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Nationale Sicherheit (siehe Abbildung 5.7). Dabei ist zu betonen, dass die Zusammenarbeit mit verlässlichen Partnern und die Nutzung des freien Welthandels essenziell bleiben. Diversifizierte Abhängigkeiten von mehreren Ländern mit stabilen Strukturen reduzieren Lieferkettenrisiken und können positiv zur Resilienz und wirtschaftlichen Sicherheit beitragen, sofern sie in eine stabile globale Arbeitsteilung eingebunden sind. Gleichzeitig bleibt es wichtig, Kapazitäten für sicherheitskritische Anwendungen, wie etwa in der Rüstungsindustrie, innerhalb der EU vorzuhalten, um strategische Interessen zu schützen.

Die **Wettbewerbsfähigkeit** beschreibt, wie die Marktbedingungen eines Produktionsschrittes die wirtschaftliche und technologische Stärke eines Landes in einem wettbewerbsorientierten, internationalen Umfeld beeinflussen. Die Kriterien umfassen:

Geschäftsoportunität	Die finanziellen Erträge, die durch eine dominierende Marktposition generiert werden. Die finanziellen Erträge variieren je nach Produktionsschritt, wobei einige deutlich lukrativer sind als andere.
Markteintrittsbarrieren	Die Schwierigkeit für neue Akteure, sich in einem Produktionsschritt zu etablieren. Hohe Eintrittsbarrieren sind besonders relevant, wenn der Markt von wenigen Akteuren dominiert wird, da diese Barrieren das Nachahmen dieser Fähigkeiten erschweren.
Spillover-Effekte	Dieser Effekt beschreibt das Potenzial, dass Fähigkeiten in einem Produktionsschritt dazu führen, Aktivitäten in anderen Bereichen der Wertschöpfungskette oder in anderen Branchen umzusetzen.

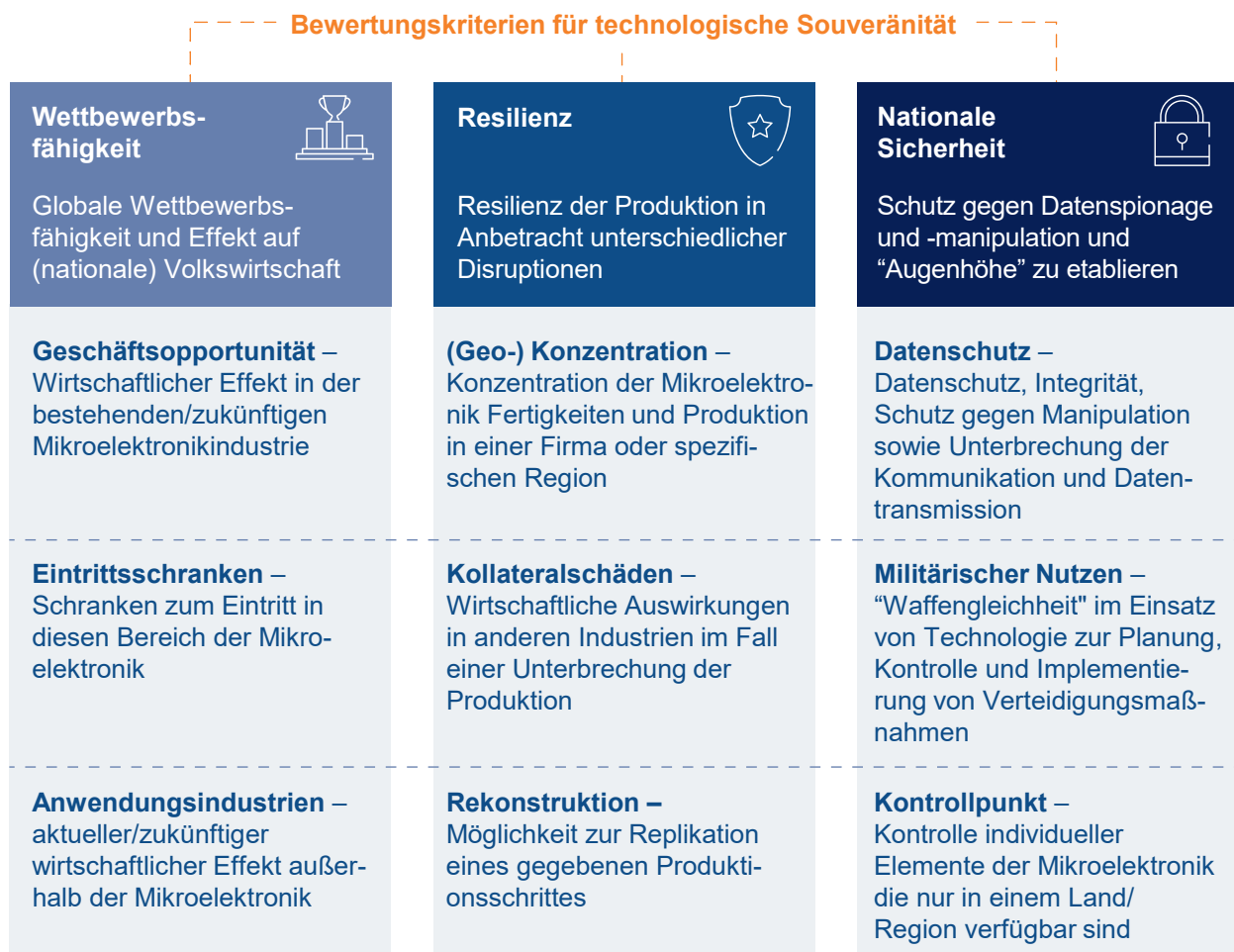
Die **Resilienz** bezieht sich auf die gesamte Halbleiter-Wertschöpfungskette. Da diese weltweit integriert ist, haben Störungen negative Auswirkungen auf nationale Interessen, unabhängig von bestehenden Rivalitäten:

(Geo-)Konzentration	Diese Schwachstellen gefährden die Geschäftskontinuität der globalen Wertschöpfungskette – zum Beispiel durch Naturkatastrophen, Pandemien oder politische Eingriffe.
Kollateralschäden	Das Risiko, dass die Unterbrechung eines bestimmten Produktionsschrittes Auswirkungen auf andere Segmente der globalen Wertschöpfungskette oder andere Industriebereiche hat. Ein Beispiel hierfür ist die in Kapitel 2 angesprochene Chip-Knappheit.
Rekonstruktion	Der Aufwand, einen bestimmten Produktionsschritt durch staatliche Intervention in Ländern zu replizieren, in denen dieser nicht konzentriert ist.

Die **nationale Sicherheit** betrifft die Bedeutung eines Produktionsschrittes im Rahmen eines Nullsummenwettbewerbs zwischen Nationalstaaten. Hier besteht zudem das Potenzial, dass nationale Regierungen Produktionsschritte nutzen, um die Interessen anderer Nationen zu schädigen. Die Kriterien umfassen:

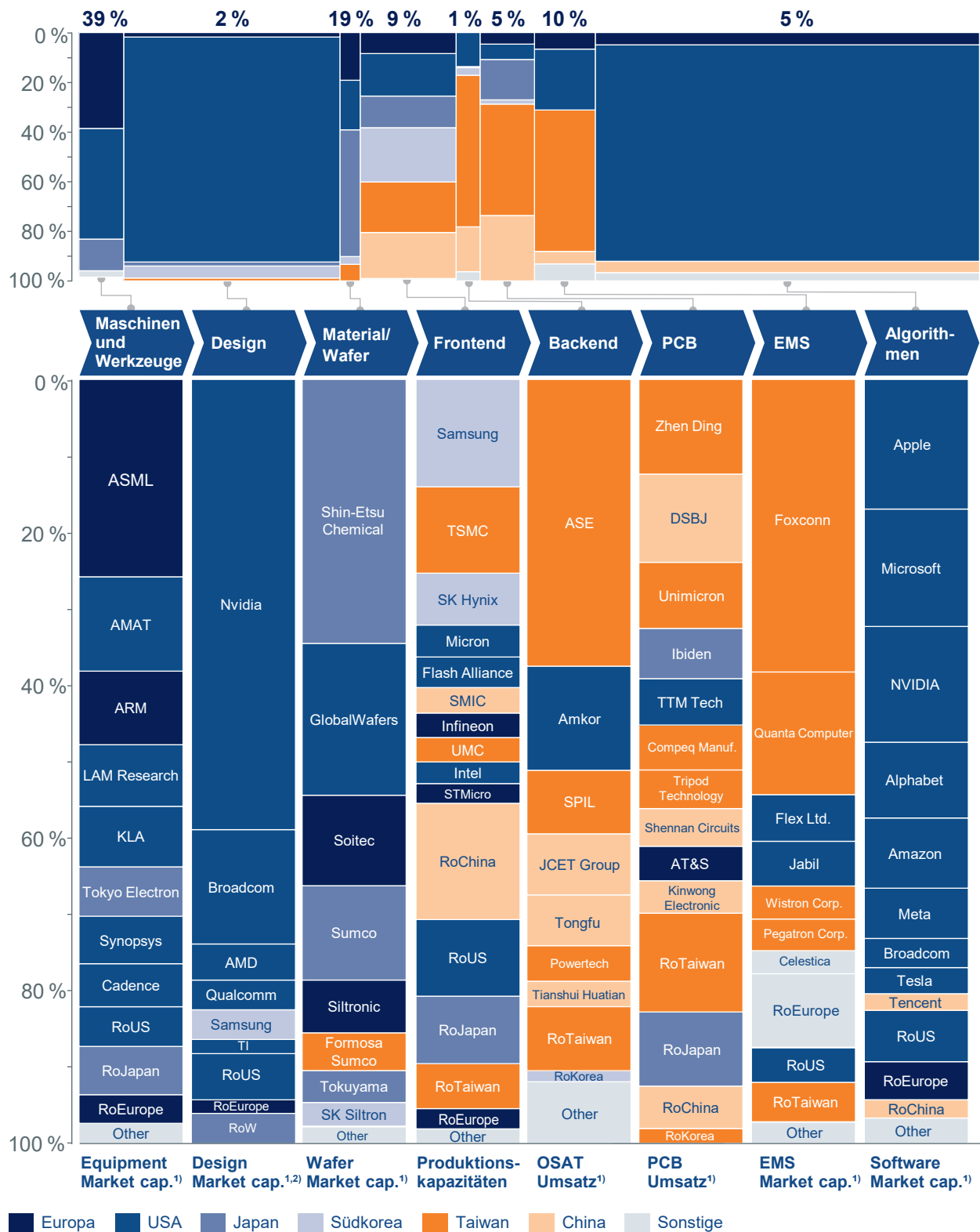
Spionagerisiko	Die Möglichkeit, dass die Manipulation eines Produktionsschritts gezielt genutzt wird, um Informationen über rivalisierende Nationen zu sammeln oder deren Interessen zu sabotieren.
Militärischer Nutzen	Die Bedeutung für militärische Fähigkeiten einer Nation (inklusive der Fähigkeit einer nationalen Wirtschaft oder eines Bündnisses), komplexe militärische Plattformen, beispielsweise Kampfflugzeuge, zu entwickeln.
Kontrollpunkt	Die Gefahr, dass eine dominante Marktposition in einem Produktionsschritt dazu genutzt wird, Nationen ohne bestimmte Fähigkeiten strategisch unter Druck zu setzen. Zum Beispiel durch nationale und multilaterale Exportkontrollen, die bestimmte Nationen gezielt ins Visier nehmen.

Abb. 5.7: Bewertungskriterien für technologische Souveränität



Quelle: Strategy& Darstellung basierend auf Lee, John and Kleinhans, Jan-Peter (2021)²

Abb. 5.8: Oben: Anteile der Wertschöpfungsschritte und Regionen an der gesamten Mikroelektronikwertschöpfung auf Basis der Hauptsitze der Unternehmen; Unten: Anteile der größten Unternehmen am Wertschöpfungsschritt anhand ihrer Marktkapitalisierung, Umsatzes und Produktionskapazitäten



1) Nur Anteile der größten Unternehmen; 2) Marktkapitalisierung von IDMs wird nur zur Hälfte berücksichtigt, um andere Wertschöpfungsanteile einzubeziehen; Quelle: Strategy& Analyse basierend auf SEMI World Fab Forecast 3Q23 und SIA-Bericht 2021

5.4 Analyse der europäischen Technologiesouveränität

Bevor die einzelnen Wertschöpfungsschritte für die Technologiesouveränität Europas bewertet werden können, ist es notwendig, deren Beitrag zur Mikroelektronikwertschöpfung und regionale Verteilung nachzuvollziehen (siehe Abbildung 5.8).

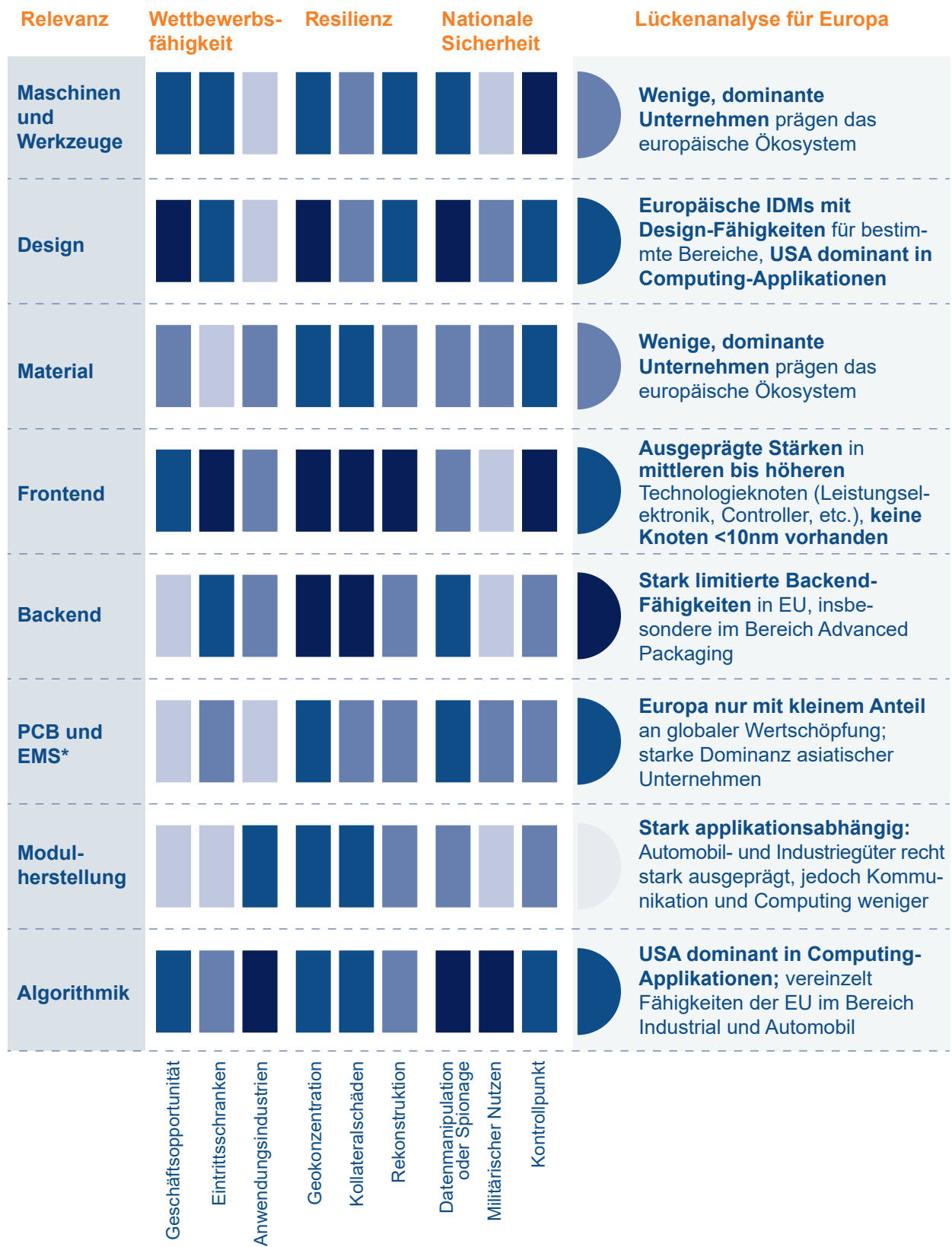
Im oberen Teil der Abbildung wird der Beitrag der einzelnen Wertschöpfungsschritte zur gesamten Mikroelektronikindustrie entlang der horizontalen Achse dargestellt – beginnend bei Maschinen und Werkzeugen, bis hin zur Algorithmik bzw. Software. Dabei wird ersichtlich, dass der Bereich Algorithmik bzw. Software über 40 % der Wertschöpfung ausmacht. Innerhalb der Mikroelektronik entfällt der größte Anteil auf das Chipdesign mit etwa 24 %, gefolgt von der Fertigung, die etwa die Hälfte dessen ausmacht. Diese Analyse repräsentiert jedoch einen Durchschnittswert über alle Halbleitertechnologien und Endprodukte. Hochvolumige Segmente wie die Unterhaltungselektronik oder hochpreisige Bereiche wie KI-Chips schlagen bei einer solchen Betrachtung stärker zu buche. Dennoch vermittelt die Darstellung ein grundlegendes Bild über die relative Bedeutung der einzelnen Wertschöpfungsschritte im globalen Vergleich.

Die vertikale Achse der oberen Abbildung zeigt die regionale Verteilung innerhalb eines Wertschöpfungsschrittes. Europa ist besonders stark in den Bereichen Maschinen und Werkzeuge (39 %) sowie Materialien (19 %). In der Fertigung liegen europäische Unternehmen wie Infineon oder STMicroelectronics bei etwa 8 bis 9 % der globalen Produktionskapazitäten. Auch hier zeigt sich je nach spezifischer Technologie ein differenziertes Bild, das im späteren Verlauf der Studie näher beleuchtet wird. Der untere Teil von Abbildung 5.8 zeigt eine detailliertere Verteilung der Anteile auf konkrete Unternehmen. Auf diese spezifische Betrachtung wird im weiteren Verlauf der Studie noch Bezug genommen.

Diese Analyse bildet eine Grundlage, um die Relevanz der einzelnen Wertschöpfungsschritte für die Technologiesouveränität Europas zu bewerten, insbesondere im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit. Im weiteren Verlauf wird diese Betrachtung durch zusätzliche Kriterien der Technologiesouveränität ergänzt (siehe Abbildung 5.7), um daraus eine umfassende Bewertung der europäischen Situation abzuleiten. Die zusammengefassten Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Die folgenden Abschnitte bieten eine gezielte Diskussion der Resultate entlang der einzelnen Wertschöpfungsschritte. Zudem werden im späteren Verlauf die Bereiche Leiterplatten und EMS detailliert untersucht, einschließlich einer Analyse ihrer spezifischen Wertschöpfungsketten.



Abb. 5.9: Bewertung der Technologiesouveränität entlang der Mikroelektronikwertschöpfung



Relevanz Sehr hoch Hoch Moderat Niedrig Nicht anwendbar

*PCB und EMS mit eigener Wertschöpfungskette (siehe Abbildung 5.12);

Quelle: Strategy& Analyse

5.4.1 Maschinen und Werkzeuge: Strategischer Kontrollpunkt in der EU

Die Herstellung von Maschinen zur Halbleiterproduktion ist entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit, da die Nachfrage nach kleineren, schnelleren und effizienteren Halbleitern stetig wächst. Die Markteintrittsbarrieren sind hierbei sehr hoch: Es bedarf umfangreichen technologischen Know-hows und eines spezialisierten Lieferantennetzwerks, um die fortschrittlichsten Maschinen zu entwickeln – insbesondere im Bereich der EUV-Technologie. Zudem stellt die Lithografiertechnologie einen kritischen Kontrollpunkt dar: Ohne die modernsten Lithografiemaschinen ist die Produktion der kleinsten Strukturbreiten für High-Performance Computing und KI-Chips nicht möglich.

In diesem Bereich nimmt die EU eine starke Position ein, da sie mit dem Unternehmen ASML einen globalen Marktführer stellt, der aufgrund seines nahezu monopolistischen Zugriffs auf EUV-Lithografiemaschinen eine Schlüsselrolle innehat (siehe Abbildung 5.8 und 5.9). Diese Position könnte jedoch zukünftig unter Druck geraten, da chinesische Unternehmen aufgrund von Exportverboten gezwungen sind, eigene Lösungen für die Produktion hochkomplexer Chips zu entwickeln. Sollte dies in den kommenden Jahren gelingen, könnte Europas starke Stellung geschwächt werden. Daher ist es essenziell, kontinuierlich in die Erforschung und Entwicklung der nächsten Technologiegenerationen zu investieren.

Auch die ARM-Architektur spielt eine wichtige Rolle für die europäische Halbleiterindustrie. Durch den Verkauf von Lizenzen für seine ARM-Chip-Architektur leistet das Unternehmen einen wesentlichen Beitrag zur globalen Chip-Design-Lieferkette. Die Position von ARM könnte jedoch zukünftig durch Entwicklungen wie die offene RISC-V-Architektur (siehe Abschnitt über Chipdesign weiter unten) und chinesische Alternativen herausgefordert werden.

5.4.2 Material: EU mit Stärken bei Wafer und Prozesschemikalien

Das Feld der Produktionsmaterialien sowie jenes der Prozesschemikalien und -gase wird von wenigen Herstellern dominiert. Besonders bei Wafern gibt es weltweit nur eine Handvoll relevanter Unternehmen, die den Markt beherrschen. Eine Unterbrechung in diesem Teil der Wertschöpfungskette kann erhebliche Auswirkungen auf die Halbleiterproduktion haben, insbesondere bei führenden Technologien. Allerdings ist die Rekonstruktion in diesem Bereich mit überschaubarem Aufwand möglich. Aus der Perspektive der nationalen Sicherheit sind Prozessmaterialien weniger anfällig für Manipulationen oder Spionage und auch ihr direkter militärischer Nutzen ist begrenzt. Dennoch können Prozessmaterialien als strategischer Hebelpunkt dienen, um in geopolitischen Konflikten kurzfristig bis mittelfristig Druck auszuüben.

Im Bereich der Silizium-Wafer dominieren vor allem japanische Unternehmen wie Shin-Etsu und Sumco den Markt. Dennoch spielt die EU mit etablierten Firmen wie Soitec und Siltronic eine bedeutende Rolle (siehe Abbildung 5.8). Darüber hinaus zählen einige der führenden Anbieter von Prozesschemikalien und -gasen zu europäischen Unternehmen, wie zum Beispiel Merck oder auch Air Liquide. Da genaue Umsatzanteile dieser Unternehmen in der Mikroelektronikbranche schwer zu ermitteln sind, wurde in dieser Studie auf eine detaillierte Aufschlüsselung verzichtet.

5.4.3 Halbleiterdesign und -fertigung: EU mit Stärken und Lücken

Das Chipdesign ist eine Schlüsselkompetenz für die heutige und zukünftige Wettbewerbsfähigkeit. Es bestimmt nicht nur einen wesentlichen Teil der Wertschöpfung, sondern bildet auch die Grundlage für die Funktionalität und Leistungsfähigkeit elektronischer Endgeräte. Die Entwicklung neuer Chip-Technologien senkt Systemkosten und ermöglicht Innovationen in Endindustrien. Nur durch effiziente und leistungsstarke Halbleiter können neue Produkte zu wettbewerbsfähigen Kosten hergestellt und verkauft werden. Gleichzeitig birgt das Chipdesign aus der Perspektive der nationalen Sicherheit erhebliche Risiken, da es Möglichkeiten für Manipulationen und Spionage eröffnet und einen wichtigen geopolitischen Kontrollpunkt darstellt.

In Bezug auf Resilienz ist das Chipdesign aktuell stark in den USA konzentriert, insbesondere bei kleineren Technologieknoten und KI-basierten Komponenten. Die Eintrittsbarrieren variieren je nach Technologie: Für fortschrittliche Technologieknoten liegen die Entwicklungskosten oft im hohen dreistelligen Millionenbereich, bei Entwicklungszeiträumen von über drei Jahren.

Das Chipdesign, das den größten Wertschöpfungsanteil in der Mikroelektronik ausmacht, zeigt insgesamt ein gemischtes Bild. US-amerikanische Unternehmen wie NVIDIA, Broadcom und AMD dominieren den Weltmarkt vor allem in Bereichen wie KI, Rechenzentren und High-Performance Computing (siehe Abbildung 5.8).

Die EU auf der anderen Seite, zeigt klare Stärken in Technologiefeldern wie Energiemanagement, Sensorik und Mikroprozessortechnologien (MCUs). Europäische IDMs wie Infineon, NXP und STMicroelectronics haben sich in diesen Bereichen als Marktführer etabliert (mehr Details im nächsten Abschnitt und Abbildung 5.10).

Auch wenn dieser Bereich umsatzmäßig kleiner ist als jener der hochpreisigen KI-Chips von Unternehmen wie NVIDIA, spielen diese Technologien eine zentrale Rolle für Anwendungen wie Edge-KI, effizientes Energiemanagement in Mobilität und Industrie sowie autonome Systeme, einschließlich industrieller Automatisierung. Europas starke Position beim Design dieser Komponenten stärkt die technologische Wettbewerbsfähigkeit der Region und fördert zugleich die Unabhängigkeit und Innovationskraft entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

In Kontext von KI und High-Performance-Computing gewinnt das Open-Source-Chipdesign-Modell RISC-V zunehmend an Bedeutung für Europa. RISC-V, eine offene und lizenzfreie Befehlssatzarchitektur, ermöglicht Akteuren, eigene Prozessoren zu entwickeln und zu vertreiben. Der Einsatz dieser Architektur fördert nicht nur die Marktdiversifizierung, sondern stärkt auch die strategische Souveränität Europas, indem die Abhängigkeit von externen Technologieanbietern verringert wird. Mehrere europäische Unternehmen, darunter Bosch, Infineon und NXP, haben Quintauris gegründet, das sich auf die Entwicklung von RISC-V-Hardwarearchitekturen konzentriert. Ziel ist es, Open-Source-RISC-V-Referenzarchitekturen zu erstellen und zu lizenzieren, die eine Grundlage für maßgeschneiderte Hardwarelösungen bieten.

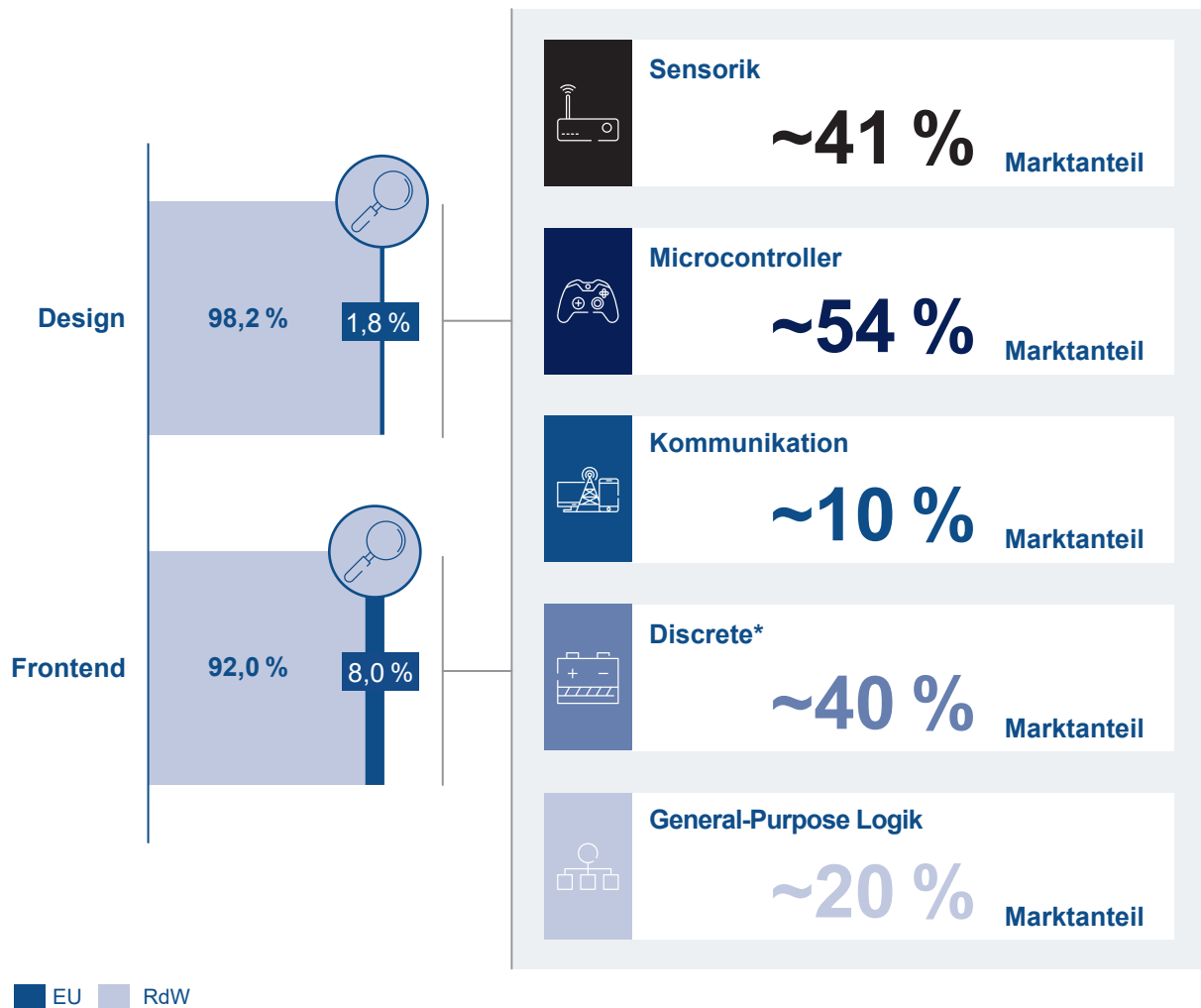
Durch den Ausbau eines Open-Source-Ökosystems im Chipdesign auf Basis von RISC-V könnte Europa eine unabhängige Infrastruktur für die Halbleiterindustrie schaffen. Dies würde der gesamten europäischen Lieferkette zugutekommen und Marktfragmentierungen sowie technologische Abhängigkeiten von Drittländern verringern. Die Möglichkeit, Hardwarearchitekturen offen zu entwickeln und zu teilen, senkt zudem die Eintrittsbarrieren für neue Marktteilnehmer und eröffnet langfristig neue Chancen für Innovation sowie Wettbewerbsfähigkeit.

Angesichts der wachsenden Bedeutung von Edge-KI und High-Performance Computing ist es für Europa entscheidend, eine eigene Rolle in diesem Bereich einzunehmen. Strategien wie die Förderung der RISC-V-Architektur und die Entwicklung von europäischem geistigen Eigentum im Chipdesign sind wichtige Bausteine, um die technologische Souveränität sowie die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

Die Produktion von Halbleitern ist das technisch anspruchsvollste Feld der Mikroelektronik und bildet einen bedeutenden Teil der Wertschöpfungskette. Dies gilt sowohl für die kleinsten Halbleiterstrukturen, aber auch für die sogenannten mittleren Knoten oder „Legacy Nodes“ mit Strukturen, die größer als 20 nm sind. Sie sind sowohl für die Wettbewerbsfähigkeit als auch für die Resilienz und nationale Sicherheit von großer Bedeutung. Die Hürden für den Markteintritt sind hoch, da die Investitionskosten für eine Halbleiterfabrik im Milliardenbereich liegen und ein immenses Know-how erforderlich ist, um die hochspezialisierten Prozesse zu beherrschen. Dies gilt auch im Falle einer notwendigen Rekonstruktion. Da Halbleiter eine Schlüsselkomponente für fast alle modernen Industrien darstellen, wären größere Disruptionen in der Halbleiterproduktion mit massiven Auswirkungen verbunden. Dies wurde während der Chip-Knappheit deutlich, deren Folgen erhebliche wirtschaftliche Schäden verursachten (vgl. Kapitel 2). Hinzu kommt, dass die Produktionskapazitäten auf nur wenige Länder, geografisch konzentrierte Regionen und Unternehmen verteilt sind. Besonders bei den fortschrittlichsten Technologieknoten gibt es weltweit nur drei Unternehmen, die in der Lage sind, die modernsten Knotengrößen zu fertigen, wodurch viel Know-how in diesen Firmen gebündelt ist. Angesichts dieser Komplexität und der enormen Bedeutung für Endindustrien ist die Halbleiterproduktion ein zentraler geopolitischer Kontrollpunkt.

Gemessen am globalen Anteil der Produktionskapazitäten von Unternehmen mit Hauptsitz in Europa liegt die EU mit etwas über 8 bis 9 % hinter den führenden Halbleiternationen Taiwan, Südkorea, den USA, China und Japan (siehe Abbildung 5.8). Dennoch verfügt Europa über bedeutende Halbleiterhersteller wie Infineon, STMicroelectronics und NXP, die in bestimmten Produktkategorien sowohl technologisch als auch marktseitig führend sind. Zusammen mit dem Wertschöpfungsschritt Design hat Europa in den Bereichen Leistungselektronik, Steuerung digitaler sowie elektrischer Signale und Sensorik eine starke Marktposition.

Abb. 5.10: Marktanteile europäischer Unternehmen in deren Halbleiter-Kernindustrien



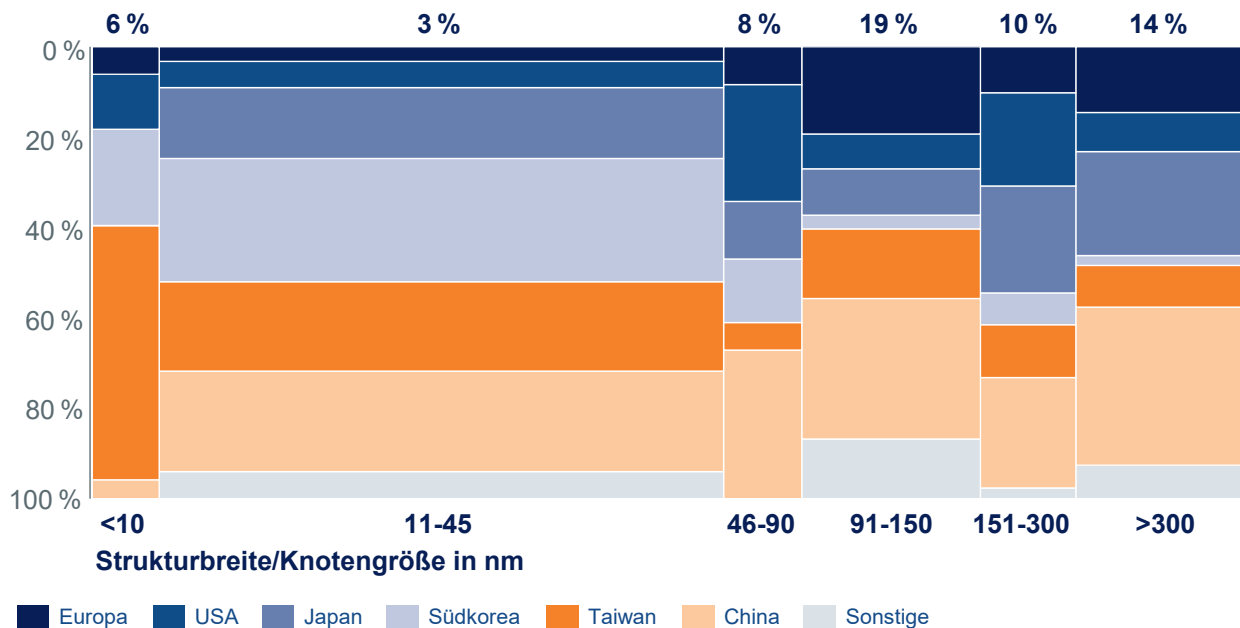
*Inklusive Leistungsmanagement;

Quelle: Omdia 2023; Strategy& Analyse basierend auf Gartner und öffentlich verfügbaren Unternehmenszahlen

Beispielsweise haben europäische Unternehmen bei Mikrocontrollern und nicht-optischen Sensoren einen Marktanteil von etwa 40-54 % (siehe Abbildung 5.10). Im Bereich der Leistungselektronik und des Powermanagements ist die EU ebenfalls führend, mit einem Marktanteil von 25 %. Auch bei General-Purpose-Logik, wie etwa Field Programmable Gate Arrays (FPGAs), liegt der Marktanteil europäischer Halbleiterunternehmen bei 20 %. Schließlich ist die EU im Bereich der Kommunikation mit einem Marktanteil von 10 % international wettbewerbsfähig. Diese bestehenden Stärken gilt es weiter auszubauen, um die langfristige Wettbewerbsfähigkeit Europas in diesen zentralen Bereichen zu sichern. Ein entscheidender Faktor ist hierbei das starke Interesse der europäischen Anwendungsindustrien, insbesondere der Automobilbranche sowie des Maschinen- und Anlagenbaus. Diese lokale Nachfrage stärkt die Halbleiterindustrie, vor allem durch die enge Zusammenarbeit mit regionalen Kunden.

Gerade im Wertschöpfungsschritt der Halbleiterfertigung spielt die Lokalisierung des Produktionsstandortes eine entscheidende Rolle für die Resilienz der Lieferketten und die Reduzierung regionaler Abhängigkeiten. Obwohl Halbleiterunternehmen grundsätzlich global aufgestellt sind und weltweit Produktionsstätten betreiben, fertigen auch europäische Unternehmen wie Infineon und STMicroelectronics einen signifikanten Teil ihrer Halbleiter außerhalb Europas – entweder in eigenen Werken oder durch Auftragsfertiger, insbesondere in Südostasien. Diese Auslandsproduktionen bergen Risiken für die technologische Souveränität Europas, da geopolitische Spannungen den Zugriff auf diese Kapazitäten einschränken könnten, selbst wenn die Muttergesellschaft in der EU ansässig ist.

Abb. 5.11: Übersicht der Fertigungskapazitäten nach Region der Fertigungsstätte und Technologieknoten



Quelle: Strategy& Analyse basierend auf SEMI World Fab Forecast 3Q23

Eine detaillierte Analyse der Verteilung der Fertigungskapazitäten nach Technologieknoten zeigt, dass die europäischen Kapazitäten besonders im Bereich oberhalb von 90 nm stark ausgeprägt sind (siehe Abbildung 5.11). In diesem Bereich spielt vor allem die Leistungselektronik eine zentrale Rolle und bestätigt die bisherigen Stärken Europas. Bei Komponenten mit kleineren Strukturbreiten unter 45 nm ist Europa hingegen stark auf außereuropäische Produktionskapazitäten und Auftragsfertiger wie TSMC, Samsung oder Intel angewiesen. In diesen technologisch führenden Bereichen dominieren Länder wie Taiwan, die USA und Südkorea. Um die technologische Souveränität Europas zu stärken und eine größere Rolle in zukunftsrelevanten Bereichen wie KI und High-Performance Computing einzunehmen, sind auch gezielte Investitionen in den Ausbau der notwendigen Fähigkeiten – sowohl im Design als auch in der Fertigung – perspektivisch erforderlich. Ein erfolgreicher Aufholprozess kann jedoch nur in enger Verbindung mit dahingehend entwickelten Anwenderindustrien unter Nutzung existierender Stärken gelingen. Zukünftige Fördermaßnahmen sollten sich stets an den vorhandenen Pull-Effekten innerhalb des europäischen Marktes orientieren.

5.4.4 Packaging: Strukturelle Schwächen beim Halbleiter-Backend

Das Halbleiter-Backend ist stark in Asien konzentriert, was signifikante Risiken für die Resilienz der globalen Lieferketten darstellt. Auch wenn die Eintrittsbarrieren und die Komplexität im Vergleich zur Halbleiterproduktion in der Regel geringer sind, hängt dies im Detail stark von der jeweiligen Technologie ab. Insbesondere Advanced-Packaging wird zunehmend komplexer und gewinnt an Bedeutung für die Funktionalität und Leistung von Elektronikkomponenten. Dies ist besonders relevant für Schlüsseltechnologien wie KI, High-Performance-Computing und autonome Systeme. Mit dieser wachsenden Bedeutung steigt auch die Relevanz für die nationale Sicherheit, da Datenmanipulation und Spionage leichter möglich sind. Die fortschreitende Innovation in diesem Teil der Wertschöpfungskette bietet sowohl Chancen als auch Risiken für zukünftige Ambitionen in Richtung Technologiesouveränität.

Der Backend-Markt, insbesondere der Bereich des Halbleiter-Packagings, wird derzeit fast ausschließlich von asiatischen Firmen dominiert. Taiwan und China haben hier einen besonders großen Marktanteil, aber auch die USA sind mit Amkor, einem der größten Packaging-Unternehmen weltweit, stark vertreten. Die EU spielt in diesem Markt bisher eine vernachlässigbare Rolle und verfügt über verhältnismäßig wenige Packagingfirmen bzw. -kapazitäten. Aufgrund von Kostennachteilen existieren in Europa derzeit nur wenige Fähigkeiten in diesem Bereich. Allerdings gewinnt das sogenannte Advanced Packaging zunehmend an Bedeutung, da es eine zentrale Rolle für die zukünftige Leistungsfähigkeit und Funktionalität von Halbleitern spielen wird. Da ein immer größerer Anteil der Innovation und Wertschöpfung in diesen Packaging-Prozessen liegt, wird es aus Perspektive der Technologie-Souveränität unerlässlich sein, eine aktivere Rolle in diesem Bereich zu übernehmen.

5.4.5 Leiterplatte und EMS: Relevanz für Resilienz und Sicherheit

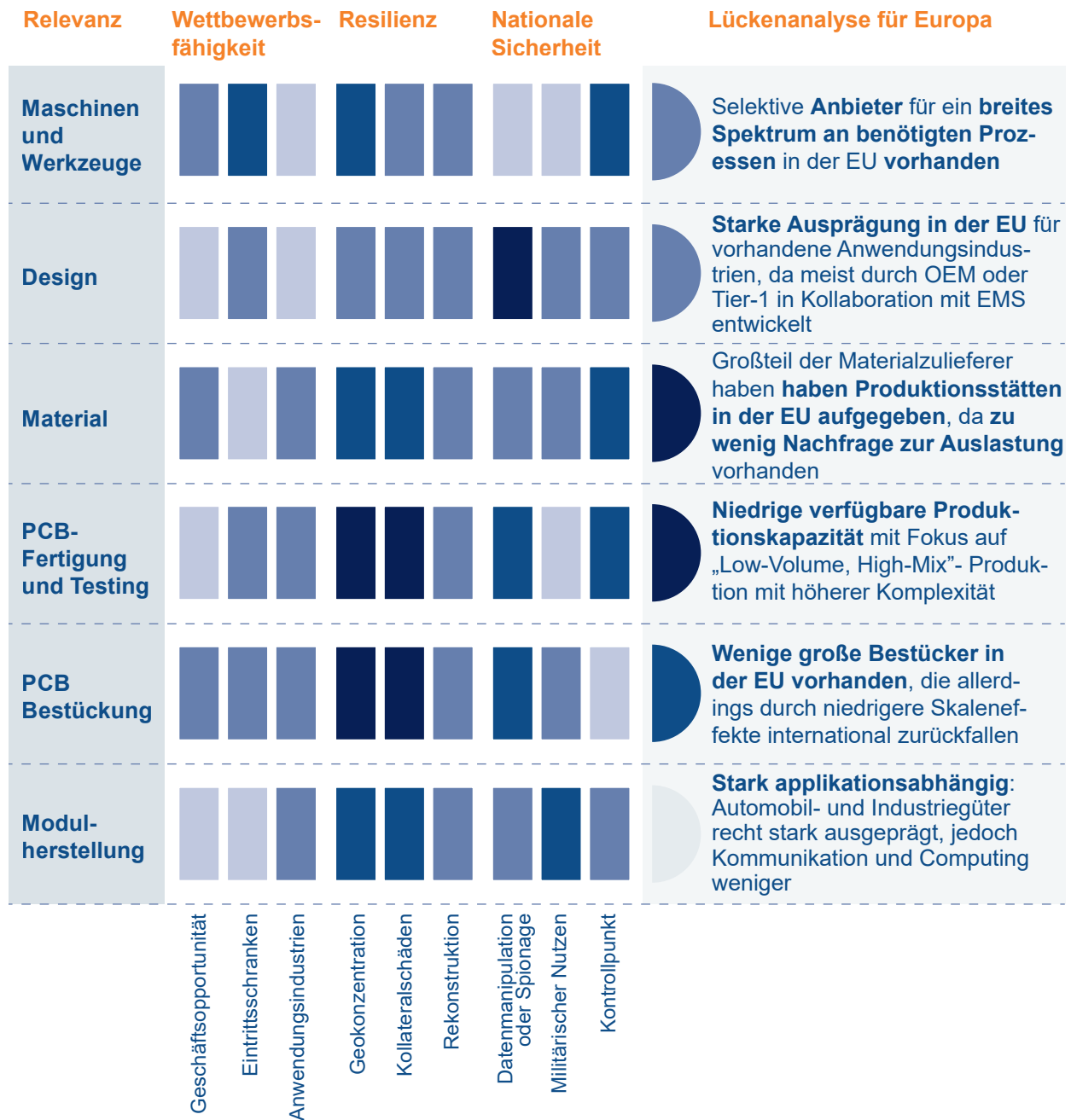
Wie bereits beschrieben, verfügt die Leiterplattenindustrie über eine eigene Wertschöpfungskette von Maschinen bis hin zu deren Bestückung (siehe Abbildung 5.12). Der Markt für Maschinen im Bereich der Leiterplattenproduktion ist insgesamt kleiner und weniger anspruchsvoll als für die Halbleiterproduktion. Die Eintrittsbarrieren sind jedoch nach wie vor hoch, insbesondere bei komplexen Prozessen und kleineren Leiterbahnbreiten, bedingt durch die technologische Komplexität. Auch die Marktkonzentration ist hoch, obwohl für zentrale Prozesse weiterhin europäische Hersteller verfügbar sind. Die Kollateralschäden eines Lieferkettenproblems wären moderat und eine Wiederherstellung der Produktionskapazitäten ist realistisch umsetzbar. Dennoch stellen die Maschinen einen wichtigen Kontrollpunkt dar, da ohne sie weder Leiterplatten noch elektronische Bauteile gefertigt werden können.

Das Design und Layout von Leiterplatten wird häufig von EMS-Unternehmen im Rahmen eines integrierten Angebots zusammen mit der Bestückung übernommen. Alternativ entwickeln OEMs oder Modulhersteller die Leiterplatten inhouse als Teil der elektronischen Komponente. Die Entwicklungsleistungen sind nicht zentralisiert, da sie oft in den Regionen stattfinden, in denen die Anwendungsindustrien ansässig sind. Spezifisches Applikations-Know-how erhöht die Eintrittsbarrieren. Bei der Rekonstruktion dieses Know-hows stellt im Besonderen der Fachkräftemangel eine Herausforderung dar, da es keine spezialisierten Ausbildungsprogramme für die Branche gibt und die Ausbildung neuer Fachkräfte einige Jahre dauern kann. Das Layout ist zudem aus Sicht der nationalen Sicherheit von Bedeutung, da das Risiko von Datenmanipulation und Spionage durch gezielte Veränderungen hoch ist.

Für die Produktion von Leiterplatten werden Materialien wie Lamine, Glasgewebe, Harz, Kupferfolie und Grundchemikalien benötigt. Durch die Verlagerung eines Großteils der Fertigung nach Südostasien sind viele Materialzulieferer aus Europa abgewandert. Dies führt bei europäischen Leiterplattenherstellern zu längeren Lieferzeiten und höheren Kosten, was die Kostennachteile des Standorts verstärkt. Zudem fehlt die kritische Masse, um direkt vom Hersteller zu kaufen, sodass oft Distributoren zwischengeschaltet werden müssen. Die Auswirkungen von Ausfällen bei Materiallieferanten sind erheblich. So kam es bereits zu Engpässen in der europäischen Leiterplattenlieferkette, als ein Lieferant für Salzsäure ausfiel. Bei steigender Leiterplattenproduktion in der EU wäre jedoch eine Ansiedlung neuer Materiallieferanten denkbar. Aus Sicht der nationalen Sicherheit ist die Materialindustrie ein wichtiger Kontrollpunkt, da eine Einschränkung der Materiallieferungen die Produktion elektronischer Bauteile erheblich beeinträchtigen könnte.

Die Leiterplattenfertigung selbst ist ein stark umkämpfter Markt, der von hohem Kosten- und Effizienzdruck geprägt ist. Der Markteintritt wird vor allem durch die hohen Investitionskosten für Fabriken und Equipment begrenzt. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, investieren Leiterplattenhersteller etwa 10 % ihres Umsatzes in Fertigungstechnologien. Der komplexe Produktionsprozess umfasst bis zu 300 Teilschritte und ist stark automatisiert. Die Fertigung ist stark auf Südostasien konzentriert, wobei 85 bis 90 % des weltweiten Produktionsvolumens in China und Taiwan hergestellt werden. Die Auswirkungen eines Ausfalls der Leiterplattenproduktion wären gravierend, da kein elektronisches Bauteil ohne eine Leiterplatte funktioniert. Aus der Perspektive der nationalen Sicherheit ist die PCB-Fertigung von großer Bedeutung, sowohl wegen der potentiellen Gefahr von Datenmanipulation als auch als essenzieller Kontrollpunkt. Ein Ausfall würde die Produktion elektronischer Bauteile erheblich beeinträchtigen.

Abb. 5.12: Bewertung der Technologiesouveränität entlang der Leiterplatten-Wertschöpfungskette



Relevanz Sehr hoch Hoch Moderat Niedrig Nicht anwendbar

Quelle: Strategy&Analyse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Leiterplattenmarkt vor allem von führenden Nationen wie Taiwan und China dominiert wird, die gemeinsam etwa drei Viertel des globalen Marktes kontrollieren (siehe Abbildung 5.8). Auch die größten Unternehmen der Branche, darunter Zhen Ding, DSBJ und Unimicron, stammen aus dieser Region. Asiatische Leiterplattenhersteller haben inzwischen zudem die Technologieführerschaft bei Miniaturisierung und innovativen Produktionstechnologien übernommen. Der Marktanteil der EU am globalen Leiterplattenmarkt ist historisch stark geschrumpft und liegt heute deutlich unter 5 %. Europäische Anbieter behaupten sich hauptsächlich in Nischenmärkten und bei High-Mix-Lösungen.

Die Bestückung von Leiterplatten ist ein Markt, der von hohen Volumina und niedrigen Margen geprägt ist. Die Eintrittsbarrieren sind moderat und hauptsächlich durch Kapitalkosten sowie tiefes applikationsspezifisches Fachwissen definiert. Geografisch ist der Markt stark in Südostasien konzentriert, es gibt jedoch auch einige größere EMS-Unternehmen in Europa. Die Auswirkungen eines Ausfalls von EMS-Firmen wären gering und die Wiederherstellung der Bestückungskapazitäten ist mit moderatem Aufwand möglich. Trotzdem hat die Bestückung eine gewisse Relevanz für die nationale Sicherheit, da sie die Beschaffung aktiver und passiver Komponenten steuert und somit den Inhalt eines elektronischen Bauteils beeinflusst. Zudem besteht während der Bestückung die Möglichkeit zur Manipulation, etwa durch die Integration von Fernsteuerungen oder manipulierten Komponenten. Oftmals fehlt es den Modulherstellern und OEMs jedoch an spezifischem Fachwissen, um solche Manipulationen zu erkennen und zu verhindern.

In der EMS-Branche dominieren vor allem taiwanesischen Unternehmen mit einem Marktanteil von etwa 60 % (siehe Abbildung 5.8). Insbesondere Hon Hai Precision, besser bekannt unter dem Markennamen Foxconn, beherrscht als Komponentenhersteller den EMS-Markt und ist bis in die Halbleiterproduktion tief integriert. Gemeinsam mit Quanta Computer, dem zweitgrößten EMS-Anbieter, sind diese beiden Unternehmen für mehr als 50 % der Wertschöpfung im globalen EMS-Markt verantwortlich. Abseits von Taiwan verzeichnet auch die USA einen hohen Marktanteil von 25 %. Die EU hingegen hält lediglich einen Anteil von 10 % am EMS-Markt.

Diese Marktanteile verdeutlichen die bestehenden Lücken der EU im Bereich Leiterplatten und EMS (siehe Abbildung 5.12). Insbesondere im Materialbereich ist die EU stark von Importen aus Südostasien abhängig und hat dadurch einen wichtigen Kontrollpunkt verloren. Zudem sind nur noch sehr begrenzte Leiterplattenfertigungskapazitäten in Europa verfügbar. Angesichts der hohen Bedeutung dieser Industrien für Resilienz und nationale Sicherheit sollten zusätzliche Fertigungskapazitäten in der EU geprüft werden. Auch im EMS-Segment könnte der Ausbau weiterer Kapazitäten in Europa dazu beitragen, Risiken wie Datenmanipulation zu verringern und Klumpenrisiken zu minimieren.

5.4.6 Hardware und Software: Wachsende Verknüpfung

Die Fertigung elektronischer Komponenten und Module hängt stark vom jeweiligen Endabnehmermarkt ab (siehe Abbildung 5.12). Ein Großteil der Modulfertigung findet in asiatischen Regionen statt, was zu einer stärkeren geografischen Konzentration führt. Disruptionen in diesem Wertschöpfungsschritt haben direkte Auswirkungen auf die Anwendungsindustrien und verursachen entsprechend hohe Kollateralschäden. Andererseits existiert in vielen Bereichen eine Vielzahl unterschiedlicher Zulieferer, was zu einem intensiven Wettbewerb führt. Ständige Innovationen und technologische Entwicklungen verändern die Situation zusätzlich kontinuierlich.

Auch wenn dies nicht der Schwerpunkt dieser Studie ist, sollte das Thema Algorithmik dennoch kurz hervorgehoben werden. Algorithmen und Software gewinnen in vielen Bereichen zunehmend an Bedeutung – sowohl für die Wettbewerbsfähigkeit als auch für die nationale Sicherheit. Mit der fortschreitenden Digitalisierung der Endindustrien steigen einerseits die Risiken im Hinblick auf Datenmanipulation und Spionage, andererseits eröffnen sich neue Geschäftsmodelle, wie etwa Software-as-a-Service (SaaS), die branchenübergreifend Anwendung finden. Dies gilt insbesondere für die europäischen Schlüsselindustrien, wie die Automobilbranche, die sich im Zuge der Transformation hin zu SDVs zunehmend auf digitale Lösungen fokussiert. Auch andere Sektoren, wie die industrielle Produktion, profitieren von den Fortschritten in der Algorithmik und Softwareentwicklung, etwa durch Anwendungen wie Predictive Maintenance oder KI-gestützte Datenanalysen. Hinzu kommt, dass Hardware und Software immer stärker miteinander verknüpft sind und selbst traditionelle Komponentenhersteller zunehmend auf Fähigkeiten der Algorithmik angewiesen sind, um ihre Wettbewerbsfähigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu sichern.

In diesem Bereich dominiert die USA klar mit einem Marktanteil von über 90 %. Multinationale Tech-Giganten wie Apple, Microsoft, NVIDIA und Alphabet haben dort ihren Hauptsitz und prägen maßgeblich den globalen Markt. Die EU hingegen hält nur einen Anteil von etwa 5 %, wobei große Industrieunternehmen wie Siemens und Bosch vor allem in der Entwicklung von Industrieanwendungen aktiv sind.

Diese Ungleichverteilung stellt ein erhebliches Risiko dar, sowohl für die nationale Sicherheit als auch für die Wettbewerbsfähigkeit der EU. Die Relevanz von Algorithmen und Software nimmt durch die fortschreitende Digitalisierung stetig zu und erstreckt sich über immer mehr Schlüsselbereiche der Wirtschaft. Neu entstehende Felder wie SDVs, KI-basierte Assistenzsysteme, Digital Twins und das Metaverse unterstreichen die wachsende Bedeutung von Algorithmen sowie deren zentrale Rolle in zukünftigen Technologien. Die Dominanz der USA in diesen Bereichen schafft potenzielle Abhängigkeiten und Schwachstellen, die langfristig die technologische Souveränität Europas gefährden könnten.

Die vorangegangene Diskussion verdeutlicht, dass der Ökosystemansatz bei der Etablierung von Technologie-souveränität eine zentrale Rolle spielt. Volkswirtschaften, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette in Bezug auf kritische Infrastrukturen und Anwendungen in der Lage sind, „Leading-Edge“-Technologien zu fertigen, können Wohlstand sichern, die Resilienz stärken und die nationale Sicherheit gewährleisten. Dies liegt unter anderem an den unterschiedlichen Kontrollpunkten entlang der Lieferkette sowie an den Risiken von Datenmanipulation und Spionage innerhalb der Wertschöpfungskette. Zudem sind die einzelnen Schritte der Wertschöpfung eng miteinander verzahnt, was bedeutet, dass eine Stärkung der Upstream-Lieferkette nur durch eine vorhergehende Stärkung der Downstream-Lieferkette möglich ist.

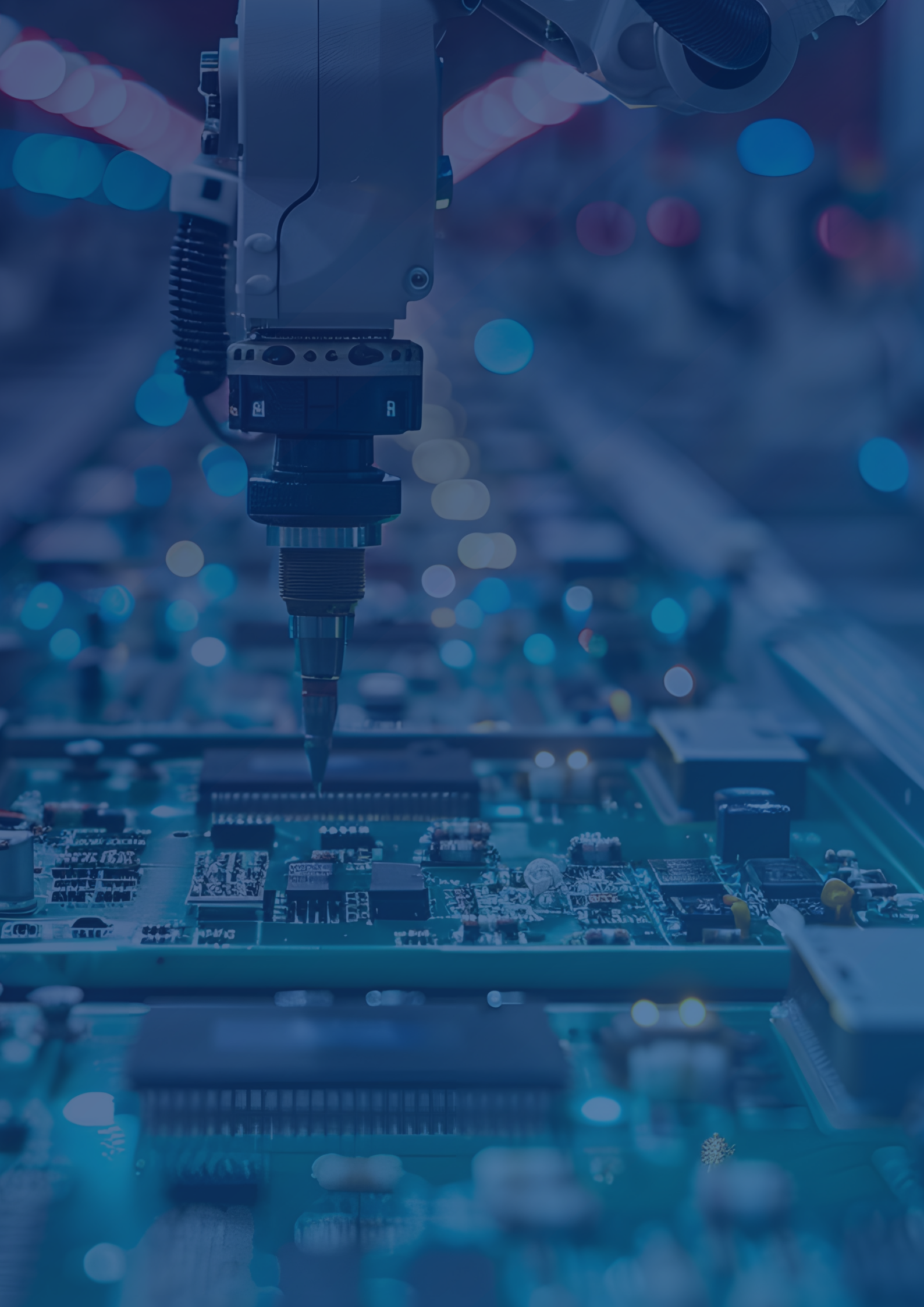
5.4.7 Geistiges Eigentum: Basis für wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit

Neben der eigentlichen Wertschöpfung spielt die Entwicklung und der Besitz von geistigem Eigentum (IP) eine zentrale Rolle in der Mikroelektronikindustrie. Als Teil des Wirtschaftszweigs 26.1 „Herstellung von elektronischen Komponenten“ rangiert die Mikroelektronik auf Platz 8 der patentintensivsten Industrien der EU mit etwa 15 bis 16 Patenten pro 1.000 Beschäftigten.⁴⁰ Zusätzlich ist zu beachten, dass ein erheblicher Teil des IP in diesem innovationsgetriebenen Sektor bewusst nicht veröffentlicht wird, um eine Kopiermöglichkeit und damit einen potenziellen Verlust von Wettbewerbsvorteilen zu vermeiden.

Nichtsdestotrotz gibt die Zahl der Patentanmeldungen einen Hinweis für wirtschaftliches Wachstum und Innovationskraft. Weltweit sind die Patentanmeldungen zwischen 1998 bis 2018 um 189 % gestiegen.⁴¹ Dies unterstreicht die zunehmende Bedeutung von IP im globalen Wettstreit um Technologieführerschaft. Geistige Eigentumsrechte schaffen nicht nur Anreize für private Investitionen in risikobehaftete Forschung, indem sie den Marktzugang für einen bestimmten Zeitraum sichern, sondern fördern auch den Wissenstransfer, indem sie wissenschaftliche Erkenntnisse für weitere Forschungen zugänglich machen.

Die Bedeutung von IP für die europäische Wirtschaft zeigt sich in aktuellen Studien. Laut dem Europäischen Patentamt (EPO, 2022) sind IP-intensive Industrien direkt für 29,7 % der Arbeitsplätze verantwortlich und generieren weitere 9,7 % indirekt. Diese Industrien sichern damit insgesamt 39,4 % der Arbeitsplätze und zahlen ihren Beschäftigten durchschnittlich 41 % höhere Gehälter als in anderen Sektoren. Zudem tragen IP-intensive Branchen mit 47,1 % erheblich zum BIP der EU bei. Diese Zahlen verdeutlichen wie wichtig geistige Eigentumsrechte zur Sicherung von Wohlstand und Wettbewerbsfähigkeit sind.

Die hier gezeigten Fakten untermauern, dass die Entwicklung und der Besitz von IP ein entscheidender Treiber für wirtschaftliches Wachstum und gesellschaftlichen Wohlstand sind. Daher ist entscheidend, nicht nur Ressourcen in die Produktion und Erhaltung bestehender Kapazitäten zu investieren, sondern auch langfristig in zukünftige Technologien. Besonders attraktiv sind dabei disruptive Innovationen, die neue Technologien erstmalig entwickeln und marktfähig machen. Diese Technologien stellen oft erhebliche Fortschritte in ihren jeweiligen Bereichen dar und haben das Potenzial, industrielle Standards zu verändern. Förderprogramme wie IPCEI spielen hier eine Schlüsselrolle, da sie genau solche bahnbrechenden Technologien unterstützen.



6 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Studie unterstreichen die zentrale Bedeutung der Mikroelektronik für die zukünftige Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und der EU. Die Analysen machen deutlich, dass weitere Maßnahmen erforderlich sind, um im internationalen Wettbewerb nicht ins Hintertreffen zu geraten. Im Hinblick auf die zukünftige europäische Wettbewerbsfähigkeit, Nachhaltigkeit und technologische Souveränität lassen sich acht zentrale Handlungsfelder identifizieren:

1. Weitere Investitionen notwendig	Die Studie zeigt, dass die Mikroelektronikförderung ein effektives Mittel zur Stärkung der europäischen Wirtschaft ist. Dennoch werden zusätzliche Investitionen erforderlich sein, um im globalen Wettbewerb Marktanteile zu behaupten und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit Europas zu sichern.
2. Bestehende Stärken stärken	Europa verfügt über klare Stärken in den Wertschöpfungsschritten Material und Maschinen sowie im Design und in der Fertigung von Leistungshalbleitern, Mikrocontrollern und Sensorik. Diese Kompetenzen müssen gezielt ausgebaut werden, um kritische Kontrollpunkte entlang der Wertschöpfung zu sichern.
3. Kombination von Stärken mit neuen Technologien ausbauen	Aktuelle strategische Lücken bestehen insbesondere im Chip- und Software-Design sowie im Bereich Advanced Packaging. Diese Bereiche erfordern gezielte Maßnahmen, um technologische Rückstände zu schließen und die vorhandenen Stärken in neuen Anwendungsfeldern zu nutzen. Langfristig könnten auch Investitionen in die Fertigung von Halbleitern mit kleinen Strukturbreiten, die für High-Performance-Computing und KI-Anwendungen essenziell sind, in Betracht gezogen werden, solange sich diese an den Innovationsroadmaps und der Nachfragesituation deutscher und europäischer Anwenderindustrien orientieren.
4. Leiterplatte und EMS stärken	Große Lücken in den Bereichen Leiterplatten, EMS und Algorithmik gefährden die Technologiesouveränität Europas. Andere Regionen haben die Relevanz dieser Wertschöpfungsschritte erkannt und investieren in diese Bereiche. Europa muss hier eine langfristige Strategie für diese kritischen Wertschöpfungsschritte entwickeln.
5. Stärkeres Wachstum über Nachfrage durch Anwendungsindustrien	Eine starke Mikroelektronikindustrie bedarf einer starken Nachfrage aus den Anwendungsindustrien. Die europäischen Kernindustrien wie Automobil und Maschinenbau sowie heute unterrepräsentierte Sektoren wie KI-Anwendungen und Rechenzentren müssen gezielt gestärkt werden, um Innovation und Synergien entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu fördern.
6. Übergreifende europäische Mikroelektronikstrategie	Eine übergreifende, europäische Mikroelektronikstrategie ist notwendig. Eine stärkere Verzahnung von Großprojekten innerhalb der EU und eine engere Abstimmung mit den strategischen Zielen für den Mikroelektronikstandort Europa sind essenziell, um Synergien zwischen Mitgliedsstaaten zu maximieren.
7. Nachhaltigkeit als Chance nutzen	Europa ist gut aufgestellt, um sich als globaler Vorreiter für nachhaltige Halbleiterproduktion zu positionieren und die Entwicklung von Klimatechnologien maßgeblich zu gestalten. Der hohe Anteil erneuerbarer Energien und strenge Umweltstandards schaffen ideale Voraussetzungen. Um dies umzusetzen, sind Investitionen in die Energieinfrastruktur sowie eine enge Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette erforderlich.
8. Aufbau und Entwicklung von Fachkräften	Die Studie hat gezeigt, dass der Mikroelektroniksektor entscheidend zum Aufbau und Erhalt von Arbeitsplätzen beiträgt und die Entwicklung innovativen Know-hows in der EU fördert. Angesichts des drohenden Fachkräftemangels, verstärkt durch den demografischen Wandel, sind gezielte Maßnahmen in Bildung, Qualifizierung und Talentförderung notwendig. Dazu gehören angepasste Studiengänge und Ausbildungsberufe, insbesondere in den Bereichen Maschinenbau und -instandhaltung.

Literaturverzeichnis

- 1 Strategy&: *Hochrechnung basierend auf Pressemitteilungen und öffentlich verfügbaren Daten*; [Stand 25.11.2024]
- 2 Europäische Kommission: *Approved IPCEIs in the Microelectronics value chain*; https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis/microelectronics-value-chain_en [Stand: 25.11.2024]
- 3 Europäische Kommission: *EU Chips Act*; https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en#:~:text=In%20total%2C%20more%20than%20%E2%82%AC,Investments%20in%20next%2Dgeneration%20technologies [Stand: 25.11.2024]
- 4 Siehe Abbildung 4.8; Strategy& Analyse: *Basierend auf SEMI World Fab Forecast 3Q23 und SIA-Bericht 2021, sowie öffentlich verfügbaren Daten über Unternehmensumsätze und Market Caps*; [Stand: 01.10.2024]
- 5 The New York Time: *Shortage of Memory Chips Has Industry Scrambling*; <https://www.nytimes.com/1988/03/12/us/shortage-of-memory-chips-has-industry-scrambling.html> [12.03.1988]
- 6 RCR Wireless News: *Chip shortage could give needed boost to Qualcomm competitors*; <https://www.rcrwireless.com/20040524/archived-articles/chip-shortage-could-give-needed-boost-to-qualcomm-competitors> [24.05.2004]
- 7 The New York Times: *Disaster in Japan Batters Suppliers*; <https://www.nytimes.com/2011/03/15/business/global/15supply.html> [14.03.2011]
- 8 Wassen Mohammad, Adel Elomri, Laoucine Kerbache: *The Global Semiconductor Chip Shortage: Causes, Implications, and Potential Remedie*, IFAC-PapersOnLine Volume 55, Issue 10 [2022]
- 9 Strategy& und Omdia: *PwC State of the Semiconductor Industry*; [11.2024]
- 10 Europäische Kommission: *European Semiconductor Board*; <https://ec.europa.eu/transparency/expert-groups-register/screen/expert-groups/consult?lang=en&groupID=3932> [15.12.2023]
- 11 Europäische Kommission: *European Chips Act: Monitoring and crisis response*; <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/european-chips-act-monitoring-and-crisis-response> [4.11.2024]
- 12 Europäische Kommission: *The European Chips Act Art. 23 Abs. 1*; https://www.european-chips-act.com/European_Chips_Act_Article_23.html [21.09.2023]
- 13 PwC Strategy&: *Eigene Analyse auf Basis der Befragung von Industrievertretern*; [2024]
- 14 Invest India: *Schemes for Electronics Manufacturing*; <https://www.investindia.gov.in/schemes-for-electronics-manufacturing> [Stand: 25.11.2024]
- 15 EE Times: *U.S. Crawls Toward Rebuilding Frail PCB Industry*; <https://www.eetimes.com/u-s-crawls-toward-rebuilding-frail-pcb-industry/> [27.04.2023]
- 16 CEPA: *It's Not Just Semiconductors – It's also Printed Circuit Boards*; <https://cepa.org/article/its-not-just-semiconductors-its-also-pcb/> [24.07.2024]
- 17 Statistisches Bundesamt: *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Input-Output-Rechnung 2019, Fachserie 18 Reihe 2*; <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Input-Output-Rechnung/input-output-rechnung-2180200207005.html> [Revision 2019, Stand: November 2021]

- 18 Berechnung auf Basis von Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung: *Durchschnittliche Steuerquote in Deutschland 2014–2023* (Hinweis: Steuern einschließlich Erbschaftsteuer und Steuern an die EU) [Stand: 25.11.2024]
- 19 Berechnung auf Basis von OECD (2024): *Global Revenue Statistics Database, durchschnittliche Steuerquote 2014–2022*; <https://www.oecd.org/en/data/datasets/global-revenue-statistics-database.html> [Stand: 25.11.2024]
- 20 Institut für Innovation und Technik: *Analyse und Prognose volkswirtschaftlicher und regionalökonomischer Wachstumseffekte des Halbleiterökosystems in Sachsen*; <https://www.iit-berlin.de/publikation/analyse-und-prognose-volkswirtschaftlicher-und-regionaloekonomischer-wachstumseffekte-des-halbleiteroekosystems-in-sachsen/> [08.2024]
- 21 Strategy&: Bridging the Talent Gap; <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/telecommunication-media-and-technology/bridging-the-talent-gap.html> [10.2023]
- 22 Strategy&: *Eigene Schätzung basierend auf Erfahrungswerten von Großprojekten im Halbleitersektor*; [Stand: 10.2023]
- 23 UNFCCC: *Pariser Abkommen*; https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf [12.12.2015]
- 24 Europäische Kommission: *European Green Deal*; https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en [2020]
- 25 METI: *Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050*; https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/ggs2050/index.html [18.06.2021]
- 26 Government of Korea: *2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea*; https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf [12.2020]
- 27 XINHUANET: *Xi announces China aims to achieve carbon neutrality before 2060*; http://www.xinhuanet.com/english/2020-09/23/c_139388764.htm [23.09.2020]
- 28 US Department of State: *The Long-Term Strategy of the United States*; <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/us-long-term-strategy.pdf> [11.2021]
- 29 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: *Das Klimaanpassungsgesetz (KAnG)*; <https://www.bmu.de/themen/klimaanpassung/das-klimaanpassungsgesetz-kang#:~:text=Das%20neue%20Gesetz%20setzt%20den,Juli%202024%20in%20Kraft%20getreten.> [1.07.2024]
- 30 Infineon: *Nachhaltigkeitsreport 2023*; https://www.infineon.com/dgdl/Nachhaltigkeit_bei_Infineon+2023.pdf?fileId=8ac78c8b8b657de2018c009f7e380101 [23.11.2023]
- 31 SEMI: *SEMI Fab Database Q3 2023* [Q3 2023]
- 32 Silicon Saxony: *Warum sind Halbleiter so teuer?*; <https://silicon-saxony.de/warum-sind-halbleiterfabriken-so-teuer/#:~:text=Kostenfaktor%20%E2%80%9ES%C3%A4ulenloser%20Reinraum%E2%80%9C,als%20in%20einer%20s%C3%A4ulengest%C3%BCtzten%20Werkhalle.> [2023]
- 33 Eurostat: *Renewables take the lead in power generation in 2023*; <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240627-1> [27.07.2024]
- 34 Statistisches Bundesamt: *Pressemitteilung Stromerzeugung 2023*; https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_087_43312.html#:~:text=M%C3%A4rz%202024&text=WIESBADEN%20%E2%80%93%20Im%20Jahr%202023%20wurden,weniger%20als%20im%20Jahr%202022. [7.03.2024]
- 35 Strategy&: *Analyse basierend auf Projekt- und Expertenerfahrung*; [10.2022]

- 36 Federal Register: *Federal Acquisition Regulation: Prohibition on Certain Semiconductor Products and Services*; <https://www.federalregister.gov/documents/2024/05/03/2024-08735/federal-acquisition-regulation-prohibition-on-certain-semiconductor-products-and-services> [03.05.2024]
- 37 US International Trade Commission: *Germanium and Gallium: U.S. Trade and Chinese Export Controls*; https://www.usitc.gov/publications/332/executive_briefings/ebot_germanium_and_gallium.pdf [03.2024]
- 38 BMBF: *Technologische Souveränität*; https://www.bmbf.de/bmbf/de/europa-und-die-welt/innovationsstandort-deutschland/technologische-souveraenitaet/technologische-souveraenitaet_node.html#:~:text=Technologische%20Souver%C3%A4nit%C3%A4t%20bedeutet%20selbst%20die,-unter%20welchen%20Rahmenbedingungen%20einsetzen%20wollen [8.10.2024]
- 39 Lee, John and Kleinhans, Jan-Peter: *Mapping China's semiconductor ecosystem in global context*; <https://merics.org/en/report/mapping-chinas-semiconductor-ecosystem-global-context-strategic-dimensions-and-conclusions> [30.06.2021]
- 40 Euripo: *IPR-intensive industries and economic performance in the European Union Industry-level analysis report*; https://euiipo.europa.eu/tunnel-web/secure/webdav/guest/document_library/observatory/documents/reports/IPR-intensive_industries_and_economic_in_EU_2022/summary/2022_IPR_Intensive_Industries_ExSum_en.pdf [10.2022]
- 41 WIPO: *Harnessing the benefits of IP for development*; https://www.wipo.int/wipo_magazine/en/2019/03/article_0002.html [07.2019]





Kontakt

Clemens Otte • Bereichsleiter Mikroelektronik & Kabel
Tel.: +49 30 306 960 10 • Mobil: +49 162 2664 930 • E-Mail: Clemens.Otte@zvei.org

Impressum

ZVEI e. V. • Verband der Elektro- und Digitalindustrie • Amelia-Mary-Earhart-Str. 12 • 60549 Frankfurt am Main
Lobbyregisternr.: R002101 • EU Transparenzregister ID: 94770746469-09 • www.zvei.org

In Zusammenarbeit mit Strategy&

Tanjeff Schadt • Partner / Geschäftsführer • Strategy&, Part of the PwC network
Tel.: +49 89 54525521 • Mobil: +49 1516 7330436 • E-Mail: t.schadt@pwc.com

Dezember 2024