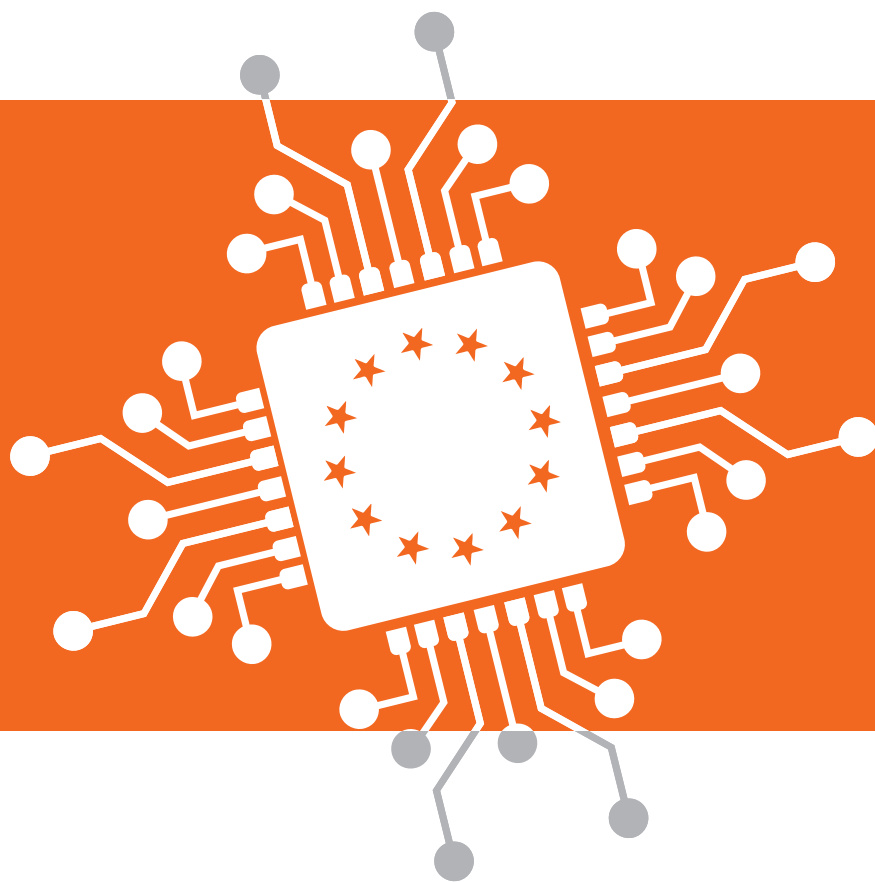


Branchenblick 2030+

Die Halbleiterindustrie



OXFORD
ECONOMICS



Impressum

BRANCHENAUSBLICK 2030+
Die Halbleiterindustrie

ERSTELLT IM AUFTRAG VON
Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

- Inselstraße 6, 10179 Berlin
- Königsworther Platz 6, 30167 Hannover
- Telefon +49 30 2787 13 25

DURCHFÜHRUNG
Oxford Economics
Autor*innen: Johanna Neuhoff,
Dr. Yann Girard, Annegret Hoch
Unter Mitarbeit von: Elia Pawlik

PROJEKTLEITUNG
Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE
Malte Harrendorf

LEKTORAT
Gisela Lehmeier, FEINSCHLIFF

SATZ UND LAYOUT
pandamedien GmbH & Co. KG

TITELBILD
pandamedien GmbH & Co. KG

DRUCK
Spree Druck Berlin GmbH

VERÖFFENTLICHUNG
Juni 2022

BITTE ZITIEREN ALS
Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (2022):
Branchenausblick 2030+: Die Halbleiterindustrie. Berlin.

Vorwort

Die Bundesrepublik Deutschland und die Europäische Union haben sich ein ambitioniertes Klimaschutzziel gesetzt: Klimaneutralität bis Mitte des Jahrhunderts. Im Rahmen des Green Deals wurden die Emissionsminderungsziele für die EU jüngst von –40 auf –55 Prozent bis 2030 im Vergleich zum Jahr 1990 angehoben.

Für Deutschland bedeutet dies unter anderem, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien deutlich beschleunigt werden muss, dass die CO₂-Zertifikatsmenge im Rahmen des ETS-Systems (Emissions Trading System) schneller reduziert wird, dass der CO₂-Preis voraussichtlich steigt und dass dadurch der Dekarbonisierungsdruck auf die ganze Gesellschaft – und insbesondere auf die Industrie – zunimmt. Gleichzeitig ist die Klimapolitik nicht der einzige Prozess, der derzeit die Gesellschaft und die Wirtschaft massiv herausfordert. Die Corona-Krise, die Veränderungen der Globalisierung, die Digitalisierung und der demografische Wandel haben große Auswirkungen auf alle Akteure.

Wie sind deutsche Industriebranchen von diesen gleichzeitig stattfindenden Transformationstrends betroffen? Welche Stärken und Schwächen mit Blick auf die Dekarbonisierung unter beibehaltener Wettbewerbsfähigkeit zeigen sie auf? Was sind besondere Risiken und Chancen des anstehenden Umbaus hin zu Nachhaltigkeit und langfristiger Leistungsfähigkeit? Und wie werden die Arbeit selbst und die Arbeitnehmer*innen in der Industrie dadurch betroffen?

In einer Studienreihe – Branchenausblick 2030+ – untersucht die Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE die Auswirkungen verschiedener Transformationsprozesse auf ausgewählte Industriebranchen. Der Fokus liegt dabei auf technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Potenzialen zu Nachhaltigkeit und Treibhausgasneutralität; aber auch andere, für die Industriebranchen transformative Entwicklungen werden beleuchtet.

Die Studienreihe komplettiert den Szenarienprozess der IGBCE, in dem Zukunftsszenarien und industriepolitische Strategien für die kommende Dekade entwickelt wurden. Obwohl es immer schwierig ist, mittelfristige Prognosen zu industriellen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Veränderungen zu machen, ist ein solcher Blick auf aktuelle Trends und Entwicklungstendenzen notwendig, um strategische Antworten auf strukturelle Veränderungen zu entwerfen. Es geht darum, die Zukunftsfähigkeit der Industrie kritisch zu beleuchten, Risiken zu identifizieren und politischen sowie gewerkschaftlichen Handlungsbedarf zu diskutieren.

Unser Ausgangspunkt ist und bleibt, dass die notwendige industrielle Modernisierung mit sozialer Gerechtigkeit, Guter Arbeit und gestärkter Mitbestimmung einhergehen muss.

Wir hoffen, mit dieser Studienreihe konstruktiv zur Debatte über die Herausforderungen, die Potenziale und die konkrete Ausgestaltung der sozial-ökologischen Transformation in der deutschen Industrie beizutragen.

Wir freuen uns auf den Austausch!

Andrea Arcais

Geschäftsführer

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

Malte Harrendorf

Bereichsleiter Energiewende und Sektorenkopplung

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

Die wichtigsten Ergebnisse auf einen Blick

(Zusammenfassung)

Halbleiter sind für die Gestaltung eines digitalen und grünen Europas unverzichtbar und nehmen eine Schlüsselposition für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit Europas ein. Zukunftsanwendungen wie die künstliche Intelligenz und das Internet der Dinge basieren auf leistungsfähigen Halbleitern, aber auch energieeffiziente Haushaltsgeräte und sparsame Elektroautos sind ohne Halbleiter nicht denkbar. Die Halbleiterindustrie ist Motor für Spitzenprodukte und Enabler für Innovationen in anderen Branchen. Jede dritte Innovation des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland basiert auf Lösungen der Elektroindustrie. Die Mikroelektronik ist zudem bereits heute die Basis für einen Großteil der Innovationen in Fahrzeugen.

Der Branchenausblick 2030+ „Die Halbleiterindustrie“ untersucht den Status quo und die Zukunftsentwicklung der Halbleiterindustrie in Europa und im wichtigsten europäischen Halbleiterstandort Deutschland. Zentrale Fragen sind dabei:

- Wie ist die europäische Halbleiterindustrie aktuell aufgestellt? Welche Rolle spielt der Halbleiterstandort Deutschland?
- Welchen Beitrag leistet die europäische Halbleiterindustrie zur Digitalisierung, Klimawende und Fachkräftesicherung? Welchen Einfluss hat die Globalisierung auf die Branche?
- Welche Rahmenbedingungen beeinflussen die zukünftige Entwicklung der Industrie?
- Welche Stärken und Schwächen, Risiken und Chancen ergeben sich für den europäischen und deutschen Halbleiterstandort?

Die Untersuchung legt dar, dass europäische Halbleiterhersteller hochinnovative Produkte entwerfen und produzieren. In den Märkten für automobiler Halbleiter und Leistungshalbleiter gehören die europäischen Halbleiterfirmen bereits zu den Weltmarktführern. Aber auch als Zulieferer sind europäische Firmen am weltweiten Markt erfolgreich – im Bereich der Halbleiter-Chemikalien und der Anlagenproduktion. In der EUV-Lithografie-Techno-

logie sind europäische Unternehmen an der technologischen Weltspitze sogar unangefochten vertreten. Europa verfügt über Spitzenforschungseinrichtungen zu Halbleitern und hat seine starke Position bei der Erforschung innovativer Halbleiterlösungen in den vergangenen Jahren kontinuierlich ausgebaut. Forschungseinrichtungen und Unternehmen arbeiten in mehreren regionalen Innovationsökosystemen bereits erfolgreich zusammen.

Neben diesen Stärken weist Europa aber auch Schwächen auf. Während andere Weltregionen, insbesondere Taiwan, Südkorea und China, ihre Halbleiterproduktionskapazitäten in den vergangenen Jahren deutlich ausgebaut haben, werden immer weniger Chips in Europa produziert. Gegenwärtig verfügt Europa über sechs bis acht Prozent der weltweiten Halbleiterproduktionskapazitäten. Beim Entwurf von Chips fehlen – auch aufgrund der fehlenden Abnehmerbranchen im Bereich der Kommunikationselektronik – in Europa Unternehmen, die sich auf das Chipdesign spezialisieren (sogenannte Fabless-Unternehmen). Insgesamt wird deshalb nur etwa jeder elfte Chip in Europa entworfen. Gleichzeitig haben Kompetenzen im Entwurf der neusten Generation von Mikroprozessoren strategisch eine enorme Bedeutung, da sie für viele sicherheitsrelevante Zukunftsanwendungen wie künstliche Intelligenz und kritische Infrastrukturen wie Kommunikationsinfrastrukturen benötigt werden.

Die europäischen Firmen in der Halbleiterindustrie sind intensiv in globale Wertschöpfungsnetze eingebunden, denn Halbleiter werden in hoch spezialisierten und international stark vernetzten Wissens- und Wertschöpfungsketten produziert. Ein Chip reist etwa zweieinhalb Mal um die Welt, bevor er fertiggestellt ist. Der hohe Grad an Spezialisierung führt zu zahlreichen kritischen Engstellen, an denen nur wenige Länder und Firmen über hinreichende Kompetenzen verfügen; dies zeigen die aktuellen Lieferengpässe eindrucksvoll. Zu den Nadelöhrn der Wertschöpfungskette zählen aber nicht nur die Produktion und der Entwurf der neusten Generation von Chips, sondern auch die Chipdesignsoftware, der Bau von Produktionsanlagen und die Herstellung von bestimmten Chemikalien. Die Abhängigkeiten in den Halbleiterwertschöpfungsketten werden international immer wieder für politische Interessen instrumentali-

siert. Zu den größten Risiken für die Geschäftstätigkeit der europäischen Halbleiterfirmen – und dadurch auch für alle nachgelagerten Branchen wie die Automobilindustrie – gehören daher politische Spannungen und Einschränkungen im weltweiten Handel, die den Zugang zu Produkten und Technologien erschweren.

Aufgrund ihrer hohen strategischen und wirtschaftlichen Bedeutung für Europa hat die Halbleiterindustrie in den vergangenen Jahren erhebliche Aufmerksamkeit vonseiten der politischen Entscheidungsträger erhalten. Im Digitalen Kompass 2030 hat die Europäische Kommission ein ambitioniertes Ziel für die nächsten zehn Jahre definiert: Der europäische Anteil am Welthalbleitermarkt soll bis zum Jahr 2030 auf 20 Prozent ansteigen und der Aufbau von neuen, technologisch führenden Chipfabriken soll vorangetrieben werden. Der Vorschlag für ein europäisches Chip-Gesetz sieht Investitionen im Umfang von 43 Milliarden Euro für Halbleiter als eines „der wichtigsten Industrievorhaben seit vielen Jahren“ vor. Denn um dieses sehr ambitionierte Ziel zu erreichen, muss die europäische Halbleiter-Produktionskapazität im Vergleich zum derzeitigen Niveau um ein Vielfaches ansteigen – je nach Wachstum des Gesamtmarkts bis um den Faktor fünf. Hieraus ergeben sich Chancen für die europäischen Hersteller, denn groß angelegte Förderprogramme schaffen Synergien und bringen die relevanten Akteure aus Wissenschaft und Industrie zusammen. Dass die Ambitionen der EU groß sind, zeigt bereits das Important Project of Common European Interest (IPCEI) Mikroelektronik, das erste europäische Gemeinschaftsprojekt dieser Art. In dem groß angelegten Förderprojekt haben Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und das Vereinigte Königreich Halbleiterunternehmen nicht nur Beihilfe zur Forschungs- und Entwicklungsarbeit gewährt, sondern auch den Aufbau von Fertigungskapazitäten befördert – ein Novum im europäischen Beihilferecht. In Deutschland sind beispielsweise die Chipfabriken von Bosch, Infineon und GlobalFoundries in Dresden mit dieser Förderung neu entstanden oder wurden ausgebaut.

Die Anstrengungen der Europäischen Kommission und der Mitgliedstaaten, massiv in den Ausbau der europäischen Halbleiterindustrie zu investieren, treffen auf einen wachsenden zukünftigen Bedarf an Halbleitern. Getrieben vom Trend zu Digitalisierung und Nachhaltigkeit steigt der Bedarf an Halbleiterlösungen in Zukunft deutlich an. Der Bereich der automobilen Halbleiter, in dem europäische Hersteller weltweit führend sind, wird – getrieben durch die Elektromobilität und die automatisierte und vernetzte Mobilität – am stärksten von allen Halbleiter-Teilmärkten wachsen. Elektronik und Software nehmen im Automobil zukünftig eine zentrale Rolle ein und sind bereits jetzt für den Großteil aller Innovationen

im Automobilbereich verantwortlich. Die europäischen Halbleiterhersteller können somit aktiv zum Umbau Europas zu einer digitalen und grünen Wirtschaft und Gesellschaft beitragen.

Höhere Produktionsmengen einerseits und ein steigender Ressourceneinsatz in neuen Fertigungstechnologien andererseits machen die Entwicklung von effizienteren und ressourcenärmeren Produktionsverfahren für Halbleiter erforderlich. Die Entwurfsphase der Halbleiterprodukte ist hierfür entscheidend, denn die Umweltauswirkungen von Produkten müssen zukünftig bereits in einer frühen Entwicklungsphase in die Optimierungen einbezogen werden. Anders als bisher muss der ökologische Fußabdruck zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Halbleiterprodukten als ein weiteres Ziel neben der Leistung, den Kosten und den Systemeigenschaften eines Produkts betrachtet werden.

Die Halbleiterindustrie ist als Branche der Spitzentechnologie für ihre Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit in besonderem Maße vom Zugang zu qualifizierten Fachkräften abhängig. Besonders wichtig sind Fachkräfte aus dem Bereich Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT), zu dem auch die Elektroingenieur*innen zählen. Aber auch die digitalen Fähigkeiten und insbesondere die Kompetenzen im Bereich Software werden zunehmend wichtig. Dieser Trend zeigt sich bereits sehr deutlich bei den Halbleitern für die Automobilindustrie. Der Einsatz von Software in den Fahrzeugen steigt kontinuierlich an und damit auch der Bedarf an Softwareentwicklungskompetenzen. Diesen mit qualifizierten Fachkräften zu decken, gehört zu den wichtigen Zukunftsherausforderungen für die europäische Halbleiterindustrie. Tabelle 1 fasst die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des europäischen Halbleiterstandorts noch einmal zusammen.

Obwohl der Branchenausblick sich primär mit der europäischen Halbleiterindustrie beschäftigt, ist Deutschland als starker europäischer Halbleiterakteur von besonderem Interesse. Zwei der führenden Halbleiterhersteller in Europa, Infineon und Bosch, und eine der drei führenden europäischen Forschungseinrichtungen für Halbleiter, die Forschungsfabrik Mikroelektronik, haben ihren Sitz in Deutschland. Die hohe Patentaktivität im Halbleitersektor unterstreicht, dass Deutschland vor allem im Bereich der Innovationen für industrielle Anwendungen von Halbleitern führend in Europa ist. Deutschland, und insbesondere Dresden, verfügt zudem über das größte Halbleiter-Cluster in Europa und kann den höchsten Anteil an MINT-Fachkräften in Europa vorweisen. Daher ist die Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands essentiell, um die ehrgeizigen Ziele der Europäischen Union zu erreichen.

Wenn Deutschland seine Rolle als wichtiger Standort für die europäische Halbleiterindustrie sichern und ausbauen will, sollte die Politik deshalb folgende Maßnahmen in Betracht ziehen:

- **Stärkung der Halbleiter-Forschung und des Chip-designs:** Die Bundesregierung sollte zum einen die bestehenden Stärken des Standorts Deutschlands im Bereich der analogen Halbleiter, Leistungshalbleiter und Chips für die Anwendung im Automobilsektor und in der Industrie stärken, da hier auf vorhandenen Ökosystemen aufgebaut werden kann. Zum anderen sollten bestehende Lücken im Entwurf von strategisch wichtigen Technologien wie Hochleistungsprozessoren geschlossen werden.
- **Aufbau von Produktionskapazitäten für wichtige Abnehmerbranchen:** Die Bundesregierung sollte nicht einseitig auf den Aufbau von Produktionskapazitäten im Bereich von Strukturgrößen unter zehn Nanometern setzen, sondern auch die Fertigung von innovativen Chips mit größeren Strukturgrößen, beispielsweise Leistungshalbleiter aus neuen Materialien, und die großmaßstäbliche Anwendung von Spitzentechnologien, beispielsweise im Anlagenbau, finanziell unterstützen. Das wichtigste Instrument ist das IPCEI, für das Firmen in Deutschland in einer zweiten Runde bereits Förderanträge gestellt haben, die noch durch den Bundestag freigegeben werden müssen.
- **Kooperationen mit inner- und außereuropäischen Partnern:** Deutschland kann hier auf bestehende Initiativen wie die Halbleiterallianz, die Allianz für Prozessoren und Halbleitertechnologien und die Gemeinsamen Unternehmen im Rahmen von EU Horizon 2020 zurückgreifen, um europaweit Synergien zu heben und gemeinsam die Ausrichtung der Förderprogramme zu koordinieren.
- Die Halbleiterindustrie profitiert von einem **möglichst uneingeschränkten internationalen Handel**, denn Kooperation und Wissenstransfer spielen in den stark arbeitsteiligen Halbleiterwertschöpfungsketten eine entscheidende Rolle.
- Die **Förderung von MINT-Fachkräften** durch eine Förderung von Frauen und einen verbesserten Zugang zum Arbeitsmarkt für ausländische Fachkräfte sowie die Aus- und Weiterbildung in den neu definierten Berufsprofilen für eine Halbleiterindustrie ist unerlässlich, um zu verhindern, dass fehlende Fachkräfte zum Nadelöhr für die zukünftige Entwicklung des Halbleiterstandorts Deutschland werden.
- **Umwelt- und Klimaregulierungen** wie die Richtlinien zum Einsatz von Chemikalien müssen auch in Zukunft die Produktion von Halbleitern in Europa erlauben.
- **Zugang zu erneuerbarer Energie**, insbesondere zu grünem, bezahlbarem Strom, muss für Halbleiterunternehmen in Deutschland gesichert sein.

Tabelle 1: SWOT-Analyse des europäischen Halbleiterstandorts

Stärken ("Strengths") 😊 Starke Wettbewerbsposition europäischer Halbleiterhersteller im Bereich Halbleiter für die Automobilindustrie, Leistungshalbleiter sowie analoge Halbleiter 😊 Enge Anbindung an starke Abnehmerbranchen (Automobil und Industrie) 😊 Marktführende Stellung eines europäischen Unternehmens im Bereich der EUV-Lithografie 😊 Starke europäische Forschungseinrichtungen und steigender Anteil am weltweiten Forschungsoutput 😊 Gut ausgebildete Ingenieur*innen als Fachkräfte 😊 Teils gut funktionierende industrielle Anwendung von Forschungsergebnissen (Beispiel Deutschland)	Schwächen ("Weaknesses") 😞 Abnehmender europäischer Anteil an den weltweiten Halbleiterfertigungskapazitäten 😞 Keine europäischen Fertigungskapazitäten im hochmodernen Bereich 😞 Geringe europäische Entwurfskompetenz für hochmoderne Chips 😞 Kaum Firmen im Fabless-Bereich, fehlende europäische Abnehmer für hochmoderne Halbleiter 😞 Verbesserungsbedarf beim Transfer des Wissens von der Spitzenforschung in die lokale Industrie (Beispiel Belgien)
Chancen ("Opportunities") 😊 Energiewende als Impulsgeber für Nachfrage nach europäischen Halbleiterlösungen 😊 Elektrifizierung und Automatisierung stärken Nachfrage nach Automobilhalbleitern 😊 Digitalisierung und Industrie 4.0 eröffnen Wachstumschancen 😊 Groß angelegte europäische Förderprogramme für den Aufbau von Produktionskapazitäten und die Stärkung des Chipdesigns 😊 Verbesserter Transfer von der Spitzenforschung in die Anwendung 😊 Allianzen mit internationalen Partnern	Risiken ("Threats") 😞 Stark fragmentierte Halbleiterwertschöpfungsketten mit kritischen Engstellen bei wenigen Unternehmen und Ländern 😞 Politische Spannungen und Handelskonflikte 😞 Disruptives Potenzial der Digitalisierung für automobiler Wertschöpfungsketten 😞 Softwareentwicklungskompetenzen werden zum Nadelöhr 😞 Groß angelegte Halbleiterförderprogramme in anderen Weltregionen (USA, China) 😞 Zunehmender Ressourcenverbrauch der modernen Halbleiterfertigung

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics

Inhalt

Vorwort	3
Die wichtigsten Ergebnisse auf einen Blick (Zusammenfassung)	4
Abkürzungsverzeichnis	10
Glossar	11
1. Einleitung	14
2. Ein erster Überblick zur Halbleiterindustrie	16
2.1 Die wichtigsten Produkte und Anwendungen der Halbleiterindustrie	16
2.2 Die typische Wertschöpfungskette und deren Akteure	18
3. Die Halbleiterindustrie in Deutschland und Europa	23
3.1 Die europäische Halbleiterindustrie im internationalen Vergleich	23
3.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Halbleiterindustrie in Europa	27
3.3 Forschung und Innovation in Europa	34
4. Transformationstrends: Digitalisierung, Globalisierung, demografischer Wandel	42
4.1 Digitalisierung	42
4.2 Globalisierung	46
4.3 Demografischer Wandel und Fachkräftesicherung	49
5. Herausforderung Nachhaltigkeit und Treibhausgasneutralität	52
5.1 Der ökologische Fußabdruck der Chipherstellung	52
5.2 Beitrag der Mikroelektronik zum Klimaschutz	54
6. Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Halbleiterindustrie	56
6.1 Industrie- und Digitalpolitik in der EU	56
6.2 Instrumente zur Stärkung des europäischen Halbleiterökosystems	57
6.3 Umwelt- und Klimapolitik	60
6.4 Innereuropäische Standortfaktoren und die Rolle Deutschlands	63
7. Fazit: SWOT-Analyse der Halbleiterindustrie 2030+	67
Literaturverzeichnis	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: SWOT-Analyse des europäischen Halbleiterstandorts	7
Tabelle 2: Elektronische Bauelemente in den Top-10-Ländern Europas (EU-28) (2018)	28
Tabelle 3: Die Top-5-Halbleiterunternehmen in Europa	30
Tabelle 4: Kennzahlen für den Bereich elektronische Bauelemente in Deutschland (2018)	32
Tabelle 5: Merkmale der Beschäftigten im Bereich elektronische Bauelemente und Leiterplatten in Deutschland (2. Quartal 2021)	33
Tabelle 6: Wandel des Automobilmarkts weltweit bis 2030	45
Tabelle 7: Bewertung wichtiger Rohstoffe der Halbleiterproduktion durch die Europäische Kommission (2020)	62
Tabelle 8: SWOT-Analyse des europäischen Halbleiterstandorts	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anwendungsbereiche von Halbleitern	14
Abbildung 2:	Halbleiterprodukte und -funktionen	17
Abbildung 3:	Ist-Stand der Marktanteile (2020) und jährliche Entwicklung (2000–2020) des Marktvolumens von Halbleiterprodukten am weltweiten Halbleitermarkt	17
Abbildung 4:	Anteil Marktsegmente für Halbleiter nach Anwendungsbereich weltweit (2005, 2020)	18
Abbildung 5:	Die Halbleiter-Wertschöpfungskette	18
Abbildung 6:	Kosten für den Chipentwurf nach Größe des Chips (2020)	19
Abbildung 7:	Baukosten für die Chipfertigung nach Größe des Chips (2020)	21
Abbildung 8:	Weltweite Umsätze der Halbleiterindustrie nach Region des Firmensitzes (2010, 2015, 2020)	23
Abbildung 9:	Verteilung der Halbleiter-Umsätze im Fabless-Bereich (2020)	24
Abbildung 10:	Produktionskapazität der wichtigsten Regionen (2010, 2015, 2020)	25
Abbildung 11:	Halbleiter-Produktionskapazität nach Ländern und größten Firmen (2019)	25
Abbildung 12:	Umsätze der TOP-10-Unternehmen weltweit mit analogen Halbleitern (links) und Halbleitern für die Automobilindustrie (rechts) (2019)	26
Abbildung 13:	Halbleiter-Produktionskapazität Europas nach Fertigungsverfahren (2020)	27
Abbildung 14:	Bruttowertschöpfung und Beschäftigung des Bereichs elektronische Bauelemente in den TOP-10-Ländern Europas (EU-28) (2018)	29
Abbildung 15:	Anteil der Marktsegmente für Halbleiter nach Anwendungsbereich weltweit und in Europa (2019) ..	29
Abbildung 16:	Beschäftigung des Bereichs elektronische Bauelemente in den TOP-10-Ländern Europas (EU-28) (2019)	31
Abbildung 17:	Bruttowertschöpfung und Beschäftigung des Bereichs elektronische Bauelemente in Deutschland (2010–2019)	32
Abbildung 18:	Frauenanteil in den wichtigsten Industriebranchen im Vergleich (2. Quartal 2021)	34
Abbildung 19:	Investitionsintensität im Bereich elektronische Bauelemente in Deutschland (2010–2019)	35
Abbildung 20:	Anteil Europas an den weltweiten Konferenzpapieren zur Halbleiter-Forschung (1995–2020)	35
Abbildung 21:	Anteil einzelner europäischer Länder an den weltweiten Konferenzpapieren zur Halbleiter-Forschung (2020)	36
Abbildung 22:	Standorte der wichtigsten europäischen Halbleiter-Forschungseinrichtungen	37
Abbildung 23:	Anteil einzelner Länder an den Patentanmeldungen der EU-27 im Bereich Halbleiter (2017)	37
Abbildung 24:	Ausgaben für FuE als Anteil an den Umsätzen (2020)	39
Abbildung 25:	Forschungs- und Entwicklungsstandorte sowie Orte für die erste industrielle Umsetzung von Innovationen in Europa	40
Abbildung 26:	Prognose des zusätzlichen Halbleiterbedarfs durch das automatisierte Fahren (2020, 2025, 2030) ..	42
Abbildung 27:	Entwicklung der Umsätze mit Halbleitern im Automobilmarkt (2020, 2025)	44
Abbildung 28:	Globales Wertschöpfungsnetzwerk	46
Abbildung 29:	Ländervergleich der Auswirkungen weiterer Lieferengpässe (2022)	48
Abbildung 30:	Qualifikationsniveau der deutschen Beschäftigten im europäischen Vergleich (2020)	50
Abbildung 31:	Abschlüsse in Elektronik und Elektrotechnik an deutschen Hochschulen (2010–2020)	51
Abbildung 32:	Emissionen der europäischen Halbleiterindustrie aus PFC (2010–2020)	53
Abbildung 33:	Zusätzlicher Halbleiterbedarf je Fahrzeug durch Elektromobilität (2018–2027)	55
Abbildung 34:	Relevante Standortfaktoren der Halbleiterindustrie	63
Abbildung 35:	Produktionsstandorte der wichtigsten Halbleiterunternehmen in Europa	65

Abkürzungsverzeichnis

ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
CPU	Central Processing Unit
ct.	Cent
DNSH	Do No Significant Harm
EDA	Electronic Design Automation
EPA	Europäisches Patentamt
EPI	European Processor Initiative
ESCO	European Skills, Competences, Qualifications and Occupations
EU	Europäische Union
EUV	Extreme Ultra Violet
FuE	Forschung und Entwicklung
G-20	Gruppe der zwanzig wichtigsten Industrie- und Schwellenländer
GPS	Global Positioning System
GU	Gemeinsames Unternehmen
HFKW	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
IDM	Integrated Device Manufacturer
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IMEC	Interuniversity Microelectronics Centre
IoT	Internet of Things
IP	Intellectual Property
IPCEI	Important Project of Common European Interest
IT	Informationstechnologie
JPO	Japanisches Patentamt
KDT	Key Digital Technologies
Kfz	Kraftfahrzeug
KI	Künstliche Intelligenz
KIPO	Koreanisches Amt für geistiges Eigentum
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
kWh	Kilowattstunde
LED	Light Emitting Diode
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches-System
METIS	Microelectronics Skills Strategy
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik
MWh	Megawattstunde
NIPA	National Intellectual Property Administration der Volksrepublik China
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSAT	Outsourced Semiconductor Assembly and Test
p. a.	per annum
PFAS	Per- und Polyfluoralkylsubstanzen
PFC	Per- und polyfluorierte Chemikalien
RAN	Radio Access Network
RISC-V	Reduced Instruction Set Computers-V („five“)
SAE	Society of Automotive Engineers
TTC	EU-US Trade and Technology Council
TVS	Transient Voltage Suppressor
USPTO	US-amerikanisches Patent- und Markenamt

Glossar

Aktuator (auch Aktor): Bauteil, das ein elektrisches Signal in Wirkungen umsetzt, beispielsweise in eine Bewegung oder in Veränderungen physikalischer Größen wie Druck oder Temperatur.

Analoger integrierter Schaltkreis: Integrierter Schaltkreis, der analoge Signale wie beispielsweise Strom, Radiowellen oder Licht erzeugt oder umwandelt (im Gegensatz zum digitalen Halbleiter, der Signale mit diskreten Werten wie null und eins verarbeitet).

Anwendungsspezifischer integrierter Schaltkreis (ASIC): Individuell für eine spezifische Anwendung entwickelter Schaltkreis (im Gegensatz zu universellen integrierten Schaltungen, die eine Vielzahl verschiedener Aufgaben bewältigen können); wegen der Anpassung ihrer Architektur auf ein spezifisches Problem besonders effizient.

Befehlssatzarchitektur: Definiert – vereinfacht gesprochen – das „Innenleben“ und die grundlegenden Anweisungen eines Mikroprozessors und legt fest, wie die Hardware von der Software gesteuert wird.

Backend: Gesamtheit der Produktionsschritte, bei der die im Frontend hergestellten einzelnen integrierten Schaltkreise zugeschnitten, getestet und verpackt werden.

More than Moore / Beyond Moore: Technologischer Ansatz, bei dem Leistungssteigerungen von Halbleitern erzielt werden, die nicht auf einer Verkleinerung der Strukturgrößen nach dem Mooreschen Gesetz basieren. Beispiele für solche Innovationen sind die Integration unterschiedlicher, zum Beispiel analoger Technologien, neue Aufbau- und Verbindungstechniken oder die Verwendung von neuen Materialien.

Chip: Umgangssprachliche Bezeichnung für einen integrierten Schaltkreis.

Diode: Passives Bauelement, das Strom bei angelegter Spannung in einer Richtung leitet und in der anderen sperrt.

Diskretes Bauelement: Einzelnes Halbleiterbauelement, zum Beispiel eine Diode oder ein Transistor. (Der Gegensatz ist ein integrierter Schaltkreis, in dem eine Vielzahl von Bauelementen integriert ist.)

EDA-Software: Software, die für den Entwurf und die Simulation von integrierten Schaltkreisen genutzt wird.

Edge-Computing: Ansätze, um Dienste zur Speicherung und Verarbeitung von Daten, wie sie üblicherweise in zentralen Rechenzentren (Cloud) durchgeführt werden, näher am Endgerät zu ermöglichen, beispielsweise in den nächstgelegenen Netzwerkknoten. Dies kann Vorteile mit sich bringen, zum Beispiel hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit und Datensicherheit.

EUV-Lithografie: Technik, bei der mithilfe eines Belichtungswerkzeugs das Schaltkreismuster auf den Wafer übertragen wird. Extrem ultraviolettes Licht (EUV) hat besonders kurze Wellenlängen und ermöglicht die Herstellung von Bauteilen mit Strukturgrößen von weniger als zehn Nanometern.

Fab: Anlage zur Frontend-Fertigung von integrierten Schaltkreisen.

Fabless-Unternehmen: Unternehmen, das Halbleiterprodukte wie integrierte Schaltkreise entwirft und vertreibt, diese aber nicht selbst herstellt. Fabless-Unternehmen greifen für die Halbleiterherstellung auf Auftragsfertiger („Foundries“) zurück.

Foundry: Halbleiterunternehmen, das im Auftrag von anderen Unternehmen Halbleiter fertigt.

Frontend: Schritt in der Produktionskette von Halbleitern, bei dem in einem mehrstufigen Prozess auf einem Wafer viele identische integrierte Schaltkreise hergestellt werden. Zur Herstellung von Halbleiterchips werden sowohl chemische als auch physikalische Vorgänge genutzt. Auf die Frontend-Verarbeitung folgt das Backend.

Halbleiter: Element mit einem elektrischen Widerstand, der zwischen dem eines Isolators und dem eines Leiters liegt, und das je nach Verarbeitung und angelegter elektrischer Spannung den Stromfluss leitet oder blockiert. Das bekannteste Halbleitermaterial ist Silizium (Si).

Integrated Device Manufacturer (IDM): Halbleiterhersteller, der alle drei wesentlichen Halbleiter-Produktionsschritte (Entwurf, Produktion sowie Montage und Prüfung) im eigenen Unternehmen abdeckt.

Integrierter Schaltkreis: auch integrierte Schaltung, englisch: „integrated circuit“, kurz IC, steht für elektronische Schaltung, bei der verschiedene Funktionselemente wie Transistoren, Widerstände oder Kondensatoren in einem Stück Halbleitersubstrat integriert sind.

Internet der Dinge (engl. Internet of Things): Verbindung zwischen physischen Objekten und der virtuellen Welt, bei der intelligente Geräte und Maschinen sowohl miteinander als auch mit dem Internet vernetzt sind.

IP-Block: Als IP-Block wird ein vielfach einsetzbarer, vorgefertigter Funktionsblock eines Chipentwurfs bezeichnet, der als Bauplan für bestimmte Funktionen dient.

Leistungshalbleiter: Halbleiterbauelemente, die für das Steuern und Schalten hoher elektrischer Ströme und Spannungen ausgelegt sind; sie ermöglichen Anwendungen wie Elektromobilität und werden unter anderem benötigt, um erneuerbare Energien in das Stromnetz einzuspeisen und die Energieeffizienz in der Industrie zu steigern.

Logik-IC: Integrierter Schaltkreis mit verschiedenen Schaltkreiselementen, die mathematische Operationen ausführen; sie können als „Gehirn“ eines elektronischen Geräts betrachtet werden.

Mikro-Elektro-Mechanisches System (MEMS): Bauelemente, in die elektronische und mechanische Funktionen integriert sind, zum Beispiel Beschleunigungssensoren.

Mikroprozessor: Eine Art von Logikchip, die beispielsweise als Zentraleinheit (CPU) von Computern eingesetzt wird.

Mixed-Signal-Halbleiter: Integrierter Schaltkreis, der sowohl analoge als auch digitale Signale verarbeitet.

Moore'sches Gesetz: Nach dem Intel-Mitgründer Gordon Moore benannte Regel, nach der sich durch die Technologieentwicklung die Leistungsfähigkeit von Chips mit der Zeit bei gleichbleibenden Kosten exponentiell erhöht. Wird im Wesentlichen durch eine stetige Verkleinerung der Halbleiterstrukturen, insbesondere der Transistoren, erreicht.

OpenRAN: Open Radio Access Network (offenes Funkzugangsnetz) im Mobilfunk, steht für den Einsatz universell nutzbarer Hardware für verschiedene Frequenzbereiche aufgrund offener Schnittstellen. Die jeweilige Umsetzung kann durch herstellerunabhängige, universell nutzbare Software erfolgen.

Optoelektronik: Kombination aus Optik und Halbleiterelektronik; die entsprechenden Bauteile wandeln elektrische Signale in Licht um oder sie empfangen Lichtsignale und setzen diese in elektrische Ströme um.

OSAT-Unternehmen: Unternehmen, das sich auf die Backend-Fertigung von Halbleitern spezialisiert hat.

RISC-V: Quelloffene Befehlssatzarchitektur, die zu Forschungs- und Ausbildungszwecken im Jahr 2010 an der University of California in Berkeley entwickelt wurde.

Reinraum: Geschlossener Bereich, der hinsichtlich Luftverschmutzung, Feuchtigkeit und Temperatur für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen geeignet ist.

Sensor: Halbleiterbauteil, das chemische oder physikalische Größen wie Beschleunigung, Druck oder Temperatur erfasst und in elektrische Signale umwandelt.

Strukturgröße: Größe des kleinsten, in einem Fertigungsprozess darstellbaren Halbleiterbauteils in Nanometern; wird häufig zur Beschreibung einer Generation von Produktionstechnologien verwendet (zum Beispiel folgt auf die 65-Nanometer-Technologie die 45-Nanometer-Technologie).

Transistor: Bauteil, das zur Verstärkung oder zum Schalten elektronischer Signale und elektrischer Energie verwendet wird; Hauptbestandteil von integrierten Schaltkreisen, die mehrere Milliarden Transistoren enthalten können.

Verbindungshalbleiter: Unterscheidet sich von einem Elementarhalbleiter dadurch, dass er aus zwei oder mehr verschiedenen chemischen Elementen besteht und dadurch andere physikalische Eigenschaften aufweist.

Verpackung: Verfahren, bei dem ein Chip in einen Schutzbehälter (Gehäuse) eingeschlossen und mit Strom- und Signalanschlüssen versehen wird.

Wafer: Runde Scheibe aus Halbleitermaterial, oft weniger als einen Millimeter dick. Auf der Oberfläche werden im Wafer-Herstellungsprozess durch verschiedene Bearbeitungsverfahren integrierte Schaltkreise implementiert. Die Größe der Wafer wird durch ihren Durchmesser definiert, zum Beispiel 300 Millimeter.

1. Einleitung

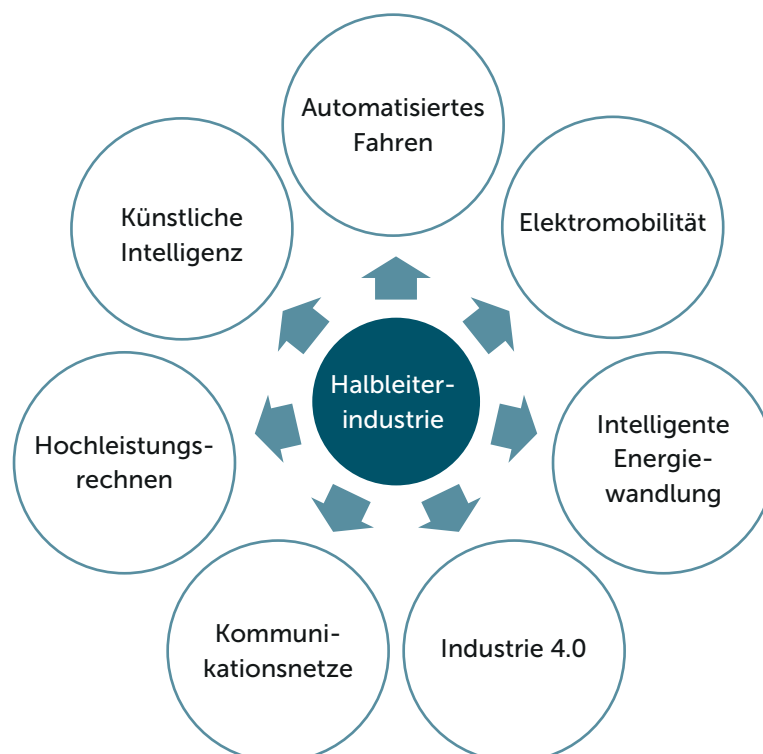
Nicht nur Smartphones und Computer würden ohne Halbleiter nicht funktionieren, auch für die meisten digitalen Zukunftsanwendungen ist halbleiterbasierte Mikroelektronik unverzichtbar. Halbleiter, auch Chips genannt, fungieren in zahlreichen Wirtschaftsbereichen als Innovationsmotor. Sie sind unverzichtbar für eine vernetzte klimafreundliche Mobilität, intelligente Produktionsmaschinen, eine effiziente und klimaschonende Energieerzeugung, für Medizintechnik und schnelle Kommunikationsnetze (vgl. Abbildung 1). Damit sind Halbleiter die Grundlage von Lösungen für viele gesellschaftliche und wirtschaftliche Herausforderungen und eine zentrale Schlüsseltechnologie für eine digitale und grüne Zukunft Europas.

Europa verfügt nicht nur über hochinnovative Halbleiterhersteller, sondern über zahlreiche Zulieferer für die führenden Halbleiterunternehmen weltweit. Die euro-

päischen Firmen in der Halbleiterindustrie sind intensiv in globale Wertschöpfungsnetze eingebunden, denn Halbleiter werden in hoch spezialisierten und international stark vernetzten Wissens- und Wertschöpfungsketten produziert. Ein Chip reist etwa zweieinhalb Mal um die Welt, bevor er fertiggestellt ist. Wenn die stark verzweigten internationalen Halbleiterlieferketten unter Druck geraten, wie beispielsweise in der Corona-Krise, hat dies konkrete Auswirkungen auf die europäische Wirtschaft, wie die Verschiebung der Produktion von Fahrzeugen der deutschen Autohersteller zuletzt gezeigt hat.

Aufgrund der Schlüsselposition, die Halbleiter für die Wettbewerbsfähigkeit Europas und die Gestaltung des digitalen Wandels einnehmen, hat die Halbleiterindustrie in den vergangenen Jahren in vielen Ländern erhebliche Aufmerksamkeit vonseiten der politischen Entschei-

Abbildung 1: Anwendungsbereiche von Halbleitern



dungsträger erhalten. Im Dezember 2020 unterzeichnete die Mehrheit der EU-Mitgliedstaaten eine gemeinsame Erklärung mit dem Ziel, erheblich in die Halbleiterindustrie der EU zu investieren. Im Digitalen Kompass 2030 hat die Europäische Kommission ambitionierte Ziele für die nächsten zehn Jahre definiert: einen europäischen Anteil am Halbleitermarkt von 20 Prozent und eine technologisch führende Chipfertigung in Europa.

Der Branchenausblick 2030+ „Die Halbleiterindustrie“ untersucht die folgenden Fragen für die Halbleiterindustrie in Europa und Deutschland, deren wichtigstes Halbleiterland:

- Wie ist die europäische Halbleiterindustrie aktuell aufgestellt?
- Welchen Beitrag leistet die europäische Halbleiterindustrie aktuell und zukünftig zur Digitalisierung, Klimawende und Fachkräftesicherung?
- Welche Rahmenbedingungen beeinflussen die zukünftige Entwicklung der Industrie?
- Mit Blick auf Innovation, Transformation und Leistungsfähigkeit in den kommenden Jahren:
Welche Stärken und Schwächen, Risiken und Chancen ergeben sich für den europäischen und deutschen Halbleiterstandort?

2

2. Ein erster Überblick zur Halbleiterindustrie

2.1 Die wichtigsten Produkte und Anwendungen der Halbleiterindustrie

Moderne Halbleiter bestehen aus Milliarden von Transistoren, die auf einem winzigen Stück eines glasartigen Materials namens Silizium zusammengefügt sind. Jeder Transistor ist kleiner als die Zellen im Körper. Er schaltet sich über 100 Milliarden Mal pro Sekunde ein und aus, um Elektrizität auf eine bestimmte Weise fließen zu lassen. Dieser Stromfluss bestimmt das Verhalten des Halbleiters und seine Anwendung: Signale können verstärkt, Berechnungen durchgeführt, Informationen verschiedener Objekte verbunden, Daten von einem Ort zum anderen bewegt und Handlungen übernommen werden.

Typische Halbleiterprodukte

Halbleiter lassen sich unterschiedlich kategorisieren. Beispielsweise kann man sie nach ihrer Funktion in integrierte Schaltkreise (sogenannte Chips), Sensoren, optische Bauelemente und diskrete Bauelemente unterteilen (vgl. Abbildung 2). Sensoren messen Eigenschaften wie etwa Druck, Position oder Temperatur und geben hierzu eine Rückmeldung. Optische Bauelemente dienen der Messung optischer Signale. Bei diskreten Bauelementen handelt es sich um einzelne Halbleiterbauelemente wie Transistoren, Dioden oder Gleichrichter, die nicht in einem integrierten Schaltkreis verbaut sind.

Integrierte Schaltkreise beziehungsweise Chips werden weiter unterschieden in Speicher, Mikroprozessoren sowie logische und analoge Chips. Speicher-, Mikro- und Logikchips erzeugen und verarbeiten digitale Signale. Analoge Halbleiter und sogenannte „mixed-signal-Halbleiter“ wie Sensoren oder Stromversorgungschips stellen eine Verbindung zwischen der digitalen Elektronik und der analogen Außenwelt dar. Sie lesen, verarbeiten oder erzeugen Sprache, Radiowellen oder Licht. Nicht zuletzt, weil sie die Spannungsregulierung übernehmen, sind analoge Halbleiter essenzieller Bestandteil der meisten elektronischen Geräte. In einem Automobil der Mittelklasse sind aktuell beispielsweise rund 100 Sensoren verbaut,

die physikalische Größen wie Temperaturen, Drehzahlen, Winkel sowie Druckpegel erfassen und in elektrische Signale umformen.¹ Analoge Halbleiter sind im Vergleich zu digitalen weniger stark standardisiert, sondern auf bestimmte Aufgaben in bestimmten Märkten und verschiedenen physischen Anwendungsbereichen zugeschnitten.

Abbildung 3 gibt die weltweiten Anteile der oben dargestellten Halbleiterprodukte im Jahr 2020 und deren Entwicklung zwischen 2000 und 2020 wieder. Im Jahr 2020 hatte der weltweite Halbleitermarkt ein Volumen von 440 Milliarden US-Dollar.² Chips dominierten mit über 80 Prozent des weltweiten Umsatzes den Halbleitermarkt deutlich. Mit jeweils etwa 27 Prozent des Marktanteils waren Speicher sowie Mikroprozessoren die beiden größten Halbleitersegmente im Teilsegment. Neben den Chips entfielen die verbleibenden 18 Prozent der Halbleiterumsätze auf die Bereiche Sensoren, Optoelektronik und diskrete Halbleiter.

Sensoren und Optoelektronik sind zwar zwei vergleichsweise kleine Teilbereiche des Halbleitermarktes, beide sind allerdings überdurchschnittlich stark gewachsen. Besonders der Bereich Sensoren hat sich, ausgehend von einem sehr geringen Niveau, mit einem jährlichen Wachstum von 35 Prozent seit 2000 enorm dynamisch entwickelt.

Anwendungsbereiche von Halbleitern

Halbleiter kommen in verschiedensten Produkten zum Einsatz. Die beiden größten Anwendungsbereiche für Halbleiter sind Datenverarbeitung und -speicherung (beispielsweise in Rechenzentren, Computern und Notebooks) sowie Kommunikation (Mobiltelefone, Tablets sowie Kommunikationsinfrastruktur). Je knapp ein Drittel der weltweiten Halbleiterumsätze entfiel 2020 auf diese Bereiche (vgl. Abbildung 4). Die große Bedeutung der Computer- und Kommunikationsgerätehersteller wird auch deutlich, wenn man die weltweit größten Halbleiterkunden betrachtet: Apple, Samsung Electronics, Huawei, Lenovo und Dell Technologies.³ Die Bereiche Automotive,

¹ Bundesministerium für Bildung und Forschung 2021a.

² ZVEI 2021a.

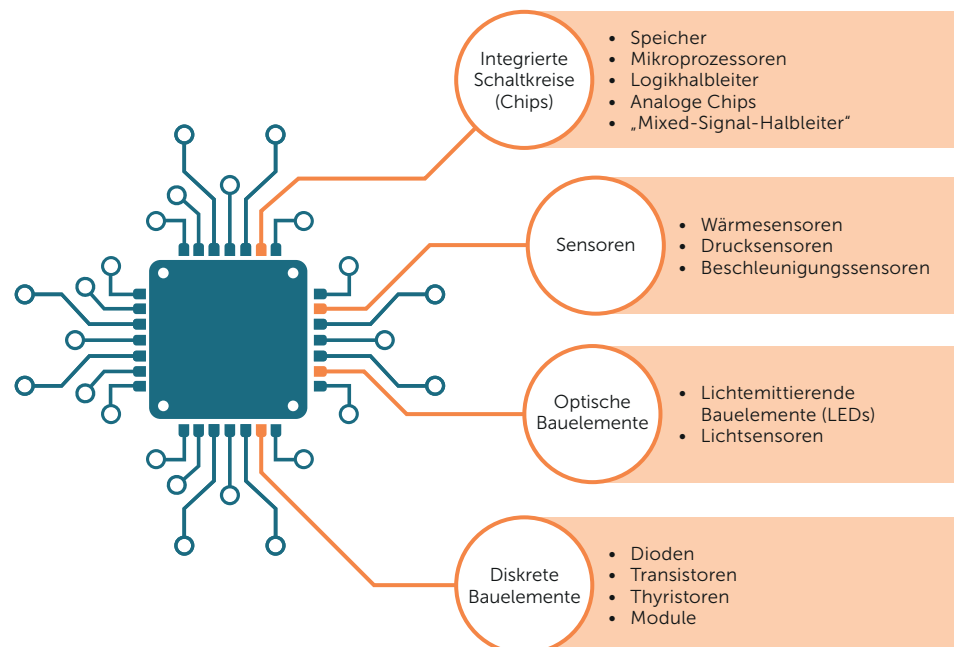
³ ZVEI 2021c.

Abbildung 2: Halbleiterprodukte und -funktionen

Funktionen der Halbleiter

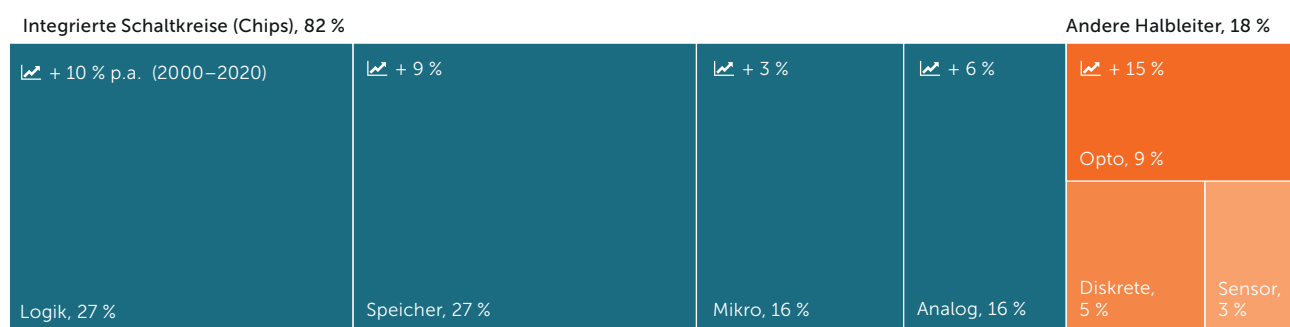


Halbleiterprodukte



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Toshiba 2018

Abbildung 3: Ist-Stand der Marktanteile (2020) und jährliche Entwicklung (2000–2020) des Marktvolumens von Halbleiterprodukten am weltweiten Halbleitermarkt



Mittleres jährliches Wachstum 2000–2020. Geringfügige Abweichungen durch Runden möglich.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf ZVEI 2021a

Industrie und Unterhaltung stellen je zwölf Prozent des weltweiten Marktanteils.

Betrachtet man die Veränderung der Anteile zwischen 2005 und 2020, zeigt sich, dass die Bereiche Datenverarbeitung- und Speicherung sowie Unterhaltung seit 2005 relativ an Bedeutung verloren, während die Anwen-

dungsbereiche Kommunikation, Automotive und insbesondere Industrie stark wuchsen. Dies ist ein Trend, der sich potenziell weiter fortsetzen könnte.

Neben diesen Anwendungen gewinnt vor allem auch die sogenannte Leistungselektronik an Bedeutung. Unter Leistungselektronik werden Halbleiterprodukte zusam-

mengefasst, die der Steuerung, der Umformung oder dem Schalten von elektrischer Energie dienen. Dieser Teilbereich spielt eine wichtige Rolle für die Energiewende, da durch eine moderne Elektronik Verluste bei der Umwandlung von Energie entlang der Energiewertschöpfungskette von der Stromerzeugung, der Übertragung im Netz bis hin zur Nutzung im Endgerät minimiert werden können. Leistungselektronik spielt auch eine wichtige Rolle für die Steigerung der Energieeffizienz,

beispielsweise über intelligente Motorensteuerung oder Beleuchtung.

2.2 Die typische Wertschöpfungskette und deren Akteure

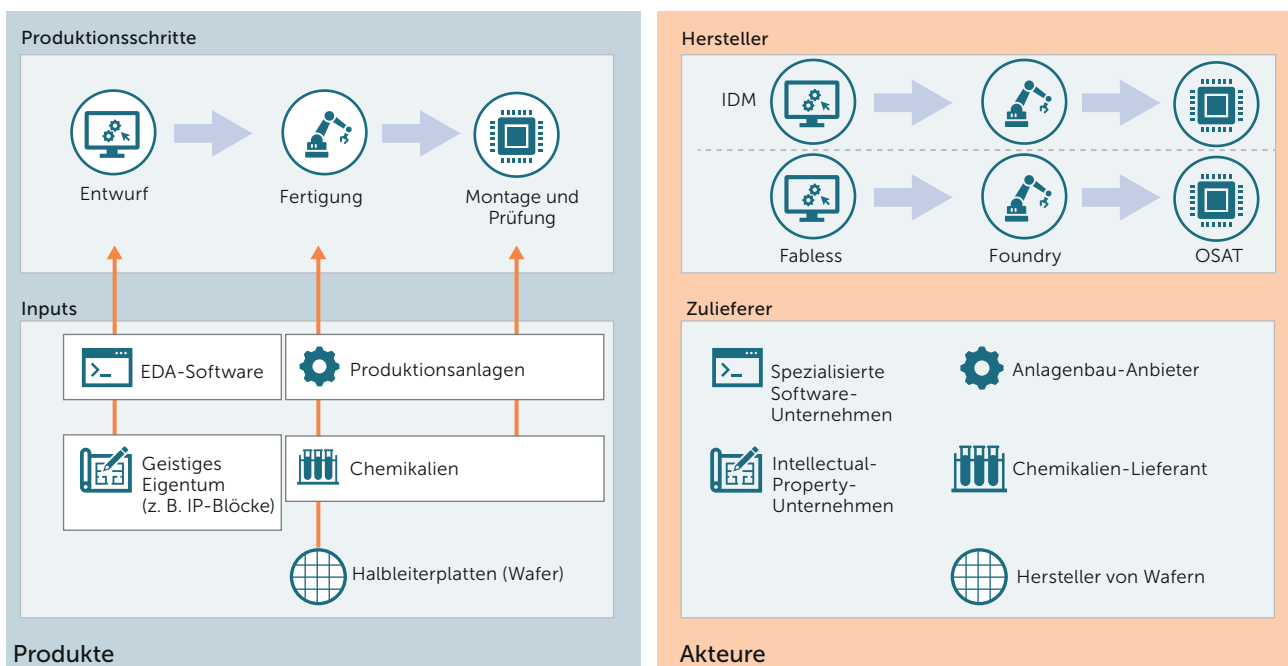
In der Herstellung eines Halbleiters lassen sich drei wesentliche Wertschöpfungsstufen unterscheiden: Entwurf, Chipfertigung sowie Montage und Prüfung. Diese benötigen nicht nur gänzlich unterschiedliche Inputfaktoren,

Abbildung 4: Anteil Marktsegmente für Halbleiter nach Anwendungsbereich weltweit (2005, 2020)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf ZVEI 2021a

Abbildung 5: Die Halbleiter-Wertschöpfungskette



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Kleinhans & Baisakova 2020

sondern werden auch von unterschiedlichen Unternehmen bedient (vgl. Abbildung 5). Jeder Produktionsschritt ist demnach einer unterschiedlichen Geschäftsdynamik unterworfen, da nur wenige Unternehmen, die sogenannten integrierten Gerätehersteller (IDMs) wie Intel, Samsung oder Infineon, alle drei Schritte unternehmensintern umsetzen. Neben den wenigen IDMs haben sich deshalb viele Unternehmen herausgebildet, die sich auf jeweils eine Stufe der Halbleiter-Wertschöpfungskette spezialisieren.

Entwurf beziehungsweise Chipdesign

In der ersten Wertschöpfungsstufe Entwurf („Chipdesign“) werden die späteren Produkte „erdacht“. Das Chipdesign ist sehr forschungsintensiv. Damit verbunden sind nicht nur der Bedarf an entsprechenden Fachkräften, sondern auch enorme Ausgaben für Forschung und Entwicklung (FuE). Dies gilt vor allem für immer kleiner werdende Chips. So kostet die Entwicklung eines 5-Nanometer-Chips beispielsweise etwa 540 Millionen US-Dollar, während 65-Nanometer-Chips noch mit einem FuE-Kapitaleinsatz von etwa 28 Millionen US-Dollar entwickelt werden können (vgl. Abbildung 6). Fabless-Unternehmen geben daher in der Regel etwa 20 Prozent ihrer Einnahmen für FuE aus.⁴

Verschiedene Akteure spielen in der Wertschöpfungsstufe Chipentwurf eine Rolle. Allen voran sind die sogenannten Fabless-Unternehmen zu nennen, beispielsweise Qualcomm und Nvidia aus den USA und HiSilicon aus China. Diese Unternehmen entwerfen ausschließlich Chips und übergeben die Herstellung an Auftragsfertiger, weil sie keine eigenen Produktionsstätten haben. Auch mehr und mehr halbleiterfremde Firmen nehmen eine vergleichbare Rolle ein. Neue Player wie Alibaba, Tesla, Facebook und

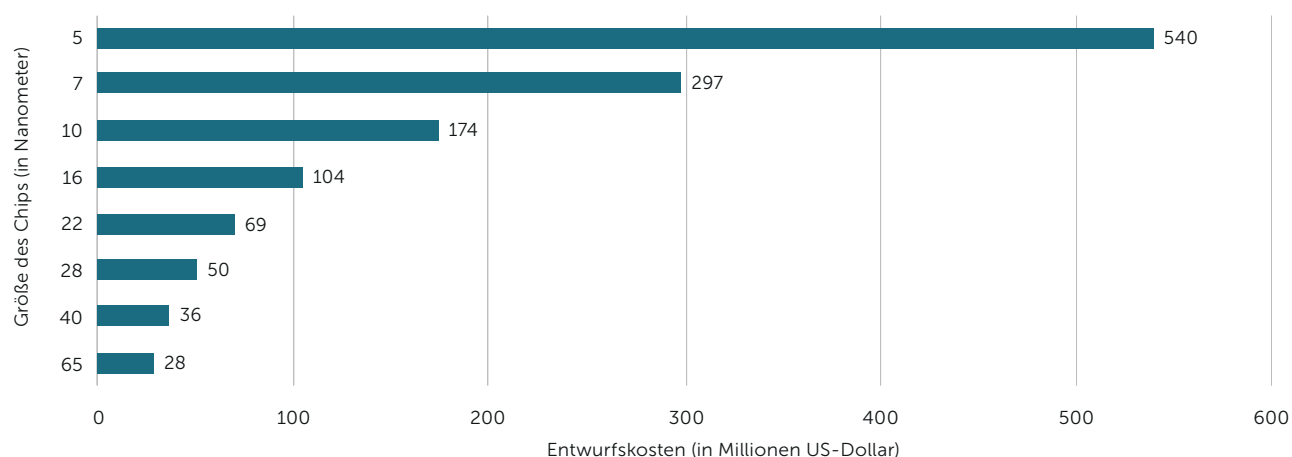
der Automobilzulieferer Bosch haben begonnen, eigene anwendungsspezifische Chips (ASIC) zu entwickeln.

Der Chipentwurf erfolgt meist softwaregestützt und zunehmend automatisiert mithilfe von sogenannten EDA-Anwendungen (EDA steht für „electronic design automation“). Die Entwurfsautomatisierung ist der forschungsintensivste Teil der gesamten Halbleiterwertschöpfungskette und wird meist von spezialisierten Software-Unternehmen übernommen. Kennzeichnend für die aktuellen Entwicklungen ist eine wachsende Komplexität, die eine Entwurfsautomatisierung nicht nur für jeden einzelnen Chip, sondern auch auf der Ebene des Elektroniksystems erfordert. Wichtige Unternehmen in diesem Segment sind Cadence Design Systems, Synopsys und Mentor, die alle in den USA lokalisiert sind.

Neben spezialisierten IT-Unternehmen sind auch sogenannte Intellectual-Property-Unternehmen in der Wertschöpfungsstufe Entwurf beteiligt. Als Funktionsblock („IP-Core“) wird ein vielfach einsetzbarer, vorgefertigter Funktionsblock eines Chipentwurfs bezeichnet, der als „Bauplan“ für bestimmte Funktionen dient. IP-Unternehmen spezialisieren sich auf die Entwicklung einzelner Funktionsblöcke und lizenzieren das produzierte geistige Eigentum an ihre Kunden.

Ein wichtiges Intellectual-Property-Unternehmen ist ARM Limited mit Sitz im Vereinigten Königreich. Das Unternehmen, das 2016 von der japanischen SoftBank übernommen wurde, stellt keine eigenen Chips her, sondern entwickelt und lizenziert geistiges Eigentum für andere Halbleiterunternehmen. Die ARM-Architektur (siehe Exkurs Prozessorarchitekturen) kommt in mobilen Anwendungen zum Einsatz, wobei Unternehmen wie Apple,

Abbildung 6: Kosten für den Chipentwurf nach Größe des Chips (2020)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf McKinsey 2020

⁴ Randall 2021.

Huawei und Samsung entweder Entwicklungslizenzen oder Funktionsblöcke von ARM kaufen, um darauf aufbauend Prozessoren zu entwickeln. Da die beiden mobilen Betriebssysteme (Googles Android und Apples iOS) für ARM-basierte Prozessoren entwickelt wurden, hängen Unternehmen, die mobile Endgeräte entwickeln, vom Zugang zu geistigem Eigentum von ARM ab.

Im Kontrast zu dieser proprietären Chiparchitektur nimmt die Bedeutung von offenen Chiparchitekturen zu. Dieser erlauben es, Mikroprozessoren zu entwerfen, herzustellen, weiterzuentwickeln und zu verkaufen, ohne Patentzahlungen zu leisten. So setzt beispielsweise die Initiative „CPU made in EU“ der European-Processor-Initiative auf die offene CPU-Architektur. Dies senkt Entwicklungskosten, reduziert Abhängigkeiten von einzelnen Unternehmen und senkt die Exposition von einzelnen Unternehmen in internationalen Handelsstreitigkeiten, wie die Auseinandersetzungen um ARM gezeigt haben.⁵

Exkurs: Prozessorarchitekturen

Prozessoren, die zum Beispiel als zentralen Recheneinheiten (CPUs) von Computern, Smartphones und Rechenzentren zum Einsatz kommen, gehören zu den wichtigen Halbleitertechnologien. Bevor ein Prozessor entwickelt wird, muss festgelegt werden, welche Befehlssatzarchitektur dem Prozessor zugrunde liegt. Die Architektur definiert das „Innenleben“ und die grundlegenden Anweisungen des Prozessors. Da in einer Befehlssatzarchitektur die Halbleiter-Verdrahtung (Hardware) und die Software eine Einheit bilden, ist Software nur mit einer bestimmten Prozessorarchitektur kompatibel. Diese proprietäre Chiparchitektur führt im Wesentlichen zu einer starken Anbieterbindung. Fast jeder Computer basiert beispielsweise auf x86-Prozessoren. Nur Intel, AMD und VIA Technologies (Taiwan) besitzen die Patente, um x86-basierte Prozessoren herzustellen und weiterzuentwickeln. Im Gegensatz dazu ermöglichen es offene Chiparchitekturen beziehungsweise Standards Halbleiterunternehmen, Mikroprozessoren ohne Patentzahlungen zu entwerfen, herzustellen, weiterzuentwickeln und zu verkaufen.

Eine Befehlssatzarchitektur, deren Bedeutung stark zugenommen hat, ist RISC-V. Es handelt sich um eine quelloffene Befehlssatzarchitektur, die zu Forschungs- und Ausbildungszwecken im Jahr 2010 an der University of California in Berkeley entwickelt wurde.

Mittlerweile beteiligen sich Entwickler*innen von Hard- und Software weltweit an der Architektur und eine Vielzahl von Unternehmen bietet RISC-V-Hardware an oder hat diese angekündigt. RISC-V ist für vielfältige Einsatzbereiche interessant. Neue Produkte auf der Grundlage von RISC-V können Innovationen im Chipdesign voranbringen. Beispielsweise wird eine zunehmende Bedeutung der RISC-V-Architektur im Halbleitermarkt für Automobile prognostiziert.⁶ Unternehmen nutzen RISC-V-Kerne zudem bereits für Bildsensoren für KI und Anwendungen im Sicherheitsmanagement. Ein Beispiel sind IoT-Chips, die in Dresden vom Sensor-Spezialisten Sensry, der Micro-Systems-Technologie-Gruppe, dem Chipwerk von GlobalFoundries in Dresden sowie dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS entwickelt werden. Die Nutzung der RISC-V-Architektur trägt zur Vertrauenswürdigkeit und Sicherheit der IoT-Anwendungen bei.⁷ Auch für Start-ups ist RISC-V interessant, da potenziell weniger oder keine Lizenzgebühren anfallen. Besonders in China wird RISC-V bereits umfangreich eingesetzt. Rund ein Drittel der Mitglieder der RISC-V Foundation stammt aus China.⁸ Hintergrund ist, dass RISC-V als quelloffener Standard keinen Exportbeschränkungen unterliegt und Halbleiterunternehmen somit unabhängiger vom Zugang zum geistigen Eigentum anderer Unternehmen macht.

Unabhängig von der Prozessorarchitektur ist eine enge Zusammenarbeit aller Akteure innerhalb der Wertschöpfungsstufe, aber auch mit der nachgelagerten Stufe – der Fertigung – notwendig. Denn sowohl die neuen, halbleiterfremden Player im Marktsegment Entwurf als auch die Fabless-Unternehmen greifen auf die Fabriken von Auftragsfertigern zurück. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Chipentwicklern und Fertigungsbetrieben, da die Chipentwicklung ein tiefgreifendes Verständnis des Fertigungsprozesses voraussetzt.

Frontend-Fertigung

Im nächsten Schritt müssen die entworfenen Chips produziert werden. In der Wertschöpfungsstufe Fertigung werden aus sogenannten Wafern Halbleiterchips hergestellt. Unter Reinraumbedingungen werden hierbei mittels optischer, physikalischer und chemischer Verfahren auf einem Wafer Transistoren und deren Verbindungen implementiert, somit wird die Funktion der Chips bestimmt. Wafer sind dünne Scheiben aus reinen mono-kristallinen Materialien. Siliziumwafer haben dabei die größ-

⁵ ARM spielte eine wichtige Rolle in den Handelsstreitigkeiten zwischen den USA und China, denn das Unternehmen hat seinen Sitz im Vereinigten Königreich, betreibt aber FuE in den USA. Dennoch kam ARM zur Einschätzung, dass das geistige Eigentum mehrheitlich aus dem Vereinigten Königreich und nicht aus den USA stammt. Aufgrund dieser Einschätzung hatte Huawei auch nach dem amerikanischen Ausfuhrverbot noch Zugang zum größten Teil des geistigen Eigentums von ARM.

⁶ Eckstein 2021.

⁷ Zapp 2021.

⁸ Eckstein 2021.

te Bedeutung, wobei für manche Anwendungen auch Halbleiterplatten aus Galliumarsenid, Galliumnitrid und Siliziumkarbid zum Einsatz kommen. Zur Herstellung von Chips werden somit neben den für die Produktion notwendigen komplexen Maschinen und Anlagen vor allem auch Chemikalien, zum Beispiel zum Strukturieren, Abscheiden, Ätzen, Polieren und Reinigen, sowie Siliziumscheiben benötigt.

Der komplexe Fertigungsprozess, in den aus den Rohwafern die Halbleiterchips hergestellt werden, kann je nach Halbleitertyp von einigen Wochen bis zu mehreren Monaten dauern. Die Halbleiterfertigung ist technologisch anspruchsvoll und hoch spezialisiert. Außerdem ist sie äußerst kapitalintensiv, wobei auch hier die Größe der gefertigten Chips eine wichtige Rolle spielt (vgl. Abbildung 7).

Wichtigster Akteur der Frontend-Fertigung sind sogenannte Foundries, die in ihren Fabriken die Halbleiter herstellen. Aufgrund der Kapitalintensität und der Notwendigkeit eines sehr spezifischen Prozesswissens ist der Markt enorm konzentriert. TSMC und Samsung als IDM mit umfangreichen Produktionskapazitäten sind die einzigen Hersteller, die Chips von sieben Nanometern oder kleiner auch im Auftrag anderer Firmen produzieren. Weitere wichtige Unternehmen der Chipfertigung sind GlobalFoundries mit Hauptsitz in den Vereinigten Staaten, UMC aus Taiwan und SMIC aus China.

Die Ausrüstung für die Anlagen zur Halbleiterfertigung basiert auf einer Vielzahl von Vorprodukten von spezialisierten klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU). Die größten KMU-Anlagenbau-Anbieter im Halbleitermarkt sind Applied Materials (AMAT), Lam Research

(LAM) und KLA in den Vereinigten Staaten, ASML in Europa und Tokyo Electron (TEL) in Japan. Auch diese KMU sind wiederum auf weitere hoch spezialisierte Zulieferer angewiesen. ASML allein hat beispielsweise 5.000 Zulieferer in Europa, den Vereinigten Staaten und Asien.⁹

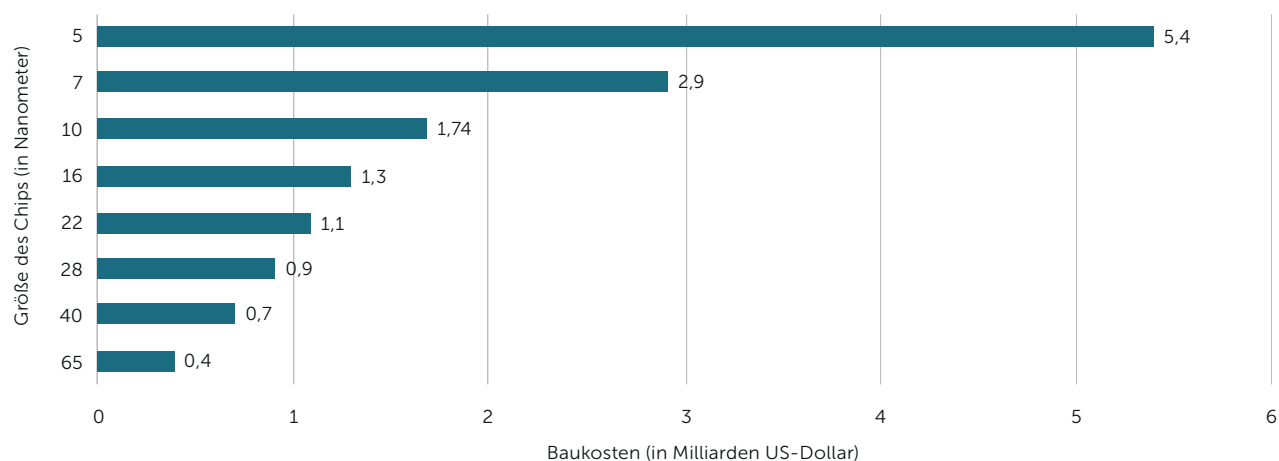
Ebenfalls relevant sind Chemikalienlieferanten. Der Markt wird hauptsächlich von japanischen Unternehmen wie Shin-Etsu, Sumitomo Chemicals und Mitsui Chemicals bedient, aber auch europäische Unternehmen wie BASF, Linde und Merck KGaA sind wichtige Lieferanten für die Halbleiterindustrie.

Wafer sind eines der wichtigsten Vorprodukte im Produktionsschritt Halbleiterfertigung. Siliziumwafer sind die gängigsten, aber für bestimmte Anwendungen werden auch Wafer aus Galliumarsenid (GaAs), Galliumnitrid (GaN) und Siliziumkarbid (SiC) verwendet. Auch dieser Markt wird von wenigen Unternehmen dominiert: Shin-Etsu und Sumco in Japan, GlobalWafers aus Taiwan, Siltronic aus Europa und SK Siltron aus Südkorea.

Backend-Fertigung beziehungsweise Montage und Prüfung

Nach der Herstellung muss der Chip getestet, zusammengebaut und verpackt werden. Dieser letzte Schritt der Montage und Prüfung (Backend-Fertigung) wird von outsourced semiconductor assembly and test (OSAT) Unternehmen durchgeführt. Die Inputfaktoren sind analog zur Frontend-Fertigung Chemikalien und Zulieferer von Maschinen. Allerdings ist deren Kostenanteil in der Montage und Prüfung wesentlich geringer. Relevanter sind nunmehr Lohnkosten, da die Backend-Fertigung geringere Gewinnspannen als die Frontend-Fertigung birgt.

Abbildung 7: Baukosten für die Chipfertigung nach Größe des Chips (2020)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf McKinsey 2020

⁹ ASML 2020.

Der Markt ist weniger stark konzentriert. Dennoch haben taiwanesischen OSAT-Unternehmen wie die ASE Group mehr als die Hälfte des weltweiten Marktanteils. Amkor Technologies ist das einzige große OSAT-Unternehmen aus den Vereinigten Staaten.

Dieses Kapitel hat veranschaulicht, dass die Wertschöpfungskette von Halbleitern stark segmentiert ist und sehr unterschiedliche Inputfaktoren und Kostenstrukturen aufweist. Ein Ergebnis dessen ist, dass die Teilmärkte entlang der Wertschöpfungskette hoch konzentriert sind, während die gesamte Halbleiterproduktion durch eine hohe Arbeitsteilung zwischen den Akteuren der Wertschöpfungsstufen gekennzeichnet ist. Der Halbleiter-Produktionsprozess beruht demnach auf einer weltweiten Wertschöpfungskette, bei der das Endprodukt von verschiedenen, auf einen Teilmarkt spezialisierten Unternehmen global erstellt wird. Ein Chip reist mehrmals um die Welt, bis er seinen Platz in einem der vielen Produkte findet, das auf Chips angewiesen ist.

3. Die Halbleiterindustrie in Deutschland und Europa

3.1 Die europäische Halbleiterindustrie im internationalen Vergleich

Halbleiter werden – wie in Kapitel 2 dargestellt – in einer global verteilten und hoch spezialisierten Wertschöpfungskette hergestellt. Wie an der Verteilung der größten Unternehmen je Wertschöpfungsstufe ersichtlich wurde, haben sich in verschiedenen Ländern und Weltregionen unterschiedliche Spezialisierungen herausgebildet. Um zukünftige Entwicklungspotenziale der europäischen Halbleiterindustrie zu identifizieren, wird in diesem Kapitel untersucht, welchen Stellenwert die europäische Halbleiterindustrie bereits innehat, in welchen Teilbereichen der Halbleiterwertschöpfung sie gut aufgestellt ist und in welchen Bereichen noch Abhängigkeiten von ausländischen Akteuren bestehen.

Umsatzanteil

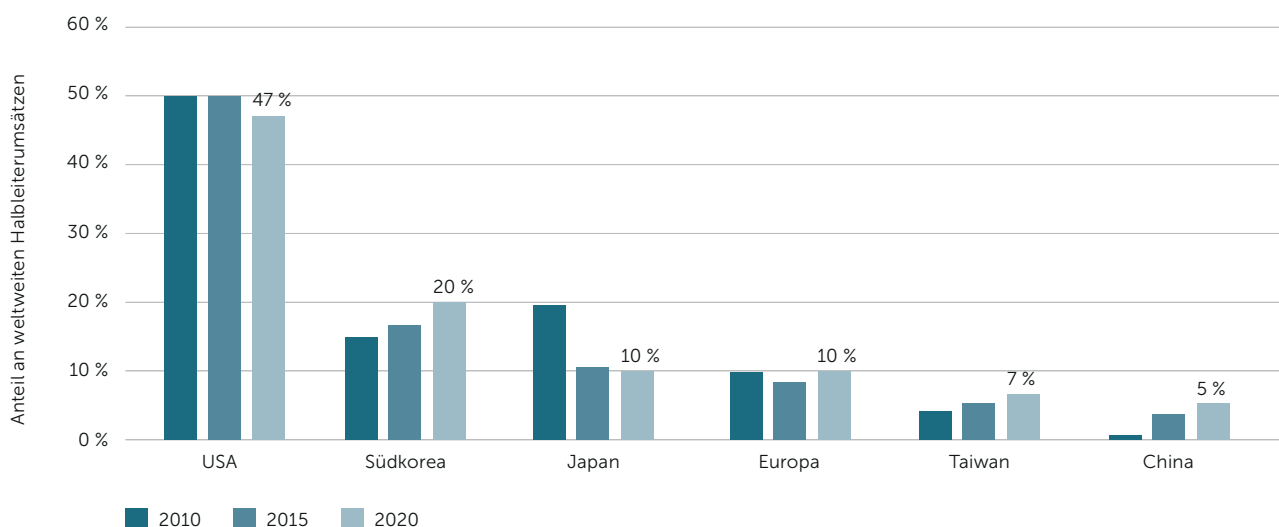
Weltweit betrug der Umsatz mit Halbleitern zuletzt rund 440 Milliarden US-Dollar, er verteilt sich auf nur fünf Länder und Europa.¹⁰ Der Markt wird dominiert von Unternehmen mit Sitz in den USA, die im zurückliegenden Zehnjahreszeitraum konstant rund die Hälfte der weltweiten Halbleiterumsätze

generierten. Demgegenüber lag der weltweite Marktanteil europäischer Halbleiterfirmen 2020 bei nur zehn Prozent (vgl. Abbildung 8). Taiwan, China und besonders Südkorea steigerten ihren Anteil an Halbleiterumsätzen, ausgehend von einem niedrigen Niveau. Im Gegensatz dazu verlor Japan Marktanteile. Auch Europa konnte seinen Anteil am weltweiten Umsatz nicht nennenswert steigern. Dennoch leisten europäische Halbleiterunternehmen seit 2010 einen konstanten Beitrag zum weltweiten Halbleitermarkt.

Rolle im Entwurf (Chipdesign)

Schätzungen zufolge wird ungefähr jeder elfte Chip weltweit in Europa entworfen.¹¹ Fabless-Unternehmen generieren inzwischen 33 Prozent der gesamten Halbleiterumsätze. In diesem stark wachsenden Marktsegment verlor Europa zuletzt Marktanteile. Betrug der Anteil Europas 2010 noch vier Prozent,¹² lag er 2020 bei nur noch einem Prozent (vgl. Abbildung 9). Der Teilmarkt der Halbleiterunternehmen ohne eigene Fertigung wird von den USA dominiert, die 2020 64 Prozent der weltweiten Umsätze der Fabless-Unternehmen generierten.

Abbildung 8: Weltweite Umsätze der Halbleiterindustrie nach Region des Firmensitzes (2010, 2015, 2020)



Hinweis: Ohne Auftragsfertiger (Foundries).

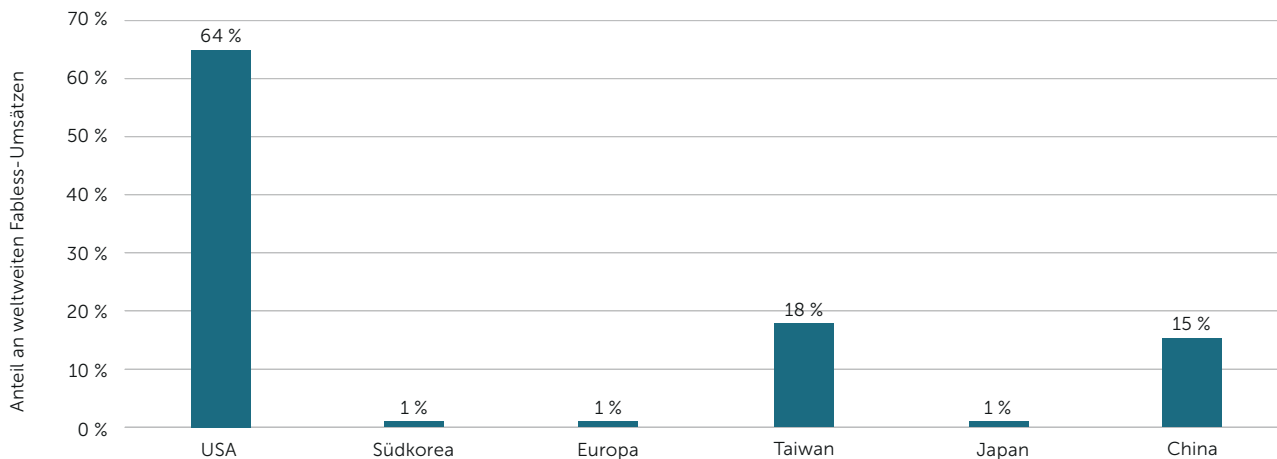
Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Semiconductor Industry Association 2021a

¹⁰ ZVEI 2021a.

¹¹ ZVEI 2021b.

¹² Kleinhans 2021.

Abbildung 9: Verteilung der Halbleiter-Umsätze im Fabless-Bereich (2020)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf IC Insights 2021

Werden hochmoderne Chips in den Strukturgrößen von fünf bis sieben Nanometern betrachtet, gibt es nur sehr wenige europäische Unternehmen, die solche Chips entwerfen. Dazu gehören NXP, STMicroelectronics, der Mobilfunkausrüster Ericsson und das Start-up SiPearl.¹³ SiPearl entwickelt im Rahmen der Europäischen Prozessorinitiative (EPI) Prozessoren für Supercomputer. Ziel der EPI ist es, die Abhängigkeit Europas von den USA und Asien im Bereich der hoch performanten Rechnerarchitekturen zu verringern.¹⁴ Im weltweiten Markt spielen diese Chips aus Europa mengenmäßig jedoch nur eine marginale Rolle. Amerikanische Unternehmen wie Apple, Qualcomm, AMD, Nvidia und Intel dominieren klar, wenn betrachtet wird, für welche Unternehmen die weltweiten Produktionskapazitäten für hochmoderne Chips genutzt werden.

Produktionskapazitäten und Spezialisierung in der Fertigung

Die Halbleiterproduktionskapazität in Europa ist in den vergangenen zehn Jahren leicht angestiegen. Allerdings war das weltweite Wachstum der Produktionskapazitäten deutlich stärker, vor allem bedingt durch eine steigende Produktion in Taiwan, Südkorea und China (vgl. Abbildung 10). Anteilig ging die europäische Produktionskapazität daher leicht zurück: von rund acht Prozent im Jahr 2010 auf rund sechs Prozent im Jahr 2020.¹⁵

Die weltweite Halbleiterherstellung ist stark konzentriert: 2019 deckten fünf Firmen zusammen 53 Prozent der weltweiten Halbleiterproduktion ab (vgl. hellblaue Balken in Abbildung 11). Wird die Chipherstellung von IDMs und Auftragsfertigern betrachtet, ist Samsung mit einer Produktion

von drei Millionen Halbleiterscheiben (Wafer) weltweit führend, dicht gefolgt von TSMC (2,5 Millionen). Entsprechend sind Taiwan und Südkorea die beiden wichtigsten Länder für die Fertigung von Halbleitern. Im Vergleich zu China, Japan, Südkorea, Taiwan und den Vereinigten Staaten verfügt Europa nur über eine recht geringe Halbleiter-Produktionskapazität von sechs Prozent.

Zu den Teilbereichen, in denen europäische Halbleiterfertiger stark sind, gehören analoge Chips. Unter den weltweit größten analogen Halbleiterunternehmen finden sich mit Infineon, STMicroelectronics und NXP drei europäische Hersteller (vgl. linke Seite von Abbildung 12). Wenn nur Umsätze mit Halbleitern betrachtet werden, die an die Automobilindustrie geliefert werden, sind europäische Unternehmen weltweit sogar führend. Neben den bereits genannten europäischen Halbleiterunternehmen gehört in diesem Segment Bosch zu den weltweiten Marktführern (vgl. rechte Seite von Abbildung 12). Im hochvolumigen Segment von Speichern und Universal-Prozessoren für Rechenzentren, PCs und Smartphones hingegen spielen europäische Halbleiterhersteller eine untergeordnete Rolle.

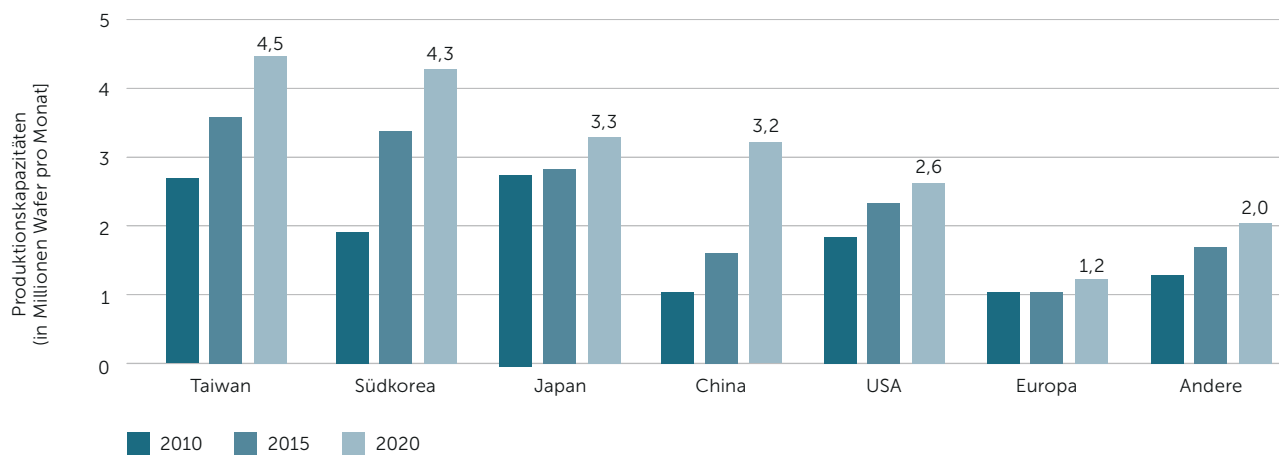
Für viele Halbleiterprodukte stellt die Verkleinerung der Strukturgröße eine wichtige Quelle von Leistungsverbesserungen dar (vgl. Kapitel 3.3). Ein häufig genutzter Indikator, um die technische Ausgereiftheit einer Halbleiterfabrik zu charakterisieren, ist daher die kleinste produzierbare Strukturgröße des Fertigungsverfahrens. Die aktuell fortschrittlichsten Herstellungsverfahren mit weniger als sieben Nanometern kommen als Auftragsferti-

¹³ Ebd.

¹⁴ Das Ende 2018 gestartete Projekt wird im Rahmen des Horizon 2020 Programms der Europäischen Union gefördert. Der Forschungsverbund besteht aus 23 Unternehmen und Forschungseinrichtungen.

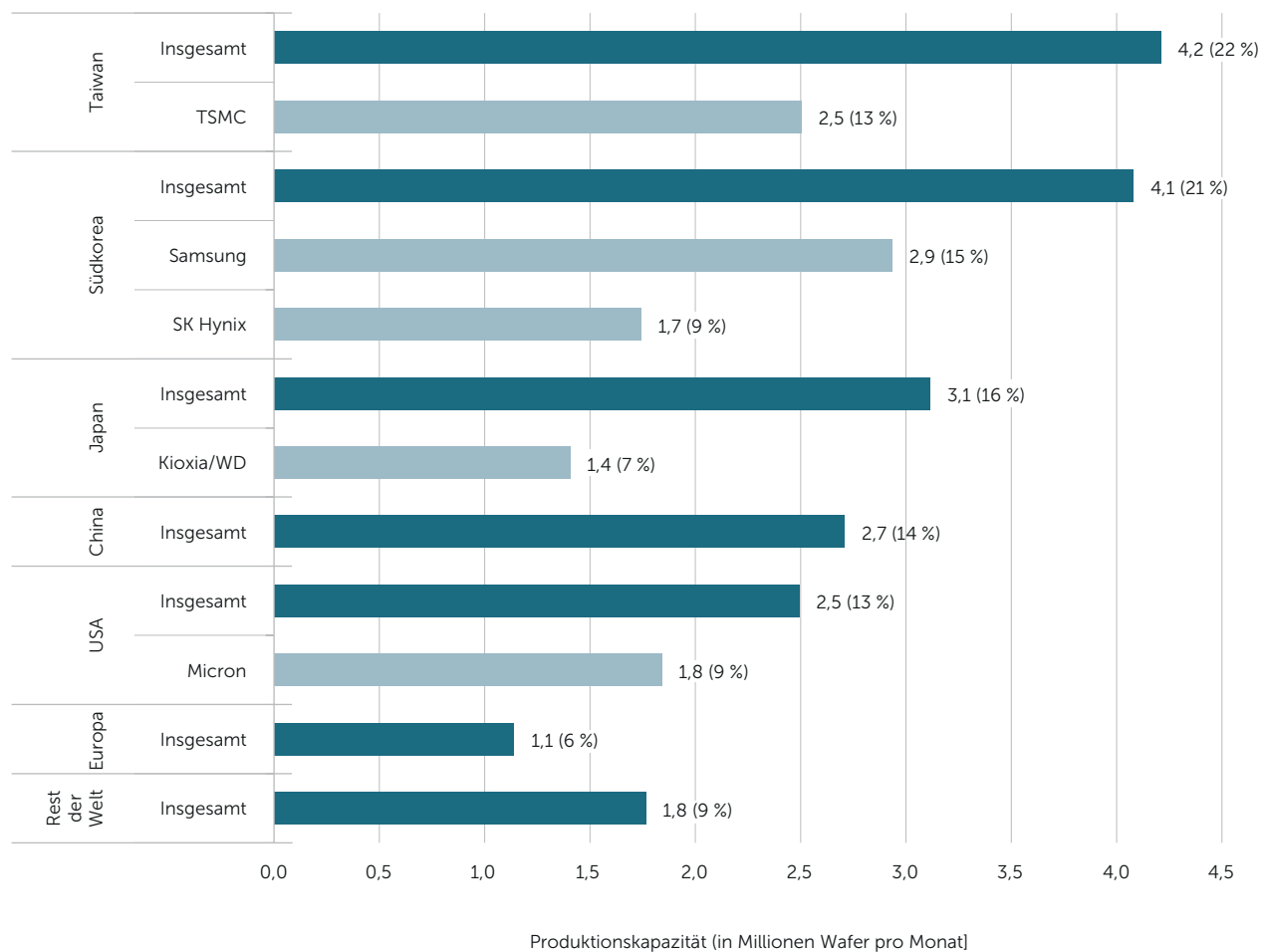
¹⁵ Beim Weltanteil Europas ergeben sich je nach Quelle geringfügige Abweichungen. Der ZVEI geht für 2020 von einem Anteil Europas an den weltweiten Produktionskapazitäten von acht Prozent aus. Vgl.: ZVEI 2021b. Insbesondere die Angaben zur Chipproduktion Chinas schwanken.

Abbildung 10: Produktionskapazität der wichtigsten Regionen (2010, 2015, 2020)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf IC Insights 2021 und Kleinhans 2021

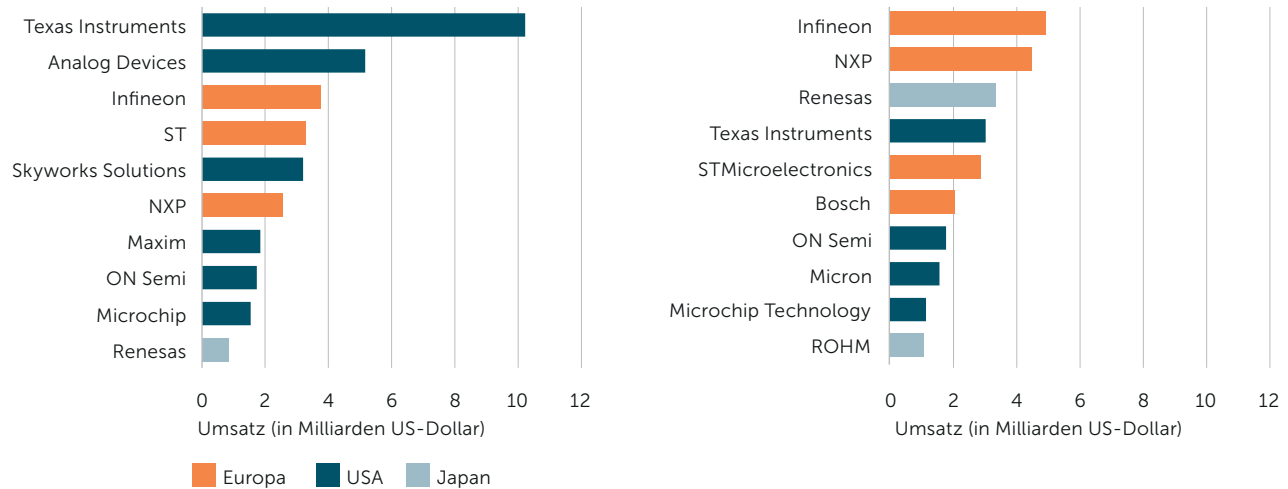
Abbildung 11: Halbleiter-Produktionskapazität nach Ländern und größten Firmen (2019)



Hinweis: In Klammern: Anteil an den weltweiten Produktionskapazitäten.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf IC Insights 2020

Abbildung 12: Umsätze der TOP-10-Unternehmen weltweit mit analogen Halbleitern (links) und Halbleitern für die Automobilindustrie (rechts) (2019)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf IC Insights 2020 und IHS/Markit 2019

gung bisher ausschließlich in Südkorea und Taiwan zur Anwendung – TSMC und Samsung sind weltweit die einzigen beiden Firmen, die Chips mit diesen Strukturgrößen für andere Firmen fertigen.¹⁶ Auch Intel möchte ab 2025 Chips der modernsten Generation anbieten und investiert dafür 20 Milliarden US-Dollar im amerikanischen Bundesstaat Ohio.¹⁷ In Europa hingegen findet eine Fertigung in hochvolumigen hochmodernen Fabriken (im Bereich unter 20 Nanometern) nur in sehr geringen Umfang statt (vgl. Abbildung 13). Der Schwerpunkt der Produktionskapazität in Europa liegt vielmehr im Bereich von größeren Strukturgrößen. So entfällt auf den Bereich von über 180 Nanometern der Großteil der gesamten europäischen Produktion.

Dass die europäische Produktion mehrheitlich in Bereichen von größeren Strukturgrößen stattfindet, bedeutet nicht, dass die europäische Halbleiterproduktion nicht fortschrittlich ist. Vielmehr entspricht sie der Nachfrage in dem Bereich, auf den sich die europäischen Hersteller spezialisiert haben. Dies gilt zum Beispiel für Leistungshalbleiter, analoge Halbleiter sowie Sensoren und Halbleiter für den Automobilbereich. Schätzungen des ZVEI zufolge werden rund zwei Drittel der in einem modernen Auto verbauten Halbleiter im Bereich von 130 Nanometern und größer gefertigt.¹⁸

Dennoch bringt die nicht vorhandene Produktionskapazität in kleineren Strukturgrößen natürlich gewisse Abhängigkeiten von anderen Weltregionen – insbesondere

Asien – mit sich. Dies ist zum Beispiel für Logik-Halbleiter wie Prozessoren relevant,¹⁹ deren Produktion in Europa stark zurückgegangen ist. Europäische Halbleiterunternehmen wie Infineon, NXP und STMicroelectronics haben einen Großteil der Produktion in diesem Bereich aus Europa heraus verlagert. Während die europäische Chipindustrie 2012 noch 70 Prozent ihrer Bauteile in der EU produzierte, waren es 2020 nur noch 54 Prozent.²⁰ Die europäischen Halbleiterunternehmen greifen demnach auf außereuropäische Fertigungsbetriebe wie TSMC, GlobalFoundries und Samsung zurück. Die einzigen europäischen Fabriken, die derzeit für Logikchips genutzt werden können, sind die 22-Nanometer-Fabrik von GlobalFoundries in Dresden und die 28-Nanometer-Fabrik von STMicroelectronics in Crolles, Frankreich.²¹

Bei der Modernisierung alter oder dem Bau neuer Fabriken investierten die europäischen IDMs zunehmend in Herstellungsverfahren für Verbindungshalbleiter aus Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN). Die physikalischen Eigenschaften dieser Verbindungsmaterialien bieten erhebliche Vorteile gegenüber dem traditionellen Silizium, insbesondere bei Leistungshalbleitern und Hochfrequenzchips. Bosch produziert beispielsweise Leistungshalbleiter aus Siliziumkarbid in Reutlingen (Deutschland). Zum Einsatz kommen diese Halbleiter in der Steuerung der Energieflüsse in Elektrofahrzeugen. Durch ihre Stärken in den Bereichen Schaltgeschwindigkeit und Wärmeverlust können Halbleiter aus Siliziumkarbid die eingesetzte Energie be-

¹⁶ Kleinhaus 2021.

¹⁷ Gerstl 2022.

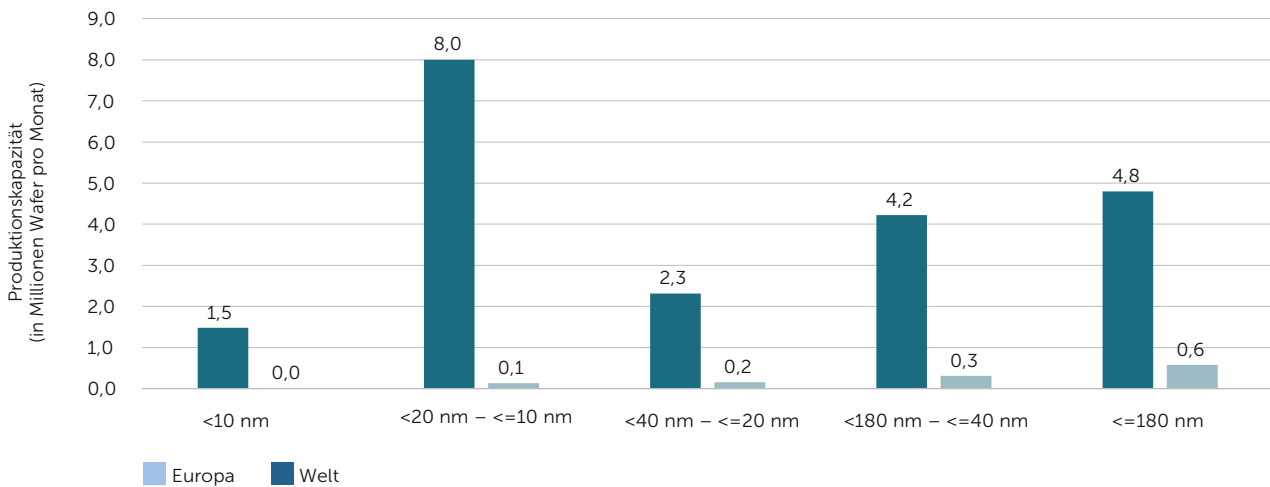
¹⁸ ZVEI 2021b.

¹⁹ Ein in einer 7-Nanometer-Strukturgröße hergestellter Prozessor verbraucht weniger Energie und kann daher komplexer und leistungsfähiger sein als ein Prozessor, der in einer 28-Nanometer-Strukturgröße hergestellt wird.

²⁰ Deutsche Welle 2021.

²¹ Kleinhaus 2021.

Abbildung 13: Halbleiter-Produktionskapazität Europas nach Fertigungsverfahren (2020)



Hinweis: nm = Nanometer

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf IC Insights 2021 und Kleinhans 2021

sonders effizient verarbeiten und dadurch die Reichweite von Elektrofahrzeugen deutlich erhöhen. Weitere Produktionsstätten für Verbindungshalbleiter sind die Werke von Infineon (SiC/GaN in Villach, Österreich) und STMicroelectronics (SiC/GaN in Catania, Italien, und GaN in Tours, Frankreich). Mit dem zunehmenden Einsatz von Verbindungshalbleitern produzieren europäische Unternehmen innovative Halbleiter, bei denen Leistungsverbesserungen nicht auf einer Verkleinerung der Strukturgrößen beruhen; stattdessen treiben sie Innovationen im sogenannten Beyond-Moore-Bereich voran (vgl. Kapitel 3.3).

Montage und Prüfung

Siliziumwafer enthalten viele winzige integrierte Schaltkreise, die herausgeschnitten und durch Verkapselung vor Beschädigung geschützt werden müssen, bevor sie in die Endgeräte, in denen sie zur Anwendung kommen sollen, eingelötet werden. Der Prozess ist arbeitsintensiv und wurde größtenteils nach Asien ausgelagert, über 60 Prozent der weltweiten Kapazitäten sind in Taiwan und China angesiedelt. Weniger als fünf Prozent dieser Backend-Produktionskapazitäten befinden sich in Europa.²²

Zulieferindustrie

Europäische Unternehmen spielen eine bedeutende Rolle als Zulieferer. Im Bereich von Produktionsanlagen für die Halbleiterindustrie sind als international bedeutsame europäische Zulieferunternehmen ASML (Niederlande), ASM International (Niederlande) und Aixtron (Deutschland) zu nennen.²³ ASML mit Sitz in Holland nimmt eine besondere Stellung im Markt ein. Das Unternehmen ist weltweit füh-

rend im Gebiet der Belichtungsmaschinen für die Halbleiterstrukturierung. In Kooperation mit dem deutschen Unternehmen Zeiss aus der feinmechanisch-optischen Industrie hat ASML fotolithografische Maschinen entwickelt, die mithilfe von Licht die Vorlagen für integrierte Schaltkreise auf Halbleiterplatten übertragen.²⁴ Grund für die wichtige Stellung im Markt ist, dass sich das Unternehmen als einziges Unternehmen weltweit auf die EUV-Lithografie versteht. Extrem ultraviolettes Licht (EUV) mit besonders kurzen Wellenlängen wird verwendet, um eine deutlich bessere optische Auflösung zu ermöglichen und damit Halbleiter-Strukturgrößen unterhalb von zehn Nanometern zu realisieren.²⁵ Da kürzere Wellenlängen das Herstellen von kleineren Komponenten ermöglichen, ist die Technologie von ASML für die Herstellung der technologisch fortschrittlichsten Chips entscheidend. Die bedeutendsten Chemikalienzulieferer für die Halbleiterindustrie sind japanische Firmen, aber auch europäische Unternehmen wie BASF (Deutschland), Linde (Irland) und Merck (Deutschland) gehören zu den Chemikalienlieferanten für die Halbleiterindustrie mit einer weltweiten Relevanz. Mit Siltronic (Deutschland) ist auch unter den weltweit bedeutendsten Zulieferunternehmen für Halbleiterplatten (Wafer) ein europäisches Unternehmen vertreten.

3.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Halbleiterindustrie in Europa

Bedeutung der Halbleiterbranche als Teil der Elektroindustrie

In der amtlichen Statistik ist die Halbleiterindustrie kein eigener Wirtschaftszweig, sondern gehört zur Branche

²² Kleinhans & Lee 2021.

²³ Kleinhans & Baisakova 2020.

²⁴ Bundesministerium für Bildung und Forschung 2021a.

²⁵ The Economist 2020.

der Elektroindustrie beziehungsweise der Herstellung elektronischer Bauelemente (vgl. Exkurs zur amtlichen Statistik). In den zehn wichtigsten EU-Ländern für die Herstellung von elektronischen Bauelementen waren im Jahr 2018 rund 189.000 Personen beschäftigt (vgl. Tabelle 2).²⁶ Elektronische Bauelemente generierten Umsätze von knapp 50 Milliarden Euro und eine Bruttowertschöpfung von 16 Milliarden Euro. Im Branchenvergleich handelt es sich bei den elektronischen Bauelementen somit um einen vergleichsweise kleinen Teilbereich des Verarbeitenden Gewerbes. Im Durchschnitt entfallen 0,7 Prozent der Beschäftigung und 0,9 Prozent der Bruttowertschöpfung im Verarbeitenden Gewerbe auf elektronische Bauelemente. Die Elektroindustrie als Ganzes trug in den betrachteten zehn Ländern etwa neun Prozent zur Wertschöpfung und Beschäftigung im Verarbeitenden Gewerbe bei.

Exkurs: Abgrenzung der Branche in der amtlichen Statistik

Die Halbleiterindustrie ist ein Teilbereich der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (kurz Elektroindustrie). Die Halbleiterherstellung wird in der amtlichen Statistik dem Wirtschaftszweig „Herstellung von elektronischen Bauelementen“ (im Folgenden „elektronische Bauelemente“) zugeordnet. Dieser Teilbereich umfasst die Herstellung von integrierten Schaltkreisen, diskreten elektronischen Bauelementen und die Herstellung von Rohhalbleitern und Wafern. Für die Analyse von Wertschöpfung und Beschäftigung in der Halbleiterindustrie wird der Teilbereich der elektronischen Bauelemente untersucht, obwohl er die Halbleiterindustrie nicht trennscharf abbilden kann. Denn die Herstellung von elektronischen Bauelementen umfasst neben der Herstellung von Halbleiterprodukten im Sinne dieser Studie auch die Herstellung von Solar-

zellen und Solarmodulen. Nicht erfasst werden in diesem Abschnitt zudem Zulieferunternehmen, die zum Maschinen- und Anlagenbau oder der Chemieindustrie gehören.

In der zurückliegenden Dekade sind im Bereich der elektronischen Bauelemente sowohl Wertschöpfung als auch Beschäftigung gestiegen. Im Jahr 2018 lag die mit elektronischen Bauelementen generierte Wertschöpfung in den wichtigsten europäischen Ländern 22 Prozent höher als noch 2010. Die Beschäftigung wuchs im selben Zeitraum mit 25 Prozent sogar noch stärker an (vgl. Abbildung 14).

Die Beschäftigungsentwicklung in den elektronischen Bauelementen war damit positiv und fiel deutlich besser aus als im Verarbeitenden Gewerbe insgesamt, in dem im selben Zeitraum die Beschäftigung nur um acht Prozent gewachsen ist.

Die Branche ist ein Wachstumstreiber für die Wertschöpfung und Beschäftigung in den wichtigsten zehn europäischen Herstellerländern. Dennoch wird mit dieser Darstellung die Bedeutung der Branche unterschätzt, die sie als „enabling technology“ für andere Industriebranchen einnimmt. Die indirekten wirtschaftlichen Effekte der Halbleiterindustrie sind zwar schwierig zu beziffern, klar ist jedoch, dass sie sehr hoch sind: Studien von Oxford Economics zur amerikanischen Halbleiterindustrie haben ermittelt, dass auf jeden Beschäftigten in der Halbleiterindustrie knapp 100 Beschäftigte in nachgelagerten Branchen wie der Herstellung von Computern, Datenverarbeitungsgeräten und Autos kommen, deren Geschäftstätigkeit durch Halbleiterprodukte erst ermöglicht wird.²⁷ In Europa sind die zentralen nachgelagerten Branchen der Halbleiterindustrie anders als in den USA vor allem

Tabelle 2: Elektronische Bauelemente in den Top-10-Ländern Europas (EU-28) (2018)

	Elektronische Bauelemente	Anteil am Verarbeitenden Gewerbe	Elektroindustrie	Anteil am Verarbeitenden Gewerbe
Unternehmen	5.689	0,35 %	64.620	3,99 %
Bruttowertschöpfung (Mio. Euro)	15.501	0,90 %	156.815	9,11 %
Umsatz (Mio. Euro)	49.324	0,73 %	493.166	7,25 %
Beschäftigte	188.960	0,73 %	2.235.537	8,66 %

Hinweis: Die Elektroindustrie umfasst die Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen sowie die Herstellung von elektrischen Ausrüstungen.
Zu den Top-10-Ländern gehören Deutschland, Italien, Frankreich, Rumänien, Polen, Ungarn, Österreich, Tschechien, Spanien und die Niederlande.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf der strukturellen Unternehmensstatistik von Eurostat

²⁶ Aufgrund unvollständiger Daten für die EU als Ganzes werden nur die zehn wichtigsten Länder für die Halbleiterherstellung betrachtet.

²⁷ Oxford Economics 2021.

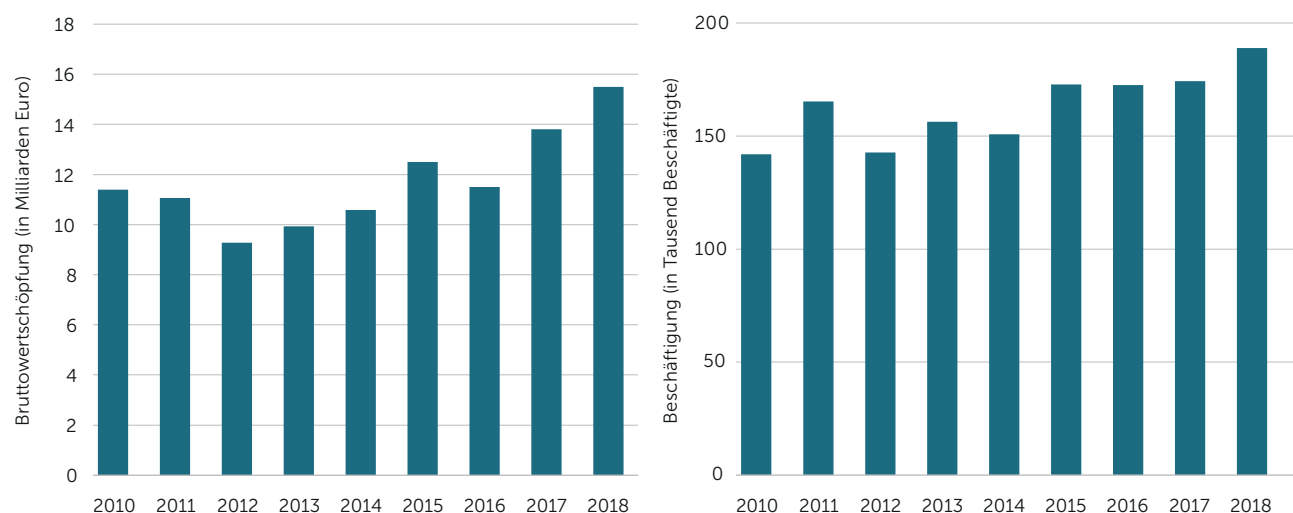
die Automobilindustrie und der Maschinenbau. Auch hier hängt die Geschäftstätigkeit durch die wachsende Bedeutung von Industrie 4.0, dem automatisierten und vernetzten Fahren und dem Wandel zur Elektromobilität zunehmend von Halbleiterlösungen ab. Schätzungen zufolge befinden sich rund 25 Prozent der weltweiten Wertschöpfung, die in zentralem Maße von halbleiterbasierten elektronischen Systemen abhängig ist, in Europa.²⁸ Darin sind nicht nur die Automobilhersteller und Maschinenbauer einbezogen, sondern auch deren nachgelagerte Dienstleister, beispielsweise Telekommunikationsnetzbetreiber und Dienstleistungen im Verkehr und im Gesundheitsbereich.

Anwendungsbereiche von Halbleitern in Europa

Der wichtigste Anwendungsbereich für Halbleiter in Europa

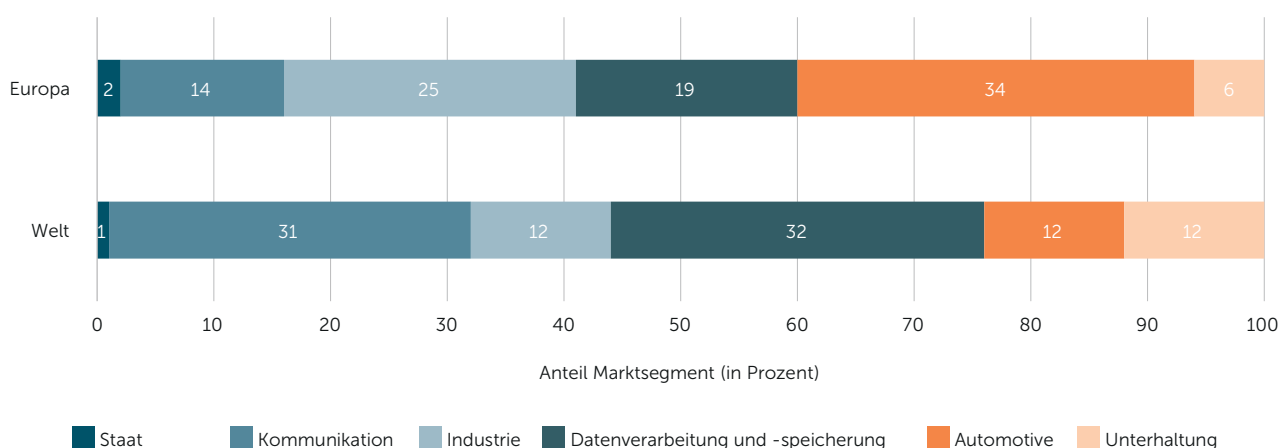
ist mit gut einem Drittel Marktanteil der Bereich Automotive (vgl. Abbildung 15). Ein Drittel der in Europa verkauften Halbleiter wird durch diese Industrie nachgefragt. Die Bereiche Datenverarbeitung und -speicherung sowie Kommunikation sind mit 19 Prozent und 14 Prozent der gesamten Halbleiterumsätze in Europa deutlich weniger bedeutsam als weltweit. Dies spiegelt wider, dass es in Europa kaum auf Verbraucher*innen ausgerichtete Elektronikunternehmen im Bereich der Consumer Electronics gibt. Zwar finden sich auch europäische Chips in elektronischen Verbraucherprodukten wie Smartphones, Tablets und Computern, aber in vergleichsweise geringer Stückzahl. In einem Samsung Galaxy Smartphone sind zum Beispiel insgesamt 35 Chips verbaut, von denen zwei Chips und zwei Sensoren von europäischen Herstellern stammen.²⁹

Abbildung 14: Bruttowertschöpfung und Beschäftigung des Bereichs elektronische Bauelemente in den TOP-10-Ländern Europas (EU-28) (2018)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf der strukturellen Unternehmensstatistik von Eurostat

Abbildung 15: Anteil der Marktsegmente für Halbleiter nach Anwendungsbereich weltweit und in Europa (2019)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf ZVEI 2021a

²⁸ Decision 2018.

²⁹ Kleinhans 2021.

Tabelle 3: Die Top-5-Halbleiterunternehmen in Europa

	Unternehmen	Hauptsitz	Umsatz (Mio. EUR)	Beschäftigte weltweit	Beschäftigte in Europa	Jahr
1	Infineon Technologies AG	Neubiberg, Deutschland	11.060	50.280	20.360 ³⁰	2021
2	STMicroelectronics	Genf, Schweiz	9.095	46.016	22.596	2020
3	NXP Semiconductors	Eindhoven, Niederlande	7.665	27.730	5.823	2020
4	ams OSRAM AG	Premstätten, Österreich	3.504	30.031	k. A.	2020
5	Robert Bosch GmbH	Gerlingen, Deutschland	1.833 ³¹	395.029*	216.953*	2020

Hinweis: *Beschäftigungszahlen Robert Bosch GmbH, gesamt

Quelle: Oxford Economics auf Basis der im Text angegebenen Quellen

Die wichtigsten europäischen Halbleiterunternehmen

Die Halbleiterindustrie ist aufgrund der Forschungsinintensität und der hohen Kosten für Halbleiterentwurf und -produktion durch Großunternehmen geprägt. Teilbereiche der Halbleiterindustrie, zum Beispiel die Bereiche Sensorik, Aktorik und Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Zulieferungen an die Kernindustrie, sind jedoch auch attraktiv für kleine und mittlere Unternehmen. Dennoch sind international vor allem Großunternehmen wettbewerbsfähig und werden demnach näher beleuchtet. Tabelle 3 listet die fünf wichtigsten Unternehmen der Halbleiterbranche in Europa auf, von denen zwei in Deutschland ihren Hauptsitz haben.



Die **Infineon Technologies AG** mit Sitz in Neubiberg im Landkreis München ist der größte Halbleiterhersteller Europas. Das Unternehmen entstand im Jahr

1999 durch die Ausgliederung des Halbleitergeschäfts von Siemens. Von den über 50.000 Beschäftigten sind rund 20.000 in Europa tätig,³⁰ 25.000 in der Asien-Pazifikregion und rund 5.000 in Amerika (vgl. Tabelle 3).³² Infineon ist seit der Übernahme von Cypress mit einem Marktanteil von 13 Prozent weltweit der größte Anbieter von Halbleitern im Automotive-Bereich. Jener ist auch das umsatzstärkste Segment des Unternehmens. Zudem liefert Infineon Komponenten für mobile Endgeräte wie MEMS-Mikrofone, TVS-Dioden, GPS-Empfangssignalverstärker, Hochfrequenz-Antennenschalter und Leistungshalbleiter für energieeffiziente Ladegeräte.³³ Bei Leistungshalbleitern

deckt das Unternehmen 30 Prozent des weltweiten Markts ab.³⁴ Infineon investierte außerdem jüngst in den Ausbau seiner Produktionskapazitäten in Europa. Das Unternehmen hat im September 2021 eine neue Chipfabrik für Leistungselektronik am Standort Villach in Österreich eröffnet und brachte dafür Investitionen von insgesamt 1,6 Milliarden Euro auf.³⁵



life.augmented

STMicroelectronics N. V. mit Sitz der Hauptverwaltung in der Schweiz ging aus der Fusion eines französischen und italienischen Halbleiterherstellers hervor. Noch heute befinden sich die wichtigsten europäischen Standorte des Unternehmens in Frankreich und Italien. Von den über 46.000 Beschäftigten weltweit arbeitet rund die Hälfte in Europa.³⁶ Das Unternehmen hat einen Anteil von rund acht Prozent am globalen Automotive-Halbleitermarkt.³⁷



Der niederländische Halbleiterhersteller **NXP** entstand im Jahr 2006 aus Philips Semiconductors, der Halbleitersparte von Philips. NXP bietet Halbleiter und Systemlösungen für den Automobilmarkt, für Fernseher, Set-Top-Boxen, Mobiltelefone sowie Sicherheitslösungen für Bankkarten, elektronische Ausweise, Reisepässe und Gesundheitskarten sowie verschiedene diskrete Halbleiterbauelemente an.³⁸ Beispielsweise liefert NXP Sicherheitschips für Personalausweise und Reisepässe an die deutsche Bundesregierung. Das Unternehmen hält rund elf Prozent am globalen Automotive-Halbleiter-

³⁰ Nur Zahlen für die Region EMEA verfügbar, jedoch betreibt Infineon im Mittleren Osten und in Afrika nur sehr wenige Standorte.

³¹ Schätzung nur für automobile Halbleiter 2018 nach IHS/Markit 2019.

³² Infineon 2022.

³³ Infineon 2021a.

³⁴ Strategy Analytics 2021.

³⁵ Infineon 2021b.

³⁶ STMicroelectronics 2021.

³⁷ Strategy Analytics 2021.

³⁸ NXP 2021a.

markt.³⁹ Von den über 27.000 Arbeitskräften sind knapp 6.000 in Europa beschäftigt.⁴⁰



Die **ams Osram AG** hat weltweit rund 9.000 Beschäftigte, etwa 1.200 davon am Hauptsitz und Produktionsstandort Premstätten. Der Schwerpunkt des Unternehmens liegt im Bereich von Sensoren und optischen Bauelementen für die Märkte Consumer Electronics, Automobil, Industrie und Medizin/Gesundheitswesen.⁴¹ Im Jahr 2020 kaufte der Halbleiterhersteller ams das Münchner Fotonik-Unternehmen Osram und baute damit Expertise im Bereich der optischen Bauelemente auf.



BOSCH

Die **Robert Bosch GmbH** mit Hauptsitz in Gerlingen, Deutschland, ist der größte Automobilzulieferer der Welt. Der Halbleiterbereich macht nur einen kleinen Teil der Geschäftstätigkeit des Unternehmens aus. Halbleiter von Bosch kommen sowohl im Automobilbereich als auch in der Unterhaltungselektronik zum Einsatz.⁴² Der Geschäftsbereich Automotive Electronics hat einerseits die Rolle des internen Fertigungs- und Entwicklungsdienstleisters für elektronische Steuergeräte und Halbleiter (integrierte Schaltkreise und Sensoren) und umfasst andererseits das externe Geschäft mit Halbleiterprodukten und Sensoren. Das Halbleiter-Produktspektrum von Bosch für automobile Anwendungen reicht von anwendungsspezifischen Schaltungen (ASIC) und Leistungshalbleitern bis zu MEMS-Sensoren⁴³. Im Bereich Unterhaltungselektronik

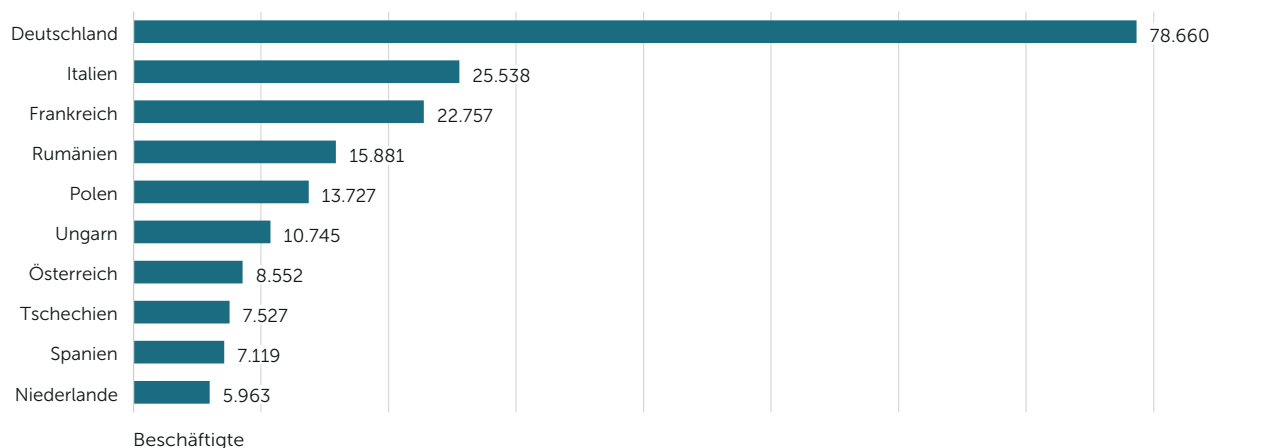
liefert die Bosch Sensortec GmbH MEMS-Sensoren für unterschiedliche Anwendungen.⁴⁴ Bosch hat zuletzt im Dezember 2021 die Serienproduktion von Halbleitern aus Siliziumkarbid in Reutlingen gestartet. Dafür investierte das Unternehmen von 2021 bis 2023 insgesamt 150 Millionen Euro für zusätzliche Reinraumflächen. Im Jahr 2022 plant Bosch, weitere 400 Millionen Euro in den Ausbau seiner Halbleiterstandorte in Dresden, Reutlingen und Penang (Malaysia) zu investieren.⁴⁵

Bedeutung in einzelnen Ländern Europas

Die europäische Halbleiterindustrie konzentriert sich auf unterschiedliche Länder innerhalb Europas. Betrachtet man die beschäftigungsstärksten Länder innerhalb der EU, so befindet sich Deutschland mit rund 79.000 Beschäftigten im Jahr 2019 im Bereich der elektronischen Bauelemente auf Rang 1. Italien und Frankreich haben jeweils mehr als 20.000 Beschäftigte und stellen gemeinsam mit Deutschland 58 Prozent der europäischen Beschäftigten im Bereich elektronische Bauelemente (vgl. Abbildung 16). Deutschland, Italien, Frankreich, die Niederlande und Österreich sind als Herkunftsländer der wichtigsten europäischen Halbleiterhersteller auch entsprechend bedeutsam für die Beschäftigung in der europäischen Halbleiterindustrie.

Viele Automobilzulieferer und Fertigungsdienstleister für elektronische Komponenten haben Standorte in Zentral- und Osteuropa errichtet. Im Bereich der elektronischen Bauelemente finden sich daher Beschäftigte in nennens-

Abbildung 16: Beschäftigung des Bereichs elektronische Bauelemente in den TOP-10-Ländern Europas (EU-28) (2019)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf der strukturellen Unternehmensstatistik von Eurostat

³⁹ Strategy Analytics 2021.

⁴⁰ NXP 2021b.

⁴¹ ams Osram 2020.

⁴² Bosch 2020.

⁴³ MEMS: Mikroelektromechanische Systeme.

⁴⁴ Bosch 2020.

⁴⁵ Bosch 2021.

werten Größenordnungen in Rumänien, Polen, Ungarn und Tschechien. Im Halbleiterbereich handelt es sich vor allem um Backend-Fertigungskapazitäten (zum Beispiel Infineon in Cegléd, Ungarn)⁴⁶, Forschungs- und Entwicklungsstandorte (zum Beispiel Intel in Gdańsk, Polen)⁴⁷ und Waferhersteller (zum Beispiel ON Semiconductor in Rožnov pod Radhoštěm, Tschechien). In Rumänien findet, getrieben durch die Antriebswende hin zur Elektromobilität, zunehmend FuE von Automobilzulieferern für elektronische Komponenten statt. Beispielsweise richtet ein deutscher Anbieter von automobil Elektronik in Rumänien ein Software-Entwicklungszentrum ein und ein großer deutscher Automobilzulieferer plant, im Land sein FuE-Zentrum für elektrische Antriebslösungen zu erweitern.⁴⁸

Bedeutung in Deutschland

Deutschland ist das Land mit der größten Halbleiterindustrie in Europa und mit zwei der fünf wichtigsten Halbleiterhersteller Europas. Je etwa ein Prozent der Wertschöpfung und der Beschäftigung im Verarbeitenden Gewerbe entfallen in Deutschland auf die elektronischen Bauelemente. Damit gehört der untersuchte Bereich auch in Deutschland zu den kleineren Industriebranchen. Mit einem Umsatz von rund 25,5 Milliarden Euro im Jahr 2018 lag der Beitrag zur Bruttowertschöpfung bei rund 7,3 Milliarden Euro. Die Hersteller von elektronischen Bauelementen zählten in Deutschland 2018 mehr als 75.000 Beschäftigte (vgl. Tabelle 4). Die Elektroindustrie als Ganzes stellt in Deutschland rund elf Prozent der Beschäftigten und generiert rund zwölf Prozent der Wertschöpfung im Verarbeitenden Gewerbe.

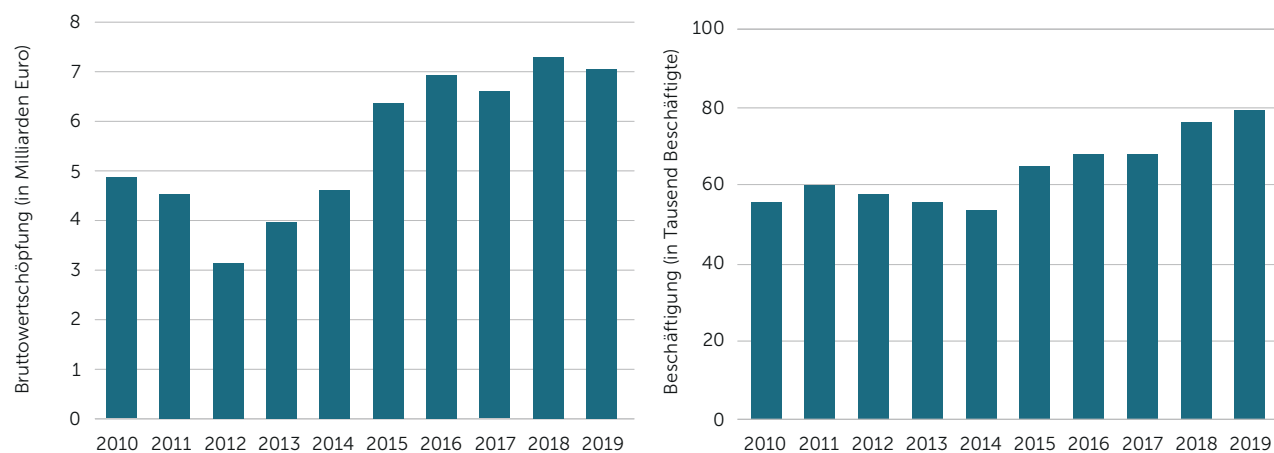
Tabelle 4: Kennzahlen für den Bereich elektronische Bauelemente in Deutschland (2018)

	Elektronische Bauelemente	Anteil am Verarbeitenden Gewerbe	Elektroindustrie	Anteil am Verarbeitenden Gewerbe
Unternehmen	1.624	0,79 %	13.636	6,62 %
Bruttowertschöpfung (Mio. Euro)	7.302	1,12 %	80.778	12,42 %
Umsatz (Mio. Euro)	25.489	1,08 %	231.264	9,82 %
Beschäftigte	75.652	0,93 %	909.023	11,19 %

Hinweis: Die Elektroindustrie umfasst die Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen sowie die Herstellung von elektrischen Ausrüstungen.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf der strukturellen Unternehmensstatistik von Eurostat

Abbildung 17: Bruttowertschöpfung und Beschäftigung des Bereichs elektronische Bauelemente in Deutschland (2010–2019)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf der strukturellen Unternehmensstatistik von Eurostat

⁴⁶ Infineon 2021a.

⁴⁷ Notes from Poland 2021.

⁴⁸ Germany Trade & Invest 2021.

Zudem hat sich die Teilbranche der elektronischen Bauelemente am Standort Deutschland in den vergangenen zehn Jahren sehr positiv entwickelt (vgl. Abbildung 17). Im Vergleich zu 2010 ist die Bruttowertschöpfung bis 2019 um 33 Prozent angewachsen und die Beschäftigung um 20 Prozent. Eine schwache Nachfrageentwicklung und rückläufige Umsätze im Bereich der Unterhaltungselektronik haben zum Rückgang der Wertschöpfung 2011 und 2012 beigetragen.⁴⁹ In der Zehnjahresperspektive entwickelten sich die elektronischen Bauelemente damit etwas schwächer als das Verarbeitende Gewerbe, das im selben Zeitraum ein Wachstum von 44 Prozent (Wertschöpfung) beziehungsweise 19 Prozent (Beschäftigung) verzeichnete.

Als forschungsintensive Branche ist die Halbleiterindustrie wie kaum eine andere Branche auf hoch qualifizier-

tes Personal angewiesen. Dies wird im ausgesprochen hohen Qualifikationsniveau der Beschäftigten in der Halbleiterindustrie Deutschlands deutlich. Der Anteil der Expert*innen ist im Bereich der elektronischen Bauelemente mit 24 Prozent aller Beschäftigten doppelt so hoch wie im Durchschnitt des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland (vgl. Tabelle 5). Knapp ein Viertel der Beschäftigten in der Herstellung von elektronischen Bauelementen geht hoch komplexen Tätigkeiten nach, etwas mehr als im Durchschnitt der Elektroindustrie. Entsprechend ist auch der Anteil der Beschäftigten mit akademischem Abschluss überdurchschnittlich. 30 Prozent der Beschäftigten im Bereich elektronische Bauelemente haben einen akademischen Abschluss, der Anteil ist doppelt so hoch wie im Verarbeitenden Gewerbe insgesamt.

Tabelle 5: Merkmale der Beschäftigten im Bereich elektronische Bauelemente und Leiterplatten in Deutschland (2. Quartal 2021)

	Elektronische Bauelemente und Leiterplatten	Elektroindustrie	Verarbeitendes Gewerbe
Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte <i>darunter</i>	150.095	762.245	7.303.345
Anteil Frauen (%)	33	29	24
Anteil Vollzeitbeschäftigte (%)	86	89	90
Anteil Teilzeitbeschäftigte (%)	14	11	10
Anteil Helfer*innen (%)	14	14	15
Anteil Fachkräfte (%)	40	44	58
Anteil Spezialist*innen (%)	22	21	15
Anteil Expert*innen (%)	24	21	12
Anteil ohne Ausbildung (%)	10	10	12
Anteil mit Berufsabschluss (%)	56	59	67
Anteil mit akadem. Berufsabschluss (%)	30	27	15
Anteil unbekannter Abschluss (%)	4	4	6
Anteil unter 25 Jahre (%)	7	7	8
Anteil 25 bis unter 55 Jahre (%)	70	69	67
Anteil 55 bis unter 65 Jahre (%)	22	23	24
Anteil 65 Jahre und älter (%)	1	1	1
Anteil Auszubildende (%)	3	3	4
Beschäftigte ab 55 Jahren je Auszubildenden	7	7	6

Hinweis: Die Elektroindustrie umfasst die Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen sowie die Herstellung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 26 und WZ 27).

Quelle: Oxford Economics basierend auf Daten der Bundesagentur für Arbeit 2022

⁴⁹ BayernLB Research 2014.

Die Beschäftigten in der Herstellung von elektronischen Bauelementen sind, verglichen mit dem Verarbeitenden Gewerbe insgesamt, etwas jünger. Besonders der Anteil der Beschäftigten im Alter von 55 Jahren und älter ist mit 23 Prozent etwas niedriger als im Verarbeitenden Gewerbe insgesamt (25 Prozent). Dass mehr als jede*r fünfte Beschäftigte im Bereich elektronische Bauelemente 55 Jahre oder älter ist, weist auf einen hohen demografischen Ersatzbedarf in den kommenden Jahren hin. Der Anteil der Auszubildenden ist mit drei Prozent etwas geringer als im Verarbeitenden Gewerbe insgesamt. Dies spiegelt wider, dass die Branche mehr als andere Branchen auf akademisch gebildete Arbeitskräfte zurückgreift.

Frauen stellen ein Drittel der Beschäftigten in der Halbleiterindustrie und sind damit deutlich unterrepräsentiert. Im stark männerdominierten Verarbeitenden Gewerbe war 2021 nur knapp ein Viertel der Beschäftigten weiblich. Es sind besonders Branchen wie die Metallerzeugung, der Maschinenbau und die Automobilindustrie, die mit weniger als einem Fünftel der Beschäftigten die niedrigsten Frauenanteile aufweisen (vgl. Abbildung 18). Unter den forschungsintensiven Branchen weist insbesondere die Pharmaindustrie mit knapp 50 Prozent einen deutlich höheren Frauenanteil als die Halbleiterindustrie auf,

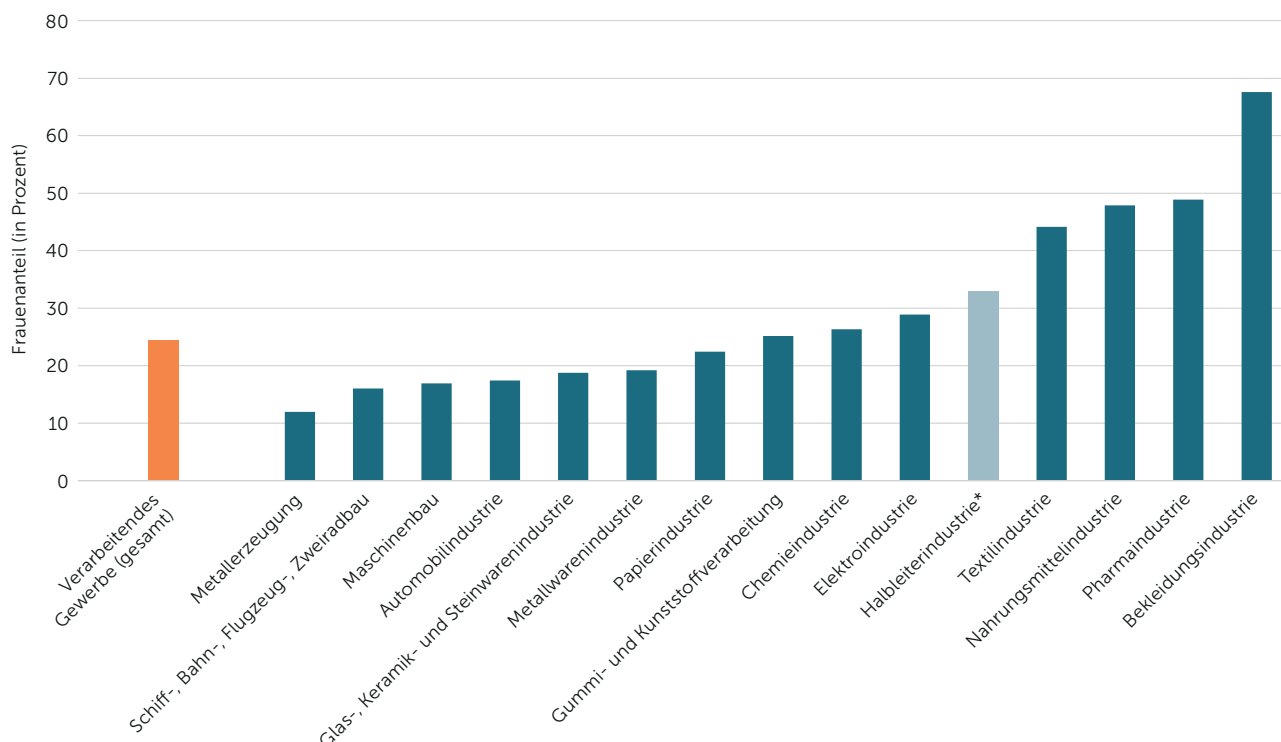
der Frauenanteil der Chemieindustrie hingegen liegt mit 26 Prozent etwas hinter der Halbleiterindustrie.

Die Halbleiterindustrie gehört zu den kapitalintensiven Branchen, da insbesondere der Aufbau von neuen Produktionsstätten hoher Investitionen bedarf. So lagen die Investitionen je beschäftigter Person in Deutschland im Bereich elektronische Bauelemente 2019 mit rund 13.000 Euro deutlich höher als im Verarbeitenden Gewerbe mit 10.000 Euro (vgl. Abbildung 19). Zudem investiert die Mehrzahl der Unternehmen nicht kontinuierlich, sondern punktuell. Der deutsche Halbleiterhersteller Infineon tätigte in den Jahren 2011 und 2012 Investitionen von knapp 900 Millionen Euro, was sich in einer besonders hohen Investitionsintensität in diesen Jahren niederschlug.⁵⁰

3.3 Forschung und Innovation in Europa

Die Halbleiterbranche ist einzigartig, denn die technologische Entwicklung ist schnell und in ihrer Dynamik unübertroffen. FuE fungiert als Motor für neue Technologien und Spitzenprodukte in der Branche, aber auch als Schlüsseltechnologie für Innovationen in anderen Branchen. Jede dritte Innovation des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland basiert auf Lösungen der Elektroindustrie.⁵¹ Die Mikroelektronik insbesondere ist Basis für einen Groß-

Abbildung 18: Frauenanteil in den wichtigsten Industriebranchen im Vergleich (2. Quartal 2021)



Hinweis: *Halbleiterindustrie ist hier definiert als Herstellung von elektronischen Bauelementen und Leiterplatten (WZ 26.1).

Quelle: Oxford Economics basierend auf Daten der Bundesagentur für Arbeit 2022

⁵⁰ Infineon 2012.

⁵¹ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2021b.

teil der heutigen Innovationen in Fahrzeugen. Dies zeigt sich bei den Patentanmeldungen der Autohersteller in Deutschland. Der Cluster „Elektrik, Elektronik und Sensoren“ hat unter allen betrachteten Technologiefeldern den größten Bedeutungszuwachs.⁵²

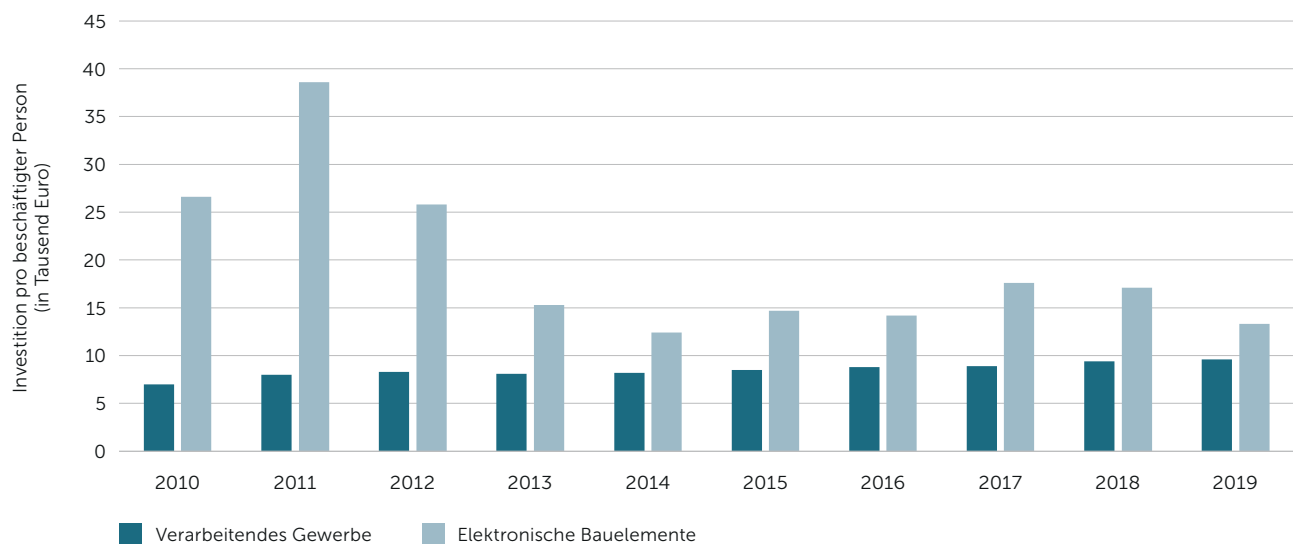
FuE zu Halbleitern in Europa

Die Chipindustrie hat eine der höchsten Forschungs- und Entwicklungsquoten mit im weltweiten Durchschnitt etwa 16 Prozent des Umsatzes. Nicht nur Unternehmen der Halbleiterindustrie, sondern insbesondere auch Universitäten und anwendungsorientierte Forschungseinrichtungen

gen beteiligen sich an der Halbleiter-Forschung.

Die europäische Forschungslandschaft ist im Halbleiterbereich sehr gut aufgestellt und nimmt im internationalen Vergleich eine zunehmend wichtige Rolle ein. So konnten europäische Forschungseinrichtungen ihren Forschungsoutput zu Halbleitern im Zeitablauf deutlich steigern. Dies zeigt eine Analyse von internationalen Konferenzpapieren zu Halbleitern.⁵³ Lag der Anteil der Forschungspapiere mit (Ko-)Autor*innen aus Europa 1995 noch bei 13 Prozent, so betrug er 2020 mit 25 Prozent fast das Doppelte (vgl. Abbildung 20).

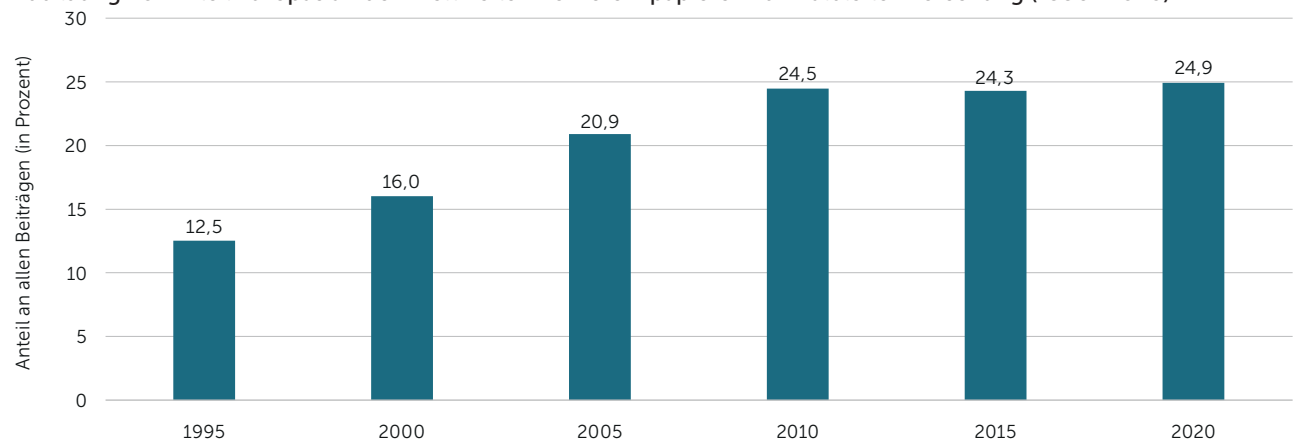
Abbildung 19: Investitionsintensität im Bereich elektronische Bauelemente in Deutschland (2010–2019)



Notiz: Die Investitionsintensität ist definiert als Bruttoinvestitionen pro beschäftigte Person in Tausend Euro.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf der strukturellen Unternehmensstatistik von Eurostat

Abbildung 20: Anteil Europas an den weltweiten Konferenzpapieren zur Halbleiter-Forschung (1995–2020)



Hinweis: Beiträge mit (Ko-)Autor*innen aus Europa an Konferenzpapieren in drei führenden internationalen Forschungskonferenzen zu Halbleitern.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Kleinhans et al. 2021

⁵² Koppel et al. 2019 untersuchen auf Basis von Auswertungen der IW-Patentdatenbank die Forschung der Kfz-Unternehmen in Deutschland.

⁵³ Kleinhans et al. 2021.

Interessant ist dies insbesondere, wenn die Forschungsleistung Europas mit der anderer bedeutender Weltregionen verglichen wird. So leistet die USA einen konstant hohen Beitrag zur Halbleiter-Forschung. Das Land war zwischen 1995 und 2020 kontinuierlich an 40 bis 45 Prozent der Forschungspapiere beteiligt und ist damit nach wie vor dominierender Forschungsakteur. China, Südkorea und Taiwan haben eine wachsende Bedeutung in der FuE von Halbleitern. Ihr gemeinsamer Beitrag ist von sechs Prozent (1995) auf 36 Prozent (2020) rasant angestiegen. Japan hingegen hat sich in den zurückliegenden 25 Jahren deutlich verschlechtert. Das Land, das historisch zusammen mit den USA für den Gutteil der Chipforschung verantwortlich war, trug 2020 nur noch zu zehn Prozent der Forschungspapiere bei.⁵⁴ Somit zeigt sich Europa im Forschungsbereich als starker Akteur im umkämpften weltweiten Wettbewerb. Der steigende Beitrag zum weltweiten Forschungsoutput steht dabei im Kontrast zum sinkenden Anteil Europas an den weltweiten Halbleiterproduktionskapazitäten.

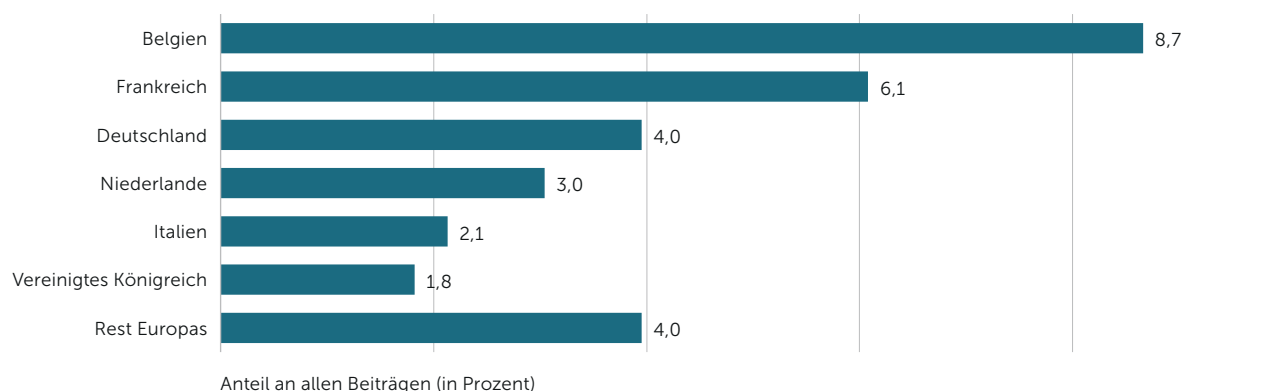
Die Forschungsstärke Europas geht auf wenige europäische Länder zurück. Es handelt sich vor allem um Belgien, Frankreich und Deutschland, die Niederlande, Italien und das Vereinigte Königreich (vgl. Abbildung 21). Diese Länder verfügen über große Forschungseinrichtungen zu Halbleitern. Bei den europäischen Spitzenforschungseinrichtungen im Halbleiterbereich handelt es sich um IMEC in Belgien, CEA-Leti in Frankreich und die Fraunhofer-Gesellschaft in

Deutschland (vgl. Abbildung 22). Besonders Belgien konnte seinen Forschungsbeitrag in den vergangenen Jahren deutlich steigern, da IMEC an der Erforschung von Produktionsprozessen mit immer kleineren Strukturgrößen beteiligt ist. Dafür arbeitet die Forschungseinrichtung eng mit Herstellern wie TSMC, Samsung und Intel zusammen.⁵⁵

Betrachtet man neben dem Forschungsoutput in Konferenzpapieren auch die angemeldeten Patente, erkennt man, dass Deutschland 2017 mit über einem Drittel der in der EU-27 angemeldeten Patente Rang 1 im europäischen Vergleich einnimmt – noch vor Frankreich und Belgien mit ihren wichtigen Halbleiter-Forschungseinrichtungen (vgl. Abbildung 23). Vor allem Deutschland und Frankreich scheinen ihre Forschung also auch in europäische Patente ummünzen zu können. Der geringere Anteil Belgiens mag auch darin begründet liegen, dass das IMEC eher mit ausländischen Unternehmen zusammenarbeitet.

Ebenfalls interessant sind Angaben zum Anteil, den FuE-Ausgaben an den Umsätzen der Halbleiterindustrie ausmachen. Europa (17,1 Prozent) rangiert hier an zweiter Stelle hinter den USA (18,6 Prozent) und noch deutlich vor Japan (12,9 Prozent) und China (6,8 Prozent). Europäische Unternehmen setzen demnach zunehmend auf Innovationen, um sich auf dem Weltmarkt zu behaupten. Relevante Innovationsfelder in der Halbleiterindustrie sind im Exkurs skizziert.

Abbildung 21: Anteil einzelner europäischer Länder an den weltweiten Konferenzpapieren zur Halbleiter-Forschung (2020)



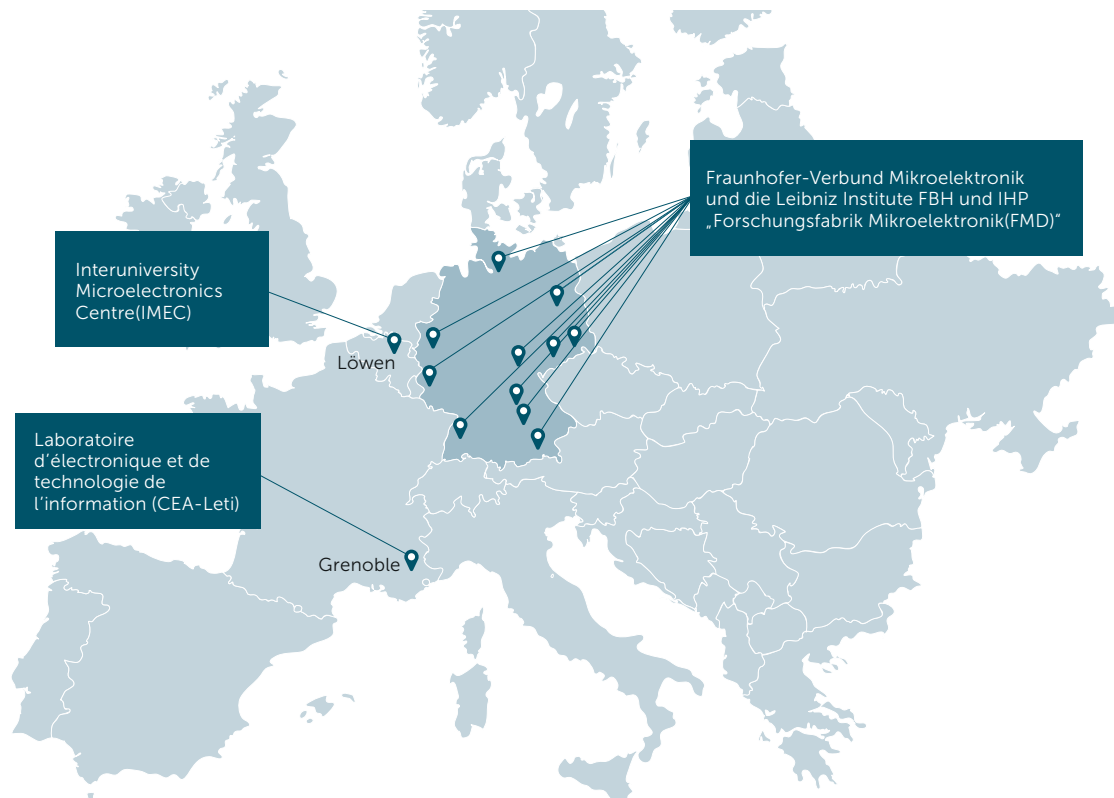
Hinweis: Beiträge mit (Ko-)Autor*innen aus dem jeweiligen Land an Konferenzpapieren in drei führenden internationalen Forschungskonferenzen zu Halbleitern.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Kleinhans et al. 2021

⁵⁴ Kleinhans et al. 2021.

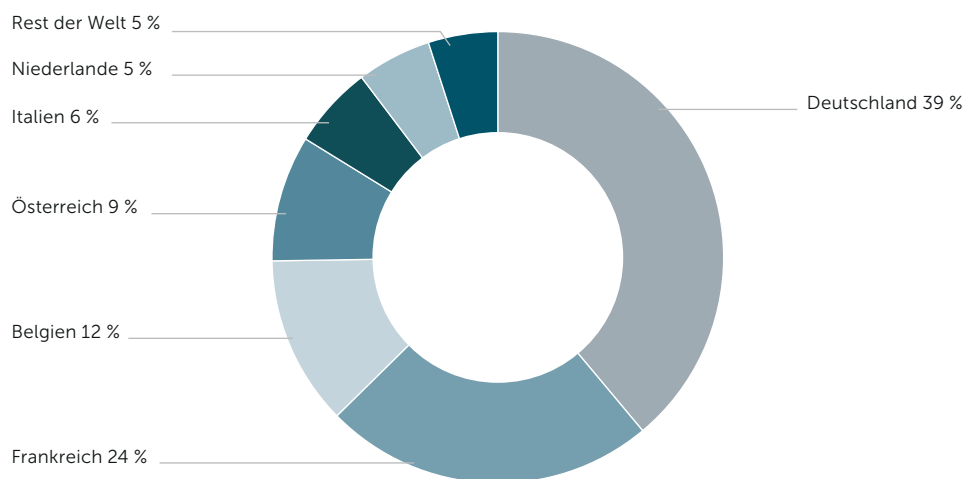
⁵⁵ Ebd.

Abbildung 22: Standorte der wichtigsten europäischen Halbleiter-Forschungseinrichtungen



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf der Europa-Karte von Geonames, Microsoft & TomTom

Abbildung 23: Anteil einzelner Länder an den Patentanmeldungen der EU-27 im Bereich Halbleiter (2017)



Hinweis: IP5-Patentfamilien sind Patente, die bei mindestens zwei Ämtern weltweit angemeldet werden, eines davon muss eines der fünf größten Ämter für geistiges Eigentum sein: das Europäische Patentamt (EPA), das Japanische Patentamt (JPO), das Koreanische Amt für geistiges Eigentum (KIPO), das US-amerikanische Patent- und Markenamt (USPTO) oder die National Intellectual Property Administration der Volksrepublik China (NIPA).

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf den IP5 Patentdaten der OECD

Exkurs: Innovationsfelder in der Halbleiterindustrie

Die Forschungsfelder decken je nach betrachteter Halbleitertechnologie viele unterschiedliche Themenfelder ab. Eine grundlegende Herausforderung und damit ein wichtiges Innovationsfeld für nachhaltige, klimafreundliche Halbleitertechnik besteht darin, substanzielle Leistungsverbesserungen zu erzielen und dabei den Energieverbrauch der mikroelektronischen Produkte gering zu halten. Wenn der Bedarf an Rechenleistungen exponentiell ansteigt, wie beispielsweise im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI), muss die Energieeffizienz von Halbleiterprodukten um ein Vielfaches verbessert werden.

Traditionell liegt eine wichtige Quelle für Effizienzverbesserungen und Leistungssteigerungen von Halbleitern in der Weiterentwicklung der Produktionsprozesse. Gordon Moore, ein Gründer von Intel, formulierte 1965 die Vorhersage, dass sich die Zahl der Transistoren auf einem handelsüblichen Prozessor alle zwei Jahre verdoppeln würde. Die technische Grundlage für das aus dieser Beobachtung formulierte Mooresche Gesetz sind immer kleinere Strukturgrößen der Transistoren (zum Beispiel Kanallänge, Kanalweite, Gate-Länge und Substratdotierung). Als Nebenprodukt geht die kontinuierliche Verkleinerung mit einer Kostensenkung einher, während sich die Leistung der Halbleiterkomponenten erheblich verbessert. Diese Skalierung eröffnete der Halbleitertechnik den Weg in mehr oder minder alle Lebensbereiche. Das Mooresche Gesetz besitzt bis heute Gültigkeit, auch wenn der Miniaturisierung der Halbleiterelektronik physikalische und ökonomische Grenzen gesetzt sind.⁵⁶ Als „More Moore Scaling“ wird verstanden, dass kleinere Strukturgrößen von Transistoren für viele Chiptypen (insbesondere für Prozessoren, Speicher und Logikchips) weiter eine wichtige Quelle für Leistungssteigerungen darstellen.

Nicht alle Typen von Halbleitern sind von der Verkleinerung der Strukturgrößen abhängig. Insbesondere analoge Halbleiter, beispielsweise Stromversorgungs- und Hochfrequenzchips sowie Sensoren, folgen nicht dem Trend, immer kleiner zu werden. Innovationen werden bei diesen Arten von Halbleitern unter anderem durch die Verwendung neuer Materialien wie Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) vorangetrieben.

Leistungsverbesserungen werden zudem dadurch generiert, dass vormals selbstständige Baugruppen, zum Beispiel optische und mechanische Funktionen, in zunehmendem Maße in einzelne Chips integriert werden

(Systemintegration). Ein typisches Beispiel für eine extrem hohe Integrationsdichte und -komplexität ist das Smartphone, in dem auf engstem Raum eine große Bandbreite unterschiedlicher Technologien zum Einsatz kommt. Hochintegrierte Chips oder Systeme enthalten oft einen hohen Anteil an analoger Elektronik wie Schnittstellen zur Sensorik, Kommunikationseinheiten und Energieversorgung. Im Entwurf analoger Schaltungen treten zahlreiche physikalische Effekte und Wechselwirkungen auf, die den Entwurf extrem aufwendig machen. Bis zu 90 Prozent des Aufwands zum Entwurf eines Mikrochips entfallen auf den analogen Teil, obwohl dieser typischerweise nur zehn Prozent der Bauteile enthält.⁵⁷

Auch die Aufbau- und Verbindungstechnik gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie viele Möglichkeiten zur Steigerung der Leistung von Halbleitern bietet. Die Aufbau- und Verbindungstechnik ist für analoge Halbleiter oft wesentlich komplexer als für andere Bauelemente. Es muss ein Medium an den Chip heran- oder aus ihm herausgeführt werden. Der Chip muss aber gleichzeitig auch vor den Umwelteinflüssen geschützt werden, welche die Qualität oder die Langzeitstabilität negativ beeinflussen.

Unabhängig vom Chiptyp sind auch eine Verbesserung des Power-Managements und das Zusammenspiel von Hardware und Software als Innovationsfelder zu nennen.⁵⁸ Innovationen in der Chipherstellung, die nicht auf einer Verkleinerung der Strukturgrößen beruhen, werden als „Beyond Moore“ oder „More than Moore“ bezeichnet.

Innovationsökosysteme in Europa

Forschung in marktgängige Innovationen zu überführen, gelingt besonders in sogenannten Innovationsökosystemen. Ein Innovationsökosystem ist ein kollaboratives Netzwerk, das Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Kunden und weitere Stakeholder miteinander verbindet und über einen zielgerichteten Fluss von Informationen, Ideen, Daten und Wissen Innovationen begünstigt.

Die Standorte der im Rahmen der ersten Important Projects of Common European Interest (IPCEI) Mikroelektronik⁵⁹ durch die Mitgliedstaaten der EU geförderten Unternehmen sind ein Indiz dafür, wo es bereits funktionierende Kooperationsbeziehungen von Forschung und Wissenschaft gibt, da gezielt Kooperationen zwischen Wirtschaft und Wissenschaft unterstützt werden sollen. Insgesamt sind demnach in Europa vier Innovations-

⁵⁶ Dornbusch 2018.

⁵⁷ Bundesministerium für Bildung und Forschung 2021a.

⁵⁸ ZVEI 2019.

⁵⁹ Näheres zu den Important Projects of Common European Interest findet sich in Kapitel 6.2.

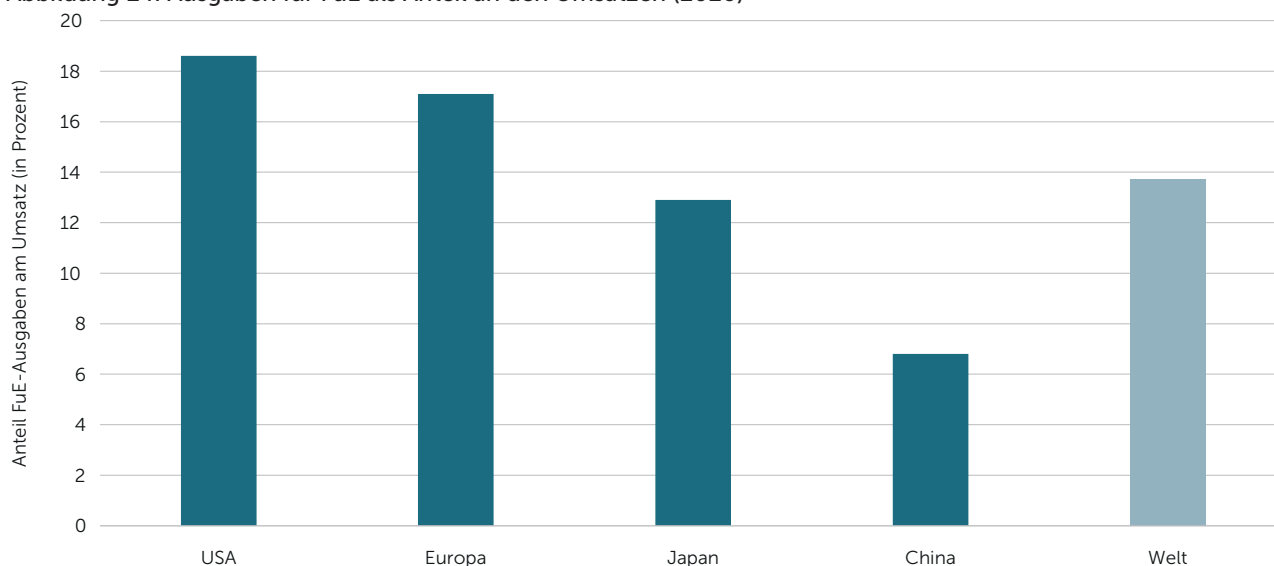
cluster erkennbar (vgl. Abbildung 25). Schwerpunkte der industriellen Umsetzung von Innovationen sind energieeffiziente Chips, Leistungshalbleiter, intelligente Sensoren, Verbundwerkstoffe und vereinzelt fortgeschrittene optische Geräte.

Das Mikroelektronikcluster **Silicon Saxony** in Sachsen ist Europas größter Mikroelektronikstandort. Infineon, GlobalFoundries und seit 2021 Bosch betreiben in Dresden einige der modernsten und größten Halbleiterfabriken Europas.⁶⁰ Neben der FAB 1 von GlobalFoundries, der größten Halbleiterfabrik Europas, betreibt auch das belgische Halbleiterunternehmen X-Fab in Dresden einen Halbleiter-Produktionsstandort. Die Strukturgrößen, mit denen in Dresden produziert wird, gehören zu den fortschrittlichsten in Europa. GlobalFoundries, RacylCs, X-Fab, Infineon, Bosch und AMTC haben in Dresden zudem FuE angesiedelt. Mit dem Advanced Mask Technology Center (AMTC) ist in Sachsen ein führendes Zentrum für FuE sowie Produktion von optischen Lithografie-Masken entstanden. Der Zulieferer Siltronic verfügt in Freiberg über eine Tiegelziehfabrik für Siliziumeinkristalle sowie eine der weltweit modernsten Fertigungslinien für 300-Millimeter-Siliziumwafer, die direkt in den ansässigen Produktionsstätten verwendet werden können. Innovationsschwerpunkte des Clusters liegen im Bereich energieeffiziente Chips, Leistungshalbleiter und intelligente Sensoren (vgl. Abbildung 25). So forscht zum Bei-

spiel Infineon in Dresden im Rahmen des IPCEI dazu, wie Prozesse, die bei der Herstellung von Sensoren anfallen, optimiert werden können. Zudem befinden sich in Dresden die Fraunhofer Institute für Integrierte Schaltungen (IIS) und für Photonische Mikrosysteme (IPMS) sowie in Chemnitz das Fraunhofer Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS), die alle zum Verband „Forschungsfabrik Mikroelektronik“ gehören. Er wurde gegründet, um die Halbleiterindustrie in Deutschland mit FuE-Dienstleistungen zu versorgen und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Insgesamt sind im Dresdener Silicon Saxony rund 62.000 Beschäftigte tätig, mehr als die Hälfte von ihnen im Softwarebereich.⁶¹

Im **Cluster Grenoble** hat sich rund um das Forschungsinstitut für Elektronik und Informationstechnologie CEA-Leti ein Ökosystem mit insgesamt 8.000 Beschäftigten im „Imaging Valley“ gebildet, wobei die Mikroelektronik, das „Microelectronics Valley“ mit 6.000 Beschäftigten den größten Bereich darstellt.⁶² Jährlich werden etwa 120 Patente angemeldet.⁶³ Aus dem 1967 gegründeten Institut haben sich seitdem 30 Start-ups gebildet, die teilweise zu großen Firmen herangewachsen sind, wie der Hersteller für Halbleitermaterialien Soitec. Der zweitgrößte europäische Halbleiterhersteller STMicroelectronics betreibt in Grenoble einen modernen Produktionsstandort, in dem Chips auf 300-Millimeter-Wafern gefertigt werden und der neben Intels Fabrik in Irland als einziger in Euro-

Abbildung 24: Ausgaben für FuE als Anteil an den Umsätzen (2020)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Statista

⁶⁰ Dornbusch 2018.

⁶¹ Wirtschaftsförderung Sachsen 2019.

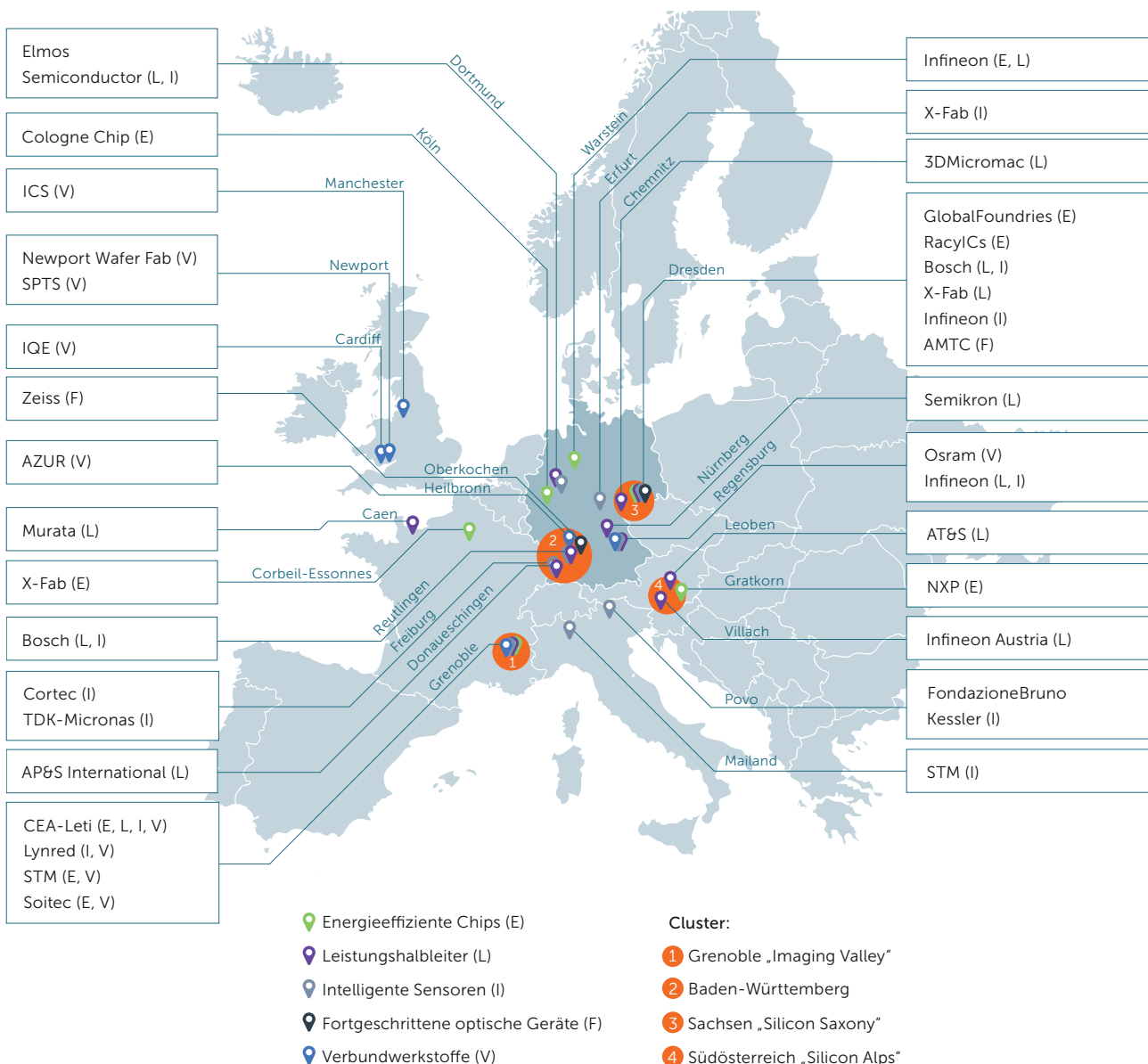
⁶² CEA-Leti 2021.

⁶³ Fraunhofer IZM 2022.

pa mit Strukturgrößen von 14 Nanometern produziert.⁶⁴ STMicroelectronics ist eine FuE-Partnerschaft mit dem CEA-Leti eingegangen, die 40 Jahre zurückreicht. Dies ist repräsentativ für die Verflechtung zwischen den in Grenoble ansässigen Unternehmen und dem Institut. Des Weiteren führen Soitec und der Infrarotdetektorenhersteller Lynred im Rahmen des ICPEI FuE am Standort Grenoble durch. Neben den Forschungsbereichen energieeffiziente Chips, Leistungshalbleiter und intelligente Sensoren wird hier auch am Einsatz von Verbundwerkstoffen geforscht.

Die **Region Kärnten** in Österreich gehört ebenfalls zu den europäischen Hotspots der Mikroelektronikindustrie. Infineon beschäftigt am Standort Villach ungefähr 4.600 Arbeitskräfte. Das Unternehmen hat an dem für Österreich wichtigen Industriestandort im September 2021 eine hochmoderne Chipfabrik für Leistungselektronik eröffnet.⁶⁵ In der 1,6 Milliarden Euro teuren Produktionsstätte werden wie in Dresden Halbleiter auf 300-Millimeter-Wafern produziert.⁶⁶ Neben Infineon haben sich internationale Unternehmen wie Intel, Flex, CISC Semiconductor

Abbildung 25: Forschungs- und Entwicklungsstandorte sowie Orte für die erste industrielle Umsetzung von Innovationen in Europa



Hinweis: Die Darstellung umfasst die 32 Unternehmen aus Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und dem Vereinigten Königreich, die im Rahmen des ersten ICPEI Mikroelektronik durch die Mitgliedstaaten der EU gefördert wurden.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf der Europa-Karte von Geonames, Microsoft & TomTom

⁶⁴ Kearney 2021.

⁶⁵ Mouchegh 2021.

⁶⁶ Infineon 2020.

oder Zulieferer wie Lam Research dort angesiedelt. Auch lokale Unternehmen wie Ortner Reinraumtechnik, Augmensys, PMS Elektro- und Automationstechnik oder Wild Hi-Precision sind in der Region Kärnten angesiedelt. Zahlreiche Betriebe forschen im Bereich Mikroelektronik und Electronic Based Systems. In der angrenzenden Steiermark befindet sich der Hauptsitz von ams. Der Halbleiterhersteller, der zu den fünf größten in Europa zählt, hat hier seine europäische Produktionsstätte. Außerdem sitzt dort auch der Zulieferer für Leiterplatten AT&S. FuE konzentriert sich vor allem im Bereich der Leistungselektronik.

Nicht zuletzt haben sich rund um die Automobilindustrie mit starken Zulieferern wie Bosch in **Baden-Württemberg** zahlreiche Halbleiterunternehmen angesiedelt. Der Cluster erstreckt sich über das gesamte Bundesland mit erhöhter Konzentration um Stuttgart und Freiburg. Zu den ansässigen Unternehmen gehören neben Bosch das japanische Elektronikunternehmen Murata, der 2021 vom japanischen Halbleiterhersteller Renesas gekaufte Zulieferer Dialog Semiconductors und das Fotovoltaikunternehmen AZUR Space Solar Power. Im südlichen Baden-Württemberg sitzt neben dem Halbleiterunternehmen TDK-Micronas, der Medizintechnikfirma Cortec und dem Anlagenzulieferer AP&S auch das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF), das als Teil der „Forschungsfabrik Mikroelektronik“ zu Halbleitertechnologien forscht. In seinem Werk in Reutlingen bei Stuttgart hat Bosch im Dezember 2021 die Serienproduktion von Halbleitern aus Siliziumkarbid gestartet. Der Einsatz von Siliziumkarbid verbessert die Energieeffizienz der hergestellten Halbleiter, was besonders für die E-Mobilität wichtig ist.⁶⁷ Auch AZUR Space Solar Power entwickelt, indem es sein Know-how aus der Fotovoltaikentwicklung nutzt, Halbleiterbauelemente aus anderen innovativen Materialien wie zum Beispiel Galliumarsenid, die Vorteile für die Automobilindustrie bringen können.⁶⁸ Obwohl nahezu alle Forschungsthemen für den Cluster relevant sind, scheint ein Fokus auf intelligenten Sensoren und dem Bereich der Leistungselektronik zu liegen. Mit Zeiss ist außerdem das einzige geförderte Vorhaben im Bereich Fortgeschrittene optische Geräte im Cluster vertreten.

⁶⁷ Stuttgarter Nachrichten 2021.

⁶⁸ IPCEI 2021.

4. Transformationstrends: Digitalisierung, Globalisierung, demografischer Wandel

4.1 Digitalisierung

Da Halbleiter eine Art Basistechnologie der Digitalisierung sind, kommt der Halbleiterindustrie eine zentrale Rolle für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft zu. Gemäß dem Mooreschen Gesetz konnte über Jahrzehnte hinweg immer leistungsfähigere Halbleitertechnik zu geringeren Kosten und mit geringerem Energieverbrauch produziert werden. Fortschritte in den Herstellungsverfahren, im Design, bei den Gehäusetechnologien und den verwendeten Materialien haben stetig neue Anwendungsfelder für Halbleiterprodukte eröffnet und damit die Diffusion digitaler Anwendungen in viele Lebensbereiche erst ermöglicht.

Halbleiter in digitalen Zukunftsanwendungen

Mit der fortschreitenden Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft werden immer mehr Lebensbereiche, Produkte und Dienstleistungen „smart“ und „intelligent“. Die zunehmende Vernetzung und der steigende Bedarf an Datenverarbeitung sind dafür verantwortlich, dass zukünftig vermehrt innovative Halbleiterlösungen benötigt werden. Im Folgenden wird daher die Bedeutung der Halbleiterindustrie für beispielhafte digitale Zukunftsanwendungen skizziert:

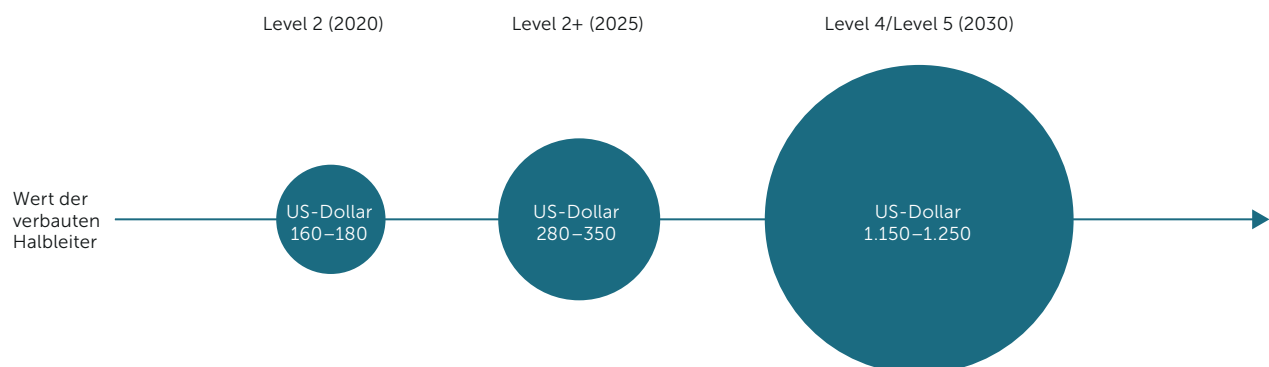


Automatisiertes und vernetztes Fahren: Technologische Basis für eine vernetzte und automatisierte Mobilität ist die Mikroelektronik. Systeme für das teil- beziehungsweise vollautomatisierte Fahren bestehen im Wesentlichen aus Sensoren (zum Beispiel Radar, Innenraum- oder Außenkamera), einem zentralen Hochleistungsrechner für die Auswertung der Sensordaten und die Berechnung der Fahrstrategie sowie aus Aktuatoren⁶⁹ für Lenkung, Bremse, Motorsteuerung und Getriebe. Hatte 2016 jedes weltweit neu ausgelieferte Auto beispielsweise durchschnittlich neun Chips von Bosch an Bord, wuchs dieser Anteil auf 17 Chips im Jahr 2019.⁷⁰ Mit zunehmender Automatisierung wird der Wert der im Auto verbauten Halbleiter noch deutlich ansteigen (vgl. Abbildung 26). Denn mit der steigenden Anzahl von Sensoren steigen auch die Datenmengen, die vom zentralen Hochleistungsrechner des Autos weiterverarbeitet werden müssen. Um in Echtzeit basierend auf den verarbeiteten Daten Fahrentscheidungen zu treffen, ist demnach ein sehr hoher Rechenaufwand erforderlich.



Das automatisierte und vernetzte Fahren ist eines der großen Anwendungsfelder für Methoden, die auf künstlicher Intelligenz (KI) basieren. Das Trainieren

Abbildung 26: Prognose des zusätzlichen Halbleiterbedarfs durch das automatisierte Fahren (2020, 2025, 2030)



Hinweis: Zur Abgrenzung der Funktionsumfänge von Fahrerassistenz- und Automatisierungssystemen wird die sechsstufige SAE-Skala angewendet, welche von Level 0 (keine Automatisierung) bis Level 5 (fahrerloses Fahren) reicht. Mit steigendem Level steigt auch der Funktionsumfang des Systems und die Verantwortung des Fahrenenden für die Fahraufgabe nimmt ab.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Strategy Analytics 2020

⁶⁹ Ein Aktuator (auch Aktor) ist eine antriebstechnische Baueinheit, die ein elektrisches Signal in mechanische Bewegungen bzw. Veränderungen physikalischer Größen wie Druck oder Temperatur umsetzt.

⁷⁰ Bosch 2021.

einer KI mit großen Datenmengen braucht viel Rechenleistung und somit Energie. Das enorme Potenzial von KI kann für viele Anwendungen allerdings erst ausgeschöpft werden, wenn sich die Energieeffizienz der Anwendungen deutlich verbessert. Hierfür braucht es innovative Halbleiterprodukte. Das Technologiefeld von speziell auf KI abgestimmten Prozessoren entwickelt sich sehr dynamisch. Die Entwicklung von Spezialprozessoren für KI-Anwendungen ist jedoch sehr komplex, weil Sensorik (Daten), Algorithmen und Elektronik präzise miteinander verzahnt werden müssen.



Industrie 4.0 steht für eine intelligente, flexible und vernetzte Produktion und Logistik. Durch die umfassende Digitalisierung und Automatisierung von Produktionsprozessen und Betriebsabläufen werden diese effizienter, flexibler und individueller. Halbleiterprodukte wie Sensoren und Prozessoren stellen die Komponenten dar, mit deren Hilfe die industrielle Produktion digitalisiert wird. Ein Beispiel, wie in der Industrie durch Automatisierung große Mengen Energie eingespart werden können, ist die Optimierung der elektrischen Antriebe von Kränen, Förderbändern, Automatisierungssystemen oder Robotern. Elektronisch geregelte Motoren können durch die Verwendung einer elektronischen Steuerung zur Drehzahlregelung die Leistung an den aktuellen Bedarf anpassen.⁷¹ Eine drehzahlgeregelte Motorsteuerung erfordert eine Vielzahl von Leistungshalbleitern. In vielen industriellen Anwendungen sind zudem Spezialprozessoren gefragt, die mit Blick auf Energieeffizienz, Echtzeitfähigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit auf die Erfordernisse der jeweiligen Anwendung zugeschnitten sind. Wichtige Voraussetzungen sind aufeinander abgestimmte Hard- und Softwarekomponenten, eine dezentrale Datenverarbeitung, Echtzeitprozesssteuerung sowie Selbstdiagnose, -konfiguration, -optimierung und -reparatur.

Auch die Halbleiterindustrie selbst kann von einer digitalisierten Produktion profitieren. Chancen für Effizienzgewinne und Kosteneinsparungen liegen hier in der Optimierung interner Prozessabläufe, wie zum Beispiel den weltweiten Produktionsstandorten und deren Zusammenspiel. Die Halbleiterfertigung selbst ist hoch automatisiert und digitalisiert. Besonders die neusten Produktionsstandorte der europäischen Halbleiterhersteller sind in der Umsetzung von Industrie 4.0 weit fortgeschritten. Infineon hat am Produktionsstandort Villach (Österreich) im Verbund mit dem Standort in Dresden (Deutschland) das Konzept einer standortübergreifenden virtuellen Fertigungssteuerung etabliert. So werden

die Werke in Villach und Dresden die gleichen Prozesse, Anlagen, Automatisierungs- und Digitalisierungskonzepte nutzen. Ziel ist es, das Fertigungsvolumen über beide Standorte hinweg flexibel verschieben zu können.



Kommunikation: Für industrielle Anwendungen und für die vernetzte Mobilität müssen Erreichbarkeit, Verfügbarkeit, Robustheit und Resilienz der Kommunikationsnetze und oft auch Echtzeitfähigkeit zuverlässig sichergestellt sein. Kommunikations- und Datennetze bestehen aus vielen verschiedenen mikroelektronischen Komponenten – von Hochfrequenztechnik und Optoelektronik über Leistungselektronik bis hin zu speziellen Prozessoren. Als Basistechnologie für Kommunikationsnetze muss die Mikroelektronik hohen Anforderungen genügen. Zu den neuen Entwicklungen, die dies ermöglichen, gehört beispielsweise Edge-Computing. Es zielt darauf ab, dass deutlich weniger Daten überhaupt übertragen werden müssen. Zu diesem Zweck werden Dienste zur Speicherung und Verarbeitung von Daten, die üblicherweise in zentralen Rechenzentren durchgeführt werden, näher am Endgerät ermöglicht.⁷² Für das dafür erforderliche intelligente Netzwerkdesign und die Datenvorverarbeitung am Punkt der Messung oder im Netz liefert die Elektronik die Komponenten. Entwicklungsbedarf besteht auch bei der Ausrüstung für 5G- und zukünftig 6G-Netze. Dazu gehören Elektronik für neue, höhere Frequenzbänder, neue Prozesstechnologien für eigene Hochfrequenz-Elektronik sowie energieeffiziente Hardware für software-definierte Funktechnologien (zum Beispiel OpenRAN).



Im Internet der Dinge (IoT) werden physische Dinge wie Smartphones, Uhren, Kameras über Autos und Computer bis hin zu Haushaltsgeräten und Industriemaschinen mit eingebetteten elektronischen Systemen, Software und Sensoren ausgestattet. Dadurch wird die physische Welt zunehmend mit der digitalen Welt verbunden. Halbleiterlösungen sind die zentralen Impulsgeber für das IoT. Sensoren erfassen analoge Umweltinformationen und wandeln sie in digitale Daten um; Mikrocontroller verarbeiten diese Daten und erzeugen Steuersignale; Stellglieder setzen die Steuersignale in Aktionen um; Sicherheitslösungen schützen die Integrität von Geräten und Daten und Konnektivitäts-Chips stellen die Verbindung zwischen der realen und der digitalen Welt her.



Sicherheit: Die zunehmende Vernetzung von Personen, Maschinen, Geräten und Automobilen verlangt nach einem hohen Maß an IT-Sicherheit. In der

⁷¹ Infineon 2020.

⁷² Bundesministerium für Bildung und Forschung 2021a.

vernetzten und digitalen Industrie entstehen Angriffspunkte für Hacker und auch das vernetzte Fahren birgt die Gefahr unbefugter Zugriffe. Im IoT ist es wichtig, nur autorisierte und authentifizierte Geräte einzubinden und sie gegen Manipulation und Cyberattacken zu schützen. Daher handelt es sich bei halbleiterbasierten Sicherheitstechnologien um einen Wachstumsmarkt. Anwendungen ermöglichen es, Personen und Maschinen zu authentifizieren, vertrauliche Daten zu schützen und unbefugte Änderungen an vernetzten Maschinen und Geräten zu erkennen. Die elektronischen Bauelemente, die zentral für die Absicherung sind, werden typischerweise fest eingebaut. Daher wird in diesem Zusammenhang von Embedded Security (eingebettete Sicherheitscontroller) gesprochen. Beispielsweise können mit speziellen Sicherheitschips Schlüssel, Passwörter und digitale Zertifikate geschützt und getrennt vom Hauptprozessor abgelegt werden.

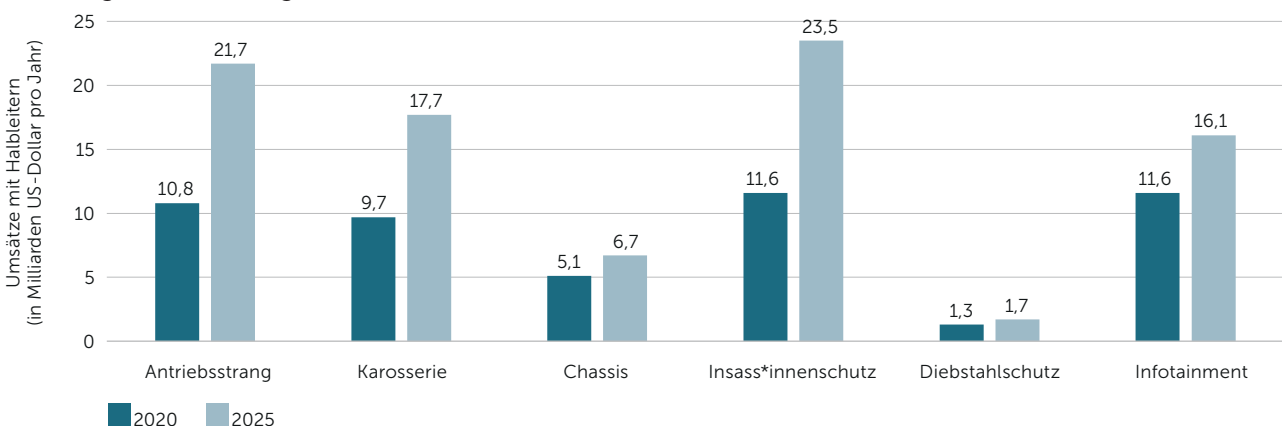
Wachstumschancen für die europäische Halbleiterindustrie

Dass Mikroelektronik die Basis für wichtige digitale Zukunftsanwendungen ist, bietet Wachstumschancen. Der weltweite Markt für Halbleiter wächst derzeit um rund fünf Prozent pro Jahr – eine Entwicklung, die sich mit der fortschreitenden Digitalisierung fortsetzen wird. Der ZVEI geht davon aus, dass das Wachstum des weltweiten Mikroelektronikmarkts bis 2025 bei fünf Prozent pro Jahr liegen wird.⁷³ Dies eröffnet Chancen für europäische Hersteller, ihre Marktposition im Bereich der analogen Elektronik – und hier insbesondere der Leistungselek-

tronik – sowie im Bereich der Spezialprozessoren für Anwendungen im industriellen Einsatz auszubauen. Vor allem die enge Anbindung an die Abnehmerbranchen wie die Automobilindustrie und Industrie tragen zu diesem Potenzial bei.

Insbesondere das für die europäische Halbleiterindustrie wichtige Segment der automobilen Halbleiter ist ein Wachstumsmarkt. Der ZVEI geht für 2025 von einem Weltbedarf an Kfz-Halbleitern von 87,4 Milliarden US-Dollar aus (2020: 50,0 Milliarden US-Dollar).⁷⁴ Mit einem Wachstum von durchschnittlich zwölf Prozent pro Jahr ist der Automobilsektor der Halbleiterteilmarkt mit den höchsten erwarteten Wachstumsraten.⁷⁵ Abbildung 27 illustriert, in welchen Anwendungsfeldern im Automobilbereich besonders dynamische Marktentwicklungen für die Halbleiterindustrie erwartet werden. Mit dem stärksten Wachstum wird aufgrund des zunehmenden automatisierten Fahrens und den damit verbundenen Sicherheitserwägungen für den Bereich Insass*innen-schutz gerechnet, während der Trend zur Elektromobilität besonders das Halbleiterwachstum im Antriebsstrang befördert. Nach Karosserie und Infotainment sind dies laut Prognose die wichtigsten Märkte für Halbleiter im Automobilbereich im Jahr 2025. Gerade die derzeitige „Transformation der deutschen Automobilindustrie“ (s. Exkurs) ist ein Treiber für die Nachfrage nach Halbleitern in Europa, die es zukünftig zu befriedigen gilt. Strategische Partnerschaften zwischen OEMs (Original Equipment Manufacturer) und der Halbleiterbranche nehmen hierbei einen zentralen Stellenwert ein.

Abbildung 27: Entwicklung der Umsätze mit Halbleitern im Automobilmarkt (2020, 2025)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf ZVEI 2021a

⁷³ ZVEI 2021a.

⁷⁴ ZVEI 2021a.

⁷⁵ Kearney 2022.

Exkurs: Transformation der deutschen Automobilindustrie

Die Megatrends der Nachhaltigkeit, Urbanisierung, Individualisierung und Digitalisierung sind dabei, die Mobilität der Menschen grundlegend zu wandeln. Für die Automobilindustrie, die in Deutschland eine Schlüsselrolle für Beschäftigung, Wertschöpfung und Innovation einnimmt, haben diese globalen Trends ein großes disruptives Potenzial. Die Herausforderung, vor der die Automobilindustrie steht, ist es, den „Paradigmenwechsel zur Informationsökonomie“ erfolgreich zu meistern.⁷⁷ Die Zukunft der Automobilindustrie wird demnach durch Elektrifizierung, Vernetzung, Automatisierung sowie die Entwicklung neuer Mobilitätsdienstleistungen und den Trend zur geteilten Mobilität (shared mobility) bestimmt sein (vgl. Tabelle 6).

Diese Veränderungen haben wiederum Einfluss auf den Stellenwert von Halbleiterprodukten für die Automobilindustrie:

- Die **Elektrifizierung des Antriebsstrangs** macht einen wichtigen Erfolgsfaktor der Automobilindustrie in Deutschland obsolet, die Technologieführerschaft im Bereich des Verbrennungsmotors. Für Zulieferer bedeutet die Abkehr vom Verbrennungsmotor einen weitreichenden Strukturwandel, da zentrale Komponenten des Motors überflüssig werden. Gleichzeitig gewinnen andere Vorprodukte wie Halbleiter durch die Elektrifizierung an Bedeutung. Leistungshalbleiter aus Siliziumkarbid können die vorhandene Energie im Elektroauto deutlich effizienter nutzen, was sich positiv auf die Reichweite der Fahrzeuge auswirkt.⁷⁸ Europäische Firmen wie Bosch setzen bereits auf diese Entwicklung.

- Der Trend zur **Vernetzung und zur Automatisierung** erfordert eine grundlegende Neugestaltung der Software- und Elektronikarchitektur des Automobils. Der Einsatz von Software in den Fahrzeugen steigt kontinuierlich an und das Automobil wird vom Hardware- zum Softwareprodukt. Diese Vernetzung von Elektronikkomponenten, die traditionell als voneinander unabhängige Komponenten funktionierten, innerhalb eines Automobils wäre ohne den Einsatz moderner Halbleiter nicht möglich.

- **Neue Mobilitätskonzepte** wie Car Sharing, Ride Hailing⁷⁹ und Mobilitätsplattformen ergänzen zunehmend das traditionelle Geschäftsmodell der Automobilindustrie. Im Zentrum steht zukünftig nicht mehr das Automobil als Produkt, sondern die Mobilitätsnachfrage. Die automobilen Wertschöpfung verlagert sich dadurch weg von der klassischen Fahrzeugherstellung hin zu Mobilitätsdienstleistungen. Auch dies steigert den Bedarf an vernetzten und integrierten digitalen Lösungen, die ebenfalls auf der Halbleiter-Technologie basieren.

Aufgrund dieser grundlegenden Veränderungen ist es abzusehen, dass sich neuartige Allianzen zwischen OEMs, Systemzulieferern und Tech-Unternehmen bilden werden. Das klassische Modell der Zusammenarbeit in der Automobilindustrie, eine hierarchisch organisierte Lieferkette, an deren Spitze der OEM steht, wird sich auflösen. Stattdessen entstehen neue Muster der Zusammenarbeit und neue Partnerschaften. Beispielsweise legten BMW und Daimler 2019 ihre Mobilitätsdienste zusammen, um Ressourcen zu bündeln und Skalenerträge zu erzielen. Während Halbleiterhersteller traditionell an Tier 1 oder

Tabelle 6: Wandel des Automobilmarkts weltweit bis 2030

Veränderung	2020	2030	Indikator
Elektrifizierung	3 %	24 %	Anteil der Elektrofahrzeuge (inkl. Hybridfahrzeuge) an allen verkauften Neuwagen
Vernetzung	45 %	96 %	Anteil der weltweit ausgelieferten Neufahrzeuge mit integrierter Konnektivität
Automatisierung	45 %	79 %	Anteil der weltweit ausgelieferten Neufahrzeuge mit Automatisierungsstufe 2 oder höher ⁷⁶
Mobilitätsdienstleistungen und geteilte Mobilität	3 %	26 %	Anteil der Gewinne im Mobilitätssektor aus neuen Quellen wie on demand mobility

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Experiences Per Mile Advisory Council 2020

⁷⁶ Zur Abgrenzung der Funktionsumfänge von Fahrerassistenz- und Automatisierungssystemen wird die sechsstufige SAE-Skala angewendet, welche von Level 0 (keine Automatisierung) bis Level 5 (fahrerloses Fahren) reicht. Mit steigendem Level steigt auch der Funktionsumfang des Systems und die Verantwortung des Fahrenen für die Fahraufgabe nimmt ab.

⁷⁷ Boes & Ziegler 2021.

⁷⁸ Köllner 2019.

⁷⁹ Vermittlung von Taxifahrer*innen und Kund*innen.

Tier 2 Zulieferer liefern, gehen Analysen davon aus, dass Automobilhersteller zukünftig verstärkt direkt mit Halbleiterherstellern zusammenarbeiten werden.⁸⁰

Einige Beispiele hierfür sind bereits heute in der deutschen Automobilbranche zu erkennen. So arbeitete Daimler für die Entwicklung seines Multimediasystems „Mercedes-Benz User Experience“ (MBUX) mit dem US-amerikanischen Chiphersteller Nvidia zusammen.⁸¹ Aufgrund der gut funktionierenden Zusammenarbeit verkündeten Mercedes Benz und Nvidia im Juni 2020 eine strategische Partnerschaft, die sich auch auf die Domänen Fahrassistenz und automatisiertes Fahren erstrecken soll. Hierzu wurde ein eigenes Start-up namens Mbition in Berlin gegründet, um MBUX weiterzuentwickeln und auszubauen. Die Vision ist, nach dem Vorbild von Tesla den Kunden kontinuierliche Updates und neue Features gegen Bezahlung anzubieten, die aufgrund der neuen Software- und Elektronikarchitektur über cloud-basierte „Over-the-air“-Updates und während des Produktlebenszyklus möglich sind. Auch BMW kooperiert mit Nvidia im Bereich der Fabriklogistik. Im Rahmen der Partnerschaft soll die Isaac-Robotics-Plattform von Nvidia in den Werken von BMW genutzt werden.

Beim VW Konzern ist die Fokussierung auf eine „neue Softwarekompetenz“ zentraler Bestandteil der Strategie „Together 2025+“, die im Jahre 2019 veröffentlicht wur-

de.⁸² Das Unternehmen strebt an, den Eigenanteil an der eingesetzten Software, der bisher bei zehn Prozent lag, auf 60 Prozent zu steigern und die Transformation vom isolierten Planen der einzelnen Hardwarefunktionen hin zu einer integrierten Systemlösung zu gestalten. Der Automobilzulieferer Bosch hat in Reaktion auf diese Entwicklung 2021 die drei Geschäftsbereiche, die software-intensive Elektroniksysteme entwickeln, unter einem Dach zusammengeführt. Das Unternehmen strebt dezidiert an, Hard- und Software integriert zu entwickeln.

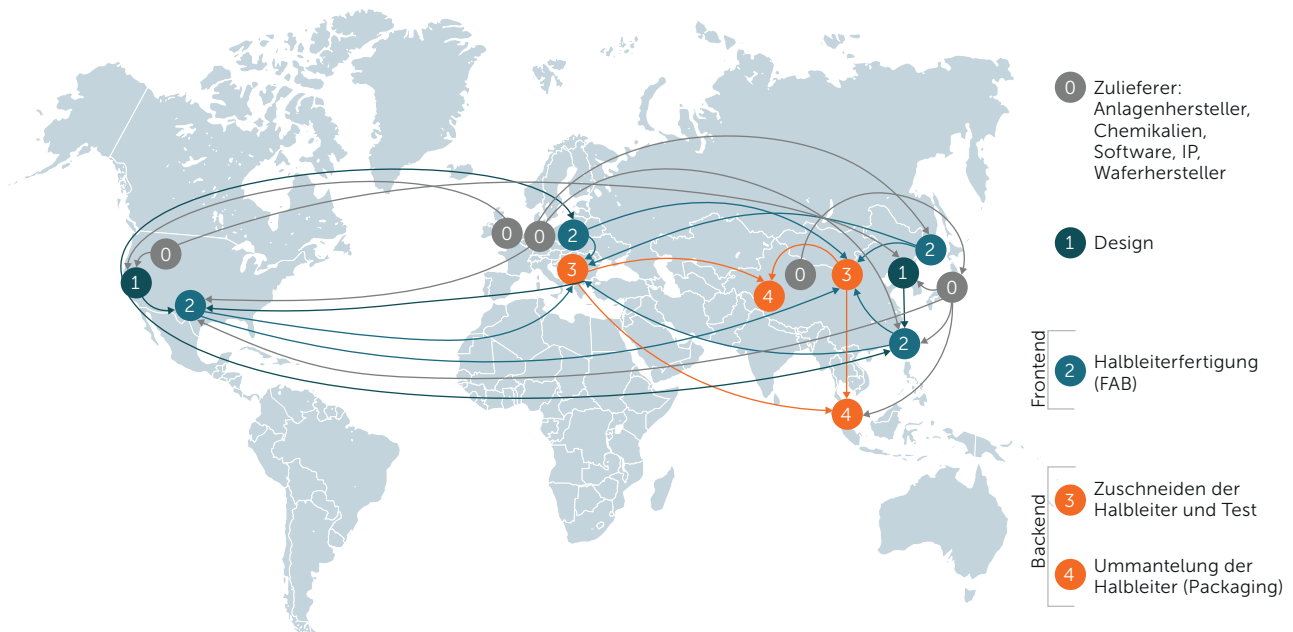
4.2. Globalisierung

Die Halbleiterwertschöpfungskette ist in hohem Maße international verflochten, wobei sich verschiedene globale Regionen auf verschiedene Produktionsschritte spezialisiert haben. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass ein Halbleiter in den USA entworfen, in Taiwan produziert und in China zusammengebaut und verpackt wird, wobei in der Produktion Chemikalien aus Japan und Deutschland zum Einsatz kommen, während die Produktionsanlagen aus den Niederlanden stammen.⁸³ Abbildung 28 zeigt das stilisierte globale Wertschöpfungsnetzwerk, das ein Chip bis zur Auslieferung an die Kundschaft durchlaufen kann.

Spezialisierung entlang der Wertschöpfungskette

Diese globalisierte Wertschöpfung ist das Ergebnis jahrzehntelanger globaler Spezialisierungs- und Konzentrationsprozesse. Noch in den 1990er-Jahren hatten

Abbildung 28: Globales Wertschöpfungsnetzwerk



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf ZVEI 2021b

⁸⁰ Strategy Analytics 2020.

⁸¹ Boes & Ziegler 2021.

⁸² Ebd.

⁸³ Kleinhans & Lee 2021.

europäische Halbleiterhersteller deutlich höhere Marktanteile als heute. Im Jahr 2000 lag der Anteil Europas an der weltweiten Halbleiter-Produktionskapazität bei 20 Prozent und die damals neuste Generation von Halbleitern wurde in Europa produziert.⁸⁴ In der Anfangsphase war die Halbleiterbranche von IDMs bestimmt, die alle drei Produktionsschritte – Entwicklung, Fertigung sowie Montage und Prüfung – im eigenen Unternehmen abdecken.

Seitdem hat sich die Industrie stark gewandelt. Wichtiger Treiber waren die Kosten für die Entwicklung und die Herstellung von Chips, die mit jeder neuen Generation stark angestiegen sind (zwischen 2002 und 2012 um den Faktor fünf).⁸⁵ Beispielsweise betragen die Kapitalkosten für eine moderne 5-Nanometer-Fabrik knapp 20 Milliarden US-Dollar mit geschätzten jährlichen operativen Kosten von einer Milliarde US-Dollar.⁸⁶ In der Folge reduzierte sich generell die Zahl der Firmen, die die neuste Generation von Chips produzierten. Außerdem spezialisierten sich Unternehmen zunehmend auf einzelne Schritte in der Wertschöpfungskette. Das Fabless- und Foundry-Geschäftsmodell entstand, um die Kosten zwischen Entwurf und Produktion aufzuteilen. Zudem wurden die europäischen Hersteller Siemens, Ericsson und Nokia im Bereich der Unterhaltungselektronik zunehmend von amerikanischen und asiatischen Herstellern verdrängt.⁸⁷ Mit den Kommunikationsgeräten verlagerte sich auch die Nachfrage nach der jeweils neusten Generation von Chips weg von Europa. Die Halbleiterunternehmen in Europa spezialisierten sich auf die verbleibenden Nachfrager im Bereich Industrie und Automobilindustrie, für die Chips mit kleinen Strukturgrößen weniger wichtig sind als für Kommunikationsgeräte.⁸⁸

Regionale Konzentration der Wertschöpfungskette

Aktuell ist keine Weltregion in der Lage, die gesamte Halbleiterwertschöpfungskette mit heimischen Firmen abzudecken und somit „technologische Souveränität“ zu erreichen. Der hohe Grad der internationalen Arbeitsteilung und die starke Marktkonzentration haben vielmehr dazu geführt, dass an mehreren Stellen in der Wertschöpfungskette kritische Engstellen bestehen, an denen nur wenige Unternehmen und Länder in der Lage sind, bestimmte Schritte durchzuführen: Nicht nur die dominante Rolle Südkoreas und Taiwans in der Herstellung technologisch führender Chips, sondern auch

die marktbeherrschende Stellung der USA im Bereich des Chipdesigns⁸⁹ und bei der Chipdesignsoftware sind hier zu nennen. Auch Europa verfügt mit ASML über eine zentrale Position in der Anlagenproduktion, während japanische Firmen als Zulieferer bestimmter Chemikalien eine hervorgehobene Rolle in der Wertschöpfungskette einnehmen.⁹⁰

Am Umsatz bemessen verfügen oftmals kleine Teilbereiche der Halbleiterwertschöpfungskette dennoch über eine große Hebelkraft. Für die europäische und deutsche Halbleiterindustrie bedeutet dies, dass sie in hohem Maße vom Zugang zu Produkten und Dienstleistungen von Firmen im außereuropäischen Ausland abhängig ist. Dies gilt nicht nur für die Halbleiterhersteller selbst, sondern auch für alle nachgelagerten Branchen. Besonders deutlich wurden die globalen Abhängigkeiten, als die Automobilproduktion deutscher Hersteller in der Coronakrise aufgrund von Engpässen bei Halbleitern unterbrochen werden musste (vgl. Exkurs zur Halbleiterknappheit 2020/2021).

Exkurs: Halbleiterknappheit 2020/2021

Bedingt durch die Coronavirus-Pandemie kam es im zweiten Quartal 2020 zu einem historischen Einbruch der Nachfrage im Automobilbereich. In der zweiten Jahreshälfte 2020 zog die Nachfrage, schneller als von vielen Unternehmen erwartet, wieder an. Die Markterholung führte zu einem sprunghaften Anstieg der Nachfrage nach elektronischen Bauteilen und hierbei insbesondere nach Halbleitern für die Automobilindustrie. Der erhöhte Bedarf der Automobilindustrie traf auf eine insgesamt hohe Nachfrage nach Halbleitern, die durch die Bereiche Unterhaltungselektronik, Computer und Kommunikation getrieben war. Aufgrund der Coronavirus-Pandemie mussten einige Halbleiterhersteller zudem die Produktion herunterfahren und bereits geplante Investitionen in eine Erhöhung der Produktionskapazität verzögerten sich. Zusammen führte dies zu globalen Lieferengpässen in der Halbleiterindustrie, so dass die kurzfristig stark gestiegenen Bedarfe der Automobilhersteller nicht gedeckt werden konnten.

Die Lieferengpässe hatten bereits spürbare wirtschaftliche Auswirkungen in Europa, insbesondere in Ländern ohne nennenswerte Halbleiterfertigungskapazitäten. Sie

⁸⁴ Kearny 2021.

⁸⁵ Ebd.

⁸⁶ Kleinhans 2021.

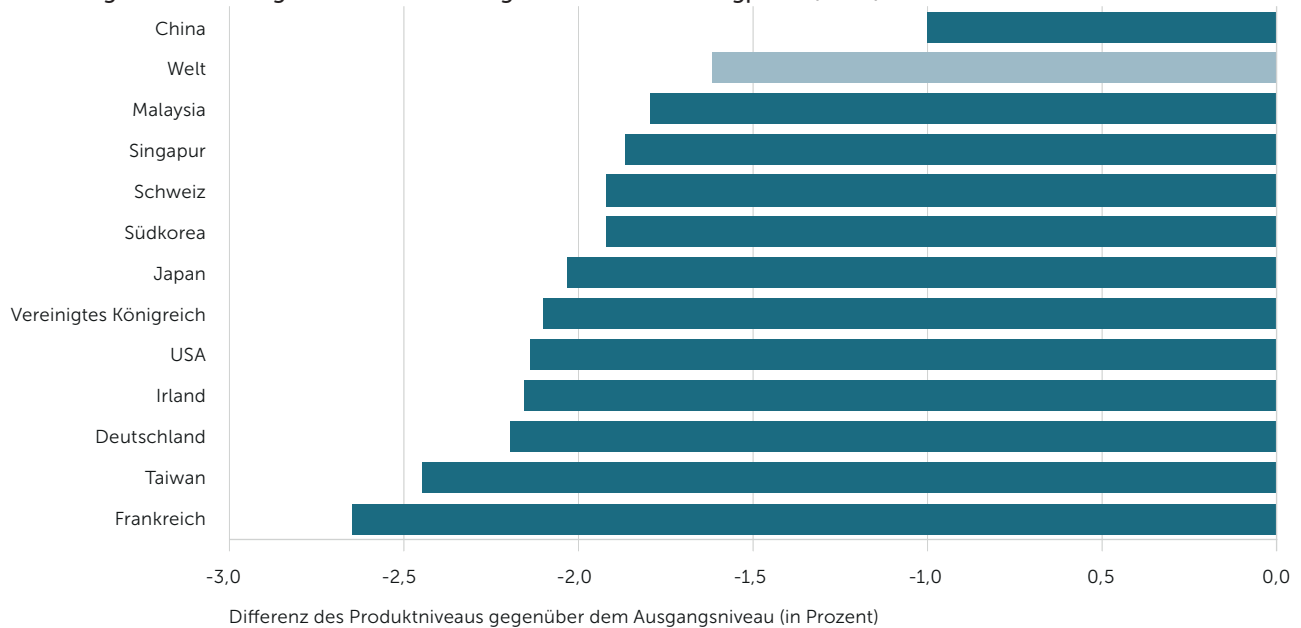
⁸⁷ Ebd.

⁸⁸ Kleinhans & Baisakova 2020.

⁸⁹ Wenn betrachtet wird, an welche Unternehmen die Auftragsfertiger in Südkorea und Taiwan ihre hochmodernen Chips liefern, dominieren amerikanische Unternehmen wie Apple, Qualcomm, AMD, Nvidia und Intel. Sechs der zehn weltweit umsatzstärksten Halbleiterfirmen ohne eigene Fertigung haben zudem in den USA ihren Sitz.

⁹⁰ Kleinhans & Baisakova 2020.

Abbildung 29: Ländervergleich der Auswirkungen weiterer Lieferengpässe (2022)



Quelle: Eigene Berechnungen von Oxford Economics

geben dadurch den Bestrebungen nach strategischer Autonomie in dieser Schlüsseltechnologie weiter Vorschub. So zeigt auch die aktuelle Prognose von Oxford Economics für das Jahr 2022, dass sich ein Szenario mit weiter bestehenden Lieferengpässen bei Halbleitern durch höhere Preise für elektronische Komponenten und Produktionsausfälle in nachgelagerten Branchen vor allem auf europäische Länder wie Deutschland und Frankreich negativ auswirken wird (vgl. Abbildung 27).

Technologische Souveränität und die Entkopplung der globalen Wertschöpfungsketten

Die wechselseitigen Abhängigkeiten auf den verschiedenen Wertschöpfungsstufen der Halbleiterherstellung werden von Regierungen für strategische Interessen genutzt. Dies gilt insbesondere für die technologische Rivalität zwischen den USA und China. So verwehrt die USA dem chinesischen Unternehmen Huawei und seinem Tochterunternehmen, dem Chiphersteller Hisilicon, den Kauf von amerikanischen Halbleitern und Komponenten und erschwert den Unternehmen den Zugang zu amerikanischer Chipdesignsoftware sowie geistigem Eigentum. Handelskonflikte und Einschränkungen im weltweiten Handel aufgrund von politischen Spannungen gehören daher zu den großen Risiken für die Geschäftstätigkeit von Halbleiterfirmen weltweit.

Ein Ansatzpunkt, um unabhängiger vom Zugang zum geistigen Eigentum im Besitz von wenigen, insbeson-

dere amerikanischen Firmen zu werden, ist die zunehmende Verbreitung von offenen Chiparchitekturen und Standards, insbesondere der RISC-V-Architektur (s. Exkurs zu Prozessorarchitekturen in Kapitel 2.2). Für ihre Nutzung fallen im Gegensatz zu proprietären Architekturen keine Lizenzgebühren an und sie unterliegen keinen Exportbeschränkungen. Besonders China setzt auf diesen Weg, um sich in Anbetracht der US-amerikanischen Handelsbeschränkungen unabhängiger vom geistigen Eigentum von amerikanischen Firmen zu machen.⁹¹

Immer mehr Regierungen weltweit wollen Abhängigkeiten zudem verringern, indem sie das nationale Halbleiterökosystem stärken und massiv in den Ausbau einer heimischen Industrie investieren. Die Vereinigten Staaten haben mit dem U.S. Innovation and Competition Act im Juni 2021 Investitionen in Höhe von 52 Milliarden US-Dollar für die heimische Chipindustrie verabschiedet. Die Bestimmungen dieses Plans dienen der Finanzierung des CHIPS for America Act zur Wiederbelebung ihrer Chipfertigung und -forschung. Die USA haben es geschafft, die Investitionen für Produktionsstätten für die neueste Generation von Halbleitern anzuziehen. Die beiden Unternehmen TSMC in Taiwan und Samsung in Südkorea haben angekündigt, fortschrittliche Fabriken in den USA zu errichten.⁹² Damit werden Produktionskapazitäten dort aufgebaut, wo Chips in großem Umfang von Kunden wie Apple entworfen werden.

⁹¹ Eckstein 2021.

⁹² Kleinhans 2021.

Auch Südkorea plant, im Rahmen der K-Belt Semiconductor Strategy (Mai 2021) über den Zeitraum von drei Jahren zwischen 55 und 65 Milliarden US-Dollar bereitzustellen. China hat sich in seinem 14. Fünfjahresplan das Ziel gesetzt, in allen Segmenten der Halbleiter-Wertschöpfungskette Autarkie zu erreichen. Im Rahmen der Initiative Made in China 2025, das China zu einem autarken Marktführer im Bereich der Spitzentechnologie machen soll, hat die chinesische Regierung über einen Zeitraum von zehn Jahren rund 150 Milliarden US-Dollar an Finanzmitteln und anderen Anreizen für die Chipindustrie bereitgestellt. Ziel ist es, in fünf Jahren 70 Prozent des chinesischen Inlandsbedarfs an Chips zu decken.⁹³ Seit 2018 hat China durch eine Reihe von Fördermaßnahmen bereits den Bau von mehr als 52 Halbleiterfabriken finanziert, darunter Zuschüsse, Kapitalbeteiligungen, reduzierte Stromtarife, günstige Kredite und Steuererleichterungen.⁹⁴

Auch das erklärte Ziel der Europäischen Kommission ist es, bis zum Ende dieses Jahrzehnts eine hochmoderne Halbleiterfertigung in der EU aufzubauen. Der weltweite Anteil europäischer Firmen an den Produktionskapazitäten für hochmoderne Chips soll bis zum Jahr 2030 auf 20 Prozent ansteigen (vgl. Kapitel 6).

4.3 Demografischer Wandel und Fachkräftesicherung

Die europäische Bevölkerung altert. Diese Entwicklung ist einerseits mit einem höheren Anteil älterer Menschen und andererseits mit einer schrumpfenden Erwerbsbevölkerung verbunden. Dieser zweite Trend zeichnet sich in der Europäischen Union seit 2010 ab und wird sich in Zukunft weiter fortsetzen. Prognosen zufolge wird die europäische Erwerbsbevölkerung von 2023 bis 2060 um 8,2 Prozent (etwa 19 Millionen Menschen) zurückgehen.⁹⁵

Herausforderung Fachkräftesicherung

Die Halbleiterindustrie ist als Branche der Spitzentechnologie in besonderem Maße vom Zugang zu qualifizierten Fachkräften abhängig. Besonders wichtig sind Fachkräfte aus dem Bereich Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT), zu dem auch das Elektroingenieurwesen zählt. Die Halbleiterindustrie weist als Teil der Elektroindustrie eine der höchsten Beschäftigungsintensitäten an MINT-Kräften auf. In der deutschen Elektroindustrie waren im Jahr 2018 54 Prozent aller Erwerbstätigen MINT-Akademiker*innen oder hatten eine berufliche Qualifikation in einer MINT-Fachrichtung, ein weit überdurchschnittlicher Anteil.⁹⁶

Kenntnisse in der Mikroelektronik sind für die europäische Halbleiterindustrie unerlässlich. Zu den grundlegenden Kenntnissen gehören zum Beispiel Grundlagen der analogen und digitalen Elektronik einschließlich des Entwurfs analoger und digitaler Schaltungen, die Fähigkeit zum Entwurf von Standardschaltungen (verschiedene Grundbausteine und wie man sie entwirft, die Kombination von Bausteinen zum Aufbau von Messketten oder Leistungswandlern), Grundkenntnisse in Chemie, Physik, Mathematik und Mechanik sowie Kenntnisse in Werkstoffen.

Darüber hinaus sind in der Mikroelektronikindustrie praktische Kenntnisse und Fähigkeiten notwendig. Beispiele für wichtige praktische Kenntnisse und Fähigkeiten im Zusammenhang mit Produktionsprozessen sind:

- Kenntnisse der Techniken zum Aufbau robuster, zuverlässiger und leistungsfähiger Schaltungen oder Layouts (im Gegensatz zu Techniken zur Erreichung der besten Spezifikationen ohne Berücksichtigung von Zuverlässigkeit)
- Kenntnisse von Entwurfstechniken zur Berücksichtigung von Temperaturschwankungen, Technologievariationen und Umwelteinflüssen
- Fähigkeit zur Verwendung von Industriestandard-Tools für Entwurf und Layout
- Fähigkeit, Hardware und angewandte Elektronik einzurichten
- Kenntnisse über standardisierte Verarbeitungsgeräte
- Kenntnisse der standardisierten Produktionsprozesse
- Kenntnisse über standardisierte Prüfverfahren
- Kenntnisse über standardisierte prädiktive/präventive Wartungsleistungen

Eine Untersuchung zum Qualifikationsbedarf der europäischen Mikroelektronikindustrie METIS⁹⁷ hat gezeigt, dass viele Industrievertreter*innen bei Hochschulabsolvent*innen mit technischen und ingenieurwissenschaftlichen Profilen einen Mangel identifiziert haben, der sowohl grundlegende Fähigkeiten als auch praktische Kenntnisse im Zusammenhang mit Produktionsprozessen betrifft.

⁹³ Semiconductor Industry Association 2021b.

⁹⁴ Ebd.

⁹⁵ Eatock 2019.

⁹⁶ Institut der deutschen Wirtschaft 2020.

⁹⁷ Metis 2020.

Die **Nachfrage und der Bedarf an MINT-Kräften** werden in Europa in den nächsten Jahren strukturell bedingt zunehmen. Wichtige Treiber sind dabei die Digitalisierung und die Dekarbonisierung. Ausgelöst durch die digitale Transformation wird der Anteil der Arbeit, der fortgeschrittenes technisches Wissen voraussetzt, in Europa bis 2030 um 41 Prozent steigen.⁹⁸ Nicht zuletzt durch die zunehmende Bedeutung von datengetriebenen Geschäftsmodellen wächst der Bedarf an fortgeschrittenen IT- und Programmierkenntnissen, aber auch der Bedarf an grundlegenden digitalen Fähigkeiten nimmt zu. Der Digitalisierungsschub während der Corona-Krise hat den IT-Fachkräftebedarf zusätzlich erhöht.⁹⁹

In der europäischen Mikroelektronikindustrie gehören technische Fähigkeiten und Kenntnisse im Zusammenhang mit der Digitalisierung zu den kritischen Fähigkeiten, das heißt, sie sind sowohl am gefragtesten als auch in verschiedenen Berufsprofilen am schwierigsten zu finden.¹⁰⁰ Zu den für die europäische Mikroelektronikindustrie wichtigen digitalen Fähigkeiten gehören Kenntnisse im Bereich Datenanalytik, künstliche Intelligenz / maschinelles Lernen, Kenntnisse über Anwendungen wie fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme sowie die Themenfelder Cybersicherheit und Software.

Mit dem Ziel Europas, zum ersten klimaneutralen Kontinent zu werden, gewinnen Forschungsthemen im Bereich Nachhaltigkeit, Klima und Energie an Bedeutung. Entsprechend benötigen nicht nur Unternehmen, sondern auch die europäischen Forschungsinstitute mehr akademisches Personal im Bereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik/Naturwissenschaften. In der europäischen Mikroelektronik-

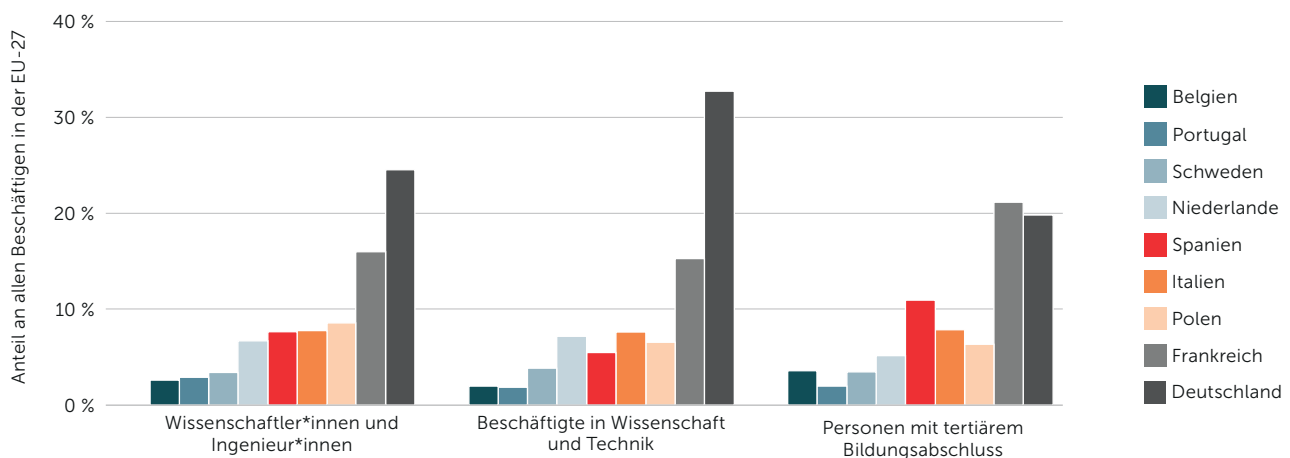
industrie gehören Kenntnisse im Zusammenhang mit dem grünen Wandel bereits zu den Kenntnissen und Fähigkeiten, die dringend gesucht werden und schwer zu finden sind.¹⁰¹

Die Beschäftigungssituation im europäischen Vergleich zeigt, dass die deutsche Halbleiterindustrie auf ein vergleichsweise großes Angebot hoch qualifizierter Arbeitskräfte zurückgreifen kann. Knapp ein Viertel aller Wissenschaftler*innen und Ingenieur*innen und ein Drittel der in Wissenschaft und Technik Beschäftigten aller 27 EU-Staaten sind in Deutschland tätig – mehr als in allen anderen Ländern der EU. Zusätzlich sind knapp 20 Prozent aller Personen mit tertiärem Bildungsabschluss in der EU in Deutschland angesiedelt (vgl. Abbildung 30).

Allerdings wird demografiebedingt ein erheblicher Ersatzbedarf für Fachkräfte entstehen, da viele der heute erwerbstätigen Fachkräfte kurz vor dem Renteneintrittsalter stehen. In Deutschland werden in den kommenden Jahren jährlich über 62.200 MINT-Akademiker*innen aus Altersgründen aus dem Arbeitsmarkt ausscheiden. In den kommenden zehn Jahren wird der jährliche demografische Ersatzbedarf im MINT-Bereich um 13.000 auf 75.200 Beschäftigte zunehmen.¹⁰²

Für ihre **Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit** ist die **europäische Halbleiterindustrie** auf hoch qualifizierte Fachkräfte dringend angewiesen. Branchenanalysen belegen einen hohen Zusammenhang zwischen hoch qualifizierten Erwerbstätigen, insbesondere im MINT-Bereich, und der Innovationskraft. Eine Befragung des ZEW zu

Abbildung 30: Qualifikationsniveau der deutschen Beschäftigten im europäischen Vergleich (2020)



Quelle: Oxford Economics basierend auf Eurostat

⁹⁸ McKinsey 2018.

⁹⁹ Institut der deutschen Wirtschaft 2020.

¹⁰⁰ Metis 2020.

¹⁰¹ Ebd.

¹⁰² Institut der deutschen Wirtschaft 2020.

den wichtigsten Innovationshemmnissen verdeutlicht, dass in Deutschland 34 Prozent der Unternehmen in den Jahren 2016 bis 2018 die Durchführung von Innovationen aufgrund von Fachkräftemangel erschwert wurde.¹⁰³ Fachkräfteengpässe werden inzwischen als häufigstes Innovationshemmnis genannt, 52 Prozent der Unternehmen mit Engpässen haben aus diesem Grund keine Innovationsaktivitäten begonnen. Auch für die Digitalisierung von Unternehmen in der Elektroindustrie entwickelt sich der Zugang zu Fachkräften verstärkt zu einem Hindernis. Sechs von zehn Unternehmen in der deutschen Elektroindustrie geben fehlende Fachkräfte als Problem bei Digitalisierungsvorhaben an.¹⁰⁴ Aufgrund der großen Bedeutung der Halbleiterindustrie für nachgelagerte Branchen hat ein Mangel an qualifiziertem Personal in der Halbleiterindustrie besonders weitreichende Auswirkungen.

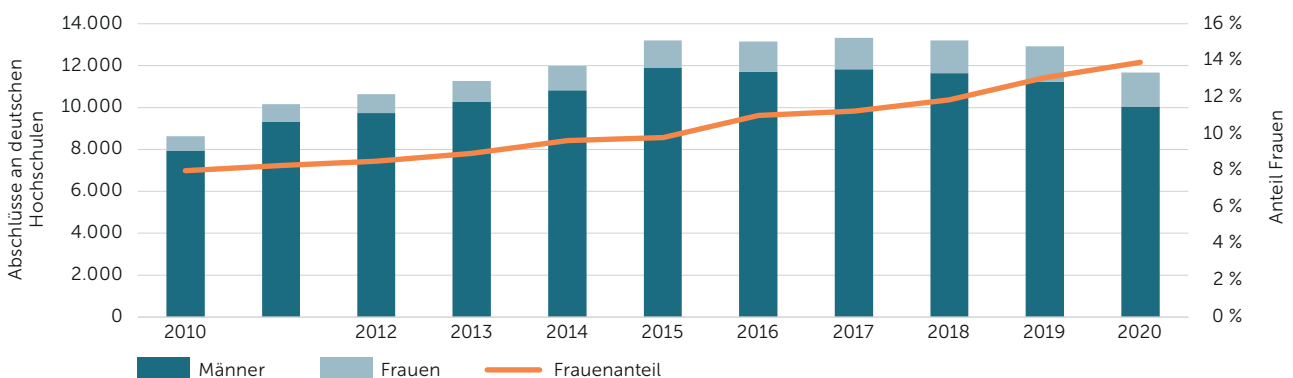
Um auch in Zukunft nachhaltige und hochmoderne Halbleiter in Europa zu entwerfen und zu produzieren, sind besonders akademisch gebildete Fachkräfte von Bedeutung. In Europa verfügt die Elektrotechnik über akademische Spitzeninstitutionen, die sich durch eine hohe wissenschaftliche Qualität, eine enge Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie und eine starke Position bei der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auszeichnen. Neben der Spitzenförderung ist für den zukünftigen Erfolg der Halbleiterindustrie allerdings auch eine gute akademische Ausbildung in der Breite erforderlich. In Deutschland konnten bei der Ausbildung von hoch qualifizierten akademischen Fachkräften seit 2010 zunächst deutliche Verbesserungen erzielt werden. Immer mehr Personen verließen die Hochschule mit einem Abschluss im für die Halbleiterindustrie wichtigen Bereich Elektrotechnik und Elektronik (Bachelor, Master und Promotion, vgl. Abbildung 30). Seit 2015 stagnierte die Zahl der Absolvent*innen jedoch. 2020 verließen

coronabedingt deutlich weniger Absolvent*innen als in den Vorjahren die Hochschulen. Ein großes unausgeschöpftes Potenzial ist in vielen technischen Berufen die Tatsache, dass sich immer noch sehr wenig Frauen für eine Ausbildung in diesen Bereichen entscheiden. Der Frauenanteil bei Hochschulabsolvent*innen in Elektronik und Elektrotechnik stieg in den vergangenen Jahren zwar an, lag 2020 dennoch bei nur 14 Prozent (vgl. Abbildung 30).

Mikroelektronik als Basis für Lösungen in einer alternden Gesellschaft

Neben der Herausforderung, die der demografische Wandel mit Blick auf die Fachkräfteverfügbarkeit für die Halbleiterindustrie mit sich bringt, bietet er auch Chancen für weitere Zukunftsmärkte. So kann halbleiterbasierte Mikroelektronik dazu beitragen, Lösungen für eine alternden Gesellschaft zu schaffen. In der medizinischen Versorgung können Elektroniksysteme für E-Health-Anwendungen genutzt werden. Smarte Uhren unterstützen alternde Erkrankte im Alltag, indem sie kontinuierlich Puls und Blutdruck messen, die Daten an die behandelnden Ärzt*innen weiterleiten und im Notfall Verwandte oder den Notruf verständigen. Vorhersagemethoden auf Basis künstlicher Intelligenz können die ärztliche Diagnosen ergänzen und dabei helfen, Krankheiten vorzubeugen oder schon früh zu erkennen. Roboter können zur Assistenz bei Operationen zum Einsatz kommen. Auf moderner Elektronik basierende Lösungen haben das Potenzial, medizinisches und Pflegepersonal von Routineaufgaben zu entlasten. Serviceroboter übernehmen das Staubsaugen und das Servieren von Essen. In einem Smarthome können zahlreiche alltägliche Aufgaben im Alter zudem barrierefrei und ohne körperliche Anstrengung erledigt werden, indem zum Beispiel Licht, Heizung und Rollläden über Sprachbefehle gesteuert werden.

Abbildung 31: Abschlüsse in Elektronik und Elektrotechnik an deutschen Hochschulen (2010–2020)



Notiz: Erfasst alle Abschlüsse an deutschen Hochschulen.

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Statistik der Prüfungen vom Statistischen Bundesamt

¹⁰³ ZEW 2020.

¹⁰⁴ ZVEI 2021d.

5. Herausforderung Nachhaltigkeit und Treibhausgasneutralität

Umweltschutz ist eine Priorität der EU, die darauf abzielt, die Gefahren für das Klima, die öffentliche Gesundheit und die Biodiversität zu minimieren. Mit dem European Green Deal hat sich die Europäische Kommission das Ziel gesetzt, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen – vor allem mithilfe sauberer Energiequellen und umweltfreundlicher Technologien. Vor diesem Hintergrund steht die europäische Halbleiterindustrie vor der Aufgabe, ihren ökologischen Fußabdruck zu minimieren. Gleichzeitig stellen Halbleiter einen wichtigen Hebel für den Klimaschutz und einen effizienten Einsatz von Energie in nachgelagerten Branchen dar.

5.1 Der ökologische Fußabdruck der Chipherstellung Potenzielle Klima- und Umweltschäden in der Halbleiterproduktion

Die Halbleiterherstellung ist ressourcenintensiv und erfordert als wesentliche Inputs Energie, Wasser, Chemikalien und Rohstoffe. Bei der Herstellung entstehen klimaschädliche Emissionen, darunter Treibhausgase wie CO₂ und **perfluorierte Verbindungen** (PFC). Gefährliche Abfälle gehören ebenfalls zu den Umweltauswirkungen der Halbleiterherstellung:

- Für Ätzprozesse zur Strukturierung von Wafern sowie für die Reinigung von Fertigungsanlagen werden klimawirksame Gase eingesetzt, insbesondere auch PFC. Es handelt sich dabei um per- und polyfluorierte Kohlenstoffverbindungen, Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃). Bei TSMC, das zu den größten und technologisch fortschrittlichsten Halbleiterfertigern weltweit zählt und detailliert über seine Umweltauswirkungen berichtet, sind rund 30 Prozent der klimaschädlichen Emissionen bei der Herstellung von 12-Zoll-Wafern auf PFCs, Chemikalien und Gase zurückzuführen.¹⁰⁵
- Die Halbleiterherstellung erfordert große Mengen an **Energie**. Die Heizung, Belüftung und Klimatisierung der für die Produktion erforderlichen Reinnräume und

die zahlreichen Maschinen zur Bearbeitung der Wafer verbrauchen die meiste Energie. Die mit dem Energieverbrauch verbundenen klimaschädlichen Emissionen hängen von der Menge und der Kohlenstoffintensität der verbrauchten Energie ab. Bei TSMC ist der Energieverbrauch für rund 63 Prozent der klimaschädlichen Emissionen bei der Herstellung von 12-Zoll-Wafern verantwortlich.¹⁰⁶

- Verschiedene organische und anorganische Verbindungen und Wasser kommen in der Halbleiterfertigung zum Einsatz. Ultrareines Wasser wird in der Halbleiterfertigung zum Spülen der Wafer und bei chemisch-mechanischen Polierschritten verwendet. Abwässer aus Halbleiterproduktionsanlagen beinhalten daher eine Reihe von schädlichen Verunreinigungen wie Lösungsmittel, Arsen, Antimon, Säuren, Laugen, Salze, feine Oxidpartikel und andere rein organische und anorganische Verbindungen. Abfälle aus Fluorsäure machen mehr als 40 Prozent der in der Halbleiterindustrie anfallenden gefährlichen Stoffe aus.¹⁰⁷

Nachhaltigkeit in der europäischen Halbleiterindustrie

Europäische Halbleiterunternehmen produzieren vergleichsweise nachhaltig. Durch den Einsatz von Technologien, die mit weniger Ressourceneinsatz auskommen und Emissionen einsparen, verbraucht der größte europäische Halbleiterhersteller Infineon in seinen Frontend-Fabriken 31 Prozent weniger Wasser, 53 Prozent weniger Elektrizität und verursacht 66 Prozent weniger Abfall als der globale Durchschnitt der im World Semiconductor Council organisierten Halbleiterunternehmen.¹⁰⁸

Aufgrund ihres hohen Treibhausgaspotenzials stehen PFC im Hauptfokus der Klimaschutzmaßnahmen der Halbleiterindustrie. Werden die Emissionen aus PFC der europäischen Halbleiterindustrie im Zeitablauf betrachtet, so wird deutlich, dass diese im zurückliegenden Jahrzehnt stark zurückgingen. In absoluten Werten sanken die Gesamtemissionen zwischen 2010 und 2020 um

¹⁰⁵ Gupta et al. 2020.

¹⁰⁶ Ebd.

¹⁰⁷ Shen et al. 2018.

¹⁰⁸ Infineon 2020.

42 Prozent, relativ zum produzierten Output sogar um 54 Prozent (vgl. Abbildung 32).

Sinkende Emissionen und Ressourcenverbrauch bei europäischen Halbleiterfirmen stehen entgegen dem weltweiten Trend in der Halbleiterindustrie. Die globale Halbleiterindustrie steht vor der Herausforderung von steigenden Ressourcenverbräuchen. Treiber sind einerseits die steigende Nachfrage und damit höhere Produktionsmengen und andererseits ein steigender Ressourceneinsatz in neuen Fertigungstechnologien.

Der Anstieg des Ressourcenverbrauchs in der Halbleiterherstellung spiegelt sich in der Nachhaltigkeitsbilanz von TSMC, dem technologisch fortschrittlichsten Halbleiterproduzenten der Welt, wider (vgl. Exkurs). Auch beim größten europäischen Halbleiterhersteller Infineon zeigt sich, dass der Einsatz von klimaschädlichen Gasen mit der Nutzung von komplexeren Fertigungstechnologien tendenziell steigt.¹⁰⁹ Eine Studie des IMEC-Nanotechnologiezentrums in Belgien hat diesen Sachverhalt umfassend untersucht.¹¹⁰ Sie vergleicht den Ressourcenverbrauch verschiedener Fertigungsverfahren für Halbleiter und zeigt, dass moderne Fertigungsverfahren für Halbleiterprodukte mit einem erheblichen Anstieg des Ressourcenverbrauchs in der Produktion einhergehen. So stieg der Stromverbrauch pro Wafer von der 28-Nanometer-Fertigung zur 2-Nanometer-

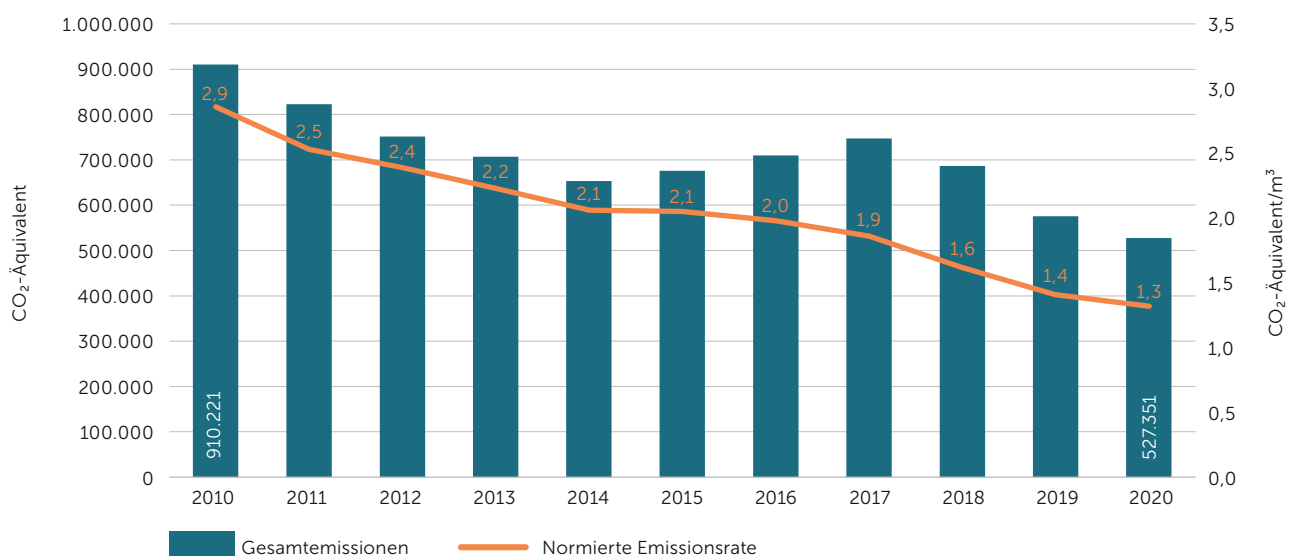
Fertigung um den Faktor 3,46 an. Der Wasserverbrauch erhöhte sich um den Faktor 2,3 und die Treibhausgasemissionen um den Faktor 2,5.

Exkurs: Ressourcenverbrauch und Nachhaltigkeit bei TSMC

Der Wasser-, Strom- und Rohstoffverbrauch von TSMC stieg im Jahr 2020 zum dritten Mal in Folge. Dies geht aus dem jüngsten Nachhaltigkeitsbericht des Unternehmens hervor.¹¹¹ Der Bau neuer Fabriken und die neu eingeführten und besonders ressourcenintensiven 5-Nanometer-Fertigungstechnologien für Chips sind für den Anstieg des Verbrauchs verantwortlich.¹¹²

Im Jahr 2020 verbrauchte TSMC insgesamt 16.900 GWh **Energie**, was einem Anstieg von fast 18 Prozent gegenüber 2019 entspricht. Der Anstieg ist auch dadurch bedingt, dass die eingesetzten neuartigen EUV-Maschinen (Extreme Ultraviolet Lithography) deutlich mehr Strom verbrauchen als ihre Vorgängermodelle. Als Reaktion darauf entwickelten TSMC und ASML¹¹³ gemeinsam eine effizientere Version der Maschinen, die fünf Prozent weniger Strom verbraucht. Der Chiphersteller plant, dieses Modell zu übernehmen, wenn er im nächsten Jahr die nächste Generation der Chip-Produktionstechnologie einführt. Bereits 2020 betrug der Stromverbrauch von TSMC fünf Prozent des Stromverbrauchs Taiwans. Es wird erwartet, dass er 2022 auf sieben Prozent ansteigt.¹¹⁴

Abbildung 32: Emissionen der europäischen Halbleiterindustrie aus PFC (2010–2020)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf European Semiconductor Industry Association 2021a

¹⁰⁹ Ebd.

¹¹⁰ Garcia Bardon & Parvais 2020.

¹¹¹ TSMC 2021.

¹¹² Ting-Fang & Li 2021.

¹¹³ Die von dem holländischen Unternehmen ASML gelieferten Maschinen sind die fortschrittlichsten in der Branche und ein wesentliches Werkzeug für die moderne Halbleiterproduktion.

¹¹⁴ Tsai 2020.

Das Unternehmen deckte 2020 7,6 Prozent seines Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien, bis 2050 sollen es 100 Prozent sein. Dafür schloss TSMC einen Vertrag mit Ørsted aus Dänemark ab, das einen 920-Megawatt-Offshore-Windpark in der Meerenge von Taiwan baut.¹¹⁵ Wichtige Impulse für die Nachhaltigkeit bei TSMC gehen vom großen Kunden Apple aus. Im „Supplier Clean Energy Program“, dem sich TSMC im Jahr 2021 anschloss, verpflichten sich Zulieferer, zukünftig nur noch erneuerbare Energien für die Produktion von Apple-Produkten zu verwenden.

TSMC senkte seinen **Wasserverbrauch** pro Wafer bis 2020 um 8,9 Prozent. In absoluten Zahlen stieg der tägliche Wasserverbrauch im Vergleich zum Vorjahr um 25 Prozent auf 193.000 Tonnen, was in etwa dem Umsatzwachstum im selben Zeitraum entspricht. Taiwan hat die schlimmste Dürre seit mehr als 50 Jahren hinter sich. In dem TSMC-Bericht werden Unterbrechungen der Wasser- und Energieversorgung als die beiden größten Betriebsrisiken für das Unternehmen bezeichnet. Neben der Verringerung des Wasserverbrauchs pro Einheit baut das Unternehmen eine neuartige Anlage, um Wasser zu recyceln und es in der Chipherstellung wiederzuverwenden.

Ansätze zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und Vermeidung von Emissionen

Wie die Nachhaltigkeitsbemühungen von TSMC zeigen (vgl. Exkurs), stellt die Nutzung von erneuerbaren Energien in der Chipproduktion eine wichtige Strategie für die Reduzierung der klimaschädlichen Emissionen dar. Mit dem zunehmenden Einsatz von erneuerbaren Energien gewinnen aber Prozessemissionen, bedingt durch den Einsatz von Chemikalien und Gasen sowie PFC, für die Nachhaltigkeitsbilanz von Halbleitern an Bedeutung. Dies gilt auch, weil viele der im Prozess eingesetzten Gase nicht vollständig durch andere Stoffgruppen ersetzbar sind.

Lösungsansätze für die Verringerung von Prozessemissionen in der Halbleiterherstellung liegen daher vor allem

- in effizienteren Produktionsverfahren,
- in der Nutzung von Abluftreinigung und
- im Einsatz von alternativen Gasen mit geringerem Treibhausgaspotenzial.

Für die Entwicklung effizienterer und ressourcenärmerer Produktionsverfahren ist weitere Forschung notwendig, beispielsweise zur Verbesserung der Ausbeute, zur Steigerung der Betriebseffizienz oder zum Einsatz neuer Materialien. Die Entwurfsphase der Halbleiterprodukte ist hierfür entscheidend, denn die Umweltauswirkungen von

Produkten müssen bereits in einer frühen Entwicklungsphase in die Optimierungen einbezogen werden. Anders als bisher muss der ökologische Fußabdruck zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Halbleiterprodukten als ein weiteres Ziel neben der Leistung, den Kosten und den Systemeigenschaften eines Produkts betrachtet werden.

Dafür sind bereits in einer frühen Phase des Entwurfs eines Produkts belastbare Informationen zu den ökologischen Wirkungen verschiedener Technologien erforderlich. Die hohe Komplexität der Fertigung, schnelle Entwicklungszyklen und eine geringe Verfügbarkeit aktueller und transparenter Daten erschweren bisher die genaue Ökobilanzierung der Halbleiterfertigung. Es fehlt ein umfassender Ansatz, um die ökologischen Effekte der Halbleiterproduktion zu quantifizieren. Vor diesem Hintergrund hat das belgische Forschungszentrum IMEC das Programm „Sustainable Semiconductor Technologies and Systems“ (SSTS) aufgelegt.¹¹⁶ Ziel ist es, Daten zum ökologischen Fußabdruck von Halbleitertechnologien bereits in der Phase des Entwurfs zu berücksichtigen, sodass der ökologische Fußabdruck als eine wesentliche Zieldimension in die Planung eines Produkts eingehen kann. Das entwickelte Software-Tool ist in der Lage, den Energie- und Wasserverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen für bestimmte Logiktechnologien abzuschätzen. Apple ist 2021 der erste Partner des Programms von Unternehmensseite geworden.

Ein weiterer Ansatz liegt im Umbau der linearen Wirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft. Insbesondere ist eine längere Nutzungsdauer von Geräten erforderlich, um die Emissionen und den Ressourcenverbrauch in der Produktion von Halbleitern zu amortisieren. Auch die verbesserte Reparierbarkeit von Produkten und das vollständige Recycling der enthaltenen Rohstoffe sind wichtige Stellschrauben für die verbesserte Lebenszyklusbilanz von elektronischen Geräten.

5.2 Beitrag der Mikroelektronik zum Klimaschutz

Für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Halbleitern ist die Perspektive über den Lebenszyklus des Produkts, in dem der Halbleiter zum Einsatz kommt, entscheidend. Dazu gehören die Produktion, der Transport, die Verwendung und die Entsorgung des Produkts am Ende des Lebenszyklus. Halbleiter sparen im Rahmen der Verwendung viel mehr Energie und damit klimaschädliche Emissionen ein, als für die Herstellung aufgewendet werden. Somit ist in einer Lebenszyklusbilanz der Beitrag von Halbleitern zum Klimaschutz typischerweise positiv. Halbleiter von Infineon sparen beispielsweise über ihr Leben rund 72 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente ein, während ihre Herstellung

¹¹⁵ The Guardian 2021.

¹¹⁶ IMEC 2021.

und der Transport nur rund zwei Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente verursachen. Somit liegt das Verhältnis von verursachter zu eingesparter Emission bei 1:33.¹¹⁷

Die folgenden wichtigen Einsatzfelder von Halbleitern illustrieren, dass Halbleiter im Laufe ihres Lebens einen zentralen Beitrag zu Emissionsminderungen und Energieeinsparungen leisten.

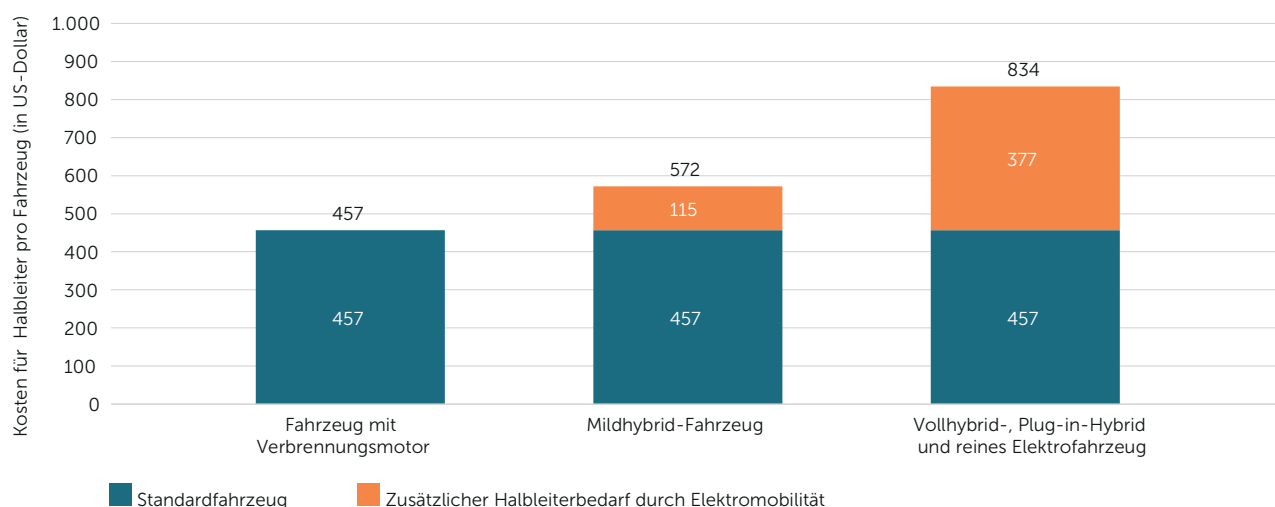
Rechenzentren: Energieeffizienz ist eine wichtige Säule für das Erreichen der Klimaziele, auch bei IKT-Anwendungen, die weltweit immer mehr Energie verbrauchen. Die Nachfrage nach den Dienstleistungen von Rechenzentren ist durch datenintensive Technologien wie künstliche Intelligenz, intelligente und vernetzte Energiesysteme, verteilte Fertigungssysteme und autonome Fahrzeuge drastisch angestiegen. Zwischen 2010 und 2018 haben sich die Arbeitslasten von Rechenzentren weltweit mehr als versechsfacht, der Internetverkehr hat sich verzehnfacht und die Speicherkapazität um das 25-Fache erhöht. Berechnungen zeigen, dass der Energieverbrauch von Rechenzentren weltweit zwischen 2010 bis 2018 „nur“ um sechs Prozent auf 205 Terawattstunden gestiegen ist.¹¹⁸ Dies hängt wesentlich mit den deutlichen Verbesserungen beim Energieverbrauch moderner Halbleiter zusammen. Rechenzentren machen etwa ein Prozent des weltweiten Stromverbrauchs aus.

Nachhaltige Energieerzeugung: Erneuerbare Energien sind eine wichtige Säule eines klimaneutralen Energiesystems. Ihr Anteil an der Stromerzeugung soll stark ansteigen. So hat zum Beispiel Deutschland seinen Zielwert für Offshore-

Windanlagen auf 20 Gigawatt erhöht. Die Halbleiterindustrie ist zentrale Zulieferbranche für den Ausbau der erneuerbaren Energien, weil Wind- und Fotovoltaikkraftwerke je Gigawatt erzeugter Leistung, verglichen mit konventionellen Kraftwerken, viel mehr Leistungshalbleiter erfordern. Hersteller von Windkraftanlagen und Fotovoltaik-Wechselrichtern sind daher auf leistungsfähige Halbleiter angewiesen. Die Mikroelektronik leistet zudem wichtige Beiträge für zukünftige Energienetze. Für die Netzanbindung erneuerbarer Energieanlagen muss eine zuverlässige, verlustarme Energieübertragung über lange Strecken gewährleistet sein. Spezielle Halbleiterprodukte kommen in Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystemen zum Einsatz. Über Sensorik werden Kennzahlen des Netzes ermittelt und mittels Kommunikationselektronik übertragen. Damit können Netze schneller und präziser als heute geregelt werden. Leistungselektronik bei Erzeugern und Verbrauchern von Energie wird zudem zur Netzstabilisierung eingesetzt.

Nachhaltige Mobilität: Der Umstieg vom Verbrennungsmotor auf den batterieelektrischen Antrieb ist eine wichtige Säule der Mobilitätswende. Nicht nur Automobile werden zunehmend elektrisch angetrieben. Auch Lokomotiven von Güterzügen, Busse, Lastkraftwagen, Bau- und Landwirtschaftsmaschinen werden elektrifiziert. Autos mit Elektroantrieb weisen einen deutlich höheren Halbleiteranteil als herkömmliche Fahrzeuge auf. Werden in einem Auto mit herkömmlichem Verbrennungsmotor im Schnitt derzeit Halbleiter im Wert von 457 US-Dollar verbaut, so liegt dieser Betrag bei reinen Elektrofahrzeugen bei 834 US-Dollar. Dabei entfallen etwa drei Viertel dieses zusätzlichen Halbleiterwerts auf Leistungshalbleiter.¹¹⁹

Abbildung 33: Zusätzlicher Halbleiterbedarf je Fahrzeug durch Elektromobilität (2018–2027)



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Infineon 2020

¹¹⁷ Infineon 2021a.

¹¹⁸ Masanet et al. 2020.

¹¹⁹ Infineon 2020.

6. Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Halbleiterindustrie

Die Halbleitertechnologie ist eine Schlüsseltechnologie für eine Reihe von strategischen Zielen der EU. Halbleiter tragen dazu bei, die digitale und grüne Transformation zu befördern sowie die Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität der Europäischen Union zu stärken. Die Halbleiterindustrie genießt deswegen auf politischer Ebene aktuell große Aufmerksamkeit.

6.1 Industrie- und Digitalpolitik in der EU

Die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und der technologischen Souveränität Europas sind wichtige Ziele der Europäischen Union. Welche Bedeutung die Europäische Kommission Halbleitern für die Wettbewerbsfähigkeit Europas beimisst, machte der für den Binnenmarkt zuständige EU-Kommissar Thierry Breton im September 2021 deutlich: „Chips are a strategic component of any industrial chain. The race for the most advanced chips is a race about technological and industrial leadership.“¹²⁰ Die Europäische Kommission beschreibt die technologische Souveränität dabei als „Schaffung der richtigen Bedingungen dafür, dass Europa seine eigenen Schlüsselkapazitäten entwickeln und einsetzen kann, um so seine Abhängigkeit von anderen Teilen der Welt bei den wichtigsten Technologien zu verringern.“¹²¹ Mit Blick auf die digitale Transformation geht es allerdings für Europa nicht nur darum, bestehende Abhängigkeiten der EU zu reduzieren, sondern den digitalen Wandel Europas für den Übergang zu einer klimaneutralen, kreislauforientierten und widerstandsfähigen Wirtschaft zu nutzen.¹²²

Die Bedeutung von Halbleitern für strategische Ziele der EU spiegelt sich in den Industrie- und Digitalisierungsstrategien auf europäischer Ebene wider. Mit der **europäischen Industriestrategie** vom 10. März 2020 unterstützt die Europäische Kommission die europäische Industrie beim Übergang zu Klimaneutralität und Digitalisierung. Sie umfasst ein Bündel von Maßnahmen, unter anderem ein Paket zur Stärkung der industriellen und strategischen Autonomie Europas mithilfe eines Ak-

tionsplans für kritische Rohstoffe und Arzneimittel und eine Allianz für sauberen Wasserstoff. Die Aktualisierung der Industriestrategie vom 5. Mai 2021, die sich auf strategische Abhängigkeiten der EU konzentriert, adressiert Halbleiter explizit. Um Abhängigkeiten zu reduzieren und zu verhindern, nennt die Kommission im Bereich von Halbleitern daher verschiedene Maßnahmen: die Diversifizierung von Handelsketten, die Stärkung alternativer Lieferketten mit engsten Verbündeten und das Schmieden der Industrieallianz für Prozessoren/Halbleitertechnologien.

In ihrer **Digitalstrategie** vom 19. Februar 2020 kündigt die Europäische Kommission ebenfalls verschiedene digitalpolitische Maßnahmen an. Dazu gehören neben dem Aktionsplan für digitale Bildung eine Kompetenzagenda zur Stärkung der digitalen Fertigkeiten in der gesamten Gesellschaft, der Aufbau und Einsatz gemeinsamer digitaler Spitzenkapazitäten in den Sektoren künstliche Intelligenz, Cybersicherheit, Super- und Quantencomputer, Quantenkommunikation sowie Blockchain.

Im **digitalen Kompass 2030** vom 9. März 2021 zeichnet die Europäische Kommission Ziele und Wege für eine erfolgreiche digitale Transformation Europas bis 2030 vor.¹²³ Eine der vier Säulen des digitalen Kompasses sind sichere, leistungsfähige und tragfähige digitale Infrastrukturen. Hier definiert die Europäische Kommission konkrete Ziele für die europäische Halbleiterbranche. Das erklärte Ziel ist, bis zum Ende dieses Jahrzehnts eine hochmoderne Halbleiterfertigung in der EU aufzubauen. Der weltweite Anteil europäischer Firmen an den Produktionskapazitäten für hochmoderne Chips soll bis zum Jahr 2030 auf 20 Prozent ansteigen.¹²⁴

Die Europäische Kommission hat somit ambitionierte Ziele für den Ausbau des europäischen Halbleiterökosystems präsentiert. Aktuell liegt der europäische Anteil an den weltweiten Halbleiterproduktionskapazitäten je nach

¹²⁰ Breton 2021.

¹²¹ Europäische Kommission 2021c.

¹²² Europäische Kommission 2021a.

¹²³ Ebd.

¹²⁴ Ebd.

Quelle zwischen sechs Prozent¹²⁵ und acht Prozent¹²⁶. Unter der Erwartung, dass sich der Welthalbleitermarkt bis 2030 auf rund eine Billion US-Dollar verdoppeln wird, bedeutet das Ziel im digitalen Kompass, dass die europäischen Produktionskapazitäten um mehr als den Faktor fünf steigen müssten.¹²⁷

6.2 Instrumente zur Stärkung des europäischen Halbleiterökosystems

Zur Erreichung ihrer ambitionierten Ziele hat die Europäische Union verschiedene Maßnahmen, Instrumente und Initiativen ins Leben gerufen, die von runden Tischen zwischen Wirtschaft und Politik über Forschungsförderungen und strategische Partnerschaften bis hin zur Neuordnung des europäischen Beihilferechts reichen. Die wichtigsten Maßnahmen werden im Folgenden skizziert.

Halbleiterallianz von 19 Mitgliedstaaten der EU

Im Dezember 2020 haben 19 Mitgliedstaaten der Europäischen Union eine Halbleiterallianz („European Initiative on processors and semiconductor technologies“) unterzeichnet, mit dem Ziel, die EU wieder als globales Zentrum in der Halbleiterbranche zu etablieren. Die gemeinsame Erklärung von inzwischen 22 Mitgliedstaaten zielt darauf, Kooperationen zu fördern und Investitionen in Materialien und Ausrüstung sowie in Entwicklung und in fortschrittliche Herstellungs- und Verpackungstechnologien zu erhöhen.¹²⁸

Die gemeinsame Initiative soll aus europäischen und nationalen Mitteln des europäischen Aufbau- und Resilienzfonds finanziert werden, von denen ein Fünftel bereits für die Unterstützung des digitalen Wandels in Europa vorgesehen ist. Somit könnte sich die Unterstützung für die Halbleiterindustrie auf bis zu 145 Milliarden Euro belaufen. Damit steht die gemeinsame Erklärung im Einklang mit ähnlichen Programmen, die in anderen Teilen der Welt eingeführt werden. In den Vereinigten Staaten beispielsweise diskutiert der Gesetzgeber Pläne zur Bereitstellung von 52 Milliarden US-Dollar zur Unterstützung der heimischen Halbleiterproduktion. Südkorea stellt 65 Milliarden US-Dollar an öffentlichen Mitteln bereit, um seine führende Marktposition im Halbleitersektor zu sichern, und China investiert bis zu 160 Milliarden US-Dollar, um bis 2025 70 Prozent seines Halbleiterbedarfs im eigenen Land zu produzieren.¹²⁹

Europäisches Chip-Gesetz (Chips Act)

Im September 2021 hat die Europäische Kommission angekündigt, ein eigenes **europäisches Chip-Gesetz** (Chips Act) vorzulegen, das eine kohärente europäische Vision für die Halbleiterindustrie präsentiert. Die Europäische Kommission will konkrete Maßnahmen vorschlagen, um die Belastbarkeit der gesamten Halbleiter-Wertschöpfungskette zu stärken, einschließlich Entwurf, Produktion, Verpackung, Ausrüstung und Lieferanten, wie zum Beispiel die Hersteller von Wafern. Im Vorschlag der Europäischen Kommission für ein Chip-Gesetz für Europa vom 8. Februar 2022 hat die Europäische Kommission konkrete Maßnahmen und Initiativen in Verbindung mit erheblichen Investitionen vorgeschlagen.¹³⁰ Wichtige Eckpunkte:

- **Stärkung der Führungsrolle Europas in Forschung und Technologie:** Die Forschungsanstrengungen sollen sich auf Technologien zur Erreichung von Transistorgrößen unter zwei Nanometern, auf KI-Technologien, energieeffiziente Prozessoren mit ultrageringem Stromverbrauch, neuartige Werkstoffe sowie die 3-D-Integration verschiedener heterogener Werkstoffe und neue Entwurfslösungen konzentrieren.
- **Aufbau von Fertigungskapazitäten:** Es sind Beihilfen für die Errichtung von Produktionsanlagen geplant, wobei Technologien unterstützt werden sollen, die über den aktuellen Stand der Technik der EU hinausgehen und somit neuartig sind. Die vorgeschlagene Chipverordnung sieht zwei Arten neuartiger Anlagen vor: „Offene EU-Fertigungsbetriebe“, die einen erheblichen Teil ihrer Fertigungskapazität zur Produktion für andere Industrieakteure einsetzen, und „Integrierte Produktionsstätten“, die Komponenten für ihre eigenen Märkte entwerfen und fertigen.
- **Stärkung des europäischen Ökosystems im Bereich Chipdesign:** Dazu sieht die Kommission die Errichtung einer virtuellen, überall in Europa zugänglichen Plattform als großmaßstäbliche Entwurfsinfrastruktur für integrierte Halbleitertechnik vor. Die Plattform soll eine umfassende Zusammenarbeit anregen und dazu beitragen, dass das geistige Eigentum für kommende Chipgenerationen aus Europa kommt. Die Entwurfsplattform soll mit den Pilotanlagen verknüpft werden, damit Entwicklergemeinschaften Technologieoptionen in den Pilotanlagen erproben und validieren können.

¹²⁵ Kleinhaus 2021.

¹²⁶ ZVEI 2021b.

¹²⁷ Ebd.

¹²⁸ Royaume de Belgique et al. 2020.

¹²⁹ Batchelor et al. 2021.

¹³⁰ Europäische Kommission 2022.

Darüber hinaus ist der Aufbau von Qualifikationen und Kompetenzen geplant. Dies soll über eine Förderung von Maßnahmen in den Bereichen allgemeine und berufliche Bildung, Kompetenzerwerb und Umschulung in der Initiative „Chips für Europa“ erreicht werden. Letztere setzt sich zum Beispiel für einen verbesserten Zugang zu Mikroelektronik-Programmen für Postgraduierte ein.

Die Kommission sieht zudem Maßnahmen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit vor, die zur Überwachung und zur Krisenreaktion dienen. Die EU und ihre Mitgliedstaaten sollen beispielsweise eine koordinierte Risikobewertung durchführen, in deren Rahmen Frühwarnindikatoren ermittelt und größere Risiken für die Lieferkette antizipiert werden. Es soll ein europäisches Halbleitergremium eingerichtet werden, das die Kommission in Krisenvorsorge- und Überwachungsfragen unterstützt.

Das Gesamtvolumen zur Unterstützung des Chip-Gesetzes der EU wird von der Kommission auf 43 Milliarden Euro bis 2030 geschätzt. Es umfasst unter anderem die Einrichtung eines Chipfonds für die Eigenkapitalunterstützung für Start-ups, Scale-ups und andere Unternehmen in der Lieferkette, sowie die Aufstockung von Darlehen der Europäischen Investitionsbank (EIB).

Industrie-Allianz für Prozessoren und Halbleitertechnologien

Europas größte Stärke in der globalen Halbleiter-Wertschöpfungskette ist seine Forschungsleistung (vgl. Abschnitt 3.3). Industrielle Akteure, die in der Halbleiterproduktion tätig sind, greifen vielfach auf die Erkenntnisse der europäischen Forschung zurück. Ein wichtiger Baustein, um das Halbleiterökosystem zu stärken, ist daher eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Akteuren aus der Forschung und der Industrie. Kooperationen helfen europäischen Unternehmen, Marktzutrittsschranken zu überwinden und eine kritische Masse zu erreichen, und sie dienen dem Ausbau und der Förderung von Synergieeffekten. Gerade im Bereich der hochmodernen Chips, wo Kosten für Entwurf und Produktion besonders hoch sind und ein großer internationaler Wettbewerbsdruck herrscht, sind Synergieeffekte entscheidend.

Die Allianz für Prozessoren und Halbleitertechnologien (Industrial Alliance on Processors and Semiconductor Technologies) bringt die wichtigsten Akteure für die Entwicklung und Herstellung von Mikroelektronikchips zusammen. Die im Juli 2021 gegründete Initiative der Europäischen Kommission hat das Ziel, die Zusammenarbeit zwischen bestehenden und künftigen EU-Initiativen

zu verbessern, um dadurch Kräfte zu bündeln und die Wettbewerbsfähigkeit des Sektors in der EU zu steigern. Sie spricht Akteure der gesamten mikroelektronischen Wertschöpfungskette in der EU an, also insbesondere Hochschulen, Forschungs- und Technologieorganisationen und Unternehmen.

Gemeinsame Unternehmen zu digitalen Schlüsseltechnologien (GU KDT)

Die Aktivitäten der EU zur Forschungsförderung im Bereich Halbleiter sollen in Gemeinsamen Unternehmen („Joint Undertaking“) gebündelt werden. Bei diesen Gemeinsamen Unternehmen handelt es sich um Partnerschaften zwischen der Europäischen Union, den Mitgliedstaaten und/oder der Industrie, um in Europa innovative Lösungen für globale Herausforderungen in den Bereichen Gesundheit, Technologie und Klima zu entwickeln. Die EU stellt im Rahmen von Horizon Europe, dem wichtigsten EU-Finanzierungsprogramm für Forschung und Innovation, Mittel in Höhe von fast zehn Milliarden Euro bereit, die von den Partnern mit Investitionen in mindestens gleicher Höhe ergänzt werden.

Eines der zehn Gemeinsamen Unternehmen betrifft den Bereich der digitalen Schlüsseltechnologien (Key Digital Technologies – GU KDT). Es umfasst elektronische Komponenten sowie deren Entwurf, Herstellung und ihre Integration in Systeme sowie die Software, die deren Funktionsweise bestimmt. Das übergeordnete Ziel dieser Partnerschaft ist die Unterstützung der digitalen Transformation aller wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Sektoren und des European Green Deals sowie die Förderung von Forschung und Innovation im Hinblick auf die nächste Generation von Mikroprozessoren. Im Rahmen des „Gemeinsamen Unternehmen EuroHPC“ wird bereits ein Verbund von 23 Unternehmen und Forschungseinrichtungen gefördert, der bis 2022/23 einen Supercomputer der Exaflops-Klasse mit europäischer Technik entwickeln soll. Dazu gehört auch ein effizienter Prozessor, um den sich die European Processor Initiative (EPI) kümmert. Ein weiterer Förderaufruf für europäische Verbundvorhaben GU KDT wurde im Dezember 2021 veröffentlicht. Ziel ist es, die ausgewählten Projekte Ende 2022 zu starten. EU-Kommissar Breton hat angekündigt, im Chips Act eine neue Halbleiter-Forschungsstrategie zu entwickeln, die auf dem GU KDT aufbaut.¹³¹

Important Project of Common European Interest (IPCEI)

Das IPCEI ist ein europäisches Instrument, mit dem europäische strategische Investitionsprojekte gefördert werden. Die Förderung erfolgt im IPCEI durch die jeweiligen Mitgliedstaaten und nicht durch die EU. Voraussetzung

¹³¹ Breton 2021.

für eine Förderung ist, dass die Projekte den strategischen Zielen der Europäischen Union folgen, mehrere europäische Mitgliedstaaten beteiligt sind und die Projekte positive Effekte auf den jeweiligen Binnenmarkt erwarten lassen. Die an einem IPCEI teilnehmenden Mitgliedstaaten können Unternehmen nicht nur für Forschungs- und Entwicklungsarbeit Beihilfen gewähren, sie dürfen auch den Aufbau von Fertigungskapazitäten fördern. Dies ist grundsätzlich im Wettbewerbsrecht der EU verboten. Bei einem IPCEI wird dies aber außer Kraft gesetzt, weil der Nutzen des Projekts für alle Mitgliedstaaten überwiegt.

Am IPCEI Mikroelektronik sind insgesamt 32 europäische Unternehmen aus Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und dem Vereinigten Königreich beteiligt.¹³² Seitens der Mitgliedstaaten werden die Projekte mit insgesamt 1,9 Milliarden Euro gefördert. Das IPCEI verfolgt das Ziel, Mikroelektronikbereiche zu stärken, zum Beispiel Leistungselektronik, Sensorik oder Spezialchips für Automotive. Es umfasst fünf Themenschwerpunkte, die die gesamte Wertschöpfungskette für die Fertigung anwendungsspezifischer Komponenten abbilden. Dazu gehören die Bereiche energieeffiziente Chips, Leistungshalbleiter, intelligente Sensoren, moderne optische Geräte und Verbundwerkstoffe. Beim IPCEI Mikroelektronik handelt es sich um das erste IPCEI überhaupt, es soll als Blaupause für weitere solcher Programme dienen, zum Beispiel im Bereich der Batteriezellfertigung.

Dass das IPCEI ein geeignetes Instrument ist, um Produktionskapazitäten in Europa aufzubauen, zeigen die Ergebnisse des ersten IPCEI Mikroelektronik. In Deutschland sind die neu entstandenen oder ausgebauten Chipfabriken von Bosch, Infineon und GlobalFoundries in Dresden, die Halbleiter-Fabrik von Osram in Regensburg, die Optik-Hallen von Zeiss in Oberkochen und das Labor von AP&S in Donaueschingen aus dem Förderprojekt hervorgegangen.

Ein zweites IPCEI Mikroelektronik und Kommunikationstechnologien soll unter dem Motto „Safety, Security, Sustainability and Sovereignty“ stehen und hat das Ziel, bei Mikroelektronik und Kommunikationstechnologien vor allem dort aufzuholen, wo Europa zum Teil technologisch abhängig von Drittstaaten ist (zum Beispiel bei Hochleistungsprozessoren und Spezialchips für KI und autonomes Fahren). Von deutscher Seite hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Dezember 2021 32 Unternehmensprojekte mit einem Investitionsvolumen

von zehn Milliarden Euro ausgewählt. Die Projekte wurden zur Pränotifizierung bei der Europäischen Kommission eingereicht.¹³³

Änderungen des Beihilferechts

Die Europäische Kommission hat im November 2021 angekündigt, die strengen Antisubventionsregelung zu lockern und damit mehr nationale Beihilfen für die Halbleiterfertigung zuzulassen.¹³⁴ Bisher unterlag die Unterstützung der Halbleiterindustrie durch die Mitgliedstaaten einer strengen Kontrolle durch die Europäische Kommission (DG COMP). Die Mitgliedstaaten dürfen in der Regel nur FuE und die erste industrielle Umsetzung der Ergebnisse solcher Forschungs- und Entwicklungsprojekte, also das Skalieren von Pilotanlagen und entsprechende Tests, unterstützen.¹³⁵ Die von der Europäischen Kommission angekündigte Änderung erlaubt nun – unter bestimmten Voraussetzungen und nach vorheriger Prüfung durch DG COMP – auch staatliche Beihilfen für die Massenproduktion und -vermarktung von Halbleitern.

Internationale Partnerschaften

Teil der europäischen Halbleiterstrategie sollte eine Strategie zur Diversifizierung von Lieferketten sein, damit die EU die übermäßige Abhängigkeit von einem einzigen Land oder einer einzigen Region verringern kann. Hier können besonders die Chancen einer verstärkten transatlantischen Zusammenarbeit genutzt werden. Die EU und die USA haben im Rahmen des im Juni 2021 gegründeten neuen Handels- und Technologierats (TTC) vereinbart, stärker zusammenarbeiten. Dies betrifft vor allem den Handel mit China, die Halbleiter-Produktion und die Regulierung globaler Technologieunternehmen. Im Bereich Standardisierung und bei der Sicherung von Lieferketten soll zukünftig zusammengearbeitet werden und das Vorgehen gegen unfaire Handelspraktiken von Staaten wie China eng abgestimmt werden. Lieferengpässen bei Halbleitern in beiden Ländern soll durch stärkere Kooperation begegnet werden.¹³⁶

Im Vorschlag für ein europäisches Chip-Gesetz prüft die Kommission Halbleiterpartnerschaften mit gleich gesinnten Ländern: In einem ersten Schritt sollen Themen mit Ländern wie den Vereinigten Staaten, Japan, Südkorea, Singapur, Taiwan und anderen sondiert werden.

Für die Steigerung der Halbleiter-Produktionskapazität in Europa zieht die Europäische Kommission zudem ausländische Investitionen in Betracht. Mit dem Chip-Gesetz

¹³² Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2021a.

¹³³ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2021a.

¹³⁴ Europäische Kommission 2021b.

¹³⁵ Batchelor et al. 2021.

¹³⁶ Europäische Kommission 2021e.

wird die Kommission gemäß ihren Ankündigungen versuchen, attraktiv für ausländische Investitionen zu werden, insbesondere im Bereich der Spitzentechnologie.¹³⁷ Unternehmen wie Intel, Samsung und TSMC haben hohe Investitionen in die Entwicklung und Fertigung von Halbleitern angekündigt. Sie sind aktuell die einzigen Unternehmen, die in der Lage sind, Chips mit Strukturgrößen unter zehn Nanometern zu produzieren. Es könnte eine Chance für die EU sein, eines der Unternehmen als Technologiepartner für den Aufbau der Fertigungskapazitäten in Europa zu gewinnen.

Fachkräftesicherung

Auch auf den steigenden Wettbewerb um qualifizierte Fachkräfte für die Halbleiterindustrie (vgl. Kapitel 4.3) möchte die EU reagieren. Hierfür wurde der **EU Pact for Skills** im Jahr 2020 ins Leben gerufen. Die EU-Initiative möchte Weiterbildung, Umschulungen und Ausbildung in Europa unterstützen, indem sie Industrie, öffentliche und private Arbeitgeber, Sozialpartner, Industrieverbände, Handelskammern, Bildungs- und Ausbildungsanbieter und Arbeitsagenturen zusammenbringt.¹³⁸ Zusätzlich werden strategisch wichtige Ökosysteme wie die Mikroelektronik darin unterstützt, groß angelegte Partnerschaften aufzubauen, die darauf abzielen, öffentliche und private Investitionen freizusetzen. Für die Mikroelektronik ist geplant, öffentliche und private Gesamtinvestitionen in Höhe von zwei Milliarden Euro anzustoßen und Weiterbildungs- und Umschulungsmöglichkeiten für 250.000 Menschen bis 2025 anzubieten. In einem ersten Workshop stellte sich heraus, dass neben der Weiterbildung und Umschulung vor allem die Attraktivität der Branche für junge Nachwuchskräfte gefördert werden sollte, zum Beispiel durch fördernde Beschäftigte aus Unternehmen, die Schüler*innen von ihrer Arbeit begeistern. Ebenso sei es wichtig, die Zahl der Frauen zu erhöhen, zum Beispiel durch Flaggschiffprogramme für Frauen in der Wissenschaft und eine Erasmus-Ausrichtung, die ein Gleichgewicht der Geschlechter befördert.

Eine europäische Initiative, die sich ganz spezifisch mit der Aus- und Weiterbildung im Mikroelektronikbereich beschäftigt, ist METIS. **METIS** wird durch das Programm Erasmus+ kofinanziert und vereint ein Konsortium von 20 wichtigen Partnern, um den METIS-Lehrplan und die METIS-Ausbildung zu entwickeln und die Mikroelektronik als Berufswahl zu fördern.¹³⁹ Zu den Partnern gehören Industrieunternehmen (Infineon, Bosch, X-Fab, Arcelik, Graphenea, Summa Semiconductor, Silicon Saxony), Aus- und

Weiterbildungseinrichtungen (TU Graz, IMEC academy, SBH Südost, TU Sofia, USN, BME und IAL-FVG), Sozialpartner (WITEC und EACG), eine Regulierungsbehörde (CIMEA) und ein Marktforschungs- und Informationsunternehmen (DECISION-Etudes-Conseil).

Bisher wurden bereits umfangreiche Qualifikations- und Berufsprofile für die Mikroelektronik erstellt sowie die METIS-Qualifikationsstrategie. Zentrale Ergebnisse waren, dass es besonders an grundlegenden Kenntnissen und grundlegenden Fertigkeiten in der Produktion mangelt sowie an mehr technischen Profilen von Generalisten, an mehr multidisziplinären Kursen und an mehr Kursen zur Mikroelektronik. Mit Blick darauf wurden vier neue ESCO-Profile¹⁴⁰ im Zusammenhang mit der Mikroelektronik vorgeschlagen, die bereits in den ESCO-Rahmen integriert wurden: Mikroelektronik-Design, Mikroelektronik-Ingenieurwesen für intelligente Fertigung, Ingenieurwesen für Werkstoffe und Mikroelektronik sowie Mikroelektronik-Wartungstechnik.

6.3 Umwelt- und Klimapolitik

Der European Green Deal

Die Europäische Kommission setzte sich im Dezember 2019 zum Ziel, bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu werden und dadurch Innovation, Arbeitsplätze und grünes Wachstum in den Mitgliedstaaten zu befördern. Das Ziel der Klimaneutralität bedeutet für die Halbleiterindustrie, dass sie als Teil der europäischen Industrie spätestens bis zum Jahr 2050 klimaneutral werden muss. Als Zwischenziel ist beschlossen, die Emissionen des Industriesektors bis zum Jahr 2030 um 70 Prozent gegenüber 1990 zu verringern. Um diese Ziele zu erreichen, müssen neben einer Umstellung auf erneuerbare Energiequellen die prozessbedingten Emissionen auf ein Mindestmaß reduziert werden.

Wichtiger als die Emissionen, die in der Halbleiterindustrie verursacht werden, ist mit Blick auf den EU Green Deal der Beitrag, den Halbleiter für die Erreichung der Klimaziele in allen Sektoren der Wirtschaft leisten. Der Halbleiterindustrie kommt eine Schlüsselrolle für das Erreichen der Klimaziele in den verschiedenen Sektoren Industrie, Energie, Verkehr und Gebäude zu. Das Ziel der Klimaneutralität und die gesamtwirtschaftlichen Strategien, um dieses Ziel zu erreichen, fungieren als Treiber für die Nachfrage nach Halbleitern (zum Beispiel durch den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Steigerung der Energieeffizienz, intelligente, digitale Netze, den Ausbau der Elektromobilität, vgl. Kapitel 5.2).

¹³⁷ Breton 2021.

¹³⁸ Europäische Kommission 2021f.

¹³⁹ Metis 2020.

¹⁴⁰ ESCO ist Teil der EU 2020 Initiative. Im ESCO-Rahmen werden Fähigkeiten, Kompetenzen, Qualifikationen und Berufe identifiziert und kategorisiert, die für den EU-Arbeitsmarkt und die allgemeine und berufliche Bildung relevant sind.

Reduzierung von F-Gasen

PFC stehen im Fokus der Klimaschutzbemühungen der Halbleiterindustrie. Sie unterliegen europäischen und nationalen Regulierungen, insbesondere der europäischen F-Gas-Verordnung aus dem Jahr 2014. Wichtigstes Instrument der Verordnung ist die schrittweise Begrenzung der Verkaufsmengen von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) bis 2030 auf ein Fünftel der heutigen Mengen, von der die Halbleiterindustrie allerdings explizit ausgenommen ist. Zudem enthält die Verordnung eine Kennzeichnungs- und Meldepflicht für F-Gase, die in Halbleiteranlagen verwendet werden, sowie die generelle Anforderung, die Freisetzung von F-Gasen zu vermeiden. Derzeit wird die F-Gas-Verordnung überarbeitet. Obwohl einige Unternehmen strengere Regularien befürchten, ist mit Blick auf die strategische Bedeutung der Halbleiterindustrie für die Ziele der Europäischen Union zu erwarten, dass HFKW in der Halbleiterindustrie auch zukünftig eingesetzt werden dürfen.¹⁴¹

Aktuell unterliegt die Halbleiterindustrie keinen gesetzlich vorgeschriebenen Minderungszielen für perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und ist auch nicht verpflichtet, am EU-Emissionshandel teilzunehmen. Vielmehr beruhen die Klimaschutzbemühungen auf freiwilligen Initiativen der Hersteller. So gibt es in Deutschland beispielsweise eine freiwillige Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller, die klimaschädlichen Gase zu reduzieren.¹⁴²

EU-Taxonomie

Ein zentrales Instrument, an dem die Europäische Kommission arbeitet, um auch private Finanzströme in klimafreundlichere, nachhaltigkeitsfördernde Investitionen zu lenken, ist die Sustainable-Finance-Taxonomie. Die EU-Taxonomie ist Bestandteil des im März 2018 vorgestellten „Aktionsplans zur Finanzierung von nachhaltigem Wachstum“ und soll es künftig ermöglichen, Wirtschaftsaktivitäten EU-weit einheitlich nach ihrer Nachhaltigkeit zu klassifizieren.¹⁴³

Laut der Taxonomie-Verordnung der EU vom 18. Juni 2021 gilt eine Wirtschaftsaktivität dann als taxonomiekonform, wenn sie einen wesentlichen Beitrag zu mindestens einem von insgesamt sechs Umweltzielen leistet, ohne den anderen zuwiderzulaufen (Do No Significant Harm – DNSH). Die Umweltziele der Taxonomie sind: (1) Klimaschutz, (2) Anpassung an den Klimawandel, (3) nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen,

(4) Wandel zu einer Kreislaufwirtschaft, (5) Vermeidung von Verschmutzung und (6) Schutz von Ökosystemen und Biodiversität.

Eine Wirtschaftsaktivität kann dabei auf drei Arten einen Beitrag zur Zielerreichung leisten (Beispiel Klimaschutz):

- wenn die Aktivität selbst mit einer niedrigen oder keiner Treibhausgasemission einhergeht,
- wenn die Aktivität den Übergang zu einer klimaneutralen Wirtschaft unterstützt und es keine „tiefgrüne“ Alternative gibt („Übergangsaktivitäten“) oder
- wenn eine Aktivität eine andere Wirtschaftsaktivität zum Umweltschutz befähigt, sogenannte „ermöglichende Aktivitäten“.

Nach der Logik der Taxonomie können nicht nur traditionell grüne Aktivitäten wie erneuerbare Energien als nachhaltig eingestuft werden, sondern auch Aktivitäten in besonders emissionsintensiven Bereichen. Übergangsaktivitäten müssen für eine Klassifizierung als nachhaltig in ihrem jeweiligen Sektor die niedrigsten Treibhausgasemissionen aufweisen („Best-in-Class-Ansatz“).

Die Taxonomie erfasst mit circa 80 Prozent der europäischen Emissionen einen Großteil der emissionsintensiven Wirtschaftsaktivitäten.¹⁴⁴ Die meisten erfassten Aktivitäten gehören zu den „Übergangsaktivitäten“. Im Bereich des produzierenden Gewerbes konzentriert sich die Taxonomie auf emissionsintensive Grundstoffindustrien – wie die Herstellung von Zement, Stahl oder chemischen Produkten. Die Herstellung von elektronischen Komponenten wie Leistungshalbleitern als „ermöglichende Aktivität“ für den Klimaschutz in anderen Branchen ist bisher noch nicht von der Taxonomie erfasst. Eine Weiterentwicklung der Taxonomie ist somit erforderlich, damit auch bei den bisher nicht adressierten Aktivitäten zwischen nachhaltigen und nicht nachhaltigen Aktivitäten unterschieden werden kann.

Für die Halbleiterindustrie sind zudem die Impulse von Bedeutung, die von der Taxonomie für die wichtigste Abnehmerbranche, die Automobilindustrie, zu erwarten sind. So wird vermutet, dass die Taxonomie die Klimaschutzbemühungen und die Wende zum Elektroantrieb weiter befördern wird.

¹⁴¹ ZVEI 2022.

¹⁴² Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in der Bundesrepublik Deutschland zur Reduzierung der Emission bestimmter fluorierter Gase; Halbleiterhersteller 2001.

¹⁴³ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020a.

¹⁴⁴ Ebd.

Chemikalien

Teil des EU Green Deals ist die Nachhaltigkeitsstrategie für Chemikalien. Zwar verfügt die EU bereits über ein ausgefeiltes Chemikalienrecht, aber aufgrund der zunehmenden Bedeutung verfolgt die Europäische Kommission das Ziel, die Umweltverschmutzung weiter zu reduzieren. Deswegen hat die Kommission am 14. Oktober 2020 eine neue Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit beschlossen. Diese zielt darauf, „Bürger und Umwelt besser zu schützen und Innovationen für sichere und nachhaltige Chemikalien zu fördern.“¹⁴⁵ Die Nachhaltigkeitsstrategie umfasst auch die schrittweise Einstellung der Verwendung von Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) in der EU, es sei denn, ihre Verwendung ist unerlässlich.

Für die europäische Halbleiterindustrie, die PFAS im Herstellungsprozess von Halbleitern einsetzt, ist es wichtig, dass die Europäische Kommission wie bisher anerkennt, dass bestimmte Chemikalien, zu denen PFAS gehören, in der Halbleiterherstellung nicht ersetzbar sind. Um das Ziel einer wachsenden Halbleiterproduktionskapazität in Europa zu erreichen, ist es unerlässlich, dass PFAS in der Halbleiterherstellung auch zukünftig zum Einsatz kommen dürfen. Dafür muss nicht nur die Nutzung von PFAS für Halbleiter selbst als unerlässlich eingestuft werden, sondern auch in der Halbleiterlieferkette.¹⁴⁶

Rohstoffe

Mit der Energiewende besteht das Risiko, dass sich die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen zunehmend hin zu einer Abhängigkeit von nicht-energetischen Rohstoffen verlagert. Auch die Halbleiterindustrie ist von dem Zugang zu bestimmten Rohstoffen abhängig, darunter Silizium und Gallium. Aufgrund ihrer großen Bedeutung für die Energiewende und den identifizierten Versorgungsrisiken führt die Europäische Kommission Gallium und Silizium in der Liste der kritischen Rohstoffe 2020.¹⁴⁷ Rohstoffe werden als kritisch bewertet, wenn ihre wirtschaftliche Bedeutung mit 2,8 oder größer und das Versorgungsrisiko mit 1,0 oder größer bewertet wird (vgl. Tabelle 7).

Silizium wird als essenzieller Bestandteil von Halbleitern, Solarzellen und in Batterien für Elektromobilität einen großen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten. Der weltweite Verbrauch von polykristallinem Silizium für Solar- und Halbleiteranwendungen wird bis 2025 voraussichtlich um zehn Prozent pro Jahr ansteigen. Die Produktion von Siliziummetall aus Quarzsand oder Quarzkies ist energieintensiv, weswegen Energiekosten den Hauptbestandteil der Produktionskosten von Silizium ausmachen. In Europa (vor allem in Frankreich) ist die Siliziumproduktion historisch oftmals an Wasserkraftwerken gelegen. Silizium ist das zweithäufigste Element in der Erdoberfläche und kommt in Form von Silikatmineralien vor. Es wird zwar geschätzt, dass die weltweiten Ressourcen in den Förderländern, darunter China, die Vereinigten Staaten, Brasilien und Norwegen, ausreichen, um die weltweite Nachfrage nach Siliziummetall für viele Jahrzehnte zu decken.¹⁴⁸ Allerdings ist der weltweite Siliziummarkt stark konzentriert. China dominiert die globale Produktion mit einem Anteil von 66 Prozent. Die europäischen Silikonmetallimporte stammen jedoch nur zu 16 Prozent aus China und zu 44 Prozent aus Norwegen.

Die wichtigsten Galliumverbindungen, die 94 Prozent des Verbrauchs ausmachen, sind Galliumarsenid (GaAs) und Galliumnitrid (GaN). Diese Verbindungen werden hauptsächlich in Halbleitern und in der Optoelektronik verwendet. Aufgrund des wachsenden Halbleiterbedarfs geht die Europäische Kommission von einem stark steigenden Bedarf von Gallium aus. Gallium gehört zu den Leitern und wird fast ausschließlich als Nebenprodukt bei der Verarbeitung anderer Metalle, hauptsächlich Aluminium und Zink, gewonnen. Innerhalb der EU wurde Gallium in Deutschland bis 2016 und in Ungarn bis 2013 produziert. Die wichtigsten Importländer sind Großbritannien und China.

Der Aktionsplan für kritische Rohstoffe adressiert die Risiken für die genannten kritischen Rohstoffe. Als Kernmaßnahmen sind vorgesehen, bestehende Wertschöpfungsketten innerhalb der EU zu stärken, die Ab-

Tabelle 7: Bewertung wichtiger Rohstoffe der Halbleiterproduktion durch die Europäische Kommission (2020)

	Wirtschaftliche Bedeutung	Versorgungsrisiko
Silizium (Si)	4,20	1,18
Gallium (Ga)	3,47	1,26

Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf Europäische Kommission 2020b

¹⁴⁵ Europäische Kommission 2020a.

¹⁴⁶ SEMI Europe 2020.

¹⁴⁷ Europäische Kommission 2020b.

¹⁴⁸ Europäische Kommission 2020c.

hängigkeit von kritischen Primärrohstoffen durch eine kreislaforientierte Ressourcennutzung, nachhaltige Produkte und Innovation zu reduzieren und die Beschaffung aus Drittländern zu diversifizieren.

6.4 Innereuropäische Standortfaktoren und die Rolle Deutschlands

Neben den europäischen Rahmenbedingungen für eine nachhaltige europäische Halbleiterindustrie sind natürlich auch die einzelnen Umgebungsbedingungen in den europäischen Mitgliedstaaten für die kleinräumige Ansiedlung der Halbleiterindustrie relevant. Im Folgenden wird daher ein Blick auf innereuropäische Standortfaktoren geworfen.

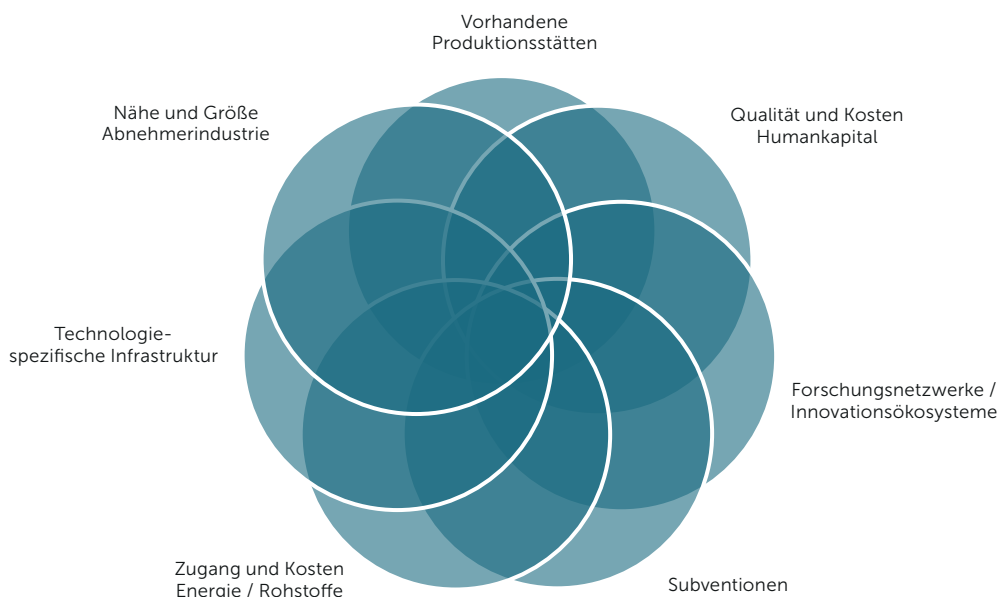
Für die Halbleiterindustrie spielen vor allem die in Abbildung 34 dargestellten Standortfaktoren eine Rolle. Transportkosten sind beispielsweise eher untergeordnet, da sie wegen der geringen Größe von Halbleitern kaum ins Gewicht fallen. Dies zeigen auch die weitverzweigten globalen Wertschöpfungsketten (vgl. Kapitel 4.2). Wichtig sind vielmehr die Qualität und Verfügbarkeit der wichtigsten Inputfaktoren für die einzelnen Produktionsschritte. So sind im Bereich Entwurf vor allem Know-how und Forschungskapazitäten relevant, während für Fertigung, Montage und Prüfung auch physische Inputfaktoren eine Rolle spielen. Mit den unterschiedlichen Inputfaktoren, die für die Wertschöpfungsstufen notwendig sind, gehen demnach auch unterschiedliche Gewichtungen der relevanten Standortfaktoren einher, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Standortfaktoren für die Wertschöpfungsstufe „Entwurf“

Für die Wertschöpfungsstufe Entwurf sind die Qualität der verfügbaren qualifizierten **Fachkräfte** entscheidend sowie der Zugang zu bestehenden Innovationsökosystemen. Gerade **Innovationsökosysteme**, die Unternehmen und Forschungseinrichtungen erfolgreich miteinander verbinden, können im Bereich Entwurf ein relevanter Standortfaktor sein, da sie einerseits das notwendige Humankapital ausbilden und andererseits über die vorhandenen Strukturen Unternehmen beim Wissenstransfer durch Kooperationen mit anderen Unternehmen und Forschungseinrichtungen unterstützen. Hervorzuheben sind hier die beiden Halbleiter-Innovationsökosysteme in Deutschland sowie die Innovationsökosysteme in Grenoble und Kärnten (vgl. Kapitel 3.3).

Neben Innovationsökosystemen hat auch die Art der Forschung Einfluss darauf, welche Standortfaktoren besonders wichtig sind und welche Rolle weitere Faktoren spielen können. So dienen Standortentscheidungen zur Ansiedlung von **Grundlagenforschungszentren** unter anderem dazu, technologische Trends in wichtigen Märkten zu erkunden, das technologische Potenzial der im Zielmarkt vorhandenen Universitäten und Forschungseinrichtungen zu nutzen und das Potenzial an Forscher*innen abzuschöpfen.¹⁴⁹ Die europäische Forschungslandschaft ist sehr gut aufgestellt und konzentriert sich auf Belgien, Frankreich und Deutschland, die Niederlande und Italien. Diese Länder verfügen über Spitzenforschungseinrichtungen zu Halbleitern wie das IMEC in Belgien, CEA-Leti in Frankreich und die Fraunhofer-Gesellschaft in Deutschland.

Abbildung 34: Relevante Standortfaktoren der Halbleiterindustrie



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics

¹⁴⁹ Belitz 1999.

Im Bereich der **Produktinnovationen** kann die Nähe zu Abnehmerindustrien besonders entscheidend sein. Vorteile ergeben sich aus der Möglichkeit der kundennahen Marktforschung, der Teilnahme an relevanten Standardisierungsgremien zur Produktspezifizierung, der Integration von Hard- und Softwaredesigns sowie bei Marketing und Vertriebsunterstützung.¹⁵⁰ Insofern sind neben der auch hier notwendigen Verfügbarkeit von jungen, hoch qualifizierten Ingenieur*innen für das Produktdesign sowie die Hardware-, Software- und Fertigungsprozessentwicklung auch die Nähe, Dynamik und Größe des für die Produktentwicklung relevanten Zielmarktes bedeutsam. In Europa sind hierbei besonders die Anwendungsgebiete der Automobilindustrie, der Industrie 4.0 und der Medizintechnik zu nennen sowie Kunden im Bereich der Leistungselektronik rund um Anwendungen der „grünen Transformation“. Im Bereich der IoT-basierten Maschinenökonomie und der Industrie 4.0 hat vor allem die modulare IoT-Chiparchitektur, basierend auf der offenen Chiparchitektur RISC-V, eine strategische Bedeutung, die von einer Kooperation zwischen verschiedenen Firmen wie dem Dresdner IoT-Sensor-Spezialisten Sensry, der Micro Systems Technologie-Gruppe, dem Chipwerk von GlobalFoundries in Dresden sowie dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS vorangetrieben wird.¹⁵¹

Innovationen in der Prozesstechnologie finden vor allem in der Nähe von Produktionsstandorten statt.¹⁵² Die wichtigsten Produktionsstandorte für Halbleiter in der EU finden sich derzeit in Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und den Niederlanden (vgl. Kapitel 3.2). Allerdings gilt auch bei Prozessinnovationen, dass technologiespezifische Forschungs- und Bildungsinfrastruktur zuträglich ist. Zusätzlich pflegen Chipfabriken typischerweise enge Beziehungen zu Chipentwicklern und auch zu den Entwicklern von Software, um sicherzustellen, dass die Software die spezifische Produktionstechnologie unterstützt. Halbleiterökosysteme und Cluster inklusive vorhandener Produktionskapazitäten spielen demnach eine wichtige Rolle für die Wahl des Standorts zur Etablierung von Prozessforschung und -innovationen.

Exkurs: Das Halbleiterökosystem in Israel

Viele der weltweit fortschrittlichsten Chips in der Halbleiterindustrie wurden und werden in Israel entwickelt. Unternehmen wie Intel, Sandisk und Texas Instruments haben Forschungs- und Entwicklungsstandorte in Israel eröffnet und nutzen die Stärke des israelischen Standorts in der

Spitzenforschung und -entwicklung. Das Beispiel Israel zeigt, dass für die Bildung eines Halbleiterclusters mehrere Faktoren relevant sind:¹⁵³

Einer der wichtigsten Faktoren für die Ansiedlung von Produktionsstätten ist die Zuverlässigkeit der örtlichen Infrastruktur. Für den Aufbau eines Clusters im Bereich FuE beziehungsweise Design, der in Israel besonders wichtig ist, hat die dortige Regierung über Universitäten und das Militär viel in Bildung und Forschung und damit in die technischen Kompetenzen der Arbeitskräfte investiert. Diese Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal bietet dem Land im Wettbewerb um die Ansiedlung von FuE-Zentren einen komparativen Vorteil. Außerdem ist es Israel gelungen, die Hightech-Industrie dazu zu bewegen, Standorte und vor allem FuE-Standorte in Israel zu platzieren. Dies geschah durch Steuererleichterungen sowie die Finanzierung von FuE-Kosten. Ein weiterer Pluspunkt ist die niedrige Fluktuationsrate von Mitarbeiter*innen in israelischen Hightech-Unternehmen. Dies ist besonders bei der Entwicklung von komplexen Halbleitern mit langen Entwicklungszyklen ein nicht unerheblicher Standortfaktor.

Standortfaktoren für die Wertschöpfungsstufe

„Fertigung (Frontend)“

Die Herstellung von Chips ist insbesondere bei den neusten Generationen von Chips äußerst kapitalintensiv und erfordert enorme Stückzahlen, um profitabel zu sein. Weltweit verfügen nur einige wenige Firmen über die Expertise, die finanziellen Mittel und das erforderliche Ökosystem für eine moderne Chipfertigung. Dementsprechend spielen gerade beim Aufbau neuer Produktionskapazitäten Subventionen (auch in Form von günstigen Gewerbeflächen) eine wichtige Rolle. So fordert beispielsweise der US-Chiphersteller Intel in Europa staatliche Subventionen von bis zu 40 Prozent des Investitionsvolumens für den Bau einer neuen Megafabrik.¹⁵⁴ Obwohl Subventionen nicht der Hauptgrund für eine Standortentscheidung sein dürften, könnten sie demnach kleinräumig durchaus den letzten Ausschlag für einen spezifischen Standort geben.

Auch im Bereich der Produktion bedarf es qualifizierter Fachkräfte, denn die Produktion von technologisch führenden Halbleitern erfordert ein hohes Maß an technischem Wissen. Die Frontend-Fertigung ist hochautomatisiert, wohingegen die Backend-Produktion traditionell eher arbeitsintensiv ist, sodass Löhne einen relevanten Kostenanteil einnehmen.¹⁵⁵

¹⁵⁰ Ebd.

¹⁵¹ Zapp 2021.

¹⁵² Ebd.

¹⁵³ De Fontenay & Carmel 2004.

¹⁵⁴ Tagesschau 2021.

¹⁵⁵ Roland Berger 2019.

Nicht zuletzt können vorhandene Produktionsstätten ein nicht zu unterschätzender Standortfaktor sein. Um Synergieeffekte zu erzielen, werden neue Werke oftmals in der Nähe von bestehenden Produktionsanlagen errichtet. Die zunehmende Digitalisierung ermöglicht aber auch eine Vernetzung von weiter entfernten Produktionsstätten, wie das Beispiel der beiden Infineon-Standorte in Villach und Dresden zeigt. Dennoch bieten auch hier die wichtigsten Produktionsstandorte relevante Anknüpfungspunkte für Investitionen. Abbildung 35 zeigt die geografische Verteilung der wichtigsten Produktionsstandorte von Halbleitern in Europa. Diese liegen vor allem in Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und den Niederlanden.

Zudem ist die Chipfertigung durch eine enge Anbindung an Anlagenhersteller und die Zulieferer von Halbleitermaterialien, Chemikalien und Rohstoffen wie Silizium gekennzeichnet. Da allerdings auch hier die Transportkosten eine untergeordnete Rolle spielen, ist die räumliche Nähe eher weniger relevant als bei anderen Faktoren. Daneben zählt aber Energie zu den wichtigsten Kostenbestandtei-

len der Halbleiterproduktion. Die Halbleiterherstellung erfordert deshalb den Zugang zu kostengünstiger Energie, perspektivisch insbesondere zu erneuerbaren Energiequellen. Allerdings setzen die Unternehmen hierbei offensichtlich nicht nur auf die Bereitstellung durch den Staat, sondern sichern sich auch eigene Energiequellen an ihren Standorten. GlobalFoundries betreibt beispielsweise am Standort Dresden zwei eigene Blockheizkraftwerke, die das Chipwerk am Standort parallel zum öffentlichen Netz mit Strom versorgen. Nichtsdestotrotz ist ein verlässlicher, grüner und preislich konkurrenzfähiger Zugang zu Strom ebenfalls ein wichtiger Standortfaktor für Halbleiterfirmen in Europa.

Deutschland im innereuropäischen Standortvergleich

Deutschland hat sowohl mit Blick auf den Ausbau der Chipentwicklung als auch der -fertigung gute Chancen im Standortwettbewerb. Die Stärken Deutschlands liegen in der leistungsfähigen Forschungsinfrastruktur rund um die Fraunhofer-Gesellschaft, die – anders als beispielsweise das IMEC in Belgien – auch an ein funktionierendes

Abbildung 35: Produktionsstandorte der wichtigsten Halbleiterunternehmen in Europa



Quelle: Eigene Darstellung von Oxford Economics basierend auf den Websites der einzelnen Unternehmen sowie der Europa-Karte von Geonames, Microsoft & TomTom

lokales Innovationsökosystem angebunden ist. Deutschland brachte in absoluten Zahlen und anteilig die meisten Patentanmeldungen im Halbleiterbereich zustande (vgl. Kapitel 3.3). Ebenfalls zuträglich ist die Nähe zu relevanten Abnehmerindustrien. Hier übernimmt Deutschland eine Lead Market Funktion. Zudem macht die hohe Zahl von Personen mit Hochschulabschluss und Arbeitskräften, die auf die Herstellung von Hoch- und Mitteltechnologie sowie IKT spezialisiert sind, Deutschland zu einem attraktiven Standort. Im Bereich der Personen mit MINT-Abschluss je Einwohner*in führt Deutschland ebenfalls das EU-Ranking an.¹⁵⁶

Auch mit Blick auf die Fertigung kann Deutschland mit den bestehenden Produktionsanlagen punkten. Von den fünf wichtigsten Unternehmen der Halbleiterindustrie haben zwei ihren Hauptsitz in Deutschland. Mit einem Umsatzanteil von knapp 40 Prozent in der Herstellung von elektronischen Bauelementen in der EU ist Deutschland damit mit Abstand der wichtigste Standort für die Mikroelektronik. Starke Zentren innerhalb von Deutschland sind vor allem in Sachsen, Bayern und Baden-Württemberg zu finden.

Es gibt allerdings auch Hemmnisse für die zukünftige Entwicklung der Halbleiterindustrie in Deutschland. Hierzu zählt in erster Linie eine zu geringe Geschwindigkeit Deutschlands beim digitalen Umbau von Wirtschaft und Gesellschaft. Der Bericht des European Center for Digital Competitiveness attestiert eine wachsende Kluft in der Geschwindigkeit der digitalen Transformation in Europa, die Deutschlands digitale Wettbewerbsposition verschlechtert hat.¹⁵⁷ Dass Deutschland in Bezug auf sein digitales Ökosystem unter den G-20-Staaten als drittletztes Land rangiert, hängt auch mit einer relativ schlechten Verfügbarkeit von Risikokapital sowie einer negativen Einstellung zu unternehmerischem Risiko zusammen. Besonders im Bereich Konnektivität und bei den digitalen öffentlichen Diensten erreichen andere Halbleiterländer wie die Niederlande und Österreich bessere Ergebnisse als Deutschland. Der Index für die digitale Wirtschaft und Gesellschaft 2021, in dem Deutschland unter den 27 Mitgliedstaaten an elfter Stelle rangiert, sieht den Netzausbau durch Engpässe bei Planungs- und Baukapazitäten beeinträchtigt und konstatiert insbesondere einen Mangel an IKT-Fachkräften.¹⁵⁸ Ein potenzieller Risikofaktor für die Entwicklung der Halbleiterindustrie liegt in der Entwick-

lung der Energiekosten.¹⁵⁹ Zwar sind besonders stark im internationalen Wettbewerb stehende Industrien weitgehend von Steuern, Abgaben und Umlagen entlastet und stromkostenintensive Unternehmen zahlen in Deutschland oft einen Strompreis um 5 ct/kWh. Jedoch sind für kleinere Abnehmer von bis zu 20.000 MWh Strom pro Jahr die Strompreise für die Industrie in Deutschland mit durchschnittlich bis zu 20 ct/kWh im europäischen Vergleich klar überdurchschnittlich.¹⁶⁰

Dass diese Standortrisiken im Vergleich zu den Stärken des deutschen Standorts bisher wenig ins Gewicht fallen, belegen die ausländischen Direktinvestitionen: Deutschland ist in Europa der führende Empfänger von ausländischen Direktinvestitionen im Bereich Halbleiter und elektronische Komponenten. Daten von GlobalData für das Jahr 2019 zeigen, dass Deutschland weltweit sogar an zweiter Stelle hinter China rangiert.¹⁶¹ Investitionen in Europa machen 40 Prozent der gesamten ausländischen Direktinvestitionen in der Halbleiterindustrie aus. Deutschland scheint also bereits heute für ausländische Investitionen attraktiv zu sein.

Positiv hervorzuheben ist nicht zuletzt, dass die Bundesregierung die große Bedeutung der Halbleiterindustrie anerkennt und sie mit Blick auf die „technologische Souveränität“ im Bereich der Mikroelektronik auch strategisch fördern möchte. Darunter versteht die Bundesregierung den „Anspruch und die Fähigkeit zu (Mit-)Gestaltung von Schlüsseltechnologien“ und die Abwesenheit von einseitigen Abhängigkeiten von anderen Weltregionen.¹⁶² Neben der Förderung der technologischen Souveränität sieht die Bundesregierung außerdem eine besondere Entwurfskompetenz im Bereich der EDA-Software, die auf die Erfordernisse der deutschen Anwenderindustrie zugeschnitten ist, zum Beispiel hinsichtlich analoger Elektronik. Auch die neue deutsche Bundesregierung erkennt die bedeutende Rolle der Halbleiterindustrie an und will die Mikroelektronik als bedeutende Schlüsseltechnologie fördern.

¹⁵⁶ Metis 2020.

¹⁵⁷ European Center for digital Competitiveness 2021.

¹⁵⁸ Europäische Kommission 2021d.

¹⁵⁹ Iwd 2019.

¹⁶⁰ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2020b.

¹⁶¹ Investment Monitor 2021.

¹⁶² Bundesministerium für Bildung und Forschung 2021b.

7

7. Fazit: SWOT-Analyse der Halbleiterindustrie 2030+

Die Halbleiterindustrie gehört zu den Schlüsselbranchen für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit Europas und nimmt als Enabler eine wichtige Rolle für Innovationen in nachgelagerten Branchen ein. Die strategische Bedeutung der Halbleiterindustrie für die digitale und grüne Transformation Europas wurde auch von der Europäischen Kommission erkannt. Deshalb hat sie im Digitalen Kompass das ambitionierte Ziel ausgerufen, bis zum Ende dieses Jahrzehnts eine hochmoderne Halbleiterfertigung in der EU aufzubauen. Ob dieses Ziel erreicht werden kann, hängt dabei von der Attraktivität des Standorts Europa für die wenigen Großunternehmen der weltweiten Halbleiterindustrie ab. Deshalb wurden im vorliegenden Branchenausblick die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des europäischen Halbleiterstandorts in den Blick genommen.

Der Halbleiterstandort Europa

Die europäische Halbleiterindustrie ist zwar vergleichsweise klein, produziert aber hochinnovative Produkte, die sich auch auf dem stark umkämpften Weltmarkt behaupten können. So gehören europäische Firmen in den Märkten für automobiler Halbleiter und Leistungshalbleiter, die besonders für die Energiewende relevant sind, bereits heute zu den Weltmarktführern. Halbleiterhersteller in Europa sind außerdem insbesondere in den Marktsegmenten gut, in denen auf den jeweiligen Anwendungsbereich zugeschnittene Lösungen gefordert sind – wie im Bereich der analogen Halbleiter und Sensoren. Auch als Zulieferer sind europäische Firmen am weltweiten Markt erfolgreich. So beispielsweise im Bereich der Halbleiter-Chemikalien und Anlagenproduktion. In der EUV-Lithografie-Technologie führen europäische Unternehmen technologisch die Weltspitze an. Eine weitere wesentliche Stärke der europäischen Hersteller ist die enge Anbindung an Abnehmerbranchen wie die Automobilindustrie und andere Industriezweige wie den Maschinenbau. Dies fördert die Entwicklung marktgängiger Innovationen und sichert auch von vornherein einen kritischen Absatzmarkt.

Neben der Industrie verfügt Europa auch über Spitzenforschungseinrichtungen zu Halbleitern und hat seine starke Position bei der Erforschung innovativer Halbleiterlösungen in den vergangenen Jahren kontinuierlich ausgebaut. Forschungseinrichtungen und Unternehmen

arbeiten in Innovationsökosystemen zudem bereits erfolgreich zusammen – dies zeigen die zahlreichen erfolgreichen Verbundvorhaben, die im Rahmen des IPCEI Mikroelektronik eingereicht wurden. Auch dies ist ein relevanter Pluspunkt des europäischen Standorts, gehört doch die Halbleiterindustrie zu einer der wissensintensivsten Branchen überhaupt.

Den Stärken stehen auch einige Schwächen des Standorts Europa gegenüber. Mit dem stark steigenden Chipbedarf sind die Produktionskapazitäten für Halbleiter weltweit stark angewachsen, besonders in Taiwan, Südkorea und China. Auch Europa hat seine Halbleiterproduktionskapazitäten gesteigert. Dennoch werden anteilig immer weniger Chips in Europa produziert. Nachteilig ist insbesondere, dass in Europa keine Fertigungskapazitäten für die neueste Generation von Halbleitern im Bereich von Strukturgrößen unter 14 Nanometern vorhanden sind.

Auch beim Entwurf von Chips weist das europäische Halbleiterökosystem strategisch relevante Lücken auf. Hier mangelt es an Kompetenzen bei den Hochleistungsprozessoren, die für viele sicherheitsrelevante Zukunftsanwendungen wie künstliche Intelligenz und kritische Infrastrukturen wie Kommunikationsinfrastrukturen benötigt werden. Die meisten modernen Chips werden deshalb nicht in Europa, sondern in den USA entworfen. Und auch China steigert seine Bemühungen im Chipdesign.

Im komplexen und kapitalintensiven Halbleiterökosystem haben gleichzeitig hoch spezialisierte Geschäftsmodelle an Bedeutung gewonnen – so auch die auf den Entwurf von Chips spezialisierten Fabless-Unternehmen. Dieses Geschäftsmodell ist vor allem auch im hochvolumigen Segment von Logikchips bewährt, in dem europäische Hersteller allerdings nicht aktiv sind. Im Ergebnis gibt es in Europa weder Fabless-Unternehmen noch eine Entwurfskompetenz im Bereich der modernen Logikhalbleiter, die vor allem in Computern und Smartphones, also in auf die Verbraucher*innen ausgerichteter Elektronik, Anwendung finden. Dies mag auch daran liegen, dass es keine starke Abnehmerbranche vor Ort gibt. Nichtsdestotrotz handelt es sich hierbei um ein für die technologische Souveränität Europas wesentliches Marktsegment.

Die ambitionierten Pläne der Europäischen Kommission bergen viele Chancen. Getrieben vom geplanten Umbau Europas zu einer digitalen und grünen Wirtschaft wird auch der Bedarf an Halbleiterlösungen in Zukunft deutlich ansteigen. Gerade die Energiewende und die Maßnahmen der EU, zum ersten klimaneutralen Kontinent zu werden, schaffen eine hohe zukünftige Nachfrage nach Leistungshalbleitern. Daneben profitiert auch der Bereich der automobilen Halbleiter, in dem europäische Hersteller weltweit bereits heute führend sind, von der Elektromobilität und der automatisierten und vernetzten Zukunft der Mobilität. Europas Halbleiterindustrie ist demnach bereits besonders stark in dem Segment, das zukünftig wohl am stärksten von allen Halbleiter-Teilmärkten wachsen wird. So nehmen neben der Umstellung des Antriebsstrangs auch Elektronik und Software im Automobil eine zunehmend zentrale Rolle ein und sind bereits für den Großteil

aller Innovationen im Automobilbereich verantwortlich. Dadurch entwickeln sich neue Kräfteverhältnisse in der Automobilindustrie, von der Halbleiterhersteller profitieren können, beispielsweise über strategische Kooperationen mit den starken europäischen Automobilherstellern.

Viele Mitgliedstaaten und die Europäische Kommission haben die zentrale Rolle der Halbleiterindustrie für die Wettbewerbsfähigkeit Europas erkannt und unternehmen gemeinsame Anstrengungen zur Stärkung des europäischen Halbleiterökosystems. Davon können sowohl Forschungseinrichtungen als auch Unternehmen profitieren, weil eine kritische Masse von Akteuren mobilisiert wird und gemeinsam agiert. Chancen liegen daher außerdem in einem verstärkten Transfer von der Spitzenforschung in die Anwendung in europäischen Firmen. Der Wissenstransfer muss hier auch nicht an geografischen Grenzen Halt ma-

Tabelle 8: SWOT-Analyse des europäischen Halbleiterstandorts

Stärken ("Strengths") ☺ Starke Wettbewerbsposition europäischer Halbleiterhersteller im Bereich Halbleiter für die Automobilindustrie, Leistungshalbleiter sowie analoge Halbleiter ☺ Enge Anbindung an starke Abnehmerbranchen (Automobil und Industrie) ☺ Marktführende Stellung eines europäischen Unternehmens im Bereich der EUV-Lithografie ☺ Starke europäische Forschungseinrichtungen und steigender Anteil am weltweiten Forschungsoutput ☺ Gut ausgebildete Ingenieur*innen als Fachkräfte ☺ Teils gut funktionierende industrielle Anwendung von Forschungsergebnissen (Beispiel Deutschland)	Schwächen ("Weaknesses") ☹ Abnehmender europäischer Anteil an den weltweiten Halbleiterfertigungskapazitäten ☹ Keine europäischen Fertigungskapazitäten im hochmodernen Bereich ☹ Geringe europäische Entwurfskompetenz für hochmoderne Chips ☹ Kaum Firmen im Fabless-Bereich, fehlende europäische Abnehmer für hochmoderne Halbleiter ☹ Verbesserungsbedarf beim Transfer des Wissens von der Spitzenforschung in die lokale Industrie (Beispiel Belgien)
Chancen ("Opportunities") ☺ Energiewende als Impulsgeber für Nachfrage nach europäischen Halbleiterlösungen ☺ Elektrifizierung und Automatisierung stärken Nachfrage nach Automobilhalbleitern ☺ Digitalisierung und Industrie 4.0 eröffnen Wachstumschancen ☺ Groß angelegte europäische Förderprogramme für den Aufbau von Produktionskapazitäten und die Stärkung des Chipdesigns ☺ Verbesserter Transfer von der Spitzenforschung in die Anwendung ☺ Allianzen mit internationalen Partnern	Risiken ("Threats") ☹ Stark fragmentierte Halbleiterwertschöpfungsketten mit kritischen Engstellen bei wenigen Unternehmen und Ländern ☹ Politische Spannungen und Handelskonflikte ☹ Disruptives Potenzial der Digitalisierung für automobilen Wertschöpfungsketten ☹ Softwareentwicklungskompetenzen werden zum Nadelöhr ☹ Groß angelegte Halbleiterförderprogramme in anderen Weltregionen (USA, China) ☹ Zunehmender Ressourcenverbrauch der modernen Halbleiterfertigung

chen. Chancen für Europa liegen daher auch in Allianzen mit starken internationalen Partnern wie den USA – sowohl bei der Forschung als auch bei der Fertigung.

Die Halbleiterwertschöpfungskette ist hoch spezialisiert und globalisiert. Dies führt aber auch dazu, dass sie wenig resilient ist und stark von kritischen Engstellen abhängt. Die bestehenden Abhängigkeiten sind mit Blick auf die aktuellen Lieferengpässe augenscheinlich. Zu den Nadelöhrchen, in denen nur wenige Länder und Firmen über bestimmte Kompetenzen verfügen, zählen nicht nur Produktion und Entwurf der neusten Generation von Chips, sondern auch die Chipdesignsoftware, der Bau von Produktionsanlagen und die Herstellung von bestimmten Chemikalien. Neben der eingeschränkten Resilienz der Wertschöpfungskette sind es allerdings auch politische Gründe, die ein Risiko darstellen. So werden die Abhängigkeiten in den Halbleiterwertschöpfungsketten international immer wieder für politische Interessen instrumentalisiert. Zu den größten Risiken für die Geschäftstätigkeit der europäischen Halbleiterfirmen – und dadurch auch für alle nachgelagerten Branchen wie die Automobilindustrie – gehören politische Spannungen und Einschränkungen im weltweiten Handel, die den Zugang zu Produkten und Technologien erschweren.

Aufgrund dieser enormen Bedeutung für die gesamte Industrie sind neben Europa auch andere Weltregionen, insbesondere China und die USA, bestrebt, die heimischen Halbleiterökosysteme zu stärken, und investieren massiv in den Aufbau von Halbleiterproduktionskapazitäten. Europäische Hersteller, die neben den heimischen Märkten vom Export ihrer Produkte und einem Zugang zu internationalen Märkten abhängig sind, drohen in einem Subventionswettkampf zwischen den USA und China ins Hintertreffen zu geraten.

Ein weiteres Risiko stellt die relative Schwäche Europas bei Tech-Unternehmen dar. Die Digitalisierung hat ein großes disruptives Potenzial für die wichtigste Abnehmerbranche der europäischen Halbleiterhersteller, die Automobilindustrie. Neue daten- und plattformbasierte Geschäftsmodelle führen dazu, dass neue Wettbewerber in den Automobilmarkt eintreten – insbesondere Tech-Unternehmen aus den USA. Ein Mangel an europäischen Digitalunternehmen mit entsprechender Kompetenz in Softwareprodukten befördert das Risiko von neuen Abhängigkeiten Europas. Softwareentwicklungskompetenzen drohen somit auch zum Nadelöhr für die Zukunftsentwicklung der Halbleiterhersteller zu werden.

Der Halbleiterstandort Deutschland

Obwohl der vorliegende Branchenausblick den europäischen Halbleiterstandort in den Blick nimmt, ist natürlich auch der innereuropäische Standortwettbewerb von Interesse. Deutschland verfügt mit Infineon und Bosch über zwei der führenden Halbleiterhersteller Europas und mit der Forschungsfabrik Mikroelektronik über eine der drei europäischen Spitzenforschungseinrichtungen zu Halbleitern. Damit ist Deutschland ein starker europäischer Halbleiterakteur. Deutschland zeichnet sich außerdem durch starke Abnehmerbranchen in der Industrie wie der Automobilindustrie aus. Auch die Energiewende verspricht in Deutschland starkes Wachstum für Leistungshalbleiter. Der Automobilzulieferer und Halbleiterhersteller Bosch kann mit guten Beziehungen zu allen Autoherstellern eine wichtige Schlüsselrolle für die bereits begonnene digitale Transformation der Automobilindustrie einnehmen. Wachstumschancen für Halbleiterhersteller bieten sich – wie auch in Europa insgesamt – im Bereich der digitalen und grünen Transformation. Eine hohe Patentaktivität im Halbleiterbereich macht zudem deutlich, dass Deutschland in Europa der führende Akteur in der industriellen Anwendung von Innovationen ist. Mit dem Halbleiterstandort in Dresden verfügt Deutschland zudem über das größte Halbleitercluster Europas und kann mit dem höchsten Anteil an MINT-Fachkräften in Europa aufwarten.

Zu den Schwächen des Standorts Deutschland im Allgemeinen gehören vergleichsweise hohe Strompreise für die Industrie und ein schwaches digitales Ökosystem, das in der Entwicklungsdynamik zuletzt stark zurückgefallen ist. Die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts wird eingeschränkt durch die schlechte Verfügbarkeit von Risikokapital sowie eine geringe Bereitschaft zu unternehmerischem Risiko. Aufgrund des hohen Energiekostenanteils in der Halbleiterherstellung stellen hohe Kosten für (erneuerbare) Energie zusätzlich ein potenzielles Hemmnis für die Ansiedlung von neuen Halbleiterherstellern in Deutschland dar.

Notwendige Rahmenbedingungen für einen starken deutschen Halbleiterstandort

Im Koalitionsvertrag 2021–2025 hat die neue deutsche Bundesregierung sich das Ziel gesetzt, Deutschland als globalen Standort der Halbleiterindustrie zu stärken. Um die deutsche Halbleiterbranche entlang der gesamten Wertschöpfungskette zukunftssicher auszubauen, sind die folgenden Maßnahmen erforderlich:

- **Stärkung der Halbleiter-Forschung und des Chip-designs:** Eine gut durchdachte Forschungsförderung sollte Kern der europäischen Ansiedlungsstrategie sein. Hierfür kann Deutschland sinnvolle Akzente setzen. Ziel sollte es sein, zum einen die bestehenden Stärken des Standorts Deutschlands im Bereich der analogen Halbleiter, Leistungshalbleiter und Chips für die Anwendung im Automobil und in der Industrie zu stärken, da hier auf vorhandene Ökosysteme aufgebaut werden kann. Zum anderen sollten bestehende Lücken im Entwurf von hochmodernen Chips wie Hochleistungsprozessoren geschlossen werden. Hier ist eine Abstimmung mit anderen europäischen Ländern und Forschungseinrichtungen, wie beispielsweise dem IMEC in Belgien, das bereits mit führenden Produzenten wie TSMC zusammenarbeitet, wichtig, um Ressourcen und Know-how zu bündeln. Das Rahmenprogramm Mikroelektronik der Bundesregierung für Forschung und Innovation 2021–2024 und die Gemeinsamen Unternehmen (Joint Undertaking Key Digital Technologies) im Rahmen des EU-Forschungsförderungsprogramms Horizon 2020 bilden den Rahmen für die Förderung der Chipforschung in Deutschland.
- **Aufbau von Produktionskapazitäten für hochmoderne Halbleiter:** Bei der Förderung für den Aufbau von Produktionskapazitäten ist zu berücksichtigen, dass je nach Typ des produzierten Halbleiters „hochmodern“ oder „high-end“ etwas anderes bedeutet. Die Bundesregierung sollte den Fokus nicht einseitig auf den Aufbau von Produktionskapazitäten im Bereich von Strukturgrößen unter zehn Nanometern setzen, sondern auch die Fertigung von innovativen Chips mit größeren Strukturgrößen, beispielsweise Leistungshalbleiter aus neuen Materialien, finanziell unterstützen. Ziel sollte sein, dass in Deutschland und Europa entwickelte und nachgefragte Chips auch verstärkt in Deutschland und Europa produziert werden. Der zukünftige Halbleiterentwurf und die -produktion sollten gemeinsam gedacht werden, so wie es die Europäische Kommission im Entwurf für ein europäisches Chip-Gesetz für den Aufbau einer EU-weiten Entwurfsplattform bereits vorsieht. Zudem spielen beim Aufbau von Produktionskapazitäten Kooperationen mit ausländischen Firmen wie Intel eine wichtige Rolle, da nur sie das entsprechende Know-how in der technologisch komplexen Chipfertigung nach Europa bringen können.
- **Kooperationen befördern:** Sowohl bei der Stärkung des Chipdesigns wie beim Aufbau von Produktionskapazitäten sollten Deutschland und Europa nicht auf Autarkie setzen, sondern auf Kooperation. Denn die gesamte Halbleiterwertschöpfungskette in Europa abzudecken, ist in einer hochgradig kapitalintensiven und arbeitsteiligen Halbleiterindustrie aufgrund der begrenzten verfügbaren Ressourcen kein gangbarer Weg. Deutschland sollte bestehende Initiativen wie die Halbleiterallianz und die Allianz für Prozessoren und Halbleitertechnologien nutzen, um europaweit Synergien zu heben und gemeinsam die Ausrichtung der Förderprogramme zu koordinieren.
- **Unbeschränkter internationaler Handel:** Da deutsche und europäische Halbleiterunternehmen in international stark verzweigten Wertschöpfungsketten produzieren, ist der Zugang zu geistigem Eigentum und Produkten aus dem Ausland (zum Beispiel Software) unerlässlich. Die Halbleiterindustrie profitiert von einem möglichst uneingeschränkten internationalen Handel, denn Kooperation und Wissenstransfer spielen in den stark arbeitsteiligen Halbleiterwertschöpfungsketten eine entscheidende Rolle.
- **Fachkräfte, insbesondere im technischen und informationstechnischen Bereich, sind für die zukünftige Entwicklung der Halbleiterindustrie von entscheidender Bedeutung.** Um zu verhindern, dass Fachkräfte zum Nadelöhr der zukünftigen Entwicklung des Halbleiterstandorts Deutschland werden, sollte die Bundesregierung stärker als bisher aktiv werden. Die Förderung von MINT-Fachkräften durch eine Förderung von Frauen und einen verbesserten Zugang zum Arbeitsmarkt für ausländische Fachkräfte sowie die Aus- und Weiterbildung in den neu definierten Berufsprofilen für eine Halbleiterindustrie sind hierfür wesentliche Maßnahmen.
- **Umwelt- und Klimaschutz:** Umweltregulierungen wie beispielsweise die Richtlinien zum Einsatz von Chemikalien müssen auch in Zukunft die Produktion von Halbleitern in Europa erlauben. Wo sie nicht durch andere Stoffe ersetzt werden können, müssen in der Halbleiterherstellung PFAS weiterhin zum Einsatz kommen können.

- Energiepolitik: Zugang zu erneuerbarer Energie, insbesondere zu grünem, bezahlbarem Strom, muss für Halbleiterunternehmen in Deutschland gesichert sein.

Fazit und Ausblick

Halbleiter werden als Schlüsseltechnologie im Fokus des politischen Interesses bleiben. Sie sind essenziell für die technologische Souveränität Europas und wichtige Bausteine in der grünen und digitalen Transformation der Europäischen Union. Deutschland ist als wichtigster innereuropäischer Standort der Halbleiterindustrie ein wichtiger Partner, um die ambitionierten Ziele der Europäischen Kommission zu erreichen. Dennoch könnte der bereits begonnene Wettlauf zwischen Asien, den USA und Europa zu einer Zersplitterung der globalen Lieferketten führen, was wiederum technologische Divergenzen und eine geringere Produktivität zur Folge hat. Für Europa bedeutet dies, vor allem die bestehenden Kompetenzen zu stärken. Zu nennen sind die Bereiche der Leistungshalbleiter, der automobilen Halbleiter, der Halbleiter für industrielle Anwendungen sowie der anwendungsbezogenen Entwicklung analoger Halbleiter und Sensoren. Hier hat Europa Lead-Market-Funktion und kann auf etablierte Ökosysteme setzen. Zudem stärkt man dadurch auch die bereits bestehende Industrie und sichert Arbeitsplätze. Gleichzeitig gilt es, verlässliche, internationale Partnerschaften beispielsweise mit den USA auszubauen, um die Kompetenzen Europas durch ein Gießkannenprinzip nicht zu verwässern. Den reinen Subventionswettlauf kann Europa mit den bisher geplanten Investitionen zumindest nicht gewinnen.

Literaturverzeichnis

ams Osram (2020): Geschäftsbericht 2020. Website von ams Osram vom 25. Februar 2021, <https://ams.com/documents/20143/3749114/GER+Gesch%C3%A4ftsbericht+ams+2020+DS.pdf/faeb6d01-1391-d843-1f17-65ea637b0fa4?t=1631521941792>.

ASML (2020): Integrated Report 2019. Website von ASML vom 11. Februar 2020, <https://www.asml.com/en/investors/annual-report/2019>.

Batchelor, B.; Depoortere, F.; Motta, G.; Vandenborre, I.; Baeten, N. und Kallidopoulou, M. (2021): EU Announces More Expansive Approach to Semiconductor Subsidies. Website von Skadden, Arps, Slate, Meagher & Flom LLP and Affiliates vom 16. Dezember 2021, <https://www.skadden.com/insights/publications/2021/12/eu-announces-more-expansive-approach-to-semiconductor-subsidies?sid=3d7c9872-d886-4ee2-acc2-81d3ca94fcbb>.

BayernLB Research (2014): Länderrisiko- und Branchenanalyse Technology. BayernLB Research Portal vom Juli 2014, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/juli/Deutsche-Elektroindustrie-profitiert-von-ansteigenden-Investitionen/BayernLB-Research-ZVEI-Technology-2014.pdf.

Belitz, H. (1999): Internationalisierung technologischer Kompetenzen in der Halbleitertechnik. In: Reger, G.; Beise, M. und Belitz, H. (1999): Innovationsstandorte multinationaler Unternehmen, Internationalisierung technologischer Kompetenzen in der Pharmazeutik, Halbleiter- und Telekommunikationstechnik, Physica-Verlag: Heidelberg, S. 81–108.

Boes, A.; Ziegler, A. (2021): Umbruch in der Automobilindustrie. Analyse der Strategien von Schlüsselunternehmen an der Schwelle zur Informationsökonomie, ISF München: München, <https://www.isf-muenchen.de/wp-content/uploads/2021/06/Forschungsreport-Umbruch-in-der-Automobilindustrie.pdf>.

Bosch (2020): Bosch-Geschäftsbericht 2020. Website von Bosch o. D., https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/our_figures/pdf/bosch-geschaeftsbericht-2020.pdf.

Bosch (2021): Bosch investiert 2022 mehr als 400 Millionen in seine Halbleiterstandorte. Pressemeldung auf der Bosch Website vom 29. Oktober 2021, <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/bosch-investiert-2022-mehr-als-400-millionen-in-seine-halbleiterstandorte-234432.html>.

Breton, T. (2021): How a European Chips Act will put Europe back in the tech race. Blog-Beitrag auf der Website der Europäischen Kommission vom 15. September 2021, https://ec.europa.eu/commission/commissioners/2019-2024/breton/blog/how-european-chips-act-will-put-europe-back-tech-race_en.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021a): Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa. Rahmenprogramm der Bundesregierung für Forschung und Innovation 2021–2024. Website des BMBF vom Dezember 2021, https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/31639_Mikroelektronik_Vertrauenswuerdig_und_nachhaltig.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021b): Technologisch souverän die Zukunft gestalten. BMBF-Impulspapier zur technologischen Souveränität, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Bonn/Berlin, https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/pdf/technologisch-souveraen-die-zukunft-gestalten.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020a): Sustainable Finance-Taxonomie. In: Schlaglichter der Wirtschaftspolitik Monatsbericht 09/2020, https://www.bmwi.de/-Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2020-09-sustainable-finance-taxonomie.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020b): Strompreise: Neue Wege bei der Finanzierung. In: Schlaglichter der Wirtschaftspolitik Monatsbericht 12/2020, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2020/2020-12-im-fokus-strompreise.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

(2021a): IPCEI Mikroelektronik: Zwei europäische Großprojekte für eine Schlüsseltechnologie der Zukunft. Website des BMWK vom 1. September 2021, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/infopapier-ipcei-mikroelektronik.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

(2021b): Elektrotechnik- und Elektronikindustrie. Artikel zur Wirtschaftsbranche auf der Website des BMWK o. D., <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-elektrotechnik-und-elektronikindustrie.html>.

CEA-Leti (2021): Grenoble Alpes: three valleys and a booming nanotechnology ecosystem. Nachricht auf der Website von CEA am 17. Juni 2021, <https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Pages/What's-On/News/Grenoble-Alpes-three-valleys-and-a-booming-nanotechnology-ecosystem-.aspx>.

De Fontenay, C. und Carmel, E. (2004): Israel's Silicon Wadi: the forces behind cluster formation. In: Bresnahan, T. (2004): Building high-tech clusters: Silicon Valley and beyond. Cambridge Univ. Press: Cambridge, S. 40–77.

Decision (2018): Emerging technologies in Electronic Components and Systems (ECS), Opportunities ahead (SMART 2018-0005). Vortrag auf der EF ECS am 20. November 2019.

Dornbusch, F. (2018): Global competition in microelectronics industry from a European perspective: Technology, markets and implications for industrial policy. Fraunhofer IMW: Leipzig.

Deutsche Welle (2021): The EU's microchip dilemma: Too little or too late? Artikel auf der Website des DW vom 29. April 2021, <https://www.dw.com/en/the-eus-microchip-dilemma-too-little-or-too-late/a-57367537>.

Eatok, D. (2019): Demografischer Ausblick für die Europäische Union 2019. Veröffentlichung des Wissenschaftlichen Dienstes des Europäischen Parlaments vom Mai 2019, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2019/637955/EPRS_IDA\(2019\)637955_DE.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2019/637955/EPRS_IDA(2019)637955_DE.pdf).

Fraunhofer IZM (2022): Kooperation zwischen Fraunhofer-Gesellschaft und CEA-LETI, Mitteilung auf der Website des Fraunhofer IZM o. D., https://www.izm.fraunhofer.de/de/institut/netzwerk_weltweit/kooperation-cea-leti.html.

Eckstein, M. (2021): Open-Source-Prozessorarchitektur, Analyse: Kann sich RISC-V durchsetzen?. Artikel auf der Website von ElektronikPraxis vom 17. Dezember 2021, <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/analyse-kann-sich-risc-v-durchsetzen-a-1083795/>.

Experiences Per Mile Advisory Council (2020): Experiences Per Mile 2030: Ensuring the Next Decade of Mobility Transformation Puts the Consumer First & Foremost. Report von der Website des EPM Council o. D., <https://www.experiencespermile.org/wp-content/uploads/2020/05/EPM-2030-Report.pdf>.

Europäische Kommission (2020a): Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit. Factsheet von der Website der Europäischen Kommission vom 14. Oktober 2020, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/fs_20_1846.

Europäische Kommission (2020b): Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final Report. Publications Office of the European Union: Luxemburg, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/1/translations/en/renditions/native>.

Europäische Kommission (2020c): Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Critical Raw Materials Factsheets (Final). Publications Office of the European Union: Luxemburg, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/2/translations/en/renditions/native>.

Europäische Kommission (2021a): 2030 Digital Compass: the European way for the Digital Decade. Mitteilung der Europäischen Kommission COM(2021) 118 final vom 9. März 2021, <https://eufordigital.eu/wp-content/uploads/2021/03/2030-Digital-Compass-the-European-way-for-the-Digital-Decade.pdf>.

Europäische Kommission (2021b): Competition: Commission Outlines Contribution of Competition Policy and its Review to Green and Digital Transition, and to a Resilient Single Market. Pressemitteilung auf der Website der Europäischen Kommission vom 18. November 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6101.

Europäische Kommission (2021c): Industrial Alliance on Processors and Semiconductor Technologies. Website der Europäischen Kommission o. D., https://ec.europa.eu/growth/industry/strategy/industrial-alliances/industrial-alliance-processors-and-semiconductor-technologies_de.

Europäische Kommission (2021d): Index für die digitale Wirtschaft und Gesellschaft 2021: Allgemeine Fortschritte beim digitalen Wandel, aber neue EU-weite Anstrengungen sind nötig. Pressemitteilung auf der Website der Europäischen Kommission vom 12. November 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_21_5481.

Europäische Kommission (2021e): EU und USA gründen Handels- und Technologierat – für eine Führungsrolle beim wertebasierten globalen digitalen Wandel. Pressemitteilung auf der Website der Europäischen Kommission vom 15. Juni 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/ip_21_2990/IP_21_2990_DE.pdf.

Europäische Kommission (2021f): Pact for Skills. Website der Europäischen Kommission o. D., <https://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=1517&langId=en>.

Europäische Kommission (2022): Ein Chip-Gesetz für Europa. Mitteilung der Kommission COM(2022) 45 final vom 8. Februar 2022, https://www.heise.de/downloads/18/3/2/7/5/0/5/4/COM_2022_45_1_DE_ACT_part1_v1_cDcFA8p3G9UA3s8Wh9fP88XKI04_83088.pdf.

European Center for digital Competitiveness (2021): Digital Riser Report 2021, European Center for Digital Competitiveness by ESCP Business School: Berlin, https://digital-competitiveness.eu/wp-content/uploads/Digital_Riser_Report-2021.pdf.

European Semiconductor Industry Association (2021): European Semiconductor Industry: a strong contributor to reducing Carbon Emissions. Veröffentlichung des ESIA o. D., eusemiconductors.eu/sites/default/files/uploads/ESIA_GHGbrochure_1907.pdf.

Garcia Bardon, M. und Parvais, B. (2020): The Environmental Footprint of Logic CMOS Technologies, A DTCO-based analysis. Artikel auf der Website des IMEC vom 17. Dezember 2020, <https://www.imec-int.com/en/articles/environmental-footprint-logic-cmos-technologies>.

Germany Trade & Invest (2021): Hersteller und Zulieferer investieren in Elektromobilität. Artikel auf der Website von GTAI vom 22. September 2021, <https://www.gtai.de/gtai-de/trade/rumaenien/branchen/hersteller-und-zulieferer-investieren-in-elektromobilitaet-677116>.

Gerstl, S. (2022): Intel investiert 20 Mrd. US-\$ in „Mega-Standort“ in Ohio. Artikel auf der Website von ElektronikPraxis vom 24. Januar 2022, <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/intel-investiert-20-mrd-us-in-mega-standort-in-ohio-a-1089798/>.

Gupta, U.; Kim, Y. G.; Lee, S.; Tse, J.; Lee, H.-H. S.; Wie, G.-Y.; Brooks, D. und Wu, C.-Y. (2020): Chasing Carbon: The Elusive Environmental Footprint of Computing, <https://arxiv.org/pdf/2011.02839.pdf>.

Halbleiterhersteller (2001): Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in der Bundesrepublik Deutschland zur Reduzierung der Emission bestimmter fluorierter Gase. Selbstverpflichtung vom 2. Februar 2001, https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sv_15.pdf.

IC Insights (2020): Global Wafer Capacity 2020-2024 – Detailed Analysis and Forecast of the IC Industry's Wafer Fab Capacity. In: Research Bulletin IC Insights, 13. Februar 2020, <https://www.icinsights.com/data/articles/documents/1235.pdf>.

IC Insights (2021): Chinese Companies Hold Only 5 % of Global IC Marketshare. In: Research Bulletin IC Insights, 13. April 2021, <https://www.icinsights.com/news/bulletins/Chinese-Companies-Hold-Only-5-Of-Global-IC-Marketshare/>.

IHS/Markit (2019): Automotive IC Suppliers 2019. Tabelle auf der Website von evertiq vom 6. Juni 2019, <https://evertiq.com/design/46364>.

IMEC (2021): Sustainable semiconductor technologies and systems (SSTS). Website von IMEC o. D., <https://www.imec-int.com/en/expertise/cmos-advanced/sustainable-semiconductor-technologies-and-systems-ssts>.

Infineon (2012): Geschäftsbericht 2012 Infineon Technologies AG. Website von Infineon o. D., <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-GB2012-D.pdf?fileId=db3a30433b92f0e8013b98a551e91604>.

Infineon (2020): Geschäftsbericht 2020, Infineon Technologies AG. Website von Infineon o. D., <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon+Gesch%C3%A4ftsbericht+2020.pdf?fileId=5546d46175b876680175e6e19f3d0028>.

Infineon (2021a): Nachhaltigkeit bei Infineon, in Ergänzung zum Geschäftsbericht 2021. Website von Infineon vom 25. November 2021, <https://www.infineon.com/dgdl/Nachhaltigkeit+bei+Infineon+in+Erg%C3%A4nzung+zum+Gesch%C3%A4ftsbericht+2021.pdf?fileId=8ac78c8b7d507352017d6b5ed94a016d>.

Infineon (2021b): Infineon eröffnet High-Tech-Chipfabrik für Leistungselektronik auf 300-Millimeter-Dünnschichten. Pressemitteilung auf der Website von Infineon vom 17. September 2021, <https://www.infineon.com/cms/austria/de/presse/GJ2021/mission-future.html>.

Infineon (2022): Unternehmenspräsentation, Infineon Technologies AG, Februar 2022. Präsentationsfolien von der Website von Infineon vom Februar 2022, https://www.infineon.com/dgdl/IFX_FY2022_Q1_web_DE.pdf?fileId=5546d4617782987a017786db82cd0006.

Institut der deutschen Wirtschaft (2020): MINT-Herbstreport 2020. MINT-Engpässe und Corona-Pandemie: kurzfristige Effekte und langfristige Herausforderungen. IW: Köln.

Investment Monitor (2021): Where should Intel establish its new European chip plants?. Analyse auf der Website von Investmentmonitor vom 8. September 2021, <https://www.investmentmonitor.ai/analysis/intel-europe-semiconductor-fdi-investment>.

IPCEI (2021): Projektsteckbrief AZUR. https://www.ipcei-me.eu/wp-content/uploads/2021/05/2020-12-IP-CEI_Projektsteckbrief_AZUR_Verbundwerkstoffe.pdf.

Iwd (2019): Standort Deutschland: Die Kosten sind das Problem. Artikel auf der Website des iwd vom 25. Januar 2019, <https://www.iwd.de/artikel/standort-deutschland-die-kosten-sind-das-problem-416733/#:~:text=Deutschland%20geh%C3%B6rt%20zu%20den,E%2DL%C3%A4ndern%20den%20neunten%20Platz>.

Kearney (2021): Europe's urgent need to invest in a leading-edge semiconductor ecosystem. Artikel auf der Website von Kearney o. D., <https://www.kearney.com/documents/20152/272966470/Europes+urgent+need+to+invest+in+a+leading-edge+semiconductor+ecosystem.pdf/f3ec1e30-b8ff-b367-417c-62cf476342ea?t=1636582354000>.

Kearney (2022): Automotive semiconductor supply: looking beyond yesterday. Artikel auf der Website von Kearney o. D., <https://www.kearney.com/communications-media-technology/article/?/a/automotive-semiconductor-supply-looking-beyond-yesterday>.

Kleinhans, J.-P.; Baisakova, N. (2020): The global semiconductor value chain, A technology primer for policy makers. Stiftung Neue Verantwortung.

Kleinhans, J.-P.; Lee, J. (2021): China's rise in semiconductors and Europe; Recommendations for policy makers. Stiftung Neue Verantwortung und Mercator Institut for China Studies.

Kleinhans, J.-P. (2021): The lack of semiconductor manufacturing in Europe. Stiftung Neue Verantwortung.

Kleinhans, J.-P.; Maham, P.; Hess, J.; Semenova, A. (2021): Who is developing the chips of the future?, Publikation auf der Website der Stiftung Neue Verantwortung, 16. Juni 2021, <https://www.stiftung-nv.de/de/publication/who-developing-chips-future>.

Köllner, C. (2019): Welche Rolle spielt Siliziumkarbid für die Elektromobilität? Artikel auf der Website von Springer Professional vom 10. Dezember 2019, [https://www.springerprofessional.de/halbleiter/elektromobilitaet/welche-rolle-spielt-siliziumkarbid-fuer-die-elektromobilitaet-/17354930#:~:text=Siliziumkarbid%20\(SiC\)%2DHalbleiter%20sollen,Form%20von%20W%C3%A4rme%20verloren%20geh](https://www.springerprofessional.de/halbleiter/elektromobilitaet/welche-rolle-spielt-siliziumkarbid-fuer-die-elektromobilitaet-/17354930#:~:text=Siliziumkarbid%20(SiC)%2DHalbleiter%20sollen,Form%20von%20W%C3%A4rme%20verloren%20geh).

Koppel, O.; Puls, T.; Röben, E. (2019): Innovationstreiber Kfz-Unternehmen. Eine Analyse der Patentanmeldungen in Deutschland für die Jahre 2005 bis 2016. In: IW-Analysen, Nr. 132. IW: Köln.

Masanet, E. R.; Shehabi, A.; Lei, N.; Smith, S. J. und Koomey, J. G. (2020): Recalibrating global data center energy-use estimates. In: Science, 367, S. 984–986.

McKinsey (2018): Skill shift: Automation and the future of the workforce. McKinsey Discussion Paper vom 23. Mai 2018, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/public%20and%20social%20sector/our%20insights/skill%20shift%20automation%20and%20the%20future%20of%20the%20workforce/mgi-skill-shift-automation-and-future-of-the-workforce-may-2018.pdf>.

McKinsey (2020): Semiconductor design and manufacturing: Achieving leading-edge capabilities. Artikel auf der Website von McKinsey vom 20. August 2020, <https://www.mckinsey.com/industries/advanced-electronics/our-insights/semiconductor-design-and-manufacturing-achieving-leading-edge-capabilities>.

Metis (2020): Skills and Occupational Profiles for Microelectronics and Microelectronics Skills Strategy. Broschüre von der Website von Metis o. D., https://www.metis4skills.eu/wp-content/uploads/2020/08/METIS_Broschüre_Skills-Strategy.pdf.

Mouchegh, J. (2021): Infineon eröffnet 300-mm-Dünnyafer-Chipfabrik. Artikel auf der Website von all-electronics vom 17. September 2021, <https://www.all-electronics.de/elektronik-fertigung/Infineon%20er%C3%B6ffnet%20300-mm-D%C3%BCnnyafer-Chipfabrik.html>.

Notes from Poland (2021): Intel to expand presence in Poland at its largest EU research and development centre. Artikel auf der Website von NFP vom 26. Januar 2021, <https://notesfrompoland.com/2021/01/26/intel-to-expand-presence-in-poland-at-its-largest-eu-research-and-development-centre/>.

NXP (2021a): Financial Results 2020. Website von NXP vom 1. Februar 2021, <https://investors.nxp.com/static-files/0924b02a-ac8f-47fa-8840-d2e61cf1ba39>.

NXP (2021b): Employee Demographics 2020. Website von NXP o. D., <https://www.nxp.com/company/about-nxp/employees/employee-demographics:EMPLOYEE-DEMOGRAPHICS>.

Oxford Economics (2021): The positive impact of semiconductor industry on the American workforce and how federal incentives will increase domestic jobs. Studie im Auftrag der Semiconductor Industry Association (SIA) vom Mai 2021.

Randall, S. (2021): Are Chinese chipmakers spending enough on R&D? Technode views Beitrag vom 10. September 2021, <https://technode.com/2021/09/10/silicon-are-chinese-chipmakers-spending-enough-on-rd/>.

Roland Berger (2019): How OSAT companies can improve their profitability in a low-margin environment. Insight auf der Website von Roland Berger vom 12. April 2019, <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Between-a-rock-and-a-hard-place-OSAT-companies-need-a-new-playbook.html>.

Royaume de Belgique et al. (2020): Declaration – An European Initiative on Processors and semiconductor technologies, https://www.eusemiconductors.eu/sites/default/files/uploads/20201209_EuropeanInitiativeon-Processorsandsemiconductortechnologies.pdf.

SEMI Europe (2020): Fluorinated Chemicals Are Essential to Semiconductor Manufacturing and Innovation. Artikel auf der Website von semi vom 15. Dezember 2020, <https://www.semi.org/en/blogs/semi-news/fluorinated-chemicals-are-essential-to-semiconductor-manufacturing-and-innovation>.

Semiconductor Industry Association (2021a): 2021 Factbook, <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/2021-SIA-Factbook-FINAL1.pdf>.

Semiconductor Industry Association (2021b): Global Governments Ramp Up Pace of Chip Investments. Artikel auf der Website der SIA vom 2. Juni 2021, <https://www.semiconductors.org/global-governments-ramp-up-pace-of-chip-investments/>.

Shen, C.; Tran, P. P. und Ly, T. (2018): Chemical Waste Management in the U.S. Semiconductor Industry. In: Sustainability, 10(5), 1545.

STMicroelectronics (2021): Annual Report 2020. Website von STMicroelectronics vom 24. Februar 2021, <https://investors.st.com/sites/st-micro/files/financial-report/2020/stm-20-f-%282020%29.pdf>.

Strategy Analytics (2020): Automotive Semiconductor Trends and Outlook. Präsentationsfolien von Strategy Analytics vom Dezember 2020, https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2020/12/Automotive-Semiconductor-Trends-and-Outlook_Richard-Robinson.pdf.

Strategy Analytics (2021): Automotive Semiconductor Vendor Market Shares 2021. In: <https://www.infineon.com/dgdl/2021-05-04+Q2+FY21+Investor+Presentation.pdf?fileId=5546d46179122fec017933153a690008>.

Stuttgarter Nachrichten (2021): Bosch baut besonders leistungsfähige Chips. Artikel auf der Website von StN.de vom 2. Dezember 2021, <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.chipfabrik-reutlingen-bosch-besonders-leistungsfaeehige-chips.0f66089e-bcf4-4c25-80c7-982f6ab7f641.html>.

Tagesschau (2021): Habeck will Chipindustrie zurückholen. Artikel auf der Website der Tagesschau vom 20. Dezember 2021, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/habeck-chipindustrie-milliardenfoerderung-101.html>.

The Economist (2020): How ASML became chipmaking's biggest monopoly. Artikel auf der Website von The Economist vom 27. Februar 2020, <https://www.economist.com/business/2020/02/29/how-asml-became-chipmakers-biggest-monopoly>.

The Guardian (2021): The computer chip industry has a dirty climate secret. Artikel auf der Website von The Guardian vom 18. September 2021, <https://www.theguardian.com/environment/2021/sep/18/semiconductor-silicon-chips-carbon-footprint-climate>.

Ting-Fang, C. und Li, L. (2021): TSMC misses sustainability goals as it ramps up chip output. Artikel auf der Website von Nikkei Asia vom 30. Juni 2021, <https://asia.nikkei.com/Business/Tech/Semiconductors/TSMC-misses-sustainability-goals-as-it-ramps-up-chip-output>.

Toshiba (2018): Basic Knowledge of Discrete Semiconductor Device. E-learning course auf der Website von Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation o. D., <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete.html>.

Tsai, A. (2020): TSMC's push toward green energy. Artikel auf der Website von Taipei Times vom 17. Juli 2020, <https://www.taipeitimes.com/News/editorials/archives/2020/07/17/2003740051>.

TSMC (2021): TSMC 2020 Corporate Social Responsibility Report. Website von TSMC o. D., <https://esg.tsmc.com/download/file/2020-csr-report/english/pdf/e-all.pdf>.

Wirtschaftsförderung Sachsen (2019): An American in „Silicon Saxony“ How Bill discovered that Saxony can do more than „just“ chips, https://business-saxony.com/sixcms/media.php/78/mikro_engl_web_20190329.pdf.

Zapp, H. (2021): Chipindustrie: Deutschlands letzte Chance auf digitale Souveränität. Standpunkt im Tagesspiegel Background vom 31. März 2021, <https://background.tagesspiegel.de/digitalisierung/chipindustrie-deutschlands-letzte-chance-auf-digitale-souveraenitaet>.

ZEW (2020): Innovationen in der deutschen Wirtschaft, Indikatorenbericht zur Innovationserhebung 2019, ZEW: Mannheim, https://www.zew.de/fileadmin/FTP/mip/19/mip_2019.pdf?v=1581409691.

ZVEI (2019): Technologie-Roadmap „Next Generation“ Elektronische Komponenten und Systeme. ZVEI: Frankfurt am Main.

ZVEI (2021a): Mikroelektronik – Trendanalyse bis 2025: Vorstellung langfristiger Trends 2015 – 2020 – 2025. ZVEI: Frankfurt am Main.

ZVEI (2021b): Zukunftsstrategie und Marktentwicklung Halbleiterindustrie, Deutschland und Europa. ZVEI: Frankfurt am Main.

ZVEI (2021c): Semiconductor Strategy for Germany and Europe, The current situation, analysis, and goals, discussion paper. ZVEI: Frankfurt am Main.

ZVEI (2021d): Die Elektro- und Digitalindustrie im Wandel, Auswertung ZVEI-Digitalumfrage. ZVEI: Frankfurt am Main.

ZVEI (2022): Expertengespräch mit Wolfgang Weber, Vorsitzender der Geschäftsführung des ZVEI am 25. Januar 2022. ZVEI: Frankfurt am Main.

**Stiftung Arbeit und Umwelt
der Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie**

Inselstraße 6
10179 Berlin
Telefon +49 30 2787 1325

Königsworther Platz 6
30167 Hannover
Telefon +49 511 7631 472

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

