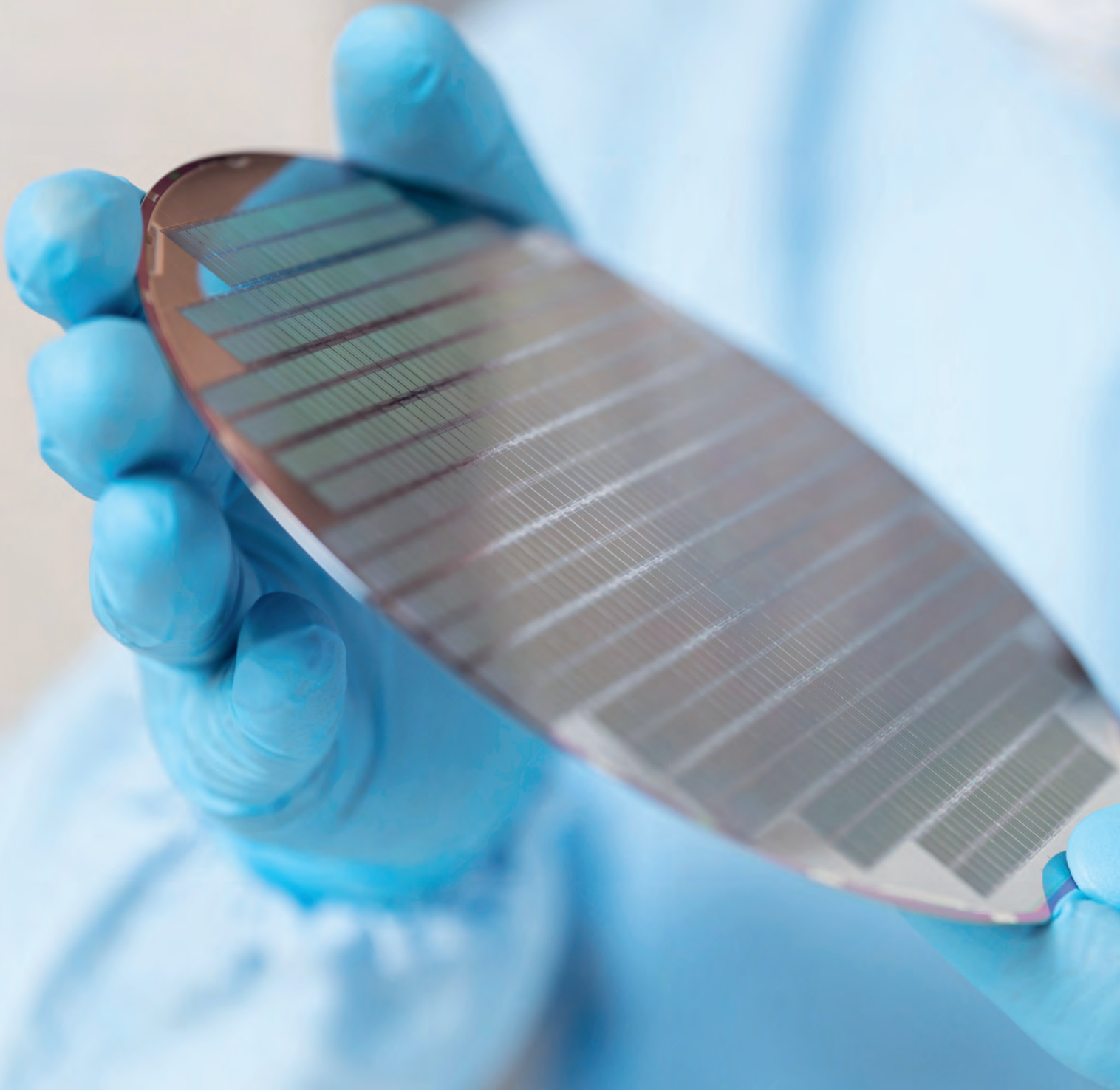




Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa.

Rahmenprogramm der Bundesregierung für Forschung und Innovation 2021-2024



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1 Einführung | 4 |
| <hr/> | |
| 2 Leitmotive und Ziele für Forschung und Innovation in der Mikroelektronik | 8 |
| <hr/> | |
| 3 Technologische Voraussetzungen für eine souveräne und nachhaltige Digitalisierung schaffen | 10 |
| <hr/> | |
| 3.1 Electronic Design Automation (EDA)..... | 10 |
| 3.2 Spezialprozessoren für Edge-Computing, Künstliche Intelligenz und Hochleistungsanwendungen | 12 |
| 3.3 Neuartige, intelligente und vernetzte Sensorik | 13 |
| 3.4 Hochfrequenzelektronik für Kommunikation und Sensorik..... | 14 |
| 3.5 Intelligente und energieeffiziente Leistungselektronik..... | 15 |
| 3.6 Querschnittstechnologien und -themen..... | 16 |
| 3.7 Ausgewählte Anlagen für die Mikroelektronikproduktion..... | 20 |
| 3.8 Advanced Silicon and beyond..... | 22 |
| <hr/> | |
| 4 Zukunftsweisende Anwendungen durch Mikroelektronik stärken | 24 |
| <hr/> | |
| 4.1 Künstliche Intelligenz..... | 24 |
| 4.2 Höchstleistungsrechnen..... | 25 |
| 4.3 Kommunikationstechnologie | 25 |
| 4.4 Smart Health..... | 26 |
| 4.5 Autonomes Fahren | 28 |
| 4.6 Industrie 4.0..... | 29 |
| 4.7 Intelligente Energiewandlung..... | 31 |
| <hr/> | |
| 5 Kooperationen, Instrumente, Strukturen | 34 |
| <hr/> | |
| 5.1 Stärkung von Kooperationen..... | 34 |
| 5.2 Maßgeschneiderte Instrumente | 36 |
| 5.3 Strukturen für Forschung und Innovation..... | 38 |
| 5.4 Ein lebendes Programm durch strategische Vorausschau und Evaluation..... | 39 |
| <hr/> | |
| Glossar | 40 |
| <hr/> | |
| Impressum | 45 |
| <hr/> | |

Vorwort

Autonom fahrende Fahrzeuge, Produktionsmaschinen, Medizintechnik, Telekommunikation – all das ist ohne innovative Elektroniksysteme nicht machbar. Diese Systeme sollen auch künftig aus Deutschland kommen. Grundlage der Innovationskraft in Deutschland sind unsere Stärken in Forschung und Entwicklung. Deswegen fördert die Bundesregierung Forschung und Innovation in der Mikroelektronik.

Es geht um die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas in der Welt. Es geht aber auch um Vertrauen. Wer sich in Zukunft in ein autonom fahrendes Verkehrsmittel setzt, der muss sich darauf verlassen können, dass es ihn sicher ans Ziel bringt. Und das gilt nicht nur dort. Immer mehr Innovationen sind heute digital und basieren auf Elektroniksystemen.

Damit Elektronik vertrauenswürdig sein kann, müssen wir sie verstehen. Das können wir nur, wenn wir in Wirtschaft und Wissenschaft Spitzenkompetenzen haben und fortlaufend weiterentwickeln. Je mehr wir fortschrittliche Elektronik selbst konzipieren, entwickeln, herstellen und absichern, desto besser können wir auch nachvollziehen, was Elektronik Dritter leistet; und auch nicht leistet. So können wir weltweit auf Augenhöhe kooperieren und Anforderungen an von uns genutzte oder betriebene Elektroniksysteme durchsetzen. Dazu gehört Nachhaltigkeit. Wir brauchen eine Digitalisierung und damit Elektronik, die für unsere Klimaschutzziele arbeitet, anstatt den Ressourcenverbrauch weiter zu steigern.

Deutschland will in Europa technologisch souverän sein und gleichzeitig kooperativ agieren. Angesichts der international stark vernetzten Wissens- und Wertschöpfungsketten in der Elektronik sind Kooperationen notwendig und vorteilhaft. Vorrangig sind dabei die auf gemeinsamen Werten basierenden Kooperationen im europäischen Binnenmarkt und Forschungsraum. Die Bundesregierung fördert deshalb den Ausbau von europäischer Elektronikkompetenz in Forschung und Produktion, damit Europa auch weiterhin gemeinschaftlich stark ist im internationalen Wettbewerb.

Aus Ideen Innovationen machen, die weltweit erfolgreich sind und den Menschen nützen – das ist der Anspruch. Ob als Forschende, Anwendende oder Nutzende: Dieses Programm für Elektronikforschung und -innovation stärkt unsere technologische Souveränität und damit den Wohlstand in unserem Land.

Ihr Bundesministerium für Bildung und Forschung







1 Einführung

Unser Alltag und unsere Arbeitswelt sind mit dem Fortschreiten der Digitalisierung immer mehr von Elektronik durchdrungen. Elektronik steckt nicht nur in Handys, Tablets und Bürocomputern, sondern regelt unsere Energieversorgung, steuert die Datenströme für unser mobiles Internet und ermöglicht eine sichere vernetzte, automatisierte Mobilität. Elektronische Prozessoren sind auch gleichsam das Hirn, in dem Künstliche Intelligenz (KI) abläuft. In Branchen wie dem Gesundheitssektor und der industriellen Fertigung sorgt Elektronik dafür, dass Dienstleistungen und Produkte aus Deutschland höchste Anforderungen an Funktion und Qualität erfüllen. Damit ist (Mikro-)Elektronik eine wichtige Grundlage für Wohlstand im Zeitalter der Digitalisierung: Durch Angebote, die die Lebensqualität verbessern und die für zukunftsfeste Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Deutschland sorgen.

Um dies auch künftig zu leisten und dabei die Digitalisierung nach unseren Werten und Vorstellungen gestalten zu können, benötigen wir technologische Souveränität. Diese verstehen wir als Anspruch und Fähigkeit zur (Mit-)Gestaltung von Schlüsseltechnologien, d. h. zur Formulierung von Anforderungen an Technologien, Produkte und Dienstleistungen entsprechend den eigenen Werten und zur Mitbestimmung entsprechender Standards auf den globalen Märkten. Technologische Souveränität zielt damit explizit nicht auf Abschottung ab, sondern auf internationale Zusammenarbeit auf Augenhöhe. Dabei gilt: Technologische Souveränität in der Elektronik ist nur möglich als Teil des europäischen Binnenmarktes und Forschungsraumes, nicht auf rein nationaler Ebene. Das vorliegende Programm ist daher

im Einklang mit dem europäischen Forschungsrahmenprogramm Horizon Europe konzipiert, das ebenfalls auf Souveränität in digitalen Technologien ausgerichtet ist. Andere Weltregionen unternehmen massive Anstrengungen: So befördern etwa die USA u. a. mit staatlichen Hilfen die Ansiedlung neuer Chipfabriken. Auch China investiert aus dem Staatshaushalt, um mit eigenen Mikroelektronik-Fähigkeiten an die Weltspitze aufzuschließen und Abhängigkeiten abzubauen. Für Europa gilt ebenso, dass nur eigene Kompetenzen die Anschlussfähigkeit sichern und Augenhöhe herstellen können.

Aus der wachsenden Bedeutung von Elektronik ergeben sich große Herausforderungen. Deutschland und Europa sind im Bereich der Mikroelektronik und Elektroniksysteme intensiv in globale Wertschöpfungsketten und Partnerschaften eingebunden (Abbildung 1). Europäische Unternehmen sind sowohl Lieferanten als auch Bezahler von Chips und Elektronik-Komponenten, sowohl Exporteure als auch Importeure. Um in diesen globalen Wertschöpfungsketten eine souveräne Position einzunehmen und die Digitalisierung nach unseren Werten gestalten zu können, brauchen wir vertrauenswürdige Elektronik: Elektronik, von der wir genau wissen, was sie tut; deren Fertigung wir verstehen; deren Funktionen wir überprüfen können; und von der wir daher wissen, dass sie sicher und zuverlässig ist. Wir müssen dafür alle Schlüsseltechnologien der Elektronik verstehen und sie anwenden können. Und wir müssen uns durch eine eigene, wirtschaftliche Mikroelektronik-Fertigung in Deutschland und Europa in der Lage halten, flexibel auf Herausforderungen in den globalen Lieferketten zu reagieren.

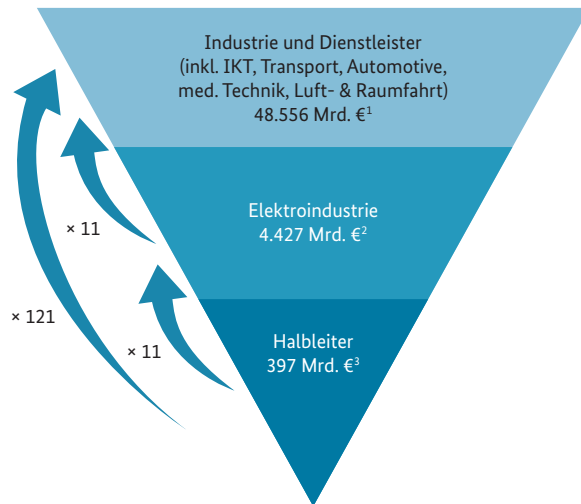


Abbildung 1: Elektronik ist die Schlüsseltechnologie in einer digitalisierten Gesellschaft wie Deutschland. Halbleiter bilden die Basis für Wertschöpfungsketten mit hohen Multiplikatoren. Quellenangaben: s. Fußnoten ^{1 2 3}

Die rasante Verbreitung der Elektronik ist Chance und Herausforderung zugleich. Einerseits könnten vielfach Ressourcen durch smarte digitalisierte Lösungen gespart werden. Andererseits konsumiert die Elektronik dabei selbst zunehmend Ressourcen. Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) waren im Jahr 2019 bereits für 3,7 % der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich; zugleich stieg der Energieverbrauch durch IKT zwischen 2015 und 2020 um 9 % pro Jahr, was bei Fortsetzung einer Verdoppelung alle acht Jahre entsprechen würde.⁴ Um CO₂-Emissionen im aktuellen Strommix reduzieren zu können, brauchen wir also Elektronik, die den Energieverbrauch von Mikroprozessoren und allgemein von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) deutlich senkt. Dabei müssen wir über größere Energieeffizienz einzelner Komponenten hinaus erhebliche Energieeinsparungen für verteilte und vernetzte IKT-Systeme erreichen, um die vereinbarten Klimaschutzziele zu erreichen. Das gilt besonders auch für KI-Systeme, die mit maßgeschneiderten, neuartigen KI-Chips deutlich effizienter sein können als mit KI-Software, die auf herkömmlichen Prozessoren läuft. Durch Reduktion kritischer Rohstoffe und durch leistungsfähige Recy-

clingprozesse müssen wir zudem eine hohe Ressourceneffizienz erreichen. Dieser auf Ressourcen- und Energieeffizienz ausgerichtete Nachhaltigkeitsansatz bei der Entwicklung von IKT-Lösungen schützt nicht nur das Klima, sondern stützt auch die Wirtschaft: Innovationsführer bei Elektronik für energiesparende IKT-Systeme zu sein, wird Unternehmen aus Deutschland einen Wettbewerbsvorteil verschaffen. Dabei schafft die Forschung und deren Förderung die Voraussetzungen für die Industrie, die Anforderungen zukünftiger regulatorischer Schritte zu erfüllen. Auch hier ergibt sich ein Wettbewerbsvorteil.

Elektronik zeichnet sich nach wie vor durch hohe Innovationsdynamik und kurze Produktlebenszyklen aus. Sie bleibt deshalb forschungsintensiv: Halbleiterhersteller investieren typischerweise rund 15 % ihres Umsatzes in Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten. Und wirklich neue Technologien brauchen neue Ansätze aus der Grundlagenforschung. Daher bedeutet Elektronik-Förderung schwerpunktmäßig die Förderung von Forschung und Innovation. Außerdem sind in der Elektronikfertigung hohe Kapitalkosten die Regel. Für den Transfer aus der Forschung in die Produktion am Standort Deutschland und Europa ist es deswegen essenziell, dass Forschungs- und Wirtschaftsförderung aufeinander abgestimmt sind.

Die beiden Aspekte „Vertrauenswürdige Elektronik“ und „Nachhaltige, klimafreundliche Elektronik“ sind die Säulen des vorliegenden Rahmenprogramms der Bundesregierung für Forschung und Innovation „Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa“ mit Laufzeit von 2021 bis 2024. Vorrangiges Ziel ist es, die technologische Souveränität Deutschlands und Europas zu stärken. Dafür bleibt die nationale Forschungsförderung mit der europäischen transnationalen Förderung verzahnt, denn die Innovations- und Wertschöpfungsketten sind und bleiben grenzübergreifend. Ziel ist auch, die Investitionsbereitschaft der Industrie für Mikroelektronik-Produktion in Deutschland weiter zu stärken; insbesondere über die Förderung von Verbundpro-

1 decision.eu/wp-content/uploads/2020/02/ECS-study-presentation-of-Key-findings.pdf

2 zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/Regelmaessige_Publikationen/Daten_Zahlen_und_Fakten/Die_globale_Elektroindustrie_Daten_Zahlen_Fakten/Faktenblatt-International-August-2020_NEU.pdf

3 wsts.org/esraCMS/extension/media/f/WST/4298/WSTS_nr-2019_11.pdf - Durchschnittskurs Dollar in 2018 ca. 1€ = 1,18\$ (de.statista.com)

4 theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf

jekten von Wissenschaft und Wirtschaft entlang der Wertschöpfungskette vom Komponentenhersteller bis zum Systemanbieter.

Eine besondere Rolle spielen dabei Pilotproduktionslinien, die für den raschen Transfer von Forschungsergebnissen in die Produktion sorgen. Den Erfolg dieses Ansatzes zeigen die Pilotlinien-Vorhaben der europäisch ko-finanzierten Initiative ECSEL (Electronic Components and Systems for European Leadership), mit einer Nachfolge-Initiative zu „Key Digital Technologies“ (KDT) im EU-Forschungsrahmenprogramm Horizon Europe ab 2021. Zudem konnte im Important Project of Common European Interest⁵ (IPCEI) on Microelectronics (Start 2017) die Umsetzung von mikroelektronischen Innovationen in die Produktion deutlich besser unterstützt werden. In Folge haben Unternehmen in neue Fertigungskapazitäten für neue Produkte der Mikroelektronik investiert. Erstmals in diesem Jahrtausend entsteht eine ganz neue Mikroelektronikfabrik in Deutschland. Auf der anderen Seite des Innovationsnetzwerkes sorgen Forschungseinrichtungen und Hochschulen dafür, dass stetig neue Ideen gesponnen werden.

Bei vielen Problemstellungen, etwa bei KI-Chips, liegt das größte Potenzial dabei in völlig neuen Lösungsansätzen. Besonderes Augenmerk wird daher auf der Innovationsbeschleunigung liegen, um kreative Ideen und neuartige Ansätze schneller in konkrete Technologien und Anwendungen zu übersetzen. Dazu sollen gezielt Kooperationen und Strukturen gefördert werden, die grundlagenorientiert Forschende frühzeitig mit möglichen Anwendenden zusammenbringen. Auch kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) sowie Start-ups können neue Ideen rasch in neue Produkte umsetzen, weswegen sich die Förderung in besonderem Maße an diese richtet: KMU haben in der Elektronik-Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) einen Anteil an der gewerblichen Förderung von rd. 35 %, während der KMU-Anteil an den FuE-Aufwendungen der Wirtschaft insgesamt deutlich unter 20 % liegt⁶.



Das vorliegende Programm baut auf dem Rahmenprogramm für Forschung und Innovation 2016-2020 „Mikroelektronik aus Deutschland – Innovationstreiber der Digitalisierung“ auf, dem ersten spezialisierten Elektronik-Forschungsprogramm der Bundesregierung. Für die Innovationsbeschleunigung verfolgt das BMBF in der Umsetzung neue Ansätze, zum Beispiel mit den Maßnahmen „Forschung für neue Mikroelektronik (ForMikro)“ und dem Pilot-Innovationswettbewerb „Energieeffizientes KI-System“. In das vorherige Programm fiel auch der Auftakt zu den Investitionsmaßnahmen Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland, Forschungslabore Mikroelektronik Deutschland (Förderung durch das BMBF) und dem IPCEI on Microelectronics (Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi). Die Forschungsfabrik bündelt die technologischen Fähigkeiten von 13 führenden Instituten für angewandte Elektronikforschung in einem gemeinsamen Technologiepool mit zentraler Anlaufstelle für Partner und Kunden aus Wissenschaft und Wirtschaft, und die Forschungslabore stärken Hochschulen in ihrer zentralen Rolle im Mikroelektronik-Innovationssystem. Die positiven Ergebnisse der bisherigen Mikroelektronikförderung und die geopolitische Lage bei dieser

5 Englisch für „Wichtiges Vorhaben von gemeinsamem europäischem Interesse“ lt. EU-Verträgen

6 Die Rolle von KMU für Forschung und Innovation in Deutschland, Studie im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation, Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 10/2016, e-fi.de/fileadmin/Innovationsstudien_2016/StuDIS_10_2016.pdf

Schlüsseltechnologie bilden auch die Grundlage für Überlegungen der Bundesregierung, im europäischen Rahmen ein IPCEI zu Kommunikationstechnologien und Mikroelektronik zu initiieren.

Die Schwerpunkte für die Ausrichtung des aktuellen Programms wurden im Austausch der Bundesregierung mit der Fachszene identifiziert. Zum einen wurde im Dialog mit Wirtschaft und Wissenschaft die Leitinitiative „Vertrauenswürdige Elektronik“ entwickelt, die auch Teil der BMBF-Digitalstrategie ist. Zum anderen wurden in mehreren Expertengesprächen prioritäre Aspekte der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit identifiziert. Zusammen mit Ergebnissen einer Umfeldanalyse und einer Bilanz des vergangenen Rahmenprogramms bilden diese Erkenntnisse die Basis des aktuellen Programms. Die inhaltlichen Schwerpunkte dafür sind in den Kapiteln zu den Dimensionen „Technologien“ und „Anwendungsfelder“ beschrieben. Diese Inhalte werden in den nächsten vier Jahren im Austausch mit der Fachszene kontinuierlich überprüft und weiterentwickelt. Im Jahr 2023 soll über eine zweijährige Verlängerung oder eine Neuauflage und Neuausrichtung entschieden werden.

Das Programm trägt bei zur Umsetzung der Hightech-Strategie 2025, insbesondere auch über die Beiträge von Elektronik zu den Missionen „Sichere, saubere und vernetzte Mobilität“, „Künstliche Intelligenz in die Anwen-

derung bringen“ und „Weitgehende Treibhausgasneutralität der Industrie“; zur Umsetzung der KI-Strategie; zur Umsetzungsstrategie „Digitalisierung gestalten“ und des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Der Aspekt „Nachhaltige, klimafreundliche Elektronik“ beinhaltet die Initiative „Green ICT – Grüne IKT“ des BMBF-Aktionsplans „Natürlich. Digital. Nachhaltig“. Das Programm hat Berührungspunkte zu zahlreichen weiteren laufenden oder geplanten Forschungsprogrammen der Bundesregierung und ihren Ressorts, insbesondere zu Kommunikationstechnologien, zur IT-Sicherheit, zu Industrie 4.0, zur Medizintechnik, zur Photonik und zum autonomen und vernetzten Fahren, da einerseits die Digitalisierung und mit ihr die Mikroelektronik immer mehr Gebiete durchdringen und da andererseits einstmals getrennte Technologiewelten (z. B. Hardware und Software oder Elektronik und Photonik) immer mehr miteinander verschmelzen.



2 Leitmotive und Ziele für Forschung und Innovation in der Mikroelektronik

Das vorliegende Programm ist geleitet vom folgenden Zielzustand:

- Deutschland ist als Teil des Europäischen Forschungsraums und des Europäischen Binnenmarkts technologisch souverän. Es gibt keine einseitigen Abhängigkeiten von anderen Weltregionen.
- Elektronik aus Deutschland und Europa hat eine neue Qualität und ist nachweisbar vertrauenswürdig. Sie ist damit die erste Wahl für sicherheitskritische Anwendungen wie das autonome Fahren, intelligente Medizintechnik oder die sich selbst steuernde Fabrik der Industrie 4.0. Akteure in Deutschland und Europa können die Vertrauenswürdigkeit von Elektronik aus allen Weltregionen aufgrund eigenen Wissens nachvollziehen. Damit wird auch zum Abbau von Handelskonflikten beigetragen.
- Elektronik aus Deutschland und Europa leistet einen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz: durch Elektronik, die selbst weniger Energie verbraucht – zum Beispiel in energieeffizienten KI-Prozessoren. Oder durch Elektronik, die andere Geräte intelligent steuert und so deren Strom-Appetit zügelt – wie es Bewegungssensoren anstelle von Lichtschaltern tun. Damit ist sie ein wichtiger Baustein für das Erreichen der Klimaschutzziele der Bundesregierung.
- Elektronik liefert technische Lösungen für weitere gesellschaftliche Herausforderungen, etwa den

sich abzeichnenden demografischen Mangel an Arbeitskräften oder die Gesunderhaltung in allen Lebensphasen. Leistungsfähige, vertrauenswürdige und nachhaltige Elektronik erschließt dabei neue Lösungswege für intelligente Assistenten, das Internet der Dinge, KI-Anwendungen oder moderne, klimafreundliche Rechenzentren.

Um dies zu erreichen, unternimmt die Bundesregierung die folgenden Schritte:

- Wir unterstützen die Entwicklung und Umsetzung neuer grundlegender Technologien in Deutschland und Europa.
- Wir stärken die Kooperation und Vernetzung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft für Know-how- und Ergebnistransfer weiter; auch, um neueste Forschungsergebnisse in Regulierung und Standardisierung einfließen zu lassen. Denn in der Digitalisierung sind Produktinnovationen nicht nur Software-Innovationen, sondern in vielen Branchen immer häufiger Mikroelektronik-Innovationen.
- Wir fördern den Transfer aus der grundlagenorientierten in die anwendungsorientierte Forschung als Wegbereiter für Sprunginnovationen am Standort Deutschland und Europa. Die direkte Forschungsförderung dieses Programms komplementiert dabei eng und arbeitsteilig die Förderung der Bundesagentur für Sprunginnovationen SPRIND.

- Wir fördern zudem vielversprechende neue Entwicklungen im Bereich der Cybersicherheit. Die Agentur für Innovation in der Cybersicherheit (GmbH) beauftragt und finanziert dazu risikofreudige, ambitionierte Forschungs- und Innovationsvorhaben und koordiniert den gesamten Forschungsprozess von der Idee bis zum Prototypen, um so deutlich schneller Ergebnisse zu erzielen. Die Ergebnisse soll sie dann der Bundesregierung zur Verfügung stellen.
- Wir stärken Nachwuchsforschende, Start-ups sowie kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) für ein agiles Innovationssystem.
- Wir fördern einen effektiven Dialog der relevanten Akteure, um neue Forschungs- und Innovationsthemen zu identifizieren und rechtzeitig aufzugreifen.
- Wir verzahnen die Forschungspolitik auf nationaler und europäischer Ebene. Denn Wissenschaft wie Wirtschaft sind grenzübergreifend aufgestellt; Wertschöpfungsketten sind oft frühestens in Europa geschlossen, nicht aber national. Die nationalen Maßnahmen sind daher strategisch abgestimmt auf europäische Initiativen wie den Digitalen Binnenmarkt, den European Green Deal und insbesondere das Forschungsrahmenprogramm Horizon Europe sowie das Investitionsprogramm Digital Europe.

Wir müssen den Elektronikstandort Deutschland stärken, wollen wir den digitalen Wandel auch in Zukunft selbstbestimmt gestalten. Hierzu gilt es nicht nur, unsere Stärken weiter zu stärken, sondern auch andere wichtige Technologiebereiche deutlich zu fördern und so neue Kompetenzen zu erwerben und zu erschließen. Dieses Programm wird hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten. Allein das BMBF stellt dafür über die vier Jahre Programmlaufzeit rund 400 Mio. Euro für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben bereit. Das BMWi prüft, für das oben genannte IPCEI zu Kommunikationstechnologien und Mikroelektronik erhebliche Mittel bereitzustellen.

In seiner Mikroelektronik-Forschungsförderung arbeitet das BMBF dabei mit den folgenden operativen Zielen:

- Auf übergeordneter Ebene: Wir stärken Wertschöpfungsketten als Inkubator von Innovationen. Wir

sorgen für Vernetzung der Forschungs- und Innovationsakteure in Deutschland, insbesondere von kleinen und mittelständischen Unternehmen, und für den Transfer aus der erkenntnis- in die anwendungsorientierte Forschung, der auch über Köpfe stattfindet. Wir treiben den Kapazitäts- und Kompetenzaufbau im Bereich der Mikroelektronikforschung voran. Indikatoren dafür sind nicht nur die Anzahl von Promotionen, Publikationen, Patenten und Produkten, sondern z. B. auch Maße für die Abdeckung von Wertschöpfungsketten, für die Breite der technologischen Kompetenzen, für die Anzahl neuer institutioneller Kontakte in und zwischen Verbänden oder für die Anzahl neuer Kooperationen.

- Für *Technologische Souveränität* zudem: Wir stärken die Halbleiterproduktion in Deutschland und Europa. Wir etablieren ein vollständiges Innovationsökosystem zum beschleunigten, plattformbasierten Entwurf von Spezialprozessoren auf der Basis der RISC-V-Architektur für eine breite Spanne von Einsatzgebieten. Indikatoren dafür sind z. B. die zeitliche Entwicklung von Branchen Kennzahlen zu Innovation und Produktion sowie der Abdeckungsgrad von Wertschöpfungsketten bzw. die Vollständigkeit des Innovationsökosystems aus der Hand deutscher und europäischer Akteure.
- Für *Nachhaltige, klimafreundliche Elektronik* zudem: Wir stellen beispielhafte Lösungen mit Strahlkraft bereit, die den Anspruch Deutschlands auf eine Vorreiterrolle für die Entwicklung nachhaltiger Technologien unterstreichen. Dazu gehört die Weiterentwicklung von Methoden und Modellen, um resultierende Energie- und CO₂-Einsparungen zu quantifizieren. Indikatoren sind z. B. die Anzahl von entsprechenden Produktinnovationen und das konkrete Einsparungspotenzial.

Um jeweils auf den Stand der Technik und Forschung in den nachfolgend beschriebenen Technologie- und Anwendungsfeldern eingehen zu können, werden für jede Fördermaßnahme spezifische operative Ziele entsprechend der jeweiligen Ausgangslage und dem Forschungsbedarf identifiziert.



3 Technologische Voraussetzungen für eine souveräne und nachhaltige Digitalisierung schaffen

Mikroelektronik ist ein Inbegriff von Hochtechnologie. Grundlegende Technologien wie die nachfolgend beschriebenen zu beherrschen, sie weiterentwickeln zu können, gar neue erschaffen zu können, ist Voraussetzung dafür, Elektronik selbstbestimmt und mit Gewinn zur Anwendung zu bringen.

3.1 Electronic Design Automation (EDA)

Am Anfang eines jeden mikroelektronischen Systems steht der Entwurf.

Bis aus der ersten Idee ein fertiger Schaltkreis bzw. ein elektronisches System entsteht, ist ein komplexer Designprozess zu durchlaufen, der alle internen Wechselwirkungen berücksichtigt. Um diese Komplexität zu beherrschen, läuft der Entwurfsprozess so weit wie möglich automatisiert ab (EDA, electronic design automation). Von diesem Prozess hängt damit zu einem erheblichen Teil die Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit späterer Gesamtsysteme ab. Fehler, die bereits beim Entwurf gefunden werden, und Optimierungen, die virtuell ohne Messungen an realer Hardware stattfinden können, reduzieren die Entwicklungszeiten und -aufwände enorm.

Viele Unternehmen nutzen beim Entwurf ihrer mikroelektronischen Komponenten die EDA-Werkzeuge großer Anbieter. Diese sind jedoch oft nicht auf die

speziellen Bedürfnisse der facettenreichen deutschen Anwenderindustrie zugeschnitten, zum Beispiel hinsichtlich analoger Elektronik. Erforderlich ist eine eigene Entwurfskompetenz, die nicht nur Innovationen ermöglicht, sondern auch einen kompetenten Umgang mit allen Gliedern der Wertschöpfungskette. Für die Technologiesouveränität Deutschlands und Europas ist die Querschnittskompetenz EDA deswegen ein zentraler Baustein.

Um den Einsatz neuer Technologien zu ermöglichen und die Anforderungen neuer Anwendungen erfüllen zu können, müssen EDA-Werkzeuge kontinuierlich neu- und weiterentwickelt werden. Die Entwurfstechnologien der Zukunft werden zur Beschleunigung von Innovationsprozessen beitragen, den nötigen Aufwand reduzieren und die Time-to-Market verkürzen. Trotz zunehmender Komplexität können viele Parameter bereits im Designstadium durch Simulationen optimiert werden. Damit entfällt das bisher übliche langwierige Test- und Evaluierungsverfahren, in dem nacheinander eine Reihe von Hardware-Prototypen gebaut und getestet werden.

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: Die Anzahl der Schaltkreise nimmt zu, Systeme werden heterogener und verschiedene Technologien werden kombiniert. Die höhere Integrationsdichte

führt über physikalische Wechselwirkungen zu neuen Effekten, die in Modellen abgebildet werden müssen – insbesondere die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Für innovative Anwendungen rücken außerdem zunehmend Aspekte wie Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und funktionale Sicherheit in den Fokus – was abermals den Aufwand in der Modellierung erhöht.

Beispiele für künftige Handlungsfelder sind:

- **Entwicklungsplattformen und Ökosysteme:** Für spezifische Einsatzgebiete werden optimal angepasste elektronische Systeme benötigt, sei es im Sinne der Energieeffizienz, der Kosten oder bestimmter Betriebseigenschaften. Solche Entwicklungen für kleine Stückzahlen sind aber aufwendig und daher oft nicht rentabel. Vor allem in kleinen Unternehmen fehlt außerdem häufig die Expertise. Derzeit entstehen zwar neue Ansätze und technologische Entwicklungen (z. B. auf Basis von RISC-V); diese werden jedoch noch nicht ausreichend durch Tools unterstützt. Benötigt werden vielseitige Entwicklungsplattformen, die es durch modulare IP (Intellectual Property, geistiges Eigentum – hier im Sinne eines Chip-Designs) und angepasste Werkzeuge erlauben, spezifisch angepasste Hardware effizient abzuleiten. Dafür müssen Hardware-IP, Software und Entwicklungswerkzeuge (Entwurf, Verifikation, Modellierung, Compiler, Debugger) modular und skalierbar zur Verfügung stehen. Besonders interessant für die deutsche und europäische Halbleiterindustrie und -forschung sind dabei Open-Source-Ansätze, wie beispielsweise bei RISC-V.
- **Hardware-Software-Co-Design:** Bestimmte Funktionalitäten können sowohl über die Hardware als auch über die Software umgesetzt werden. Daher ist eine optimale Aufteilung und Verzahnung von fundamentaler Bedeutung, um Entwicklungskosten, Wartbarkeit, Aktualisierbarkeit und Performanz im Sinne von Geschwindigkeit und Energieeffizienz bestmöglich gestalten zu können. Umfassende Modelle bis hin zu virtuellen Prototypen ermöglichen eine wertschöpfungskettenübergreifende bzw. parallele Entwicklung von Hard- und Software. Gerade für sehr spezielle Systeme (z. B. neuronale Netze und neuromorphe Architekturen) kann eine angepasste Hardwarearchitektur enorme Effizienzsteigerungen bewirken.

- **KI für EDA:** Künstliche Intelligenz kann die Komplexität des Entwurfs beherrschbarer machen, Testverfahren optimieren und damit den Entwurfsprozess insgesamt beschleunigen. Ein schnellerer Entwurf treibt Innovationen und ist kritisch für den wirtschaftlichen Erfolg.
- **Design-for-Test:** In komplexen, hochintegrierten Chips und Systemen sind viele Parameter nicht mehr von außen abgreifbar bzw. zugänglich. Dies muss im Designprozess im Hinblick auf eine ausreichende Testbarkeit verstärkt berücksichtigt werden.
- **Analogdesign:** Hochintegrierte Chips oder Systeme enthalten oft einen hohen Anteil an analoger Elektronik wie Schnittstellen zur Sensorik, Kommunikationseinheiten und Energieversorgung. Bis zu 90 Prozent des Aufwands zum Entwurf eines Mikrochips entfällt auf den analogen Teil, obwohl dieser typischerweise nur 10 Prozent der Bauteile enthält. Im Entwurf analoger Schaltungen treten zahlreiche physikalische Effekte und Wechselwirkungen auf, die das Design extrem aufwendig machen und viel Experten- und Erfahrungswissen erfordern. Daher ist eine Formalisierung des Wissens und der Entwurfsautomatisierung durch entsprechende Werkzeuge anzustreben.



RISC-V

RISC-V ist eine offene Befehlssatzarchitektur, also eine abstrakte Beschreibung der Implementierung eines Rechners in Bezug auf die ausführbaren Maschinenbefehle, auf deren Grundlage rasch neue Prozessoren entwickelt werden können. „Offen“ heißt: Die Architektur ist nicht patentiert oder urheberrechtlich geschützt, sondern unter einer Open-Source-Lizenz verfügbar und darf deshalb frei verwendet werden. Speziell kleinere und mittlere Unternehmen können so ohne hohe Lizenzkosten maßgeschneiderte und performante Mikroprozessoren entwerfen, herstellen und verkaufen. Dies bietet für Deutschland bzw. Europa die Chance, eigene Prozessoren zu entwickeln und für die Industrie verfügbar zu machen.

3.2 Spezialprozessoren für Edge-Computing, Künstliche Intelligenz und Hochleistungsanwendungen

Leistungsstarke Spezialprozessoren sind Innovationstreiber.

Leistungsfähige Universal-Prozessoren für Server, PCs und Smartphones werden aktuell in Deutschland weder entworfen noch hergestellt; Spezialprozessoren wiederum gehören zu den Stärken der deutschen Elektronikindustrie. Sie spielen eine wesentliche Rolle im Innovationsgeschehen, denn durch ihre Eigenschaften wie Energieeffizienz, Echtzeitfähigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit können sie die spezifischen Anforderungen in den für die deutsche Industrie besonders relevanten Anwendungen oft besser erfüllen als Universalprozessoren. Sie ermöglichen auch ein höheres Maß an anwendungsspezifischer Performanz und Sicherheit und leisten damit einen entscheidenden Beitrag als Voraussetzung für Cybersicherheit.

Neue Anwendungsfelder und erheblich steigende Leistungsanforderungen in etablierten Anwendungen bringen die hierzulande vorhandenen Lösungen für Spezialprozessoren jedoch zunehmend an ihre Grenzen. Dies ist zum Beispiel beim Edge-Computing der Fall, der Verschiebung von rechenintensiven Anwendungen aus der Cloud in die Nähe der Endgeräte. Besonders hohe Leistungsansprüche an die Prozessoren haben auch Anwendungen der Künstlichen Intelligenz, weil hier sehr große Datenmengen in vielfältigen Kombinationen verarbeitet werden.

In künftigen Spezialprozessoren werden Elektronik und Algorithmen so aufeinander abgestimmt, dass Anwendungen deutlich beschleunigt werden können. Die Verzahnung von Sensorik, Künstlicher Intelligenz und Elektronik wird zudem die Energieeffizienz deutlich erhöhen. Für Deutschland ergibt sich damit die Chance, den Sprung in neue Leistungsklassen und Anwendungsfelder zu schaffen - mit Prozessoren Made in Europe als vertrauenswürdige Basis der Digitalisierung. Hier kann die Europäische Prozessorinitiative

(EPI)⁷ Know-how für die Industrie nutzbar machen, zum Beispiel für Anwendungen im automatisierten vernetzten Fahren (AVF).

Aktuell gibt es viele neue technologische Entwicklungen, die Möglichkeiten für Deutschland und Europa eröffnen. Handlungsfelder sind unter anderem:

- **Ökosysteme mit Baukastenansätzen:** Spezialprozessoren werden für eine große Breite von Anwendungen nachgefragt, allerdings jeweils mit kleiner Stückzahl. Eine Neuentwicklung für jeden Anwendungsfall ist nicht bezahlbar. Benötigt werden flexible und modulare Komponenten, die sich mit wenig Aufwand zu einem System integrieren lassen. Solche skalierbaren Baukästen ermöglichen Lösungen vom sparsamen Mikrocontroller bis zum KI-Prozessor. Aufgebaut werden solche Baukästen über Ökosysteme, die entsprechende Hardware und Software anbieten. Auch KMU und Start-ups können damit auf einer vertrauenswürdigen Basis eigene Entwicklungen rasch realisieren. Frei verfügbare Architekturen wie RISC-V sind eine gute Grundlage, um rasch neue Einsatzgebiete und Anwendungsfelder für die deutsche Industrie zu erschließen.
- **Prozessoren mit optischen bzw. elektro-optischen Komponenten:** Die Kombination von elektronischen und photonischen Komponenten bietet in passenden Anwendungen, beispielsweise bei der optischen Datenverarbeitung, ein großes Potenzial für Energieeffizienz und Geschwindigkeit.
- **Weitere Trends:** Im Zusammenhang mit neuen Spezialprozessoren stellen neue Architekturen und Speichertechnologien wie nichtflüchtige eingebettete Speicher, Memristoren für neuromorphe Chips oder das so genannte „ungeheure Rechnen“ (approximate computing) zukunftsweisende Ansätze dar, um Energie einzusparen. Auch das analoge Rechnen verspricht Vorteile für bestimmte Anwendungen. Hier besteht jedoch noch großer Transferbedarf aus der Grundlagenforschung (siehe Kapitel 3.8).

⁷ european-processor-initiative.eu

Edge Computing



Unter Edge Computing bzw. Edge-Cloud-Lösungen werden hier elektronische Systeme zur Sammlung und Vorverarbeitung von Informationen am Rand des Netzes, z. B. direkt am Endgerät statt in der Cloud, verstanden. Datenströme können hierdurch ressourcenschonender verarbeitet werden, da keine umfangreichen Rohdatensätze in die Cloud übertragen werden müssen. Erst weiterreichende Verarbeitungsschritte finden dann in der Cloud statt. Dieser Markt könnte so rapide wachsen, dass bereits 2025 mit Edge-KI-Chips größere Umsätze erzielt werden als mit KI-Prozessoren für bisherige Cloud-Rechenzentren.

3.3 Neuartige, intelligente und vernetzte Sensorik

Sensoren sind die Sinnesorgane von Maschinen, Anlagen und intelligenten Systemen.

Vertrauen ist gut, Sensorik ist besser: Vertrauenswürdige Elektroniksysteme sind darauf angewiesen, dass Sensoren vertrauenswürdige Messwerte liefern. Sensoren sind schon jetzt weit verbreitet, und im Zuge der voranschreitenden Digitalisierung und Vernetzung nimmt ihre Bedeutung weiter zu. MEMS-Sensoren, Mikro-Elektro-Mechanische Systeme, teilen dabei nicht nur das Grundmaterial Silizium und die dazugehörigen Bearbeitungstechniken mit der Elektronik, sondern wachsen immer enger mit der dazugehörigen Elektronik zusammen. Sensoren sind deswegen immer weniger „Extrageräte“, sondern immer mehr Teil der Elektronik. Die Erfassung, Verarbeitung und Weiterleitung von Messwerten ist dabei die Basis für die funktionale Sicherheit und den effizienten Betrieb von komplexen und intelligenten Systemen in nahezu jeder Branche. Beim automatisierten vernetzten Fahren, der industriellen Produktion oder in der Robotik bilden sie die Schnittstelle zur realen Welt und gewährleisten die Sicherheit bei der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine.

Auch für die Überwachung und Steuerung von Prozessen im Sinne der Nachhaltigkeit und für den Klimaschutz kommen Sensoren zum Einsatz. Sie ermögli-

chen eine ressourceneffiziente Prozesskontrolle für den Energie-, Wasser- und Rohstoffverbrauch und sorgen für die effiziente Steuerung von Flüssen wie Material, Energie, Mobilität, Logistik oder Infrastruktur. Sensorik kann Wasserqualität überwachen, den CO₂-Pegel in der Nähe von CO₂-Speichern messen und Schadstoffe und Defekte detektieren, die zu Umweltgefahren führen.

Bei allen Anwendungen gilt: Sensoren müssen höchsten Ansprüchen an die Zuverlässigkeit genügen und Störungen robust standhalten. Für die Auswertung, insbesondere mit KI-Methoden, ist eine hohe Erfassungsqualität mit niedrigem Rauschen erstrebenswert.

Sensorik ist ein für KMU attraktives Feld, weil die Anwendungsbreite so groß ist und spezialisierte Lösungen gefragt sind. Wie bei den Spezialprozessoren können Baukastensysteme und Entwicklungsplattformen als Innovationstreiber wirken.

Handlungsfelder ergeben sich unter anderem über neue Sensorprinzipien und Systemansätze:

- **Neue Sensorprinzipien:** Sensorsysteme, die auf neuen Messprinzipien wie Quanteneffekten basieren, auf neuen Materialansätzen oder Integrationstechnologien aufbauen, können neue Anwendungsfelder erschließen. Die Steigerung der Intelligenz und Dezentralität von Sensorsystemen durch KI-Methoden ist ein weiteres wichtiges Forschungsfeld, das neue Möglichkeiten eröffnet (siehe Kapitel 3.2).
- **Organische Elektronik:** Sensoren auf Basis organischer Elektronik versprechen große Chancen und stehen gleichermaßen noch vor enormen technologischen Herausforderungen.
- **Lab-on-a-chip:** Für die Point-of-Care-Diagnostik in der Medizin, in der Lebensmittelindustrie und in der Umweltüberwachung sind Lab-on-a-Chip-Lösungen von großer Bedeutung, da sie die Zeiten bis zum Vorliegen eines Ergebnisses gegenüber klassischer Laboranalyse erheblich verkürzen können.
- **Chemische Sensoren und Biosensoren:** Bei der Prozessanalyse in zahlreichen Industrien (Chemie, Halbleiter, Lebensmittel), der Medizin und der Umweltanalytik tragen chemische Sensoren zu besserer Prozesskontrolle und somit zur Prozesssicherheit



Energieautarke Sensoren

Durch die Umwandlung thermischer, mechanischer oder optischer Energie in elektrische Energie kann verfügbare Energie aus der unmittelbaren Umgebung „geerntet“ und für den Betrieb des Elektroniksystems und der integrierten Sensorik sowie Funkeinheit genutzt werden. Auf diese Weise können bisher unzugängliche Orte mit Sensorik ohne störende Kabel oder wartungsintensive Batterien ausgestattet werden.

bei. Chemische Sensoren und Biosensoren sind bislang jedoch nur in Spezialanwendungen zu finden. Forschung und Entwicklung sollen Low-Cost-High-Volume-Anwendungen und neue Einsatzgebiete zum Beispiel in Pharmaindustrie und Medizin ermöglichen (siehe Kapitel 4.4).

Weitere Trends ergeben sich aus den Anwendungsfeldern:

- **Intelligente Sensorsysteme:** Energieeffiziente, lokale Messdatenverarbeitung und -auswertung sowie Sensordatenfusion sind Schlüsselaspekte für intelligente Sensorsysteme für Industrie 4.0 und weitere Anwenderbranchen (siehe Kapitel 3.2 und 4.6).
- **Eigendiagnose und Selbstkalibrierung:** Sensoren müssen stets die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anwendung erfüllen. Durch Eigendiagnose und Selbstkalibrierung wird die Vertrauenswürdigkeit ohne zusätzlichen Aufwand erhöht.
- **Energieautarke Sensoren und Systemlösungen** ermöglichen neue Anwendungen und tragen zur Kosteneffizienz bei.

Rund 100 Sensoren sind heute in einem Automobil der Mittelklasse verbaut. Sie erfassen physikalische Größen wie Temperaturen, Drehzahlen, Winkel, Drücke u. a. und formen diese nichtelektrischen Größen in elektrische Signale um. Sie dienen somit als Sinnesorgane der elektronischen Steuergeräte.⁸



3.4 Hochfrequenzelektronik für Kommunikation und Sensorik

Hochfrequenzelektronik ist das Herz moderner Kommunikationstechnologien.

Hochfrequenzelektronik ist ein zentraler Baustein der Digitalisierung, unter anderem für den Aufbau der 5G/6G-Infrastruktur oder für das Abstandsradar von Fahrzeugen oder Servicerobotern. Als sicherheitskritische Komponente muss die Hochfrequenzelektronik in höchstem Maß vertrauenswürdig sein. Das gilt auch für Anwendungen der Hochfrequenzelektronik in der Sensorik, den Sinnen der vernetzten Welt. Der Innovationstandort Deutschland hat daher für seine technologische Souveränität ein großes Interesse daran, die Verfügbarkeit der Hochfrequenzelektronik durch eigene Weiterentwicklung der Technologie zu sichern.

Der Entwicklungstrend geht dabei zu immer höheren Frequenzen. In der Sensorik werden damit bessere Auflösungen erreicht. In der Kommunikationstechnik ermöglichen sie es, mehr Informationen gleichzeitig zu übermitteln – führen allerdings auch zu geringerer Reichweite, was wiederum mehr Sendestationen erforderlich macht. Um dadurch den Energieverbrauch

⁸ Quelle: Sensoren im Auto, springerprofessional.de/bordnetze/energiemanagement-im-elektrofahrzeug/das-moderne-automobil-fordert-die-sensorbranche/16152976

nicht steigen zu lassen, müssen Sendestationen deutlich effizienter werden. Dies lässt sich zum einen durch eine verbesserte Energieeffizienz der Hochfrequenztechnik erreichen, bei längeren Strecken aber auch durch ein Wechselspiel zwischen elektronischer und optischer Datenübertragung.

Generell fordert der Übergang zu immer höheren Frequenzen eine fortlaufende Forschung in der Höchstfrequenztechnik, aber auch in der dafür benötigten schnellen Elektronik. Forschungsbedarf besteht auch an den Schnittstellen zur Optoelektronik (Silizium-Photonik); hier ist es relevant, höchstintegrierte Schaltungen mit Strukturbreiten unterhalb von 10 nm fertigen zu können, was derzeit jedoch kein europäisches Unternehmen beherrscht.

Zu den Handlungsfeldern in der Hochfrequenzelektronik gehören:

- **Radarsysteme:** Durch hochintegrierte und hochfrequente Radarsysteme können Eigenschaften und Kosteneffizienz erheblich verbessert werden. Erhebliche Herausforderungen liegen in der Systemintegration künftiger Radarsysteme.
- **Antennen:** Höhere Integrationsdichten und Frequenzen erfordern neue und komplexe Antennendesigns und -konzepte, eine entsprechende Antennenansteuerung und Hardware-Implementierung neuer Modulationsverfahren.
- **EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit):** Der Trend zu höheren Frequenzen verschärft die Herausforderungen bei der EMV und erzeugt Forschungsbedarf.
- **Wechselspiel von Hochfrequenzelektronik und Optik für Kommunikation:** Die frühe und energieeffiziente Wandlung zwischen Elektronik und Optik (Photonik) ist ein wichtiges Forschungsfeld und Baustein der Nachhaltigkeit. Es werden auch Entwurfswerkzeuge benötigt, welche die Einbindung der Optoelektronik erleichtern.
- **Neue Substrate und Materialien** für die Hochfrequenzelektronik sind nötig, um die theoretischen Vorteile höherer Frequenzen in der Praxis ausreizen zu können.



EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) speziell für Hochfrequenzelektronik bezeichnet die Fähigkeit, ein technisches Gerät oder auch einen einzelnen Schaltkreis so zu entwickeln, dass andere Schaltkreise im selben Gerät und andere Geräte nicht durch ungewollte elektrische oder elektromagnetische Effekte beeinflusst werden. Die ungewollte wechselseitige Beeinflussung von Elektroniksystemen ist nicht nur eine Frage der Technik und des Rechts, sondern auch eine der Sicherheit.

3.5 Intelligente und energieeffiziente Leistungselektronik

Leistungselektronik ist und bleibt eine zentrale Querschnittstechnologie der Elektronik.

Damit elektrische Energie dort ankommt, wo sie gebraucht wird, muss sie verteilt, gewandelt und geregelt werden. Dies ist die Aufgabe der Leistungselektronik. Ihre Bedeutung wird weiter zunehmen, denn der Anteil der elektrischen Energie am Primärenergieverbrauch wird sich durch die Energiewende und die wachsende Digitalisierung massiv erhöhen. Denn immer mehr Anwendungen und Geräte werden elektrisch betrieben.

Deutschland nimmt in der Leistungselektronik eine herausragende Position ein. Die wachsenden Märkte für Leistungselektronik locken jedoch neue internationale Player an, und es ist zu erwarten, dass der Kostendruck durch höhere Stückzahlen weiter steigen wird. Um die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in der Leistungselektronik zu erhalten, müssen daher vor allem die Kosten reduziert werden. Gleichzeitig aber werden die Anforderungen an Gewicht, Baugröße, Zuverlässigkeit und Effizienz auch in Zukunft nicht nachlassen, sondern eher noch steigen.

Zusätzlich soll Leistungselektronik in Zukunft intelligenter werden und in der Lage sein, industrielle elektrische Antriebe auch bedarfsabhängig zu steuern, anstatt sie unnötig unter Vollast zu fahren. Dies trägt dazu bei, in immer mehr Anwendungen Energie einzusparen und damit einen großen Schritt in Richtung mehr Klimaschutz zu machen.

In der Weiterentwicklung der Leistungselektronik finden sich unter anderem die folgenden Handlungsfelder:

- **Kostensenkung:** Vielversprechende Forschungs- und Entwicklungsansätze sind neue Konzepte für die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und für die Systemintegration, die für eine Produktion größerer Stückzahlen ausgelegt sind. Auch Plattformen und Materialeffizienz werden in der Leistungselektronik immer bedeutender. Damit lassen sich Skalierungseffekte heben und Kosten senken, was wiederum einen breiteren Einsatz der Systeme ermöglicht.
- **Effizienz:** Potenziale ergeben sich durch den Einsatz von Wide-Bandgap-Halbleitern, die bei hohen Schaltfrequenzen betrieben werden können und dadurch einen höheren Wirkungsgrad erreichen. Neben den bereits gut erforschten Materialien Siliziumcarbid und Galliumnitrid werden neuen Halbleitermaterialien wie Aluminiumnitrid und Galliumoxid hohe Effizienzpotenziale in der Leistungselektronik zugeschrieben.
- **Nachhaltigkeit:** Je langlebiger und robuster die Leistungselektronik gestaltet wird, desto nachhaltiger ist sie. Auch über das Vermeiden kritischer Rohstoffe und eine Kreislaufwirtschaft lassen sich erhebliche Nachhaltigkeitseffekte erzielen.
- **Intelligente Leistungselektronik-Systeme:** Forschungsthemen für „smarte“ Leistungselektronik sind neue Topologien für Systeme mit erhöhtem Wirkungsgrad auch im Leerlauf oder Teillastbereich, integrierte Sensorik zur Selbstüberwachung, aktive Steuerung sowie integrierte Kommunikationstechnik zur Vernetzung mit anderen Systemebenen und Systemen.

Weil immer mehr Anwendungen elektrisch betrieben werden, könnte sich der Strombedarf bis 2050 nahezu verdoppeln.⁹

Wide-Bandgap-Halbleiter



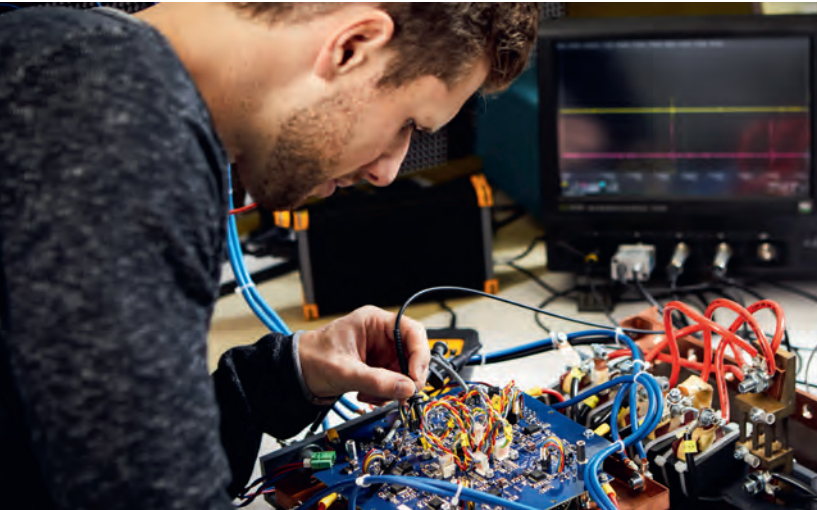
Als Wide-Bandgap (WBG)-Halbleiter bezeichnet man Halbleiter, die wegen ihrer größeren Bandlücke leistungsfähiger sind als herkömmliche Silizium-Halbleiter. Sie werden bei besonderen Anforderungen wie z. B. für rauscharme Verstärker und Hochfrequenzverstärker eingesetzt. Die Vorteile von WBG-Halbleitern sind geringere Verluste bei Schaltreglern; die Möglichkeit, höhere Spannungen, Temperaturen und Frequenzen auszuhalten; und die erhöhte Zuverlässigkeit. Die größere Bandlücke erlaubt auch die Anwendung für optische Strahler im kurzwelligeren (sichtbaren) Licht, beispielsweise für Leuchtdioden (LEDs) mit den Farben Blau oder Ultraviolett.

- **Ultra-Low-Power-Leistungselektronik:** In immer mehr Kleinsteuereinrichtungen des Internets der Dinge findet sich Ultra-Low-Power-Leistungselektronik. Allein über die Stückzahlen spielt sie damit eine zunehmende Rolle bei der Energieeffizienz. Forschungsthemen sind Zero-Power-Standby sowie die Weiterentwicklung der Effizienz bis hin zur Energieautarkie.
- **Elektromagnetische Verträglichkeit und Systemintegrationstechnologien:** In der Leistungselektronik muss die elektromagnetische Verträglichkeit im Zusammenspiel mit dem Systemaufbau auf allen Ebenen berücksichtigt werden. Mit zunehmender Systemkomplexität, Integrationsdichte und Schaltfrequenz nehmen auch hier die Herausforderungen weiter zu.

3.6 Querschnittstechnologien und -themen

Bestimmte Aspekte haben als Querschnittsthemen grundlegende Bedeutung für mehrere Technologiefelder. Sie werden in der Forschungsförderung in der Regel gemeinsam mit den jeweiligen Anwendungsfällen betrachtet, verdienen jedoch eine eigenständige Darstellung.

⁹ www.acatech.de/publikation/sektorkopplung-optionen-fuer-die-naechste-phase-der-energiewende



3.6.1 Systemintegrationstechnologien

Innovative Integration macht Systeme leistungsfähiger, zuverlässiger und kostengünstiger.

Ein wichtiger Trend in der Elektronik ist die Integration von immer mehr Funktionen und Komponenten in einem System: Statt herkömmlich auf einer Leiterplatte kombiniert zu werden, werden diese bereits in einem kompakten Modul, in einem Chipgehäuse („Package“) oder direkt auf einem einzigen Chip integriert. Dafür gibt es mehrere Gründe: Zum einen kann die Anwendung eine platzsparende Systemintegration erfordern, wenn es etwa Beschränkungen bei Baugröße oder Gewicht gibt. Zum anderen kann Systemintegration die Zuverlässigkeit verbessern, weil jeder nachfolgende Montageschritt eine potenzielle Fehlerquelle ist. Dieser Technologietrend wird mit dem Schlagwort „More than Moore“ bezeichnet, um ihn vom reinen Wachstum der Integrationsdichte abzugrenzen, für das das empirische „Moore’sche Gesetz“ abgeleitet wurde (siehe Kapitel 3.8). Die Integration optischer und mechanischer Funktionen in elektronische Systeme ist eine besondere Stärke der deutschen und europäischen Halbleiterindustrie: Mikrosystemtechnik, Mikro-Elektro-Mechanische Systeme (MEMS) und Mikro-Opto-Elektro-Mechanische Systeme (MOEMS) sind die gängigen Begriffe dafür. Mehrdimensionale Beschleunigungssensoren, Lidar für autonomes Fahren und Mikrospektrometer – alle „on chip“ – sind aktuelle Beispiele.

Bei ausreichender Stückzahl lassen sich mit Hilfe einer geeigneten Systemintegration auch die Fertigungskosten senken. Das kann so weit gehen, dass das inte-

grierte Elektroniksystem von der einzelnen Funktion oder Komponente über deren Verbindung bis hin zur Verpackung direkt auf dem Wafer hergestellt wird. Ein typisches Beispiel für eine extrem hohe Integrationsdichte und -komplexität (allerdings außerhalb des europäischen Herstellerkreises) sind Smartphones, die aufgrund ihrer großen Stückzahl den damit verbundenen technologischen Entwicklungsaufwand wirtschaftlich rechtfertigen. Sie bekommen immer mehr Funktionen bei gleichbleibender Baugröße und enthalten dementsprechend möglichst hoch integrierte Elektroniksysteme. Dafür kommt eine große Bandbreite an Technologien zum Einsatz.

Die zunehmende Komplexität der Systemintegration bringt zahlreiche Herausforderungen mit sich und stellt enorme konzeptionelle und technologische Anforderungen. So nimmt die Materialvielfalt im System zu, was prozesstechnisch berücksichtigt werden muss. Unterschiedliche Funktionen können zu divergierenden technologischen Anforderungen führen. Hier sind Rahmenbedingungen wie der Bedarf an optischen Fenstern oder an einem hermetischen Aufbau, thermische und elektromagnetische Abhängigkeiten oder die Einsatzbedingungen für das fertige System zu beachten. In der Aufbau- und Verbindungstechnik, dem so genannten „Back End of Line“, erfordert die Systemintegration zunehmend automatisierte Verfahren und hochentwickelte Anlagentechnik. Auch die Mess- und Prüftechnik ist für ein System deutlich komplexer als für Komponenten mit einzelnen Funktionen. Erschwerend kommt hinzu, dass der Trend zur Auslagerung von Fertigungsschritten, insbesondere in der Montage und Gehäusung, das Endprodukt angreifbar macht. Auf der anderen Seite können neue Ansätze wie beispielsweise eine verteilte Fertigung (engl. „split manufacturing“) gezielt dazu beitragen, Elektroniksysteme vertrauenswürdiger zu machen.

Für die Forschung und Entwicklung ergeben sich zahlreiche Handlungsfelder:

- **Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT) für neue komplexe Systeme:** Hierzu gehört der Aufbau von Multichippackages und SiPs (System-in-Package), 3D Packaging, Stapeltechniken, Interposertechnologien (z. B. Vias), Embedding, aber auch die Entwicklung von Alternativen zu Drahtbonds und Lötkontakten. Dünne, substratlose Packages haben aufgrund kurzer



Hard- und Software Co-Design

Hard- und Software Co-Design kann die Entwicklung mikroprozessorgesteuerter Geräte enorm beschleunigen, denn Elektronikkomponenten, Board und Applikations-Software werden bei diesem Vorgehen gleichzeitig entwickelt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Systementwicklung lange sehr flexibel bleibt, da bei sich verändernden Anforderungen die Aufteilung von Funktionen auf Hard- und Software noch angepasst werden kann (siehe Kapitel 3.1).

und planarer elektrischer Verbindungen den Vorteil eines geringen thermischen Widerstands und guter Hochfrequenz-Eigenschaften. (Fan-Out) Wafer-Level-Packaging besitzt hohes Miniaturisierungspotenzial sowohl im Packagevolumen als auch in der Packagedicke. Vielversprechend ist auch das Fan-Out-Panel-Level-Packaging. Forschungsbedarf besteht ferner für thermisches und Stress-Management, für Robustheit und Recyclingfähigkeit.

- **Fertigungsverfahren:** Im Fokus steht die Automatisierung von Montage und Packaging (Back End of Line), die Integration von additiven Fertigungsverfahren wie beispielsweise 3D-Druck von Bauelementen und Leiterbahnen), Stereolithografie für 3D Packaging und Embedding, die Entwicklung von angepasster Fertigungsausrüstung und von passenden Mess- und Prüftechniken sowie der Einsatz von ressourcensparenden Prozessschritten.
- **AVT und Fertigungsverfahren für vertrauenswürdige Elektronik:** Neue Methoden der Systemintegration können einen entscheidenden Beitrag zur Vertrauenswürdigkeit von Elektronik leisten. Ansätze für modulare Aufbauten und verteilte Funktionalität zum Beispiel durch Wafer-to-Wafer-Bonding, Chiplet-Konzepte und „Split Manufacturing“ spielen dabei eine besonders wichtige Rolle.
- **Design und Simulation:** Beim Co-Design von Hard- und Software werden Aufbau und Funktionsweise des Systems schon beim Entwurf gemeinsam berücksichtigt. Wegen der zunehmenden Komplexität kommen schon beim Entwurf auch der Fertigung nachgelagerte Anforderungen zum Tragen: Design

for Testability, Design for Reliability, Design for Trust. Forschungsthema sind auch thermische, mechanische oder elektromagnetische Wechselwirkungen in komplexen Systemen.

3.6.2 Test, Verifikation und Validierung

Testen schafft Vertrauen.

Die Anforderungen an die Haltbarkeit vieler elektronischer Komponenten und Systeme werden immer größer. Besonders bei kritischen Anwendungen steigt der Bedarf an zuverlässiger und robuster Elektronik. Zum Beispiel wird das autonome Fahren beim Einsatz in Fahrdienstleistungen dazu führen, dass die Elektronik im Auto nicht nur wenige Stunden am Tag, sondern durchgehend, mit wenigen Pausen, genutzt wird.

Zugleich werden Elektroniksysteme immer komplexer in ihrem Aufbau und kombinieren verschiedenste Technologien auf engstem Raum. Dies schafft neue Fehlerquellen, die in Defekten münden können. Systeme können aber nicht nur durch unerwartete Fehler komplexer Technologien ausfallen. Eine Gefahr geht auch von Fälschungen und Plagiaten bei zugelieferten Bauteilen aus, die der Wirtschaft jährlich Milliarden-schäden beschern und für die Anwender erhebliche Sicherheitsrisiken bedeuten.

Für vertrauenswürdige Systeme steigt damit die Bedeutung von Tests und die Anforderung an die Leistungsfähigkeit von Testmethoden. Dies gilt für die gesamte Kette vom Entwurf über die Herstellung bis hin zur Verifikation und Validierung. Der Aufwand für Forschung und Entwicklung ist jedoch im Bereich Test, Verifikation und Validierung sehr hoch.

Insgesamt ergeben sich verschiedene Handlungsfelder, wie z. B.:

- **Design for Test:** Elektroniksysteme müssen so entworfen werden, dass Tests vom Simulations- über das Prototypenstadium bis zum Endprodukt einfach und aussagekräftig möglich sind. Das spart Zeit und Kosten, denn aufgrund der Komplexität der Systeme, der hohen Anforderungen und der hohen Integrationsdichte nehmen Test und Verifikation mittlerweile einen extrem hohen Anteil an den Entwicklungsaufwänden ein. Besonders in Systemen, die auch analoge Anteile wie z. B. Kommunikationsschnitt-

stellen enthalten, ist der Test komplex, kann aber nie vollständig sein. Die Abschätzung der Testabdeckung und das Design von Tests im Zusammenspiel mit Simulationsmodellen muss kontinuierlich an neue Technologieentwicklungen angepasst werden.

- **Testmethoden und -geräte:** Diese müssen mit den Technologieentwicklungen Schritt halten. Die Erforschung und Entwicklung neuer Technologien für die Mikroelektronik muss immer mit Forschung und Entwicklung in Test und Validierung einhergehen. Im Fokus stehen sowohl Testmethoden, um unbeabsichtigte Fehler zu finden, als auch Testmethoden, um absichtliche Manipulationen zu entdecken.
- **Globale Vernetzung verschiedenster Komponentenprüfstände:** Ziel ist die Validierung von Systemen und die Bereitstellung standardisierter Komponentendaten für Simulationsrechnungen. Hierdurch können Unternehmen und Forschung über eine sichere Datenverbindung das Zusammenspiel mit anderen Komponenten untersuchen und gleichzeitig vertrauliche Informationen der eigenen Komponenten bewahren. Dies begünstigt auch neue Methoden wie die modulare Absicherung. Dabei können einzelne Komponenten abgesichert und für den Betrieb sämtlicher Systemkombinationen freigegeben werden. Die Prüfstandnutzungsdauer kann damit signifikant verringert werden.

- **Messmethoden und -geräte:** Die Funktionalität und Leistungsfähigkeit von Bauteilen kann durch geeignete Messungen verifiziert werden und Messtechnik hilft dabei, Plagiate zu entdecken. Herfür müssen geeignete Messmethoden und -geräte entwickelt werden. Aufgrund des wachsenden und hohen Integrationsgrades sollten Messmöglichkeiten idealerweise bereits im Bauteil integriert werden, um die erforderlichen Zustandsdaten aufnehmen und bewerten zu können.
- **Vereinheitlichung von Bauteiluntersuchungen durch Standardisierung:** Standardisierung kann die Prozesse für vertrauenswürdige und zuverlässige Elektronikkomponenten und -systeme weiter voranbringen und für homogene sowie schematische Verfahrensweisen bei der Validierung und Absicherung der Einzelkomponenten und Gesamtsysteme sorgen.

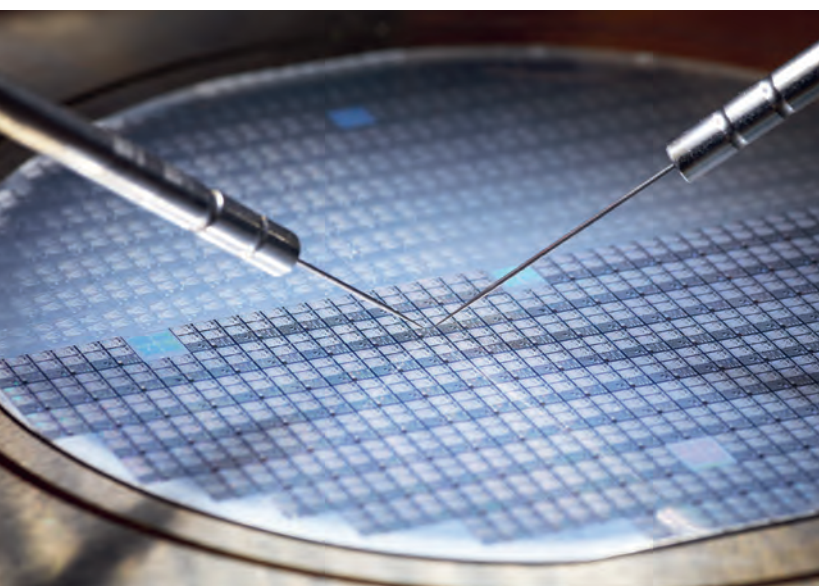
3.6.3 Adaption neuer Materialien

Entwicklungsschritte in der Mikroelektronik basieren oft auf Innovationen im Bereich der Materialien.

Der anhaltende Trend zur Miniaturisierung von Strukturen, Komponenten und Systemen stellt hohe Anforderungen an die Eigenschaften der genutzten Materialien. Dabei müssen die Materialien nicht nur die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Elektronik, sondern auch übergeordnete Ansprüche wie Robustheit und Zuverlässigkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit unterstützen.

Dies begründet die Notwendigkeit, neue Materialien für die Mikroelektronik zu erforschen und einzusetzen. Doch auch neu entdeckte Eigenschaften bekannter Materialien bieten Potenziale für Neu- und Weiterentwicklungen in der Mikroelektronik, Leistungselektronik und Sensorik.

Der Einsatz neuer Materialien ist mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, denn durch die Kombination verschiedener Materialien in heterogenen Systemen steigt auch die Komplexität der Systemintegrationstechnologien. Zudem benötigen sie neue Herstellungsprozesse und -anlagen. Damit im Sinne der Technologiesouveränität für den Mikroelektronik-Standort Deutschland keine neuen Abhängigkeiten entstehen, müssen die neuen Materialien nicht nur verfügbar sein.



Es sind auch gezielt Kompetenzen für die technologische Beherrschung der Materialien aufzubauen. Dafür ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Material- und der Elektronikforschung erforderlich. Dabei werden Vorhaben, deren Fokus auf der Entwicklung neuer und innovativer Materialien liegt, vorrangig im Programm „Vom Material zur Innovation“ vom BMBF gefördert, insbesondere auch zum nachhaltigen Umgang mit Materialien in der gesamten Prozesskette.

Aktuell sind folgende Forschungs- und Entwicklungsthemen erkennbar:

- **Neue Materialien und Materialsysteme für die Mikroelektronik:** Neben neuen Materialien bietet deren Kombination mit etablierten CMOS-Technologien ein großes Potenzial, wie es beispielweise bei der Integration von Galliumnitrid auf Silizium erfolgreich praktiziert wird. Für die Hochfrequenzelektronik mit stetig steigenden Frequenzen und Leistungsansprüchen sind stets neue und optimierte Materialien erforderlich. Im Hinblick auf die Realisierung von neuromorphen Computern stellen zum Beispiel memristive Materialien weitere Ansatzpunkte dar.
- **Neue Materialien für Leistungselektronik:** Insbesondere Wide-Band-Gap-Materialien wie beispielsweise Aluminiumnitrid und Galliumoxid versprechen für die Leistungselektronik ein enormes Innovationspotenzial. Neue System- und Integrationsansätze erfordern zudem neue Substrat- und Sintermaterialien.
- **Neue Materialien für die Sensorik:** Forschungsansätze liegen bei ein- und zweidimensionalen Materialien und bei Materialien, durch deren Nutzung verbesser-



te und neue Sensoreigenschaften realisiert werden können (z. B. organische Materialien oder Materialien mit besonderen physikalischen Eigenschaften).

- **Nachhaltigkeit:** Neben der Materialauswahl nach Kriterien wie Effizienz, Produktion, Langlebigkeit, Recyclingfähigkeit können auch selbstheilende Materialsysteme, die Substitution kritischer Materialien und die Vermeidung seltener Erden sowie der Einsatz von kompostierbaren bzw. biodegradierbaren Materialien und von Materialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe einen Beitrag für mehr Nachhaltigkeit leisten.

3.7 Ausgewählte Anlagen für die Mikroelektronikproduktion

Elektronikfertigung auf Anlagen Made in Germany.

Die traditionelle Stärke deutscher Unternehmen auf den Gebieten Maschinenbau, Messtechnik und Optik eröffnet viele Chancen, den Ausbau der Halbleiterproduktion in Europa zu stärken und deutliche Umsätze auf dem internationalen Markt zu generieren. Hierfür müssen jedoch Forschung und Industrie in Deutschland und Europa noch stärker zusammenarbeiten.

Bei Anlagen für hohe Durchsätze dominieren zunehmend außereuropäische Anbieter. Die Herstellung

i

Memristive Materialien

Neuromorphe elektronische Systeme werden mit memristiven Werkstoffen aufgebaut. Das Wort memristiv beinhaltet den Begriffen „Memory“ für Speicher und „Resistor“ für elektrischen Widerstand. Die intelligenten Materialien ermöglichen es, Lern- und Gedächtnisprozesse biologischer Systeme technisch nachzubilden.

von vertrauenswürdiger Elektronik, besonders für sicherheitsrelevante Anwendungen, erfordert jedoch Spezialmaschinen für kleinere Stückzahlen. In diesem Spezialgebiet ist Deutschland stark, ebenso im Anlagenbau für Sonderanwendungen wie das Beschichten (z. B. MOCVD, Sputtern), das Plasmaätzen oder die Automatisierung. Hier zahlt sich die enge Zusammenarbeit von Industrie und Forschung in Deutschland aus.

Bei anderen Anlagen arbeiten deutsche Unternehmen mit europäischen Partnern zusammen und sind dabei weltweit Spitzenklasse. Seit Jahrzehnten besteht eine enge Kooperation zwischen Zeiss (Deutschland) und ASML (Niederlande); gemeinsam sind die beiden Unternehmen Weltmarktführer auf dem Gebiet der Belichtungsmaschinen für die Halbleiterstrukturierung (Lithographiestepper). Mit langjähriger Förderung des BMBF und der EU haben sie maßgeblich die Entwicklung zu immer kleineren Halbleiterstrukturgrößen vorangetrieben und sind jetzt der weltweit einzige Anbieter von neuartigen EUV¹⁰-Steppern für die kleinsten machbaren Strukturgrößen. Im IPCEI on Microelectronics konnte erstmals die Forschung und Entwicklung sowie Ausstattung unterstützt werden, die für den Aufbau der Serienproduktion dieser technologisch äußerst anspruchsvollen Innovation notwendig war.

Im Zuge der Globalisierung hat sich auch in der Elektronikindustrie der Schwerpunkt arbeitsintensiver Produktionsschritte in Regionen mit traditionell geringen Lohnkosten verlagert. Über eine zunehmende Automatisierung von Arbeitsprozessen kann die Produktion in Europa wieder gestärkt werden, um so die Technologiesouveränität des Standorts zu sichern. In der Tat gehören deutsche Halbleiterhersteller zu den Vorreitern von Industrie 4.0. Insbesondere im Back-end-Bereich der Halbleiterproduktion wie zum Beispiel in der Aufbau- und Verbindungstechnologie (AVT) gibt es noch weiteres Potenzial, die Automatisierung voranzubringen.

Für die Mikroelektronikproduktion ergeben sich damit verschiedene Forschungsaufgaben, zum Beispiel:

- **Automatisierungslösungen für die Halbleiter- und Elektronikfertigung:** Neue elektronische Systeme erfordern neue Automatisierungslösungen. Dadurch können nicht nur Kostenpotenziale bei der Fertigung erschlossen, sondern auch die Prozesssicherheit erhöht und die Systemeigenschaften verbessert werden. Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen für Spezialanlagen sollen darüber hinaus Deutschlands und Europas Position im globalen Wettstreit um die technologische Souveränität stärken.



10 EUV = Extremes Ultra-Violett; besonders kurzwelliges, für das menschliche Auge nicht mehr sichtbares Licht

Additive Fertigungsverfahren

i

Der 3D-Druck, auch bekannt als Additive Fertigung oder Rapid-Prototyping-Technologie, ist ein Fertigungsverfahren, bei dem unterschiedliche Materialien Schicht für Schicht aufgetragen und so dreidimensionale Gegenstände (Werkstücke) erzeugt werden. Additive Fertigung wird in der Industrie, im Modellbau und der Forschung zur Fertigung von Modellen, Mustern, Prototypen, Werkzeugen oder Ersatzteilen zu Vermeidung von Lagern eingesetzt.

- **Komplexe Maschinen für additive Fertigungsverfahren:** Diese dienen der Integration von elektronischen und Sensor-Funktionen in Trägermaterialien sowie der Anpassung an spezielle Einbausituationen in der AVT. Die hohe Kompetenz Deutschlands im Maschinenbau bietet das Potenzial, international eine marktführende Rolle für Sondermaschinen für additive Fertigungsverfahren einzunehmen.
- **Mess- und Prüftechnik:** Die Elektronikentwicklung und die Qualitätskontrolle in der Fertigung verlangen

technisch anspruchsvolle Messtechnik. Deutsche Unternehmen sind hier weltweit führend. Neue Materialien und Technologien wie neuromorphe Chips erfordern jedoch neue Messtechnikverfahren. Diese müssen perspektivisch auch direkt und kontinuierlich in die Fertigungslinie integrierbar sein, um Produktionsprozesse zu überwachen. Hier ist noch viel Entwicklungsarbeit notwendig. Die Messtechnik wird in Deutschland vor allem von KMU und Start-ups vorangetrieben, die sich damit Nischenmärkte erobern. Industrie und Forschung arbeiten dabei eng zusammen. Dies ist eine gute Basis für eine Spitzenstellung im internationalen Wettbewerb.

3.8 Advanced Silicon and beyond

Auf der Suche nach neuartigen Technologien.

Lange Zeit waren Leistungs- oder Energieeffizienzsteigerungen von Halbleiterbauelementen entsprechend dem Moore'schen Gesetz mit immer weiter fortschreitender Miniaturisierung verbunden. Diese Strukturverkleinerung stößt jetzt aber allmählich an die physikalischen Grenzen und es wird immer aufwendiger,



dem bisherigen Trend der Entwicklung („More Moore“) zu folgen. Gleichzeitig wird auch eine wirtschaftliche Produktion immer schwieriger.

Zunehmend wird deswegen an „Beyond Silicon“-Konzepten geforscht: neuartigen Technologien und Materialien mit disruptivem Potenzial. Zum einen ist hier ein deutlicher Fortschritt bei der Energieeffizienz von elektronischen Systemen zu erwarten. Zum anderen eröffnet sich damit die Chance, bei neuen grundlegenden Technologien von Anfang an dabei zu sein und die Kompetenzführerschaft und Souveränität zu erhalten.

Hier eröffnen sich verschiedene Handlungsfelder, z. B.:

- **Neuartige Strukturen und Bauelemente:** Die stetige Leistungssteigerung integrierter Schaltungen verbunden mit einer voranschreitenden Strukturverkleinerung erfordert regelmäßig neue Konzepte, sowohl auf Transistorebene als auch auf der Ebene der Speicher und Chiparchitekturen. Durch neue Forschungsansätze können für bestimmte Anwendungen optimierte mikroelektronische Systeme entstehen oder zusätzliche Funktionen in Chips integriert werden, wie z. B. durch Einbindung optischer und mikromechanischer Komponenten. Wichtig ist außerdem die Forschung an neuartigen Bauelementen wie z. B. Memristoren (siehe Kapitel 3.2).
- **Neue Ansätze für Rechenleistung:** Forschungsgebiete sind disruptive Konzepte des „Beyond-von-Neumann“-Trends wie z. B. „Rechnen-im-Speicher“, „neuromorphe Chips“ und „künstliche Synapsen“. Neuromorphe Chips haben das Potenzial für hohe Rechenleistungen bei geringer Leistungsaufnahme.



Neuromorphe Chips

Ein Neuromorpher Chip ist ein spezieller Mikrochip, der nach dem Vorbild von natürlichen Nervenzellen im Gehirn (Neuronen) und deren Vernetzung untereinander gebaut wird. Neuromorphe Chips haben das Potenzial, gegenüber herkömmlichen Universalprozessoren für KI-Anwendungen deutlich schneller und energieeffizienter zu sein – so wie das menschliche Gehirn wesentlich energieeffizienter arbeitet als bisherige Computer. Der noch relativ junge Forschungsbereich hat bereits Prototypen wie künstliche Retinaimplantate oder Spezialprozessoren für naturnahe Bewegungsabläufe bei Robotern hervorgebracht.



4 Zukunftsweisende Anwendungen durch Mikroelektronik stärken

Die Mikroelektronik ist und bleibt der Innovationstreiber für eine breite Spanne von Anwendungen, gerade in der Digitalisierung. Diese treiben die Anforderung an die Elektronik, vertrauenswürdig und nachhaltig zu sein.

4.1 Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz, die dem Menschen dient und vertrauenswürdige Mikroelektronik nutzt, entspricht unseren europäischen Maßstäben und Werten.

Vom Automobil über die Medizin bis hin zur Industrie 4.0: Immer mehr Branchen nutzen Methoden, die auf Künstlicher Intelligenz (KI) basieren. Denn lernende Systeme auf Basis von Künstlicher Intelligenz und Big Data ermöglichen vielfältige neue Innovationen und Geschäftsmodelle auf Grundlage exponentiell wachsender Datenmengen und Rechenleistung. Unter anderem kann Künstliche Intelligenz dazu beitragen, Prozesse und Systeme im Sinne der Nachhaltigkeit effizienter zu steuern und so beispielsweise in der Industrie 4.0 das Energiesparen unterstützen. Gleichzeitig sorgen energieeffizientere Chips für nachhaltigere KI und neue Einsatzmöglichkeiten – etwa für Medizingeräte, die am Körper getragen werden können, oder für personalisierte KI, die im Endgerät nachtrainiert wird.

Neben den enormen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Chancen bringt KI jedoch auch Risiken mit sich.

Umso wichtiger ist es, die zugrundeliegenden Technologien in Europa gut zu beherrschen, um souverän agieren, Chancen nutzen und potenzielle Risiken kontrollieren zu können.

Dies gilt ganz besonders für die Elektronik, die Basistechnologie und das „Elektronenhirn“ der KI. Wer in seinen Produkten Künstliche Intelligenz integrieren will, sollte daher auf Ebene der Gesamtwirtschaft auch über Kompetenzen in der Elektronik verfügen, um nicht von Herstellern außerhalb Europas abhängig zu sein. Damit der Standort Europa seine Technologiesouveränität sichern kann, braucht er nicht nur ein eigenes KI-Ökosystem, sondern auch eine eigene Elektronikkompetenz: möglichst mit eigener Produktion, aber in jedem Fall mit der Know-how-Basis, um die nötigen Chip-Funktionen entwerfen und verifizieren zu können. Auf dieser Basis kann vertrauenswürdige KI entstehen, die den Anforderungen und Werten der europäischen Gesellschaft gerecht wird.

Deutschland bringt beste Voraussetzungen mit, sich als einer der wesentlichen Elektroniklieferanten für die europäische KI zu etablieren. Das Technologiefeld der KI-Prozessoren entwickelt sich sehr dynamisch und eröffnet gute Chancen für anwendungsspezifische KI-Methoden mit entsprechender Hardware, z. B. über Open-Source-Ansätze oder Baukastensysteme.

Das Trainieren einer Künstlichen Intelligenz mit großen Datenmengen braucht viel Rechenleistung und

somit Energie, und der Bedarf dafür steigt exponentiell. Das enorme Potenzial von KI kann für viele Anwendungen daher erst ausgeschöpft werden, wenn sich die Energieeffizienz deutlich verbessert. Energieeffiziente Prozessoren aus deutscher/europäischer Produktion können hier einen wichtigen Beitrag leisten. Spezialprozessoren ermöglichen unter anderem Edge-KI und „embedded“ („eingebettete“) KI und damit einen bedeutenden Beitrag für Ressourcenschonung und Datenschutz: Bislang werden KI-Algorithmen meistens in großen Rechenzentren trainiert. Wird das Anwenden dieser Algorithmen aus der Cloud zu den Endgeräten verschoben, kann deutlich Energie eingespart werden. Wenn Daten direkt im Endgerät verarbeitet werden und gar nicht erst in die Cloud gelangen, wird es zudem einfacher, europäische Wertevorstellungen zur Privatsphäre technisch zu flankieren.

Die Entwicklung von Spezialprozessoren für KI-Anwendungen ist jedoch sehr komplex, weil Sensorik (Daten), Algorithmen und Elektronik präzise miteinander verzahnt werden müssen. Deshalb muss die hierfür erforderliche Design- und Fertigungskompetenz in Deutschland und Europa ausgebaut werden. Es empfiehlt sich, dabei offen für neue Hardware-Technologien zu sein, denn abseits von klassischen Halbleiterprozessoren bieten beispielsweise auch Prozessoren mit optischen bzw. elektro-optischen Komponenten ein hohes Potenzial an Energieeffizienz und Geschwindigkeit.

4.2 Höchstleistungsrechnen

Höchstleistungsrechnen ermöglicht wissenschaftliche Exzellenz.

Für die Lösung von komplexen Fragestellungen werden in Forschung und Entwicklung häufig rechnergestützte Simulationen eingesetzt. Dabei berechnen Supercomputer mit enormer Leistungsfähigkeit komplexe Modelle. Dieses „Höchstleistungsrechnen“, bekannt auch unter der englischen Bezeichnung High Performance Computing (HPC), hilft bei der Beantwortung der drängenden Fragen des 21. Jahrhunderts – von Klimawandel, Energiewende und Gesundheitswesen bis hin zu Mobilität, Sicherheit und Kommunikation.

Das Höchstleistungsrechnen trägt so dazu bei, Deutschlands Spitzenstellung in den Schlüsseltechnologien und die Wettbewerbsfähigkeit des Wissenschafts- und Industriestandorts auszubauen. Neue Mikroelektronik kann dabei eine deutliche Effizienzsteigerung von Hochleistungsrechnern bewirken, zum Beispiel mit Komponenten für den Ausbau der Rechenkapazitäten und für sichere Server- und Cloudarchitekturen.

Ein Exascale-Supercomputer ist im Vergleich zu einem Laptop noch schneller als eine Weltraumrakete im Vergleich zu einer Schnecke.¹¹

Das BMBF stärkt das Höchstleistungsrechnen als Basis für die wissenschaftliche Exzellenz und zukunftsweisende Industrieanwendungen über die Förderung von Rechenkapazitäten, auf nationaler Ebene im Gauss Centre for Supercomputing (GCS) und auf europäischer Ebene über die Beteiligung an der EU-Partnerschaft EuroHPC. Die hierfür benötigte Hardware wird unter anderem in der European Processor Initiative (EPI) entwickelt. Diese Initiative, an der Forschende aus Deutschland beteiligt sind, hat das Ziel, leistungsstarke, effiziente Prozessoren für Supercomputer, Rechenzentren und autonome Fahrzeuge zu entwickeln. Dafür werden derzeit im Rahmen von EPI eigene Prozessoren entwickelt. Diese nutzen die offene Befehlssatzarchitektur RISC-V und Lizenzen des CPU-Herstellers ARM (siehe Kapitel 3.2). EPI ist Teil der europäischen Strategie zum Aufbau einer Infrastruktur für das Höchstleistungsrechnen in Europa.

4.3 Kommunikationstechnologie

Kommunikationsnetze sind die Lebensadern der digitalen Welt.

Kommunikations- und Datennetze bestehen aus vielen verschiedenen mikroelektronischen Komponenten – von Hochfrequenztechnik und Optoelektronik über Leistungselektronik bis hin zu speziellen Prozessoren. Weil diese immer leistungsfähiger werden, ergeben sich ständig neue Anwendungen und Geschäftsmodelle für die Kommunikationstechnik.

11 exanode.eu/exascale-computing

Wer diese Chancen in vollem Umfang nutzen und souverän in der digitalen Welt agieren will, muss jedoch über vertrauenswürdige Datennetze mit entsprechender Hardware für Datenübertragung und Verschlüsselung verfügen. Für die Technologiesouveränität des Standorts Europa spielt die Mikroelektronik darum eine wichtige Rolle, ebenso bei der Nachhaltigkeit der Kommunikationstechnologie und beim Klimaschutz.

Die Digitalisierung kann in Form von „smarten Netzen“ helfen, signifikant Energie zu sparen. Eine klimafreundliche Digitalisierung kann aber nur mit energie-sparsamer Kommunikationselektronik gelingen, denn auf seinem Weg durch die Datennetze verbraucht jedes einzelne Bit Energie. Angesichts der exponentiell wachsenden Datenmengen im Internet muss dieser Energieverbrauch auf allen Streckenabschnitten massiv gesenkt werden. Fortschritte in der Mikroelektronik sind sowohl bei der Vertrauenswürdigkeit als auch bei der Nachhaltigkeit von Kommunikationsnetzen wichtig. Die bedeutsamen Systemaspekte von Kommunikationstechnologien werden in einem separaten Forschungsprogramm sowie in weiteren Aktivitäten der Ressorts betrachtet.

Als Basistechnologie für Kommunikationsnetze muss die Mikroelektronik deswegen hohe Anforderungen erfüllen. Insbesondere für industrielle Anwendungen oder im Bereich der Mobilität müssen dabei Erreichbarkeit, Verfügbarkeit, Robustheit und Resilienz der Systeme, oft auch Echtzeitfähigkeit, zuverlässig sichergestellt sein.

Einige innovative Anwendungskonzepte werden erst mit Mikroelektronik möglich. Edge-Computing beispielsweise zielt darauf ab, dass möglichst wenige Rohdaten übertragen werden müssen. Für das dafür erforderliche intelligente Netzwerkdesign und die Datenvorverarbeitung am Punkt der Messung, im Edge-Gerät oder in Edge-Cloud/Fog-Computing-Ansätzen im Netz liefert die Elektronik die Komponenten.

Auch die drahtlose Übertragung braucht Innovationen aus der Mikroelektronik. Im Internet of Things, in Industrie und Verkehr werden mit Einführung von 5G und künftig 6G noch mehr Geräte miteinander vernetzt. Damit dies reibungslos funktionieren kann, wird am Elektronikdesign für neue 5G-Systeme geforscht, die Datacenter, Edge-Cloud-Systeme, schmalbandige Funktechnologie und weitreichende Datenübertragung

miteinander verbinden. Lokalisierungsfunktionen werden künftig separate Sensorik ergänzen oder auch ersetzen. In allen Fällen wird eine hohe Effizienz der Übertragung angestrebt. Entwicklungsbedarf besteht auch bei der Ausrüstung für 5G/6G-Netze. Dazu gehören Elektronik für neue, höhere Frequenzbänder, neue Prozesstechnologien für eigene Hochfrequenz-Elektronik sowie energieeffiziente Hardware für software-definierte Funktechnologien (z. B. OpenRAN). Ein weiterer Schwerpunkt ist die effiziente Kombination verschiedener Standards und Technologien (z. B. WLAN und LIFI).

Das Rückgrat moderner Drahtlosnetze sind Glasfasern, aber auch diese brauchen Mikroelektronik. Hochintegrierte photonische Komponenten ermöglichen eine frühe und energieeffiziente Wandlung zwischen Elektronik und Optik; hierdurch lässt sich vor allem der Energieverbrauch weiter reduzieren. Beim Zusammenwirken von Elektronik und Optik besteht heute noch Verbesserungspotenzial, das zum Beispiel über die Entwicklung von Plattformen zur Integration von Elektronik und Optik adressiert werden kann.

4.4 Smart Health

Wenn es um die Gesundheit geht, kommt es auf Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit an.

Auch in der Medizin ist die Digitalisierung längst angekommen. Für intelligente und vernetzte Gesundheitsanwendungen ist die Elektronik eine Basistechnologie, die wesentlich die Innovationshöhe eines neuen medizinischen Produkts bestimmt. Dabei muss die Elektronik ganz spezifische Anforderungen erfüllen. Je nach Anwendung ist beispielsweise ein möglichst geringer Energiebedarf erforderlich, eine kleinstmögliche Baugröße, ein hohes Maß an Robustheit oder die Biokompatibilität des Gesamtsystems.

Für alle medizinischen Anwendungen gilt: Die Elektronik muss absolut zuverlässig arbeiten. Zuverlässig und vertrauenswürdig muss auch der Umgang mit Patientendaten sein, denn sensible Gesundheitsdaten unterliegen einem besonderen Schutz. Dies entspricht dem europäischen Verständnis von Grundwerten, zu denen Menschenwürde, informationelle Selbstbestimmung, Freiheit, Rechtsstaatlichkeit und Solidarität gehören und die garantiert sein müssen. Der European Health

Data Space schafft Strukturen, damit Daten über europäische Grenzen hinweg sicher und datenschutzkonform zugänglich gemacht und geteilt werden können. Die Elektronik muss zu all diesem ihren Beitrag leisten. Zudem gilt: Damit in Krisensituationen wie Pandemien geeignetes medizinisches Equipment schnell geliefert werden kann, müssen die erforderlichen elektronischen Komponenten auch kurzfristig in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

Um diese hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit, Vertrauenswürdigkeit und Verfügbarkeit der Elektronikkomponenten zu erfüllen, brauchen wir zuverlässige Wertschöpfungsketten. Gerade in kritischen Segmenten wie dem Gesundheitssektor muss Europa seine technologische Souveränität sichern, um die alleinige Abhängigkeit von Herstellern außerhalb Europas möglichst gering zu halten und den Bürgerinnen und Bürgern jederzeit die bestmögliche medizinische Versorgung zu sichern.

Von technischer Seite gibt es hierfür verschiedene vielversprechende Ansätze. Zum einen ermöglicht eine umfassende Modularität und Austauschbarkeit von Komponenten und ganzen Funktionseinheiten eine flexible Anpassung an sich ändernde Bedarfe. Zum anderen können Plattformlösungen und einheitliche Schnittstellen bei Neuentwicklungen die Zeit bis zur

Markteinführung reduzieren. Neue mikroelektronische Komponenten werden das Anwendungsspektrum der Medizinelektronik künftig deutlich erweitern. Bei der medizinischen Diagnostik, der Datenvorverarbeitung, der Wirkstoffentwicklung sowie bei dem Verständnis seltener Erkrankungen kann Künstliche Intelligenz viel Zeit und Ressourcen einsparen. Elektroniksysteme für E-Health-Anwendungen zur Telemedizin können die Gesundheitsversorgung in medizinisch unterversorgten ländlichen Regionen verbessern und beschleunigen. Neue Biosensoren in Lab-on-a-Chip-Anwendungen können am Point-of-Care die Labordiagnostik ergänzen oder auch ersetzen. In diesen Anwendungen werden Ansätze des Edge-Computing eine zunehmende Rolle spielen (siehe Kapitel 3.2 und 4.1).

Bei Implantaten unterstützt die Mikroelektronik unter anderem das Energiemanagement für eine langlebige Energieversorgung, zum Beispiel für aktive, intelligente und vernetzte Implantate, die Patienten mehr Lebensqualität bringen. Sensorische und aktorische Komponenten im Verbund mit neuen Formen der Energieversorgung ermöglichen künftig schonendere therapeutische Behandlungsansätze. Energiesparende Elektroniksysteme und spezialisierte KI-Lösungen werden zunehmend die Grundlage für verbesserte patientenindividuelle Prothesen und Orthesen bilden.



Hochspezialisierte Elektroniksysteme in der Neuroprothetik wiederum tragen dazu bei, Auswirkungen unheilbarer neurologischer Erkrankungen wie Morbus Parkinson, Epilepsie oder Locked-in-Syndrom zu mindern. Nach Unfällen mit Schädigung der Extremitäten und bei Querschnittslähmung kann die Neuroprothetik perspektivisch die Funktionsfähigkeit gestörter oder durchtrennter Nervenstränge zumindest teilweise wiederherstellen. Mikroimplantate können auch Arzneimittelgaben ersetzen, beispielsweise bei der Behandlung von chronischen Schmerzen und schweren depressiven Erkrankungen.

Auf moderner Elektronik basierende Lösungen können medizinisches und Pflegepersonal von Routineaufgaben entlasten. Hier gibt es viele Möglichkeiten von einfachen RFID-Tags über Roboter zur Assistenz bei Operationen und zur Unterstützung von Pflegekräften bis hin zu leistungsfähigster stationärer Diagnostik.

In der Bioverfahrenstechnik und Arzneimittelherstellung kann Mikroelektronik dazu beitragen, Produktionsprozesse engmaschiger zu überwachen, Produktionsausfälle zu minimieren und eine hohe Produktqualität sicherzustellen (siehe Kapitel 3.3).

4.5 Autonomes Fahren

Elektronik und Sensorik machen Menschen mobil.

Der Mobilitätssektor gehört zu den forschungs- und innovationsstärksten Sektoren Deutschlands und trägt maßgeblich zum Erhalt von Arbeitsplätzen und Wohlstand bei. In den nächsten Jahren werden vor allem das autonome vernetzte Fahren und der Bedarf an nachhaltiger Mobilität die Entwicklung prägen. Die Elektronik ist derzeit noch zuverlässiger Innovationslieferant für die deutsche Automobilwirtschaft. Gerade beim autonomen Fahren schafft sie aber auch ein disruptives Potenzial, das die bisherigen Geschäftsmodelle in Frage stellt. Hier besteht ein enger Zusammenhang zwischen Innovationsführerschaft und Marktführerschaft.

Elektronik und Sensorik senken in Fahrerassistenzsystemen schon heute das Unfallrisiko und schützen Leben. In Zukunft werden autonome Fahrzeuge die Verkehrssicherheit weiter steigern.

Sie werden Verkehrsflüsse auf Schnellstraßen und in den Städten optimieren und sowohl im Fahrzeug als auch im Verkehrssystem für höhere Energieeffizienz sorgen. Damit reduzieren sich auch Lärmbelastung, Luftverschmutzung und CO₂-Ausstoß, womit das autonome Fahren auch einen Beitrag zum Klimaschutz leistet. Schließlich können über das autonome Fahren alle Menschen einfacher am Straßenverkehr teilhaben. Die Mobilität wird sich also grundlegend verändern.

Die technologische Basis für diese neue Form der Mobilität ist eine leistungsstarke und hochinnovative Mikroelektronik. Sie bestimmt ganz wesentlich Sicherheit, Funktionsweise und Nachhaltigkeit. Um im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung den Mobilitätsstandort Deutschland zu sichern, wird die Technologiesouveränität in den Schlüsselkomponenten der Mikroelektronik immer wichtiger.

In erster Linie braucht jedes autonome Fahrzeug leistungsfähige Sensorik mit einer hohen Detektionsgenauigkeit, die in Echtzeit unter allen Umgebungsbedingungen funktioniert (siehe Kapitel 3.3 und 3.4). Mit der steigenden Anzahl von Sensoren steigen auch die Datenmengen, die von immer leistungsfähigeren Rechensystemen weiterverarbeitet werden müssen – bei begrenztem Energie-Budget vor allem in batterieelektrischen Fahrzeugen (siehe Kapitel 3.2 und 3.4). Für ein ganzheitliches Umgebungsbild müssen die Daten zunächst fusioniert und anschließend nach erkannten Objekten kategorisiert werden. Um daraus eine Fahrentscheidung in Echtzeit ableiten zu können, ist ein sehr hoher Rechenaufwand erforderlich. Vielversprechend ist hier der Einsatz von Künstlicher Intelligenz, die über die Vernetzung von autonomem Fahrzeug, Infrastruktur wie smarten Ampeln oder Edge-Rechnern am Straßenrand, hochgenauer Karte und Daten aus der Cloud wichtige Informationen über die Fahrzeugumgebung kombiniert.

Nur wenn alle Bauteile und das gesamte System unter allen Bedingungen sicher und zuverlässig funktionieren, kann der Technologie zugetraut werden, die richtigen Entscheidungen zu treffen und die Verantwortung für die Sicherheit der Insassen zu übernehmen. Im Notfall, wenn dies nicht mehr gewährleistet ist, muss das Fahrzeug jederzeit in einen sicheren Zustand (z. B. Anhalten) kommen können.



Beim autonomen Fahren hat die Vertrauenswürdigkeit der eingesetzten elektronischen Komponenten und des Gesamtsystems absolute Priorität. Angefangen beim einzelnen Chip über die Datenverarbeitung bis hin zur Software in Steuerung und Infrastruktur muss das Risiko einer ungewollten Störung oder beabsichtigten Manipulation ausgeschlossen werden. Hierfür müssen Technologien und Konzepte entwickelt werden, die mögliche Fremdeinwirkungen sowohl erkennen als auch verhindern. Eine Grundlage dafür ist vertrauenswürdige Elektronik.

Um den Stromverbrauch der Fahrzeuge zu senken, muss die Energieeffizienz der Einzelsysteme deutlich verbessert werden. So manche energieintensive Funktion lässt sich auch aus dem Fahrzeug nach außen verlagern. Die Gewinnung von Umfeldinformationen und die Datenverarbeitung beispielsweise können mittels Edge-Computing in der Infrastruktur oder alternativ in der Cloud stattfinden. Wichtig ist dabei, dass die Latenzzeiten, also die Reaktionszeiten des Fahrzeugs, niedrig und die Datenübertragungsraten hochgehalten werden.

Das Entwicklungstempo und der Druck durch internationale Wettbewerber sind hoch. Die Nachfrage nach immer höheren Leistungen der Bauteile wird begleitet von immer kürzeren Innovationszyklen in der Automobilelektronik, denen eine übliche Lebensdauer des

Fahrzeugs von 10 bis 15 Jahren gegenübersteht. Das aus der Elektronikfertigung bekannte „Refurbishment“ von Ausrüstungen, also die Überholung und Instandsetzung zum Zweck der Wiederverwendung, wird künftig auch bei der Elektronikausstattung von autonomen Fahrzeugen eine Rolle spielen. Hierfür sind flexible modulare Konzepte und standardisierte Schnittstellen erforderlich.

4.6 Industrie 4.0

Industrie 4.0 ist nur möglich mit modernster Mikroelektronik, KI-Prozessorik und Sensorik.

Industrie 4.0 steht für eine intelligente, flexible und vernetzte Produktion und damit nicht weniger als die vierte industrielle Revolution. Das Besondere: Industrie 4.0 verändert nicht nur die Produktionsprozesse selbst, sondern auch das Wechselspiel mit ihrem ökonomischen, gesellschaftlichen und sozialen Umfeld. Das BMBF hat das Thema Industrie 4.0 aufgrund der herausragenden Bedeutung für die deutsche Industrie als Zukunftsprojekt des BMBF vorangetrieben.

In der Industrie 4.0 werden Daten aus dem Produktionsprozess automatisiert erhoben und dann in den unterschiedlichsten Zusammenhängen genutzt. Dadurch werden Produktion und Logistik effizienter, flexibler

und individueller. Mit dezentralen Prognosen und Entscheidungen können Produktionsanlagen zunehmend autonom agieren. Ein weiteres Kernthema von Industrie 4.0 ist die prädiktive Wartung von Produktionsanlagen und die verbesserte Überwachung von Industrieprozessen. Und wenn Produktionsanlagen und -prozesse auch über Unternehmensgrenzen hinweg vernetzt werden, lässt sich auch die Wechselwirkung mit Kooperationspartnern in der Wertschöpfungskette, mit Vertrieb, Marketing und Kunden gut analysieren und steuern. Oft ergeben sich auch Erkenntnisse für die Forschung und Entwicklung. Umgekehrt können Kunden und Partner auf digitalem Weg schneller, direkter und effizienter auf die Produktion Einfluss nehmen.

Über die umfassende Digitalisierung und Automatisierung von Produktionsprozessen und Betriebsabläufen eröffnet Industrie 4.0 völlig neue Geschäftsmodelle und Kooperationen in unternehmensübergreifenden Produktions- und Vermarktungsnetzwerken. Für Deutschland – traditionell stark und führend in den Bereichen Fertigungstechnik, Automatisierung, Sensorik, Systemlösungen – ist diese Entwicklung in mehrfacher Hinsicht relevant. Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau hat über den nationalen Bedarf hinaus einen großen globalen Marktanteil. Analog

könnte Landwirtschaft 4.0 zu einer effizienten und ökologischen Landwirtschaft beitragen und deutsche Landtechnik zum Exportschlager werden lassen.

Nachgefragt: 94 Prozent der deutschen Industrieunternehmen sehen in der Industrie 4.0 die Voraussetzung für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie. Mehr als jeder Zweite betont, Industrie 4.0 gebe dem eigenen Geschäft generell neuen Schub. Fast drei Viertel der deutschen Industrieunternehmen planen im Zuge von Industrie 4.0 nicht nur, Prozesse zu verändern, sondern auch eine Modernisierung der eigenen Geschäftsmodelle.¹²

Mikroelektronik und Sensorik sind die Schlüsseltechniken für Industrie 4.0. Sie ermöglichen neben der eigentlichen Informationsgewinnung auch die Datenverarbeitung im Sensor, in der Maschine, im Edge-Computing oder in der Cloud sowie die interne und externe Kommunikation per Datenübertragung. Vielfach werden anwendungsspezifische Lösungen benötigt, für die die deutsche Mikroelektronikindustrie sehr gut aufgestellt ist.



¹² BITKOM Industrie 4.0 – so digital sind Deutschlands Fabriken, bitkom.org/Presse/Presseinformation/Industrie-40-so-digital-sind-Deutschlands-Fabriken (2020)

Damit Deutschland auch künftig ein weltweit wettbewerbsfähiger Produktionsstandort und ein Leitanbieter bleiben kann, muss die Mikroelektronik konsequent weiterentwickelt werden, so dass rasche Innovationsvorsprünge im Technologiefeld Industrie 4.0 realisiert werden können.

Hierfür gibt es bereits viele Ansätze: Energieeffiziente oder auch energieautarke Sensorsysteme können zum Beispiel die Nachhaltigkeit und den wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen deutlich verbessern und – weil Verkabelung an vielen Stellen überflüssig wird – auch die Infrastruktur vereinfachen (siehe Kapitel 3.3, 3.5 und 3.6). Mikroelektronik liefert auch die Komponenten, mit denen die Produktion durchgängig digitalisiert, die Produktentwicklungszyklen verkürzt und ein Produktlebenszyklus-Management etabliert werden können. Und die Sensorik gewährleistet eine sichere und effiziente Kooperation zwischen Mensch und Maschine.

Leistungsfähige und aufeinander abgestimmte Hardware- und Softwarekomponenten ermöglichen eine energieeffiziente Datenerfassung und -verarbeitung. Geforscht wird hierfür auch an Elektroniksystemen, die bereits auf Hardwareebene die Implementierung von Identifikations- und Sicherheitsfunktionalitäten ermöglichen, sowie an neuen Hardware-Konzepten, Schaltungen und Systemen, die auf Methoden der KI bzw. des maschinellen Lernens optimiert sind.

Mikroelektronik unterstützt auch bei der dezentralen Datenverarbeitung sowie bei der Datenreduktion und Datenvorverarbeitung für die Echtzeit-Prozesssteuerung, ebenso bei Selbstdiagnose, -konfiguration, -optimierung und -reparatur. Entwickelt werden hierfür neue Lösungen für Sensordatenfusion, Messverfahren und Sensorkonzepte sowie sichere Schnittstellen vom Sensor bis zur Cloud und zurück. Weitere Querschnittsthemen der Mikroelektronik für Industrie 4.0 sind Echtzeitfähigkeit, Zuverlässigkeit, elektromagnetische Verträglichkeit, Robustheit, Resilienz, Vernetzungsfähigkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit für den Einsatz im industriellen Umfeld.

Um schnell zu neuen innovativen Mikroelektronik-Komponenten für Industrie 4.0 zu kommen, muss der Systementwurf durch Einsatz und Entwicklung neuer EDA-Werkzeuge weiter beschleunigt werden. Benötigt

werden außerdem neue Möglichkeiten der Simulation und Virtualisierung von Prozessen und Objekten im Sinne eines digitalen Zwillings sowie eine Anpassung an standardisierte, verbreitete industrielle digitale Kommunikationsprotokolle, auch im Sinne eines Hardware-Software-Co-Designs.

4.7 Intelligente Energiewandlung

Für die Energiewende muss Energiewandlung ganz neu gedacht werden.

Energie durchläuft auf ihrem Weg von der Primär- bis zur nutzbaren Energie diverse Wandlungsprozesse. Bis etwa Sonnenenergie zum Antrieb eines elektrischen Gerätes nutzbar ist, muss sie über mehrere Stufen in elektrischen Strom gewandelt und oft auch über weite Strecken transportiert werden. In der Vergangenheit waren Erzeugung, Wandlung und Transport von Strom nach dem Prinzip organisiert, dass die gut steuerbare Erzeugung dem nicht vollständig vorhersehbaren Verbrauch folgt.

Das hat sich in den vergangenen Jahren zusehends geändert. So wird unser Energiesystem nicht mehr von wenigen großen Stromerzeugern dominiert, die ihr Angebot der Nachfrage anpassen können. Heute wird bereits knapp die Hälfte unseres elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonne bereitgestellt, und damit durch immer mehr kleine Stromerzeuger mit stark schwankender Leistung. Auch der schon immer im Tagesverlauf schwankende Stromverbrauch verändert sich mit der zunehmenden Elektrifizierung und Digitalisierung der Endanwendungen. Die Einbindung von Energiespeichern, die Digitalisierung der Energiewende z. B. mit „smarten“ Stromzählern sowie die zunehmende Kopplung des Energiesektors mit den Nachfragesektoren kann hier einerseits helfen, erhöht jedoch gleichzeitig auch die Komplexität des Gesamtsystems.

Um auch unter unbeständigen Bedingungen im europäischen Strommarkt die Stromerzeugung und -nutzung miteinander in Einklang zu halten, den Einsatz der erneuerbaren Energien zu stärken und damit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, werden eine Energiewandlung, Energieverteilung und ein Energieverbrauch gebraucht, die deutlich flexibler sind als



bisher, gleichzeitig intelligenter aufeinander abgestimmt und auch „kommunikativer“. Damit können erneuerbare Energien effektiver und effizienter genutzt werden. Dies erhält nicht nur die Versorgungssicherheit, sondern kann sie sogar steigern.

Herausforderungen gibt es auf allen Ebenen. Dies gilt für das Endgerät, dessen Strombedarf so gering und dessen Versorgung so effizient wie möglich sein muss – unter allen Lastbedingungen und bei Geräten mit flexiblen Einsatzzeiten idealerweise von der Netzseite her steuerbar. Weiter gibt es Bedarf an flexibleren, auch bidirektionalen Systemen für Energienetze. Gebraucht werden diese zum Beispiel für Inselnetze, für Ladesysteme für Elektrofahrzeuge, zwischen verschiedenen Netzebenen, aber auch für Sektorenkopplung oder Großspeicher. Schließlich müssen die Energienetze der Zukunft nicht nur Energie, sondern auch Daten austauschen, um so intelligente Wandler, Speicherung und Transport von Energie zu ermöglichen.

Die Mikroelektronik leistet hierfür wichtige Beiträge. Sie liefert hocheffiziente und flexible Leistungselektronik für die Wandler, kostengünstige, sparsame oder sogar energieautarke Sensorik zur Bestimmung von Kennzahlen in den Netzen sowie Kommunikationselektronik zum Datenaustausch. Mit dieser technischen Basis lassen sich auch Ansätze der KI nutzen, um Daten auszuwerten, schneller und präziser als heute komplexe Netze zu regeln und intelligente Leistungselektronik bei Erzeugern und Verbrauchern zur Netzstabilisierung einzusetzen (siehe Kapitel 3.2, 3.3., 3.5, 3.6).

An vielen Stellen ist noch Entwicklungsarbeit zu leisten, z. B. ist bisher vor allem der Status der Mittel- und Niederspannungsnetze nur schwer zu erfassen. Hindernisse sind hohe Investitionsaufwände für Mess- und Kommunikationstechnik, mangelnder Bauraum in den Anlagen und die hohen Anforderungen an eine sichere Datenübertragung – Probleme, zu deren Lösung die Mikroelektronik entscheidend beiträgt.

2018 gingen bundesweit in den Energienetzen 24,6 TWh verloren,

4 %

der gesamten Energie (621 TWh) und fast doppelt so viel wie der gesamte Berliner Jahresstromverbrauch (13,5 TWh).^b

Kommunikationstechnologien verursachten 2018

3,7 %

der globalen Treibhausgasemissionen.^a

Test und Verifikation nehmen bei komplexer Mikroelektronik bis zu

70 %

des Entwicklungsaufwands ein.^c

Verkehrsunfälle in Deutschland sind zu rund

90 %

auf menschliche Fehler zurückzuführen.^d

Das produzierende Gewerbe liefert etwa ein Viertel der Bruttowertschöpfung in Deutschland. Damit liegt Deutschland deutlich über dem europäischen Durchschnitt von

19 %.^e

a theshiftproject.org/en/article/lean-ict-our-new-report/

b bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf

c blogs.sw.siemens.com/verificationhorizons/2016/08/22/part-2-the-2016-wilson-research-group-functional-verification-study/

d destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700197004.pdf

e destatis.de/Europa/DE/Thema/Industrie-Handel-Dienstleistungen/Industrie.html



5 Kooperationen, Instrumente, Strukturen

Aus den vorhergehenden Kapiteln wird deutlich: Moderne Mikroelektroniksysteme basieren auf vielen unterschiedlichen grundlegenden Technologien und müssen auf viele unterschiedliche Anwendungsfälle angepasst sein. Die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Chancen der Mikroelektronik können deswegen nur über Kooperationen in vollem Umfang genutzt werden. Die Förderung der Bundesregierung soll dafür Impulse geben. Dauerhaft wirksam werden diese in den richtigen Strukturen. Die Maßnahmen und Werkzeuge dieses Programms ordnen sich in diese drei Kategorien ein.

5.1 Stärkung von Kooperationen

Zum einen ist die Mikroelektronik eine sehr forschungsintensive Technologie und damit generell auf eine enge Zusammenarbeit von Forschung und Industrie angewiesen. Zum anderen basieren die Anwendungen der Mikroelektronik auf komplexen, arbeitsteiligen Lieferketten, die vom Material über die Bauteil- und Modulebene bis hin zum System mit allen Softwarekomponenten von vielen Akteuren mit unterschiedlichstem Know-how abhängen. Eine Verknüpfung der technologischen Kompetenz der Mikroelektronikindustrie mit der Systemkompetenz deutscher und europäischer Anwenderbranchen ist daher für den Kompetenzaufbau und -erhalt essentiell.

Um die technologische Souveränität Deutschlands zu sichern, und insbesondere um vertrauenswürdige

Elektronik zu entwickeln, strebt die Bundesregierung eine weitere Vertiefung von Kooperationen auf den verschiedensten Ebenen an:

- **Kooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft:** Kernelement der Mikroelektronik-Förderung des BMBF bleibt die vorwettbewerbliche kooperative Forschung von Wissenschaft und Wirtschaft in klassischen Verbundvorhaben und darüber hinaus. Auch zwischen den außeruniversitären Forschungseinrichtungen wird die Kooperation gestärkt. Die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) bündelt zum Beispiel unterschiedliches Forschungs-Know-how zur Mikroelektronik und schafft eine zentrale Schnittstelle, die der Industrie, insbesondere dem Mittelstand, den Zugang zu Spitzentechnologie erleichtert. Die FMD umfasst dabei von vornherein Institute, die eng mit der Wirtschaft kooperieren: einerseits Fraunhofer-Institute, andererseits wirtschaftsnahe Institute der Leibniz-Gemeinschaft. In umgekehrter Richtung sollen Hochschulen und Forschungseinrichtungen verstärkt mit Gründerinitiativen kooperieren, um bewusst eine offene Atmosphäre für neue Kooperationen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu schaffen.

Verbundvorhaben kommt dabei auch eine Schlüsselrolle in der Ausbildung des wissenschaftlich trainierten Nachwuchses und für den Know-how-Transfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu: Hochschulen und Forschungseinrichtungen haben über Mittel aus Verbundvorhaben breite Möglichkeiten zur Ausbildung und Anleitung von Masteranden und

Masterandinnen, Promovierenden und Postdocs in anwendungsorientierten Projekten. Im Verbund entstehen direkte Kontakte mit der Industrie, die Bedarf an Fachkräften hat. Dadurch wirkt das vorliegende Programm einem Fachkräftemangel entgegen.

- **Europäische und multilaterale Kooperation:** Die Verzahnung der nationalen Mikroelektronik-Forschungsförderung mit europäischen Programmen erzeugt eine Hebelwirkung durch langfristige Kooperationen in Deutschland und Europa. Insbesondere KMU profitieren neben den direkten Ergebnissen aus Förderprojekten von dem intensiven Kontakt zu europäischen Partnern aus Wissenschaft und Industrie. Oftmals ergeben sich über die Projekte hinaus fruchtbare Kooperationen.

Kernstück der europäischen Kooperation im EU-Forschungsrahmenprogramm Horizon Europe und dessen Vorgänger Horizon 2020 sind die Gemeinsamen Unternehmen Electronic Components and Systems for European Leadership (ECSEL) sowie dessen geplanter Nachfolger zu digitalen Schlüsseltechnologien (Key Digital Technologies, KDT), während EuroHPC den Ausbau von Kooperationen zum Höchstleistungsrechnen und die europäische Prozessor-Initiative (EPI) fördert. Darüber hinaus leisten internationale Kooperationen einen Beitrag zum Wissens- und Kompetenzaufbau in Deutschland. Dazu gehören bilaterale Kooperationen wie die deutsch-japanische Forschungskoope-ration für das

autonome Fahren, aber auch multilaterale Maßnahmen wie die Förderung in der zwischenstaatlichen Initiative EUREKA (in den Jahren 2016 bis 2020 im Elektronik-Cluster PENTA).

Eine besondere Form der Kooperation stellen IPCEI-Fördermaßnahmen dar. Hier kooperieren europäische Staaten mit dem Ziel, nicht nur die Entwicklung neuer Technologien, sondern auch deren Umsetzung in die Produktion zur Stärkung der EU-Volkswirtschaft und deren Wettbewerbsfähigkeit zu ermöglichen. Die Bundesregierung hat zusammen mit Italien, Frankreich und dem Vereinigten Königreich 2017 das erste IPCEI gemäß den Kriterien der Europäischen Kommission von 2014 gestartet.

- **Bund-Länder-Kooperation:** In der europäischen Elektronik-Initiative ECSEL hat die Bundesregierung eine besonders hohe Synergie durch die gemeinsame Förderung mit den Freistaaten Sachsen und Thüringen erreicht. Diese eröffnet den Forschungsakteuren in beiden Freistaaten zusätzliche Chancen zur Teilhabe an den europäisch ko-finanzierten Projekten. Die Voraussetzungen für die Beteiligung der Bundesländer an der ECSEL-Nachfolgeinitiative KDT sind gegeben. Im IPCEI on Microelectronics kooperiert die Bundesregierung mit dem Freistaat Sachsen bei der Finanzierung eines Teilvorhabens.
- **Verbände, Netzwerke und Cluster:** Verbände, Netzwerke und Cluster sind wichtige Teile des Innovationsstandortes Deutschland. Der ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie und der AMA Verband für Sensorik und Messtechnik als Branchenverbände, der VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik als Verband von Ingenieurinnen und Ingenieuren, die Plattform Industrie 4.0, die Netzwerke Silicon Saxony, Silicon Germany und Silicon Europe auf ihrer jeweiligen Ebene, das edacentrum als Netzwerk für Elektronik, Design und Anwendungen – sie alle sorgen für Kooperation und neue Ideen durch Vernetzung, sie bieten der forschungspolitischen Debatte Foren und geben ihr Impulse, sie sorgen für den nötigen Austausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Cluster bündeln alle relevanten Akteure eines Themenfeldes und/oder einer Region entlang einer gemeinsamen Strategie. Dazu gehören insbesondere das ECPE European Center for Power Electronics für den Bereich



Leistungselektronik sowie die Spitzencluster It's OWL, microtech südwest und Cool Silicon. Anknüpfend an die Spitzenclusterförderung hat das BMBF die neue Zukunftscluster-Initiative (Clusters4Future) ins Leben gerufen. Sie setzt auf aktuelle, junge Forschungsthemen, die an der Schwelle zur Anwendung stehen. Ziel ist der Aufbau der nächsten Generation regionaler Innovationsnetzwerke, zum Beispiel auch für Zukunftsthemen der Mikroelektronik.

5.2 Maßgeschneiderte Instrumente

Welches Instrument die Innovationskraft Deutschlands im Bereich der Mikroelektronik am besten stärken kann und wie neue Impulse gezielt gesetzt werden können, hängt stark vom jeweiligen Einzelfall ab. Handelt es sich um eine Stärke der deutschen Industrie oder gilt es, Abhängigkeiten in einem bestimmten Bereich zu reduzieren? Gibt es viele etablierte Akteure oder handelt es sich um eine Innovation, die neue Märkte erschließt? Kann Deutschland in diesem Bereich auf einer Spitzenstellung in der Forschung aufbauen? Gilt es, den Transfer in die industrielle Forschung zu stärken oder den Übergang in die Produktion? Dies sind Fragen, die je nach Anwendung und Technologie höchst unterschiedlich beantwortet werden.

Um dem gerecht zu werden, setzt dieses Programm auf maßgeschneiderte Instrumente:

- **Thematische Bekanntmachungen zur Förderung und Stärkung von Technologien und Anwendungen:** Durch dieses flexible Instrument wird in der Regel eine Gruppe von Verbundforschungsprojekten gestartet, die zusammen einen Forschungsschwerpunkt bilden. Zur Vorbereitung werden neue Themen der Mikroelektronik im Früh- oder Grundlagenstadium u. a. in Expertengesprächen sondiert. Der Forschungsschwerpunkt hat zum Ziel, neue, auch riskante Ansätze beschleunigt zu evaluieren und in die Anwendung zu bringen. Dies verschafft den beteiligten Akteuren aus Wissenschaft und Wirtschaft Vorsprünge. Verbundprojekte sorgen gleichzeitig für eine Vernetzung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft und für wissenschaftlich ausgebildeten Fachkräfte-Nachwuchs (siehe in Kapitel 5.1 „Koope-ration zwischen Wissenschaft und Wirtschaft“).
- **Mehrstufige Verbundprojekte:** Am Übergang von der Grundlagenforschung zur anwendungsorientierten Forschung gibt es oft aussichtsreiche Ideen, die der erkenntnisorientierten Forschung entwachsen, aber für eine Verbundforschung unter Mitfinanzierung der privaten Hand als noch zu risikobehaftet angesehen werden. Damit besteht das Risiko, dass innovative Potenziale nicht weiterverfolgt werden. Eine Lösung können mehrstufige Maßnahmen sein, bei denen wissenschaftliche und industrielle Partner über mehrere Phasen in teils wechselnden Konstellationen zusammenarbeiten. In einer ersten Phase liegt der aktive Part im Bereich der akademischen Partner, welche von der Industrie begleitet werden. Im weiteren Verlauf geht der Schwerpunkt auf die industrielle Forschung über. An klar definierten Punkten wird über den Erfolg des Projekts und die Erfolgsaussichten eines industriegetriebenen Anschlussvorhabens mit breiter Verwertungsperspektive entschieden, um ein hohes wissenschaftlich-technisches Risiko mit vertretbarem finanziellem Risiko für die Allgemeinheit zu verbinden. Die Maßnahmen „Forschung für neue Mikroelektronik (ForMikro)“ und „Zukunftsfähige Spezialprozessoren und Entwicklungsplattformen (ZuSE)“ greifen Ansätze eines solchen Konzeptes in der Mikroelektronik-Förderung bereits auf.
- **Innovationswettbewerbe** werden als Ideenkatalysatoren eingesetzt, wo ein Feld für breit angelegte Verbundforschungsprojekte erst erschlossen werden soll. Ergebnisse der Spitzenforschung lassen nicht immer unmittelbar erkennen, ob und wie sie für neue Technologie und in Anwendungen genutzt werden können. Hier setzen die Innovationswettbewerbe an. Forschungsthemen im Frühstadium, in denen Netzwerke sich erst noch bilden, können über Innovationswettbewerbe rasch vorangebracht werden, etwa Mikroelektronik, die für die Implementierung von Künstlicher Intelligenz optimiert ist. Es werden kurzlaufende, stark fokussierte Förderungen vergeben. Mehrere Gruppen treten dabei gegeneinander an, um für ein gegebenes Problem eine Lösung zu finden. Wer bestimmte quantifizierte Zielparameter am besten erfüllt (z. B. hinsichtlich Energieeffizienz), geht als Sieger hervor. Der Pilotinnovationswettbewerb „Energieeffizientes KI-System“ ist ein erstes Beispiel dafür, wie ein kompakter Wettbewerb zu einem hochrelevanten Thema Ideen katalysiert, kreative Köpfe motiviert und Sichtbarkeit für Spitzen-



forschung in der Öffentlichkeit, aber vor allem in der deutschen Industrie erzeugt. Innovationswettbewerbe haben großes Potenzial als schnelles Werkzeug, um verschiedene Lösungsansätze zu vergleichen, Sichtbarkeit für Top-Ergebnisse zu schaffen und sich bildende Communities in Deutschland zu vernetzen.

- **Schüler- und Studierendenwettbewerbe:** Die Elektronik unterliegt einem enormen Innovationstempo, welches nur durch kreative Köpfe und engagierte Nachwuchswissenschaftler aufrechterhalten werden kann. Um mittelfristig einem Fachkräftemangel im Bereich der Elektronik entgegenzuwirken, werden Möglichkeiten geschaffen, die Elektronikkenntnisse von Studierenden sowie von Schülern und Schülerinnen zu vertiefen und eigene Entwicklungsergebnisse in Wettbewerbsform national und international zu präsentieren. So werden unter anderem die Elektronik-Wettbewerbe INVENT a CHIP und LABS for CHIPS gemeinsam mit dem VDE veranstaltet sowie der VDE-Studierendenwettbewerb COSIMA unterstützt.
 - **KMU-innovativ (KMU_i):** KMU-innovativ ist dafür konzipiert, speziell kleine und mittlere Unternehmen effektiv in Innovationsprozessen zu unterstützen.
- Dabei unterstützt KMU-innovativ auch den Einstieg von bisher weniger förder- und forschungserfahrenen KMU, baut Hürden ab und stärkt die Motivation für anspruchsvolle, risikoreiche, aber fokussierte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Einreichungen bei KMU_i sind kontinuierlich möglich, mit zwei festen Bewertungstichtagen im Jahr. Die Förderung ist offen für die gesamte Themenbreite des Programms.
- **Europäische multilaterale Verbundprojekte:** Die Kombination von EU- und nationaler Förderung entlang einer mehrjährigen Strategie in ECSEL sowie in dem geplanten Nachfolger KDT bietet einen langfristigen Innovations- und Förderrahmen und sorgt für eine programmatische Kohärenz zwischen EU, Mitgliedstaaten und den beteiligten Industrien. Diese ist Grundlage für einen raschen Transfer von Forschungsergebnissen in neue Produktion über Pilotlinien-Vorhaben und dadurch für eine neue Investitionsbereitschaft der europäischen Elektronik-Hersteller. ECSEL und KDT umfassen die gesamte Themenbreite dieses Programms. Komplementär dazu ist es möglich, über die multilateralen EUREKA-Initiativen zu bestimmten Themen weitere Impulse zu geben.



- **IPCEI:** Grundsätzlich dürfen EU-Staaten Innovationen außerhalb von Regionalfördergebieten nur durch Forschungs- und Entwicklungsprojekte fördern. Gibt es aber ein übergeordnetes, gesamteuropäisches Interesse, können solche Vorhaben als IPCEI von mehreren EU-Mitgliedstaaten gemeinsam bis zur ersten gewerblichen Nutzung (first industrial deployment) gefördert werden.

5.3 Strukturen für Forschung und Innovation

Deutschland verfügt mit den Hochschulen und den außeruniversitären Forschungseinrichtungen über weltweit herausragende Strukturen für Forschung und Innovation. Die größte Bandbreite an anwendungsorientierten Mikroelektronik-Aktivitäten entfaltet dabei die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) mit ihren dreizehn Instituten: die elf Vollmitglieder des Mikroelektronik-Verbands der Fraunhofer-Gesellschaft (FhG) sowie das Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP) und das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH). An verwandten Themen arbeiten auch die fünf weiteren Institute der FhG, die Gastmitglieder im Mikroelektronik-Verband sind; aus der Leibniz-

Gemeinschaft zu nennen ist zudem das im Vergleich stärker grundlagenorientierte Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik. Die Grundlagen zukünftiger Elektronik erforscht die Helmholtz-Gemeinschaft im Programm Future Information Technology, insbesondere am Forschungszentrum Jülich. Auch die Max-Planck-Gesellschaft widmet sich solchen Grundlagen, zum Beispiel in der organischen Elektronik oder der Quantenelektronik. Schließlich fördern Bund und Länder über die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) die Forschung an Hochschulen, unter anderem in mehreren Sonderforschungsbereichen zu Elektronik-Themen der Zukunft. Dabei verläuft Innovation in der Praxis selten so linear, wie es die Aufteilung in grundlagenorientierte und anwendungsorientierte Forschungsorganisationen suggerieren mag.

Die Mikroelektronikforschung in Deutschland ist historisch dezentral aufgestellt: mit starken kleineren Instituten, jedes spezialisiert und in der Regel stark in die jeweiligen regionalen Innovationsökosysteme eingebunden. Da die Mikroelektronik besonders forschungs- und geräteintensiv ist, entstehen hohe Kosten für Anschaffung und Betrieb der notwendigen Ausstattung. Es ist daher sinnvoll, die deutsche Elektronikforschung stärker arbeitsteilig und komplementär aufzustellen. Die ersten Schritte hierfür sind bereits erfolgt: Die o.g. dreizehn Institute bündeln in der

Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) ihre Kompetenzen, arbeiten institutsübergreifend eng zusammen und nutzen ihren Gerätepark gemeinsam. Dies bietet Forschungspartnern und Kunden aus Wissenschaft und Wirtschaft einfachen Zugang zur gesamten Wertschöpfungskette der Mikroelektronik aus einer Hand. Die FMD bietet dabei gerade auch kleinen und mittelständischen Unternehmen umfassenden Zugang zu Hochtechnologie. Dies stärkt den raschen und effizienten Technologietransfer für die gesamte Bandbreite der vertretenen Technologien: multifunktionale, energiesparende Sensorik, MEMS-Aktorik, Leistungselektronik, Hochfrequenzelektronik, opto-elektronische Systeme und Hochintegration. Die Aufbauphase der FMD von 2017 bis 2021 hat die Bundesregierung mit 350 Mio. Euro gefördert.

Neben den außeruniversitären Forschungsinstituten sind Hochschulen in Deutschland ein zentraler Innovationsfaktor in der forschungs- und geräteintensiven Mikroelektronik. Sie erschließen neues Wissen und bilden den wissenschaftlich qualifizierten Nachwuchs aus. Die zwölf Forschungslabore Mikroelektronik Deutschland (ForLab) an Hochschulen erhalten daher bereits eine Investitionsförderung von weiteren 50 Mio. Euro für eine modernisierte Geräteausstattung. Dies ermöglicht, Forschung auf internationalem Spitzenniveau zu verstärken, neue Forschungsfelder für die Mikroelektronik der Zukunft zu erschließen und den wissenschaftlichen Nachwuchs mit hochmoderner Ausstattung auszubilden. Darüber hinaus wird die Vernetzung untereinander und mit externen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft gefördert – für mehr wissenschaftlichen Austausch und Kooperation.

Um die Themen und Initiativen dieses Programms zum Nutzen von Wirtschaft und Gesellschaft voranzutreiben, stärkt die Bundesregierung weiterhin leistungsfähige Strukturen, moderne Forschungsausstattung und neue Formen der Zusammenarbeit in der Mikroelektronik. Spitzenforschung braucht Spitzenausstattung, um den Mikroelektronikstandort Deutschland zu stärken und wettbewerbsfähig zu halten.

Die Bundesregierung will weitere Kooperationen der Industrie mit der erkenntnisorientierten Mikroelektronikforschung intensivieren, auch mit Helmholtz-Zen-

tren und mit Instituten der Max-Planck-Gesellschaft. Ziel ist ein intensiverer Dialog von Wissenschaft und Wirtschaft, um die für Deutschland strategisch relevanten Erkenntnisse zu Grundlagen zukünftiger Mikroelektronik schneller in innovative Anwendungen zu überführen. Projekt- und institutionelle Förderung könnten dadurch ihre Komplementarität noch besser entfalten.

5.4 Ein lebendes Programm durch strategische Vorausschau und Evaluation

Aufgrund des hohen Innovations- und Entwicklungstempos in der Mikroelektronik und ihrer stetigen Verbreitung in immer neue Anwendungsfelder ist es erforderlich, das Rahmenprogramm als lebendes Programm zu gestalten und umzusetzen. Dies setzt voraus, die Maßnahmen fortlaufend weiterzuentwickeln.

Programmbegleitend und fortlaufend erfolgt eine Auswertung der Forschungsförderung, die auch berücksichtigt, dass viele Wirkungen von vorwettbewerblicher Forschung sich erst mittelfristig und indirekt entfalten. Dieses begleitende Monitoring ermöglicht jeweils eine zeitnahe forschungspolitische Auswertung; es stützt sich auf Förderdaten sowie auf Informationen, die über die Projektberichte erhoben werden. Daraus wird rollierend eine strategische Vorausschau auf prioritäre oder ganz neue Themen generiert, um geeignete Maßnahmen abzuleiten. Dies erreicht zum einen eine evidenzbasierte Justierung und legt zum anderen die Grundlagen für die spätere Ex-post-Evaluierung des Programms als Ganzem.

Mit dem vorliegenden Programm für Forschung und Innovation in den strategisch bedeutsamen Technologien und Anwendungen der Mikroelektronik ist Deutschland für die nächsten Jahre gut aufgestellt, um die strategische Souveränität in europäischer Partnerschaft zu stärken und den Wohlstand zu mehren.

Glossar

3D-Packaging: Stapelung mehrerer Chips in einem Gehäuse zu einem kompakten Bauelement.

5G/6G: Mobilfunkstandards (5G – 5. Generation, 6G – 6. Generation).

Additive Fertigungsverfahren: Schichtweiser Aufbau von dreidimensionalen Strukturen, in der Elektronik vorzugsweise von leitenden und isolierenden Schichten, um Bauelemente herzustellen. Ein besonders produktives Verfahren ist die „Gedruckte Elektronik“.

Aktorische Komponenten: Bauelemente, die elektrische Signale in mechanische Bewegungen oder andere nichtelektrische Größen umsetzen, auch Aktoren oder Aktuatoren genannt.

Approximate Computing: Näherungsweise Rechnen zugunsten von Einsparungen bei Leistung, Rechenzeit und Chipgröße – für viele Anwendungen ausreichend.

Beyond-von-Neumann-Trend: Die Von-Neumann-Architektur ist die noch heute dominierende klassische Struktur von Computern, bestehend aus Prozessoren mit Steuer- und Rechenwerk, dem Speicher und den Ein- und Ausgabeeinheiten. Dieses prinzipiell serielle Konzept der Datenverarbeitung stößt für viele Aufgabenstellungen an Leistungsgrenzen. Deshalb werden neue Ansätze „Beyond von Neumann“ verfolgt.

Biodegradierbare Materialien: Biologisch abbaubare Materialien.

Bit (Binary Digit): Kleinste elektronische Speichereinheit in der Elektronik. In der Informatik als Bezeichnung für eine Stelle in einer Binärzahl, als Maßeinheit für die Datenmenge digital repräsentierter (gespeicherter, übertragener) Daten und als Maßeinheit für den Informationsgehalt.

Chiplet-Konzept: Aufteilung der Gesamtfunktionalität auf einzelne Chips (Chiplets), die modular zu einem Bauelement, z. B. Prozessor, integriert werden. Es ermöglicht mehr Flexibilität und Kostensenkung, da die einzelnen Chiplets jeweils optimiert gefertigt und für verschiedene Bauelemente eingesetzt werden können.

CMOS-Technologie: Complementary Metal Oxide Semiconductor. Heutzutage meistgenutzter Halbleiterprozess zur Herstellung von integrierten digitalen und analogen Schaltkreisen.

Compiler: Ein Compiler übersetzt Computerprogramme einer oftmals „höheren“, also von Menschen besser verständlichen und dadurch benutzernahen Programmiersprache in einen vom Computer (direkter) ausführbaren Maschinencode.

Debugger: Programm zur Erkennung von Fehlerzuständen oder Fehlerursachen in Soft- und Hardware von Computersystemen.

Digitaler Zwilling: Digitale Repräsentation eines materiellen oder immateriellen Objekts, Systems oder Prozesses, welches Meta-Informationen (z. B. zu Architektur oder Konfiguration) einschließen und zur Simulation, Validierung, Verifikation oder Prognose genutzt werden kann.

Echtzeitfähigkeit: Fähigkeit von Systemen zur Reaktion auf ein Ereignis in einer vorgegebenen Zeit. Die dabei zulässige Verzögerung ist von der Anwendung abhängig und wird als Latenzzeit bezeichnet.

Edge-/Fog-Computing: „Cloud“ bezeichnet Rechneternetzwerke, zum Beispiel die Menge der Server in Daten- und Rechenzentren. Bei „Fog“ bis hin zu „Edge“ handelt es sich im Gegensatz dazu um Strukturen am Rand des Netzwerks bis hin zum Endgerät. „Edge-Computing“ und „Fog-Computing“ bezeichnen verschiedene Ansätze, um Dienste zur Speicherung und Verarbeitung von Daten, wie sie üblicherweise in zentralen Rechenzentren (Cloud) durchgeführt werden, auch näher am Endgerät zu ermöglichen, bspw. in den nächstgelegenen Netzwerkknoten. Dies kann Vorteile z. B. hinsichtlich der Reaktionsschnelligkeit und Datensicherheit mit sich bringen.

Edge-KI: Verarbeitung von Daten mit KI-Algorithmen mittels Edge-Computing (s. o.).

Ein- und zweidimensionale Materialien: Materialien, in denen die elektronischen Eigenschaften/Effekte an eindimensionalen (Linien) oder zweidimensionalen (Flächen) Strukturen genutzt werden.

Elektromagnetische Wechselwirkungen: Beeinflussung durch elektrische und/oder magnetische Felder.

Embedded KI: Die KI-Algorithmen werden im Gerät hardwaremäßig „eingebettet“, d. h. mittels anwendungsspezifischer KI-Prozessoren auch dort ausgeführt (siehe auch Edge-KI).

EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit. Sicherstellung der Funktion elektronischer Systeme unter dem Einfluss äußerer elektromagnetischer Felder.

Europäische Prozessorinitiative (EPI): Initiative mit dem Ziel, mit europäischen Technologien und Ressourcen leistungsstarke, effiziente Prozessoren für Supercomputer, Rechenzentren und autonome Fahrzeuge zu entwickeln.

Fan-Out Wafer Level Packaging/Fan-Out Panel Level Packaging: Fan-out Wafer Level Packaging (FOWLP) ist eine der neuesten Packaging-Technologien in der Mikroelektronik mit hohem Miniaturisierungspotenzial. Die hochintegrierten Chips werden auf einen weiteren Wafer kontaktiert, der eine Dünnschicht-Umverdrahtungslage enthält, die die elektrischen Verbindungen in der Fläche verteilt (fan out), um die weitere Verarbeitung mit Löttechnologien zu ermöglichen. Für eine höhere Produktivität und daraus resultierende geringere Package-Kosten geht der aktuelle Trend zu einem Fan-out Panel Level Packaging (FOPLP) auf Leiterplatten mit noch größeren Abmessungen.

Flip-Chip: (to flip – umdrehen) Montage von ungehäuteten Halbleiter-Chips mit der aktiven Kontaktierungsseite nach unten durch Löten auf Kontaktierhügel (sogenannte Bumps).

Interposer: Zwischenträger mit elektrischen Verteilungsstrukturen zur Verbindung mehrerer Chips in einem Package oder zur Spreizung von Kontaktabständen.

Lab-on-a-Chip: Auf einem Chip integriertes chemisches oder medizinisches Analysesystem.

Lidar: Verfahren zur optischen Messung von Abständen und Geschwindigkeiten mittels Laserabtastung der Umgebung.

LIFI: Li-Fi (Light Fidelity) ist eine Technologie zur drahtlosen Datenübertragung mittels Licht.

Memristor: Zweipoliges elektronisches Bauelement, das einen elektrischen Widerstand aufweist, der mit hindurchgeflossener Ladung, je nach Richtung, größer oder kleiner wird. Stromlos ist die Spannung null und der Widerstand bleibt erhalten. Die Bezeichnung Memristor ist aus Memory (Gedächtnis, Speicher) und Resistor (Widerstand) abgeleitet.

MEMS: Mikro-Elektro-Mechanisches System. Bauelement, in dem elektronische und mechanische Funktionen integriert sind, z. B. Beschleunigungssensor.

MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition. Beschichtungsverfahren in der Halbleiterindustrie.

MOEMS: Mikro-Opto-Elektro-Mechanisches System, Integration von optischen, elektronischen und mechanischen Funktionen in einem Bauelement.

Moore'sches Gesetz: Nach dem Intel-Mitgründer Gordon Moore benannte Regel, nach der sich durch die Technologieentwicklung die Leistungsfähigkeit von Chips mit der Zeit exponentiell erhöht bei gleichbleibenden Kosten. Das wird im Wesentlichen durch immer weitere Verkleinerung der Halbleiterstrukturen erreicht. Streng genommen kein Gesetz, sondern eine These, die sich über lange Zeit bestätigte, heutzutage aber an physikalische und wirtschaftliche Grenzen stößt.

More Moore: Technologischer Ansatz zur Weiterentwicklung der Mikroelektronik nach dem Moore'schen Gesetz.

More than Moore: Technologischer Ansatz, der über die Strukturverkleinerung von Speichern und Prozessoren hinaus die Integration weiterer Funktionen, z. B. Sensoren, in den Chip/das Bauelement beinhaltet.

Nichtflüchtiger eingebetteter Speicher: Speicher, der mit einem Mikroprozessor auf einem Chip integriert ist.

OpenRAN: Open Radio Access Network (offenes Funkzugangnetz) 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.

Organische Elektronik: Elektronische Bauelemente oder Systeme auf Basis organischer Materialien, wie z. B. Polymeren.

Plasmaätzen: Verfahren zur Strukturierung von Halbleitern.

RFID-Tags: Radio-Frequency-Identification-Tags. Elektronische „Namensschilder“, deren Informationen per Funk berührungslos ausgelesen werden können.

Sensordatenfusion: Verknüpfung der Daten mehrerer Sensoren, um das Gesamtergebnis für eine Messaufgabe zu verbessern bzw. zu validieren, insbesondere in sicherheitsrelevanten Anwendungen, wie z. B. Autonomes Fahren.

Sensorische Komponenten: Komponenten, bspw. als Bestandteil von Implantaten, die Mess- und Überwachungsaufgaben übernehmen.

Split Manufacturing: Aufteilen der Fertigungsprozesse auf mehrere Fabriken, wodurch Standardprozesse kostengünstig ausgelagert werden können und sicherheits- bzw. know-how-relevante Prozesse selbst realisiert werden.

Selbtheilende Materialsysteme: Materialien, die sich nach Beschädigung selbst reparieren können.

SiP: System-in-Package. Integration mehrerer Chips zu einem Bauelement in einem Gehäuse.

Sputtern: Verfahren zur Beschichtung von Halbleitern.

Stereolithografie: Druck von dreidimensionalen Strukturen durch schichtweises strukturiertes Auftragen von Material.

Theranostische Behandlungsansätze: enge Verbindung von Diagnostik und Therapie bei der medizinischen Behandlung

Vias: VIA: Vertical Interconnect Access. Senkrechte elektrische Verbindungen zwischen Leiterbahnebenen.

Wafer-Level-Packaging: Kontaktierung und Verpackung der Chips im Waferverbund. Erst danach wird der Wafer in einzelne Bauelemente getrennt.

Wafer-to-Wafer-Bonding: Verfahren, um Chips mit anderen Chips oder Substraten im Waferverbund zu verbinden.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Elektronik und Autonomes Fahren; Supercomputing
53170 Bonn

Bestellungen

schriftlich an
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09
18132 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: bmbf.de
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand

aktualisierte Neuauflage Dezember 2021

Text

BMBF

Gestaltung

VDI/VDE-IT, Berlin

Druck

BMBF

Bildnachweise

Titelbild: naka/AdobeStock
S. 3: Gorodenkoff/AdobeStock
S. 4: Valeriy/AdobeStock
S. 6: TU Ilmenau
S. 8: Westend61/Getty Images
S. 10: Valeriy/AdobeStock
S. 14: Rohde & Schwarz
S. 17: Universität Paderborn
S. 19: Aleksandr Matveev/Adobe Stock
S. 20: Fraunhofer EMFT/Bernd Müller
S. 21: Fraunhofer IPMS
S. 22: Monty Rakusen/ Cultura via Getty Images
S. 24: NicoElNino/AdobeStock
S. 27: lukszczepanski/AdobeStock
S. 29: Anski21/Shutterstock.com
S. 30: Gorodenkoff/AdobeStock
S. 32: iStock/MartinPrescott
S. 34: alotofpeople/AdobeStock
S. 35: BLEND3 Frank Grätz
S. 37: arthurhidden/AdobeStock
S. 38: Fraunhofer Mikroelektronik/Steinert

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

