

Herausgeber:
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

Geschäftsstelle
Residenz München
Hofgartenstraße 2
80539 München

Hauptstadtbüro
Unter den Linden 14
10117 Berlin

T +49(0)89/5203090
F +49(0)89/5203099

T +49(0)30/206309610
F +49(0)30/206309611

E-Mail: info@acatech.de
Internet: www.acatech.de

Redaktion: Dr. Holger Jens Schnell
Koordination: Dr. Marc-Denis Weitze
Layout-Konzeption: acatech
Konvertierung und Satz: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS,
Sankt Augustin

Die Originalversion des Buches ist beim Springer Verlag erhältlich.

> INHALT

MITWIRKENDE UND PROJEKTVERLAUF	5
KURZFASSUNG	7
1 EINLEITUNG	10
1.1 Die aktuelle Situation der Nanoelektronik: Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen	11
1.1.1 Förderung der Nanoelektronik im internationalen Vergleich	12
1.1.2 Lage der Nanoelektronik in Deutschland	14
1.1.3 Andere Studien zum Thema	14
1.2 Motivation und Zielsetzung	16
2 METHODIK	17
2.1 Entwicklung der Fragestellungen	17
2.2 Sondierung des Themenfeldes	18
2.3 Methodik Themenbereich Nahziele	18
2.3.1 Expertengespräche	18
2.3.2 Online-Befragung	18
2.3.3 Roadmap-Workshop	20
2.4 Methodik Themenbereich Fernziele	20
3 ERGEBNISSE	22
3.1 Nahziele	22
3.1.1 Ergebnisse Online-Befragung und Roadmap-Workshop	22
3.1.2 Fazit Nahziele	28
3.2 Fernziele	29
3.2.1 Neue Materialien und Prozesse	31
3.2.2 Kohlenstoffbasierte Elektronik	31
3.2.3 Organische Elektronik	31
3.2.4 Neue Architekturen	32
3.2.5 Molekularelektronik, selbstorganisierende Strukturen	32
3.2.6 Quantencomputer und Quantum Cellular Automata (QCA)	33
3.2.7 Alternative Technologien und Systemkonzepte	34
3.2.8 Fazit Fernziele	34

4 EMPFEHLUNGEN	35
4.1 Empfehlungen zur strategischen Ausrichtung der Forschung und Entwicklung	35
4.2 Empfehlungen zu Forschung und Forschungsförderung	36
4.3 Empfehlungen zu Forschung und Forschungsstrukturen	37
LITERATURVERZEICHNIS	38

MITWIRKENDE UND PROJEKTVERLAUF

> PROJEKTL EITUNG

- Prof. Dr. techn. Dr. h.c. Peter Russer, Technische Universität München

> STELLVERTRETENDE PROJEKTL EITUNG

- Prof. Dr. Doris Schmitt-Landsiedel, Technische Universität München

> LEITUNG PROJEKTBEREICH FERNZIELE

- Prof. Dr. Paolo Lugli, Technische Universität München

> PROJEKTGRUPPE

- Dr. Ralf Anselmann, Evonik Degussa GmbH
- Dr. Wolfgang Arden, Infineon Technologies AG
- Prof. Dr.-Ing. Christian Boit, Technische Universität Berlin
- Prof. Patrick Dewilde, Technische Universität München, Institute of Advanced Studies
- Prof. Dr. Harald Fuchs, Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- Prof. Dr.-Ing. Heinz Gerhäuser, Fraunhofer IIS, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr. Dr. Prof. h.c. mult. Thomas Geßner, Technische Universität Chemnitz
- Prof. Dr. rer. nat. Ernst Otto Göbel, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
- Dr. Karl-Heinrich Hahn, BASF SE
- Prof. Dr. Josef Hausner, Infineon Technologies AG
- Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl, Deutsches Museum, Technische Universität München
- Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Joachim Heinzl, Bayerische Forschungsförderung
- Prof. Dr. Dr. h.c. Karl Hess, Institute for Advanced Study, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA
- Prof. em. D.Ing. Dr.-Ing. h. c. Wolfgang J. R. Hoefer, A*STAR, Institute of High Performance Computing, Singapore
- Prof. Dr. Erich Kasper, Universität Stuttgart
- Prof. Dr. rer. nat. Günter von Kiedrowski, Ruhr-Universität Bochum
- Dr. Michael Lentze, Deutsche Forschungsgemeinschaft
- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mathis, Leibniz Universität Hannover
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Neumann, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt
- Prof. Dr. techn. Josef A. Nossek, Technische Universität München

- Prof. Dr. Wolfgang Porod, University of Notre Dame, Notre Dame, IN, USA
- Prof. Dr. Martin Stutzmann, Technische Universität München
- Prof. Dr.-Ing. Roland Thewes, Technische Universität Berlin
- Prof. Dr. Frank Träger, Universität Kassel
- Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel, Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr. Roland Wiesendanger, Universität Hamburg

> REVIEW-GRUPPE

- Prof. em. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Hartwig Höcker, RWTH Aachen/acatech Präsidium
- Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. h. Werner Wiesbeck, Karlsruhe Institute of Technology/acatech
- Prof. Dr.-Ing. Ingo Wolff, IMST GmbH

> PROJEKTMITARBEITER

- Nikolaus Fichtner, Technische Universität München
- Christoph Friederich, Technische Universität München
- Dr. rer. nat. Rolf Gausepohl, Fraunhofer-Institut ISI, Karlsruhe
- Dr. Johannes Russer, Technische Universität München
- Elna Schirrmeister, Fraunhofer-Institut ISI, Karlsruhe
- Dr. Sven Wydra, Fraunhofer-Institut ISI, Karlsruhe

> KOORDINATION

- Dr. Marc-Denis Weitze, acatech Geschäftsstelle

> PROJEKTVERLAUF

Dieses Positionspapier wurde im Zeitraum Juli 2008 bis Januar 2011 erarbeitet. Das acatech Präsidium hat das Papier am 8. Februar 2011 syndiziert.

> FINANZIERUNG

Das Projekt wurde finanziell unterstützt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, die Deutsche Forschungsgemeinschaft, den Fraunhofer Verbund Mikroelektronik, Infineon Technologies AG sowie die Kommission für Mikro/Nanoelektronik in Sachsen.

Das Symposium „Fernziele“ wurde finanziell unterstützt durch Gauss Instruments GmbH, Infineon Technologies AG, nanosystems initiative munich und Siemens AG.

KURZFASSUNG

Die Nanoelektronik ist die Fortsetzung der Mikroelektronik. Sie ist einerseits durch die Entwicklung der elektronischen Bauelemente auf Basis der vorherrschenden Siliziumtechnologie in Richtung auf kleinere Strukturgrößen, höhere Integrationsdichten und erweiterte Funktionalitäten, andererseits durch die Entwicklung neuer Materialien, Bauelemente und Systemarchitekturen gekennzeichnet. In der Nanoelektronik werden Strukturgrößen von unterhalb 100 Nanometern bis herab zu molekularen und atomaren Dimensionen erreicht oder für die Zukunft angestrebt.

Die Nanoelektronik ist als Basis- und Schlüsseltechnologie für große Bereiche der Industrieproduktion und Wertschöpfung von fundamentaler Bedeutung und insbesondere auch eine Zukunfts- und Schrittmachertechnologie mit umfassender Bedeutung für die Technologieentwicklung in weiten Bereichen der industriellen Entwicklung und Produktion. Es gibt heute kaum ein Gerät oder System, in dem die Elektronik nicht eine wesentliche Funktion hat und damit entscheidend ist für die mit ihm erzielbare Wertschöpfung und dessen Wettbewerbsfähigkeit. Angesichts der Chancen, die die Elektronik der Zukunft in den Bedarfsfeldern Energieeffizienz, Mobilität, Gesundheit und Umweltschutz bietet, ist die Bedeutung der Nanoelektronik als Schlüsseltechnologie kaum zu überschätzen.

Ausgehend von einer großen Tradition und starken Stellung Deutschlands auf dem Feld der Halbleitertechnologie sowie der starken Stellung Deutschlands im Bereich der Nanotechnologie- und Nanoelektronik-Forschung wird die zunehmende Verlagerung von Produktionsstandorten in die Nähe zukünftiger Zielmärkte in Asien mit Sorge betrachtet. Als Basis für Gesamtsystemoptimierungen und für die Erhaltung der Innovationsfähigkeit und damit der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrielandschaft muss die gesamte technologische Wertschöpfungskette verfügbar sein und der uneingeschränkte Zugang zu allen wichtigen Basistechnologien und ihrer Fortentwicklung gesichert sein.

Aufbauend auf nationalen und internationalen Studien, Expertenbefragungen, einem Roadmap-Workshop und einem im Rahmen des Projekts organisierten Symposium, die sich mit der Entwicklung der Nanoelektronik befassen, werden Nahziele und Fernziele der Nanoelektronik mit jeweils eigener Methodik untersucht. Im Themenbereich Nahziele wurden insbesondere die industrienah und die anwendungsorientierte Forschung mit einem Zeithorizont von drei bis acht Jahren untersucht. Dieser Bereich wird von der Siliziumelektronik dominiert, deren Weiterentwicklung innerhalb der nächsten beiden Jahrzehnte jedoch an Grenzen stoßen wird. Weiterhin finden mikroelektronisch-mechanische Systeme in vielen Anwendungen zunehmend Verwendung. Im Themenbereich Fernziele wurden insbesondere neuartige Entwicklungen der Nanoelektronik mit einem weiter in die Zukunft ausgreifenden Forschungs- und Entwicklungshorizont behandelt. Zu den künftigen, neuartigen Bauelementen und Systemen gehören nanoelektronisch-mechanische Systeme, organische Halbleiter, kohlenstoffbasierte Materialien, die Spintronik oder Spinelektronik, molekulare Elektronik, Quantencomputer und der gesamte Bereich der Quanteninformationstheorie. Dabei stellten sich die Übergänge zwischen diesen Themenbereichen fließend dar.

Die vorliegende Studie ist als Empfehlung für weiteres Handeln zu verstehen und insofern eine Eingangsstudie, die die Akteure in Politik und Wirtschaft veranlassen soll, die erforderlichen sach- und fachbezogenen Schlüsse für ein konzertiertes Handeln in den Bereichen Industriepolitik und Forschungsförderung zu ziehen.

EMPFEHLUNGEN ZUR STRATEGISCHEN AUSRICHTUNG DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

> acatech empfiehlt,

den uneingeschränkten Zugang zu allen Basistechnologien der Wertschöpfungskette in Deutschland und Europa sicherzustellen und die Entwicklung der Nanoelektronik in Deutschland durch politische Maßnahmen zu fördern, da gegenwärtig globale Wettbewerbsverzerrungen für diese wichtigen Schlüsseltechnologien bestehen.

> acatech empfiehlt

die Entwicklung von Abläufen und Strukturen, die den wirtschaftlichen Zugang zu Technologien für Massenmärkte auch für KMU ermöglichen. Das BMWi bietet sich hier für eine Koordinierung an.

> acatech empfiehlt,

die Systemkompetenz und Technologien zur Systemintegration in Deutschland vorzuhalten und fortzuentwickeln.

> acatech empfiehlt,

auf eine abgestimmte Entwicklung der Technologie- und Systemseite zu achten.

EMPFEHLUNGEN ZU FORSCHUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG

> acatech empfiehlt

die verstärkte Förderung der Systemintegration und der Zuverlässigkeit von Sensorik und Aktorik.

> acatech empfiehlt

die Erforschung und Entwicklung von Bauelementen auf Basis von organischen Halbleitern.

> **acatech empfiehlt**

ein Engagement der Industrie in der Entwicklung von Bauelementen auf Basis von kohlenstoffbasierten Materialien und deren weitere Erforschung.

> **acatech empfiehlt**

die Erforschung und Entwicklung neuartiger Bauelemente wie z. B. magnetische Bauelemente, plasmonische Bauelemente, zelluläre Automaten, supraleitende Bauelemente, biologische Bauelemente.

> **acatech empfiehlt**

intensive Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung.

EMPFEHLUNGEN ZU FORSCHUNG UND FORSCHUNGSSTRUKTUREN

> **acatech empfiehlt**

für Themenstellungen der Nanoelektronik die Etablierung von fokussierten Forschungszentren in Deutschland unter starker Einbeziehung der Industrie. Eine Doppelung von Strukturen, etwa in verschiedenen Regionen, ist dabei zu vermeiden. Die Initiative zu solchen Forschungszentren könnte vom BMBF ausgehen und gemeinsam mit den Forschungsorganisationen und den Hochschulen umgesetzt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass vorhandene deutsche Infrastrukturen einbezogen werden und eine Kooperation mit anderen europäischen Forschungseinrichtungen vorgesehen wird.

> **acatech empfiehlt,**

die Umsetzung der Nanoelektronik von der Forschung in die Produktion systematisch zu fördern.

1 EINLEITUNG

Mikroelektronik findet sich heute in allen Lebensbereichen wieder: von der allgegenwärtigen Kommunikationstechnik über Maschinen und Fahrzeuge bis hin zur medizinischen Anwendung im und am Körper. Mehr als 50 Prozent der Wertschöpfung in entsprechenden Produkten und Dienstleistungen gehen heute auf Elektroniksysteme zurück, Tendenz: steigend. Im Automotive-Bereich z. B. sind Elektronik und Elektrik Treiber von etwa 80 Prozent aller Innovationen.¹ Sie spielen eine nahezu unentbehrliche Rolle in einem modernen Fahrzeug – vom Komfort über die Sicherheit bis hin zu den Antrieben.

Der Industriestandort Deutschland und mithin der gesellschaftliche Wohlstand hängen in entscheidendem Maße davon ab, wie es gelingt, leistungsfähige, energieeffiziente und zuverlässige Elektroniksysteme als Grundlage für innovative und international wettbewerbsfähige Produkte zu entwickeln. Darüber hinaus versprechen nanoelektronische Produkte wesentliche Beiträge für die gesellschaftlichen Bedürfnisse an Energieeffizienz, Mobilität, Gesundheitsfürsorge und Umweltschutz zu leisten.

In vielen Anwendungsfeldern wird Nanoelektronik die mikroelektronischen Technologien von heute ergänzen und ersetzen. Tatsächlich stellt sich Nanoelektronik einerseits begrifflich als eine Fortsetzung der Mikroelektronik dar, d. h. als eine Kombination von elektronischen Bauelementen von immer kleineren Dimensionen (unterhalb von 100 nm) mit einer steigenden Integrationsdichte. Andererseits steht Nanoelektronik – unabhängig von Miniaturisierung – für ganz neuartige Ansätze, Herausforderungen und Lösungsstrategien, etwa im Rahmen molekularer Elektronik bzw. des Einsatzes neuer Materialklassen, neuartiger Bau-

elementkonzepte und der Fortführung des Moore'schen Gesetzes durch äquivalente Skalierung.² Aus diesem Grund hat die Projektgruppe den pragmatischen Ansatz gewählt, neue Technologien, die neue Anwendungsmöglichkeiten in der Elektronik erschließen und Strukturgrößen im Bereich von 1-100 nm verwenden, unter dem Begriff „Nanoelektronik“ zusammenzufassen, anstatt zunächst eine einheitliche allgemeingültige Definition zu fordern.

Nanoelektronik-Firmen sind wichtige Zulieferer der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-Industrie und nehmen eine Schlüsselrolle im übergreifenden Innovationsprozess ein, da sie die technischen Grundlagen vieler Innovationen in der IKT-Industrie bereitstellen. Somit spielen sie eine bedeutende Rolle für deren technologische Wettbewerbsfähigkeit.³ Auch in anderen Industrien, etwa im Bereich der Sensortechnik, kann Nanoelektronik zentrale Innovationsimpulse setzen, darunter in der Automobilindustrie, der Umwelttechnik oder der Medizintechnik.⁴ Es zeigt sich darüber hinaus, dass Nanoelektronik in zahlreichen unterschiedlichen Disziplinen erforscht wird. Nanoelektronik ist dabei im Begriff, sich als eigenständiger interdisziplinärer Wissenschaftszweig zu etablieren.⁵

In Europa hat sich der Standort Dresden („Silicon Saxony“) als wichtigste Produktionsregion für die Halbleitertechnologie entwickelt. Insgesamt arbeiten hier rund 35.000 Menschen in über 200 Unternehmen der kommerziellen Mikro- und Nanoelektronik.⁶ Jedoch sind innerhalb Deutschlands weitere Regionen wie z. B. Berlin, München, Aachen/Jülich aktiv, in denen verstärkt Unternehmen der Mikroelektronik angesiedelt sind.

¹ VDE/ZVEI 2010.

² Eine weitere Spezifizierung der Nanoelektronik (z. B. Beschränkung auf Bauelemente mit eindeutig quantenmechanischem Funktionsprinzip o. Ä.) erscheint nicht sinnvoll, zumal sie auch Bauelemente einschließen würde, die seit Jahrzehnten in Verwendung sind (beispielsweise Laserdioden, SQIDS etc.) und üblicherweise nicht zur Nanoelektronik gezählt werden.

³ Thielmann et al. 2009.

⁴ Roetzer 2010.

⁵ Islam 2009.

⁶ vgl. SMWK2009; Angaben von Silicon Saxony bei www.silicon-saxony.com.

Dem gegenüber steht die zunehmende Verlagerung von Produktionsstandorten in die Nähe zukünftiger Zielmärkte nach Asien (Thielmann et al. 2009). Dabei findet nicht nur eine räumliche Verschiebung, sondern teilweise auch die Umsetzung neuer Geschäftsmodelle wie etwa Lohnfertigung statt. Standortvorteile spielen bei den Verlagerungen eine wichtige Rolle. Asiatische Länder locken Investoren beispielsweise mit Steuererleichterung an. Unternehmen und Unternehmensteile in der Europäischen Union müssen hier deutliche Nachteile in Kauf nehmen.

DEFINITIONSANSÄTZE DER NANOELEKTRONIK

Für den Begriff der Nanoelektronik existiert ähnlich wie für die Nanotechnologie⁷ international noch keine allgemein anerkannte Definition. Die National Nanotechnology Initiative (NNI, USA) schreibt zum Begriff „Nanoelectronics“:

„Nanoelectronics, the application of nanotechnology to make electronic circuits, offers revolutionary alternatives to the component technology used in existing computer circuits“, bzw.: „Nanotechnology is the understanding and control of matter at dimensions between approximately 1 and 100 nanometers, where unique phenomena enable novel applications. Encompassing nanoscale science, engineering, and technology, nanotechnology involves imaging, measuring, modeling, and manipulating matter at this length scale.“⁸

Die Europäische Kommission umschreibt den Begriff „Nanoelektronik“ wie folgt⁹: „Nanoelectronics can be defined as electronics on the deep submicron level – that is with circuit dimensions of less than 0.1 micron. The term covers both the manufacturing of ever-smaller and hence higher performance of existing semiconductor devices and advances in molecular electronics that involve exploiting single atoms or molecules.“

1.1 DIE AKTUELLE SITUATION DER NANOELEKTRONIK: BEDARF AN FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSANSTRENGUNGEN

Während der vergangenen 40 Jahre folgte die Entwicklung der Mikroelektronik dem sogenannten Moore'schen Gesetz, welches vorhersagt, dass sich die Bauelementedichte und die Leistungsfähigkeit monolithisch integrierter Siliziumschaltkreise in zeitlichen Abständen von 18 Monaten jeweils verdoppeln.¹⁰ Während dieser 40 Jahre verringerten sich die Strukturgrößen von Transistoren von 10 Mikrometer auf etwa 30 Nanometer. In den letzten 25 Jahren entwickelte sich die siliziumbasierte komplementäre Metall-Oxid-Halbleitertechnologie (CMOS) zur Mainstreamtechnologie für digitale, analoge und Mixed-Signal-Anwendungen.

⁷ Vgl. DEST 2006.

⁸ NNI 2007.

⁹ High Level Group of the European Commission 2004.

¹⁰ Thompson 2006.

1.1.1 FÖRDERUNG DER NANOELEKTRONIK IM INTERNATIONALEN VERGLEICH

Weltweit gibt es sehr starke öffentliche Förderung im Bereich der Nanotechnologie.¹¹ Diese beinhaltet auch die Förderung der Nanoelektronik. Dabei verfolgen die einzelnen Staaten unterschiedliche Förderstrategien. Asiatische Länder wie China, Südkorea und Taiwan zeigen hierbei mit den etablierten Industrienationen vergleichbare Aufwendungen. Noch deutlicher werden deren Anstrengungen, wenn ihre Ausgaben mit der lokalen Kaufkraft normiert werden. Hier liegt China bereits an dritter Stelle nach den USA und Japan und vor Deutschland.¹²

Auch in Europa gab und gibt es starkes öffentliches Interesse und Förderung für die Nanotechnologie. Die Europäische Union fördert Forschung und technologische Entwicklungen in zeitlich begrenzten Forschungsrahmenprogrammen (FP). Das FP6 beinhaltete eine explizite Förderung der Nanotechnologie und Nanoelektronik in Höhe von 1,4 Mrd. Euro.¹³ Ausgehend von dem Bericht der „High Level Group“¹⁴ wurde das „European Nanoelectronics Initiative Advisory Council“ (ENIAC)¹⁵ als eine europäische Technologieplattform gegründet. Aufgabe des ENIAC ist die Erstellung einer strategischen Forschungsagenda (SRA), um sowohl öffentliche als auch private Investitionen zu steuern und zu motivieren.

Für das FP7 vollzog die ENIAC einige Änderungen in der Organisationsstruktur sowohl für die SRA als auch für die Industriekooperation. Die ENIAC Joint Technology Initiative (JTI) für Nanoelektronik soll im Wesentlichen die Ergebnisse der SRA in konkrete anwendungsorientierte Projekte mit

hoher Beteiligung von kleineren und mittleren Unternehmen (KMU) umsetzen. Das Budget dieser JTI für den Zeitraum 2008-2017 beträgt 3 Mrd. Euro, von denen 1,7 Mrd. aus Sachleistungen aus dem privaten Sektor bestehen. Die restlichen Finanzmittel werden überwiegend von den Mitgliedsstaaten und der EU gestellt.¹⁶

Hierbei sollen längere Partnerschaften motiviert und Synergien mit anderen europäischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten genutzt werden. Des Weiteren fungiert die ENIAC JTI als Schnittstelle zwischen der öffentlichen Verwaltung (EU, Mitgliedsstaaten) und einer neu gegründeten Industrievereinigung (AENEAS), in der die Akteure der Forschung und Entwicklung (KMU, Großunternehmen und öffentliche Forschungseinrichtungen) organisiert sind.

Weitere geförderte Forschungsinitiativen stellen EUREKA Programme dar. Für diese gibt es keine speziellen Themenvorgaben und daher können sie nicht unmittelbar der Nanoelektronik zugeordnet werden. Mit MEDEA+¹⁷ existiert aber seit 2001 ein erfolgreiches EUREKA Programm mit mikroelektronischer Themenausrichtung. Im Jahr 2008 wurde das MEDEA+ Programm vom CATRENE Programm abgelöst; dieses EUREKA Programm beinhaltet die Anwendungs- und Technologieentwicklung der Nanoelektronik.¹⁸

Zu beachten ist, dass in den einzelnen Mitgliedsstaaten zusätzliche Programme und Förderungen existieren und traditionell eine große Bedeutung haben. Allerdings sind diese Programme im Vergleich zum Förderbudget in Deutschland in anderen Staaten der EU, wie Frankreich (ca. – 50 Prozent) und England (ca. – 70 Prozent), finanziell deutlich schlechter ausgestattet.¹⁹

¹¹ Stark 2007.

¹² Lux 2007.

¹³ Cordis 2009.

¹⁴ High Level Group of the European Commission 2004.

¹⁵ <http://www.eniac.eu>.

¹⁶ <http://www.eniac.eu/web/JU/Key%20figures.php>.

¹⁷ <http://www.medeaplus.org>.

¹⁸ <http://www.catrene.org>.

¹⁹ Stark 2007.

Des Weiteren wurde im Jahr 2010 ein Diskussionsprozess innerhalb der Europäischen Kommission gestartet, bei dem die Bedeutung von sogenannten Key Enabling Technologies (Schlüsseltechnologien) analysiert wird. Dazu wurden als Schlüsseltechnologie auch die Mikro-/Nanotechnologie ausgewählt. Sowohl Vertreter der Großindustrie, der KMU als auch führender Forschungseinrichtungen in Europa haben bisher die strategische Bedeutung der Mikro- und Nanoelektronik als Schlüsseltechnologie zur weiteren Entwicklung der Volkswirtschaft herausgearbeitet.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert die Nanotechnologie seit 2001 innerhalb der Hightech-Strategie „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“²⁰. Eine mikro- bzw. nanoelektronische Komponente ist mit der Leitinnovation „NanoFab“ mit einem Fördervolumen von 323 Mio. Euro enthalten. Gegenstand dieser Leitinnovation sind die Fertigungsverfahren der modernen Nanoelektronik. Ebenfalls auf die Fertigungskompetenz zielt seit 2005 die Leitinnovation „NanoMikroChem“ mit einem Volumen von 31 Mio. Euro. Bis einschließlich 2006 wurden innerhalb des Förderprogramms „IT-Forschung 2006“ durch das Förderkonzept „Nanoelektronik“ Projekte mit einem Gesamtvolumen von 396 Mio. gefördert. Konkret listet der Förderkatalog des BMBF 775 laufende Projekte (Stand 01/2011) mit einem „Nano“-Bezug auf. Dies ist eine Abnahme um 20 Prozent, verglichen mit der Anzahl der laufenden Projekte im Dezember 2008. Hingegen vervierfachte sich die Anzahl der Projekte, die sich der Nanoelektronik zuordnen lassen, auf 40. Darüber hinaus gibt es in den einzelnen Bundesländern Förderprojekte mit Bezug zur Nanoelektronik. Beispielsweise genannt sei der Forschungsverbund für Nanoelektronik (FORNEL) der Bayerischen Forschungsförderung (2004-2007).

Von hoher Bedeutung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie ist das Vermögen, neue Forschungsergebnisse aus Universitäten und Forschungszentren in neue Produkte umzusetzen. Ein solcher Wissenstransfer erfordert Finanzmittel, aber erst hierdurch entsteht aus der Forschung Wertschöpfung, die den gesellschaftlichen Wohlstand sichern kann. Vergleicht man nun die Finanzmittel für den Bereich der Nanoelektronik,²¹ ist auffällig, dass trotz ähnlicher öffentlicher Förderung in Europa und den USA in der Summe mehr Geld in den USA durch private Investitionen in den Sektor fließt. Japan kann sogar höhere Gesamtinvestitionen aufweisen, obwohl die öffentlichen Mittel deutlich unter denen Europas liegen. Noch deutlicher wird der Vergleich bei der Betrachtung des eingesetzten Wagniskapitals.²² Nur 3,5 Prozent des weltweit investierten Gesamtvolumens von ca. 900 Mio. Euro fließen nach Europa. Da ca. 45 Prozent des Wagniskapitals im Bereich Halbleiter bzw. Elektronik investiert werden, erschließt sich hier ein enormes Potenzial für die Nanoelektronik. Einen weiteren Leistungsindikator stellen die Patentanmeldungen im Bereich der Nanotechnologie²³ dar, wobei auch hier Europa nur 30 Prozent der Anmeldungen der USA vorweisen kann. Für die Mikro-/Nanoelektronik stellt sich die Lage etwas besser dar. Der Anteil europäischer Anmeldungen bei den Patentämtern der USA, Japans und Europas stieg bis 2003 auf 25 Prozent und liegt damit auf dem dritten Platz hinter USA (30 Prozent) und Asien (45 Prozent).²⁴

Bei der Bewertung dieser Leistungsindikatoren müssen aber die unterschiedlichen Patentsysteme sowie die unterschiedlichen Rahmenbedingungen zur Unternehmensfinanzierung in Europa und den USA berücksichtigt werden. Daher ist es sinnvoll, auch noch andere Leistungsindikatoren

²⁰ BMBF 2006.

²¹ Crawley 2007.

²² Stark 2007.

²³ Stark 2007.

²⁴ Eine ausführliche Analyse der Patentanmeldungen im Bereich der Mikro-Nanoelektronik findet sich in ZEWTNO 2010.

einzu beziehen. Die Anzahl und Größe der Unternehmen, die im Bereich der Nanoelektronik aktiv sind, wären beispielsweise solche Indikatoren.

1.1.2 LAGE DER NANOELEKTRONIK IN DEUTSCHLAND

Deutschland besitzt nicht nur in der Forschung, sondern auch in der Kommerzialisierung der Halbleitertechnologie eine lange Tradition der Halbleitertechnologie. Bereits in den 1950er Jahren entwickelte Siemens ein Herstellungsverfahren für Reinst-Silizium, nach dem auch heute noch ca. 80 Prozent der weltweiten Jahresproduktion hergestellt wird. Leistungsgleichrichter waren die ersten Produkte, die hiervon profitieren konnten.²⁵ In den 1980er Jahren gab es mehrere Projekte, so beispielsweise das „Mega“-Projekt.²⁶ Bei diesen Projekten wurde bereits in europäischer Kooperation gearbeitet, welche schließlich in das JESSi (Joint European Submicron Silicon) Projekt und weitere Folgeprojekte mündeten.

Aber auch abseits der Siliziumtechnologie hat sich in Deutschland eine „Nanoindustrie“ etabliert. Das VDI Technologiezentrum erstellt regelmäßig eine Übersicht der Aktivitäten auf dem Gebiet der Nanotechnologie in Deutschland. Die „Nanomap“²⁷ führt 1.790 Einträge auf (Stand Januar 2011), von denen 725 auf KMU, 236 auf Großunternehmen, sowie 584 auf Universitäten und Forschungseinrichtungen entfallen. Dies stellt eine enorme Zunahme (+48 Prozent) verglichen mit dem Stand November 2008 dar. Von den 1.790 Einträgen der Nanotechnologie sind 195 der Nanoelektronik zugeordnet; damit ist die Nano-

elektronik auf dem gleichen Stand wie im November 2008. Die Anzahl der Universitäts- und Forschungsinstitute hat sich in diesem Bereich erhöht (+24 Prozent). Dem gegenüber steht eine deutliche Abnahme bei KMU und größeren Firmen (-40 Prozent).

Daneben haben sich Netzwerke mit teilweise starker industrieller Beteiligung etabliert, die sich der Nanotechnologie zuordnen. Eine Übersicht findet sich auf der Seite der „Initiative Kompetenznetze Deutschland“ des BMWi.²⁸ Beispielshaft seien der „Strategiekreis Nanowelten“²⁹ und der „Cluster Nanotechnologie“³⁰ genannt.³¹

1.1.3 ANDERE STUDIEN ZUM THEMA

Es liegen bereits zahlreiche Studien vor, die sich – mit unterschiedlicher Ausrichtung – mit der Entwicklung der Nanoelektronik auseinandersetzen. Viele wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit Entwicklungstrends im IKT-Bereich befassen, berufen sich auf die internationale Technologie-Roadmap für Halbleiter (ITRS, International Technology Roadmap for Semiconductors), die in diesem Bereich seit 1999 existiert und jährlich aktualisiert wird.³² Seit 2005 befasst sich die ITRS auch mit nanoskaligen Technologien in Ergänzung zur etablierten CMOS-Technologie (CMOS – complementary metal oxide semiconductors).³³ Die Publikationen, die sich auf diese Roadmap berufen, tragen die dortigen Ideen weiter und vertiefen ausgewählte Aspekte. Aber auch in weiteren Artikeln werden sich abzeichnende Entwicklungen diskutiert.³⁴ Der internationale Verband

²⁵ Schaffer 2005.

²⁶ Ruge 1989.

²⁷ <http://www.nano-map.de>.

²⁸ <http://www.kompetenznetze.de>.

²⁹ <http://www.pub-471.bi.fraunhofer.de>.

³⁰ <http://www.nanoinitiative-bayern.de>.

³¹ Eine ausführlichere Betrachtung zur Geschichte der Mikroelektronik, der internationalen Förderprogramme und der aktuellen Situation in Deutschland findet sich in Friederich/Schmitt-Landsiedel 2011.

³² Cerofolini 2005a.

³³ Tolfree 2009.

³⁴ Wang 2002; Cerofolini 2005b; Wang 2008.

IEEE veröffentlichte in einem Band der Reihe „Proceedings of the IEEE“ einen aktuellen Überblick über die Forschung an nanoelektronischen Informationstechnologien.³⁵

Im institutionellen Umfeld sind zahlreiche Roadmaps zu nanotechnologischen Themen erstellt worden. Eine Übersicht hierzu liefert Smith.³⁶ Für den Bereich der Nanoelektronik sind im Jahr 2001, 2003 und 2009 Roadmaps mit Fokus auf Gesamteuropa entstanden.³⁷ Zudem existiert eine „Vision 2020 nanoelectronic“ der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2004, die ein Jahr später zur Formulierung einer europaweiten Forschungsagenda des „Europäischen Beratungsgremiums zur Nanoelektronikinitiative“ (ENIAC) führte.³⁸

In der Mitteilung „An die Zukunft denken: Entwicklung einer gemeinsamen EU-Strategie für Schlüsseltechnologien“ der Europäischen Kommission wird eine wirksame Förderung der Schlüsseltechnologien in der EU gefordert.³⁹ Es wird eine deutliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit der EU auf den Gebieten Forschung und Innovation angemahnt, damit die Pläne der EU, weltweit zum Spitzenstandort für Unternehmertum und Innovation zu werden, verwirklicht werden können. Zur Erzielung einer effizienten industriellen Umsetzung von Schlüsseltechnologien solle die EU in folgenden politischen Bereichen tätig werden: Die öffentliche Förderung soll Gewicht auf Schlüsseltechnologien und den Technologietransfer legen, wobei die Elektronik ausdrücklich als Basistechnologie genannt wird. Der Zugang kleiner und mittlerer Unternehmen zu den in Europa entwickelten Schlüsseltechnologien soll verbessert werden. Eine zielgerichtete staatliche Beihilfe und Auftragsvergabe soll für groß

angelegte, marktnahe Innovationen und damit als Anreiz für neu entstehende Märkte im Bereich der Schlüsseltechnologien genutzt werden. Aufgabe der Handelspolitik sei es, sicherzustellen, dass die durch direkte oder indirekte Subventionen verursachten potenziellen Marktverzerrungen in Drittländern wirksam erkannt und beseitigt werden. Investitionen in Hochtechnologieunternehmen in Forschung, Entwicklung, Produktion und Infrastruktur sollen gefördert werden. Den Bereichen Qualifikationen, Hochschulbildung und Ausbildung soll besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Das Beratungsunternehmen Frost & Sullivan hat in der Reihe „Technical Insights“ in den letzten Jahren drei Analysen zur Entwicklung der Nanoelektronik herausgegeben, zuletzt Anfang des Jahres 2010 in Form einer Roadmap zu den aufkommenden Anwendungsfeldern verschiedener Nanomaterialklassen.⁴⁰ Diese Studien zeichnen sich in Bezug auf die Autoren und den Geltungsbereich durch einen globalen Ansatz aus.

Ebenso existieren Studien mit regionalem Fokus.⁴¹ So wurde 2009 eine Studie des sächsischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst mit Handlungsempfehlungen für die sächsische Landesregierung für den Bereich Mikro- und Nanoelektronik erstellt. Zur Stärkung des Wissenschaftsstandortes wurde mit Mitteln des Bundes und des Freistaats Sachsen ein Forschungszentrum für die 3D-Integration gebildet (Fraunhofer IZM – ASSID). Des Weiteren wurde eine Kommission gebildet, die die weitere strategische Entwicklung der Mikroelektronik in Sachsen analysiert und Empfehlungen bis spätestens 2011 ableiten soll (KOMINAS-Kommission Mikro-Nano-Elektronik in Sachsen).

³⁵ IEEE 2010.

³⁶ Smith 2007.

³⁷ Compano 2001; Medea 2003; Borel 2009.

³⁸ EC 2004; ENIAC 2005.

³⁹ KOM 2009, S. 4.

⁴⁰ Frost 2003; Frost 2008; Frost 2010.

⁴¹ VDI-TZ 2006; SMWK 2009.

Fachverbände wie VDE, VDI und ZVEI veröffentlichen in regelmäßigen Abständen Positionspapiere zur aktuellen Lage der Mikroelektronik sowie zu einzelnen Anwendungsfeldern.⁴² Der VDE – Verband der Elektrotechnik Elektronik Informations-technik – und der ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie – kommen im Berliner Protokoll des Expertenpanels 2010 zu dem Ergebnis,⁴³ dass es ratsam sei, die Entwicklung der Mikro- und Nanoelektronik in der EU durch politische Maßnahmen umgehend zu fördern, da gegenwärtig globale Wettbewerbsverzerrungen für diese wichtigen Schlüsseltechnologien bestehen. Diese Verzerrungen werden durch unterschiedliche Subventions- und Währungsregime verursacht, motiviert durch die Tatsache, dass diese Technologien von aufstrebenden Volkswirtschaften als sehr bedeutsam für deren künftige wirtschaftliche Entwicklung angesehen werden. Das Expertenpanel fordert, Maßnahmen zu treffen, um in den Bereichen der Mikroelektronik, in denen ein europäischer Vorsprung besteht, etwa in der Automobil-, Energieeffizienz-, Sicherheits- und Industrieelektronik, diesen Vorsprung zu erhalten. Bereiche, in denen die europäische Mikroelektronik sich in einer guten Position befindet, etwa im Bereich der Mobilkommunikation und der intelligenten Energieversorgung, sollen gefördert werden. Zudem wird ein neuer Ansatz zur Schwerpunktforschung und -entwicklung gefordert.⁴⁴

acatech selbst hat zeitgleich mit der vorliegenden Stellungnahme einen Projektbericht zur Organischen Elektronik in Deutschland erstellt⁴⁵. Hier wird betont, wie der Ersatz anorganischer durch organische Materialien in elektronischen Bauteilen grundlegende Vorteile in ökonomischer und ökologischer Hinsicht, aber auch hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten und des Designs bieten kann. Allerdings bedarf es zu einer konkurrenzfähigen, effizienten und kostengünstigen Realisierung noch erheblicher Forschungsanstrengungen im Hinblick auf das theoretische Verständnis, wirksame Materialien und kontrollierte Prozesstechnik, also im Hinblick auf die gesamte Wertschöpfungskette.

1.2 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Bislang gibt es kaum Arbeiten mit nationalem Fokus, die anwendungsgeleitet Handlungsempfehlungen für das deutsche industrielle Umfeld formulieren, so wie es in diesem Projekt angestrebt wurde. Ziel dieses acatech Projekts ist es daher, das Potenzial nanoelektronischer Entwicklungen und anwendungsorientierter Forschung in Deutschland zu bewerten, Chancen, die sich aus der Nanoelektronik zur Effizienzsteigerung und zur Entwicklung neuer Technologien ergeben, zu erörtern und neue Entwicklungen und Systemkonzepte mit einem weit in die Zukunft (15 bis 20 Jahre) greifenden Forschungs- und Entwicklungshorizont zu diskutieren. Der gegenwärtige Forschungsstand (national und international) und der Forschungsbedarf in Wissenschaft und Wirtschaft sollen aufgezeigt werden sowie die technischen und experimentellen Herausforderungen für die Technologie zukünftiger Entwicklungen. Die Problematik von Unternehmensgründungen im Bereich der Nanoelektronik in Deutschland und die Entwicklung geeigneter öffentlicher und privater Förderstrukturen für den effizienten Technologietransfer sind zu diskutieren. In dem Projekt werden Handlungsimplicationen und Empfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft erarbeitet.

Im Folgenden wird der Forschungs- und Entwicklungsbedarf der Nanoelektronik, der sich aus einem zuvor identifizierten Marktpotenzial ableitet, zusammengeführt und einer Bewertung unterzogen. Bewertungskriterium ist hierbei die potenziell innovationsstimulierende und -treibende Bedeutung einer betrachteten nanoelektronischen Entwicklung für den Standort Deutschland und deren Potenzial als Antwort auf gesellschaftliche Probleme. Die abgefragten Anforderungen sollen dabei helfen, die zukünftige Leistungsfähigkeit Deutschlands auf dem Gebiet der Nanoelektronik zu sichern und ihre Bedeutung als Impulsgeber für weite Bereiche der Wirtschaft zu bewahren.

⁴² VDE 2008; VDE 2009; VDE/ZVEI 2010.

⁴³ VDE/ZVEI 2010.

⁴⁴ VDE/ZVEI 2010.

⁴⁵ acatech 2011.

2 METHODIK

2.1 ENTWICKLUNG DER FRAGESTELLUNGEN

Bei ihrer konstituierenden Sitzung im Juli 2008 diskutierte die Projektgruppe die Bedeutung der Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik für den Standort Deutschland und erarbeitete einen Katalog von Fragestellungen, der im weiteren Verlauf der Arbeit der Projektgruppe als Grundlage dienen sollte. Dabei wurde eine Einteilung in eine technisch-wissenschaftliche und eine förderungspolitische Implikation vorgenommen:

- Technisch-wissenschaftliche Fragestellungen:
 - Welche Anforderungen bestehen hinsichtlich künftiger informations- und kommunikationstechnischer Systeme?
 - Welche Bauelement-, Schaltungs- und Systemkonzepte der Nanoelektronik erfüllen diese Anforderungen?
 - Wie ist das Potenzial nanoelektronischer Entwicklungen zu beschreiben und zu bewerten?
 - Welche Chancen ergeben sich aus der Nanoelektronik zur Effizienzsteigerung und zur Entwicklung neuer Technologien?
 - Welche Zielrichtungen auf dem Gebiet der Nanoelektronik sind für die deutsche Industrie besonders attraktiv?
- Förderungspolitische Aufgaben:
 - Welche Anstrengungen in Forschung und Entwicklung sind erforderlich?
 - Welche Beiträge können auf diesem Gebiet nur von großen Unternehmen erbracht werden?
 - In welchen Bereichen kann die mittelständische Industrie und in welchen können Start-up-Unternehmen erfolgreiche Beiträge leisten?
 - Gibt es schon Beispiele von erfolgreichen Start-up-Unternehmen in Rahmen der Nanotechnologie und Nanoelektronik?
 - Effizienter Technologietransfer von der nanoelektronischen Grundlagenforschung zur industriellen Fertigung moderner nanoelektronischer Bauelemente und darauf basierender I&K-technischer Systeme.
 - Wie kann die Zusammenarbeit zwischen Industrie, Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen gefördert werden?
 - Ist die Fokussierung auf die Förderung der „deutschen“ Industrie angesichts der aktuell mangelnden Standorttreue problematisch?
 - Benötigt die Projektgruppe zusätzliche Kompetenz in Bezug auf die Diskussion förderpolitischer Fragestellungen? Eine sorgfältige Bestandsaufnahme der förderpolitischen Situation in Deutschland ist erforderlich.
 - Bestandsaufnahme von Unternehmen, die in Deutschland auf dem Gebiet der Nanoelektronik in Forschung und Entwicklung aktiv sind.
 - Können förderpolitische Maßnahmen zu einer gezielteren und besser auf die Anforderungen der Zukunft ausgerichteten Industrieforschung führen? Passt staatliche Steuerung von industrieller F&E in unsere Kultur? (Galileo als Modell?)
 - Lässt sich die Interaktion von Forschungseinrichtungen und Industrie verbessern? Wie lassen sich Forschungseinrichtungen und Industrie in diesem Feld koppeln?
 - Vision 2025 für eine erfolgreiche Kooperation von Forschung und Industrie.

2.2 SONDIERUNG DES THEMENFELDES

Ergänzend zu Treffen der Projektgruppe mit einzelnen Vorträgen wurde im April 2009 ein von der DFG unterstütztes Rundgespräch mit Teilnehmern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Forschungsförderorganisationen durchgeführt. Referenten lieferten in Impulsreferaten zu fünf Themenblöcken die Grundlage für die anschließende Diskussion der Teilnehmer. Die Referenten waren folgende Mitglieder der Projektgruppe: Nahziele: Wolfgang Arden, Fernziele: Karl Hess, Technische Herausforderungen: Paolo Lugli, Unternehmensgründungen: Robert Weigel, Förderstrukturen: Michael Lentze.⁴⁶ Die Ergebnisse des Rundgesprächs führten zu einem gemeinsamen Verständnis der Problematiken innerhalb der Projektgruppe und bildeten die Grundlage und den Ausgangspunkt der weiteren Projektarbeit in den Bereichen Nahziele und Fernziele.

Methodisch wurde eine Einteilung in „Nahziele“ und „Fernziele“ vorgenommen. Im Themenbereich Nahziele wurden insbesondere die industrienähe und die anwendungsorientierte Forschung mit einem Zeithorizont von drei bis acht Jahren untersucht. Im Themenbereich Fernziele wurden insbesondere neuartige Entwicklungen der Nanoelektronik mit einem weiter in die Zukunft ausgreifenden Forschungs- und Entwicklungshorizont diskutiert. Zu den künftigen, neuartigen Bauelemente- und Systementwicklungen gehören z. B. die Spintronik oder Spinelektronik, molekulare Elektronik, Kohlenstoffnanoröhrchen, Quantencomputer und der gesamte Bereich der Quanteninformationstheorie. Dabei stellten sich die Übergänge zwischen diesen Themenbereichen fließend dar.

2.3 METHODIK THEMENBEREICH NAHZIELE

2.3.1 EXPERTENGESPRÄCHE

Durch sieben Interviews mit ausgewählten Experten aus den Fachgebieten Mikro-/Nanosystemtechnik, Leistungsbaulemente und -elektronik, Medizinelektronik, Kommunikationselektronik sowie Low-Power- und High-Performance CMOS Technologie wurden die Erkenntnisse der vorangegangenen Treffen der Projektgruppe hinsichtlich der Nahziele erweitert. Der Fragebogen wurde erstellt von TU München/Lehrstuhl für Technische Elektronik (TUM-LTE) und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), die Interviews wurden von TUM-LTE geführt. Die Interviews basierten auf einer einheitlichen Befragungsstruktur unter Verwendung eines Leitfadens. Bei der Auswahl der Gesprächspartner wurde auf ein ausgeglichenes Verhältnis aus Industrie, Mittelstand sowie Hochschulen bzw. Forschungseinrichtungen geachtet. Neben den Vorarbeiten der Projektgruppe lieferten die Expertengespräche wichtige Informationen für die Gestaltung eines Fragebogens für die anschließende Online-Befragung.

2.3.2 ONLINE-BEFragung

Im Rahmen einer Online-Befragung (Durchführung: Fh-ISI) mit fachlicher Beratung des TUM-LTE im Sommer 2010 unter 109 Experten auf dem Gebiet der Nanoelektronik wurden die Anforderungen für industrienähe und anwendungsorientierte Nanoelektronik-Forschung herausgearbeitet. Die Teilnehmer kamen zu 48 Prozent aus dem Bereich der Wissenschaft und zu weiteren 45 Prozent aus Industrieunternehmen mit mehr als 500 Mitarbeitern. Dabei ordnete sich der überwiegende Teil der Befragten (66 Prozent) der Branche Elektronik- und Elektrotechnikindustrie zu.⁴⁷ Dem

⁴⁶ Russer 2011 enthält eine ausführliche Zusammenfassung der Impulsreferate sowie der daran anschließenden Diskussion.

⁴⁷ Mehrfachnennungen waren gestattet.

nächstkleineren Bereich mit 8 Prozent ordneten sich Befragte zu, die entweder im Maschinenbau, in der chemischen Industrie oder der metallverarbeitenden Industrie tätig waren. Weitere Industriebereiche der Teilnehmer waren die Medizintechnik (6 Prozent), die Automobil- und Luftfahrtindustrie (5 Prozent), die Umwelt- und Sicherheitstechnik (4 Prozent) sowie der Bereich der Energieversorgung (2 Prozent). Ein Anteil von 9 Prozent konnte sich keinem der gelisteten Sektoren zuordnen.

Der erste Teil der Befragung thematisierte Materialien und Produktionsverfahren sowie Systemkomponenten und Anwendungsgebiete. Die Befragten sollten in Abhängigkeit von ihrer Expertise die Bereiche auswählen, die sie beantworten wollten (siehe Abb. 1).

Abb. 1: Screenshot aus dem ersten Teil der Online-Befragung, der eine Frage zu Anwendungsgebieten darstellt



acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



Fraunhofer
ISI



TUM
Technische Universität München

43%

Welche Entwicklungsziele der Nanoelektronik sollten in den einzelnen industriellen Bereichen bzw. Beispielanwendungen vornehmlich verfolgt werden?
Wählen Sie bitte jeweils bis zu zwei Bereiche aus.

	Leistungs- fähigkeit/ Miniaturi- sierung	Fehlertoleranz/ Ausfall- sicherheit	Funktions- integration / neue Funktionen	Energie- verbrauch/ Wirkungsgrad	Produktions- kosten	Kompati- bilität
Medizintechnik	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Aktive Implantate (z.B. Retina-Implantat)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Weitere aktive Medizinprodukte (z.B. Hörgerät, Prothese)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Überwachung von Körperfunktionen zu Therapie und Diagnose	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Umwelt- und Sicherheitstechnik	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Luftreinheitssensoren	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Gasdetektoren	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Gewässeranalyse	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Ein zweiter Teil folgte einem thesenbasierten Vorgehen. Aus den Expertengesprächen waren Thesen abgeleitet worden, die nach Diskussion in der Projektgruppe Eingang in die Befragung fanden. Die Befragten wurden in der Online-Befragung gebeten, zu äußern, inwieweit sie den genannten Thesen zustimmen. Aus den Ergebnissen wurden anschließend durch die Projektgruppe Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2.3.3 ROADMAP-WORKSHOP

Ausgehend von den Befragungsergebnissen wurde vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI ein Workshopkonzept zur Erstellung einer Roadmap erarbeitet. Der Bezugsrahmen hierfür war wiederum die Nanoelektronik-Industrie in Deutschland, für die die Entwicklungen im Bereich der Nanoelektronik in den nächsten acht Jahren und darüber hinaus gemeinsam erfasst und zeitlich angeordnet wurden. Der Kreis der Teilnehmer deckte zahlreiche Industriesektoren von der Materialherstellung bis hin zum IDM⁴⁸ ab.

Aus der erarbeiteten Roadmap gehen die Abhängigkeitsverhältnisse der einzelnen Themengebiete und damit deren Relevanz für die Produkte der deutschen Wirtschaft hervor. Daraus wurden weitere Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2.4 METHODIK THEMENBEREICH FERNZIELE

Anhand von Literaturstudien, Referaten und Diskussionen in der Projektgruppe wurde dieses Feld analysiert. Darüber hinaus wurde im September 2010 an der Technischen Universität München ein „International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics“ als Kooperation der Projektgruppe mit dem Fh-EMFT abgehalten, in dem von internationalen Wissenschaftlern aktuelle und hoch innovative Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Nanoelektronik behandelt wurden (Programm siehe Tabelle 1). Am Ende des Workshops fand eine Podiumsdiskussion statt.⁴⁹

Ausgehend von den Fragestellungen der Projektgruppe und auf der Basis der Referate und Diskussionen wurden Empfehlungen für diesen Themenbereich abgeleitet.

⁴⁸ Integrated Device Manufacturer: Entwickler von integrierten Schaltkreisen mit eigener Fertigung.

⁴⁹ Glesner et al. 2011.

Tabelle 1: Vorträge zum Symposium

VORTRAGENDE(R)	INSTITUTION/ FIRMA	TITEL	THEMENGEBIET
Christoph Kutter	Infineon Technologies AG	System on Chip Integration and System in Package Integration for mobile phone applications	Siliziumtechnologien
Simon Deleonibus	CEA-LETI, Grenoble	Silicon nanoelectronics: challenges and opportunities	Siliziumtechnologien
Marc van Rossum	IMEC, Leuven	Novel materials for CMOS-based nanoelectronics systems: stretching Moore's law?	Siliziumtechnologien
Gerhard Abstreiter	TU München	III-V based hetero-nanowires	Bauelemente auf Basis von III-V-Halbleitern
Dimitris Pavlidis	TU Darmstadt	Nitride epitaxy and nanodevice technologies	Bauelemente auf Basis von III-V-Halbleitern
Hagen Klauk	MPI Stuttgart	Fabrication and characteristics of organic nanoscale transistors	Organische Materialien und Bauelemente
David Müller	Merck KGaA, Darmstadt	Materials for printed electronics	Organische Materialien und Bauelemente
Karl Hahn	BASF SE, Ludwigshafen	Materials for high efficient organic LED	Organische Materialien und Bauelemente
Elisa Molinari	University of Modena-Reggio Emilia	Designing graphene nano/opto-electronics	Kohlenstoffbasierte Materialien und Bauelemente
Heinrich Kurz	AMO GmbH, Aachen	Carbon electronics: The hype and hope of graphene	Kohlenstoffbasierte Materialien und Bauelemente
Yasuhiko Arakawa	University of Tokyo	Quantum dot and photonic crystal for advanced light sources	Optische Bauelemente
Constance Chang-Hasnain	University of California, Berkeley	Nanolaser on silicon substrate	Optische Bauelemente
Heike Riel	IBM Zurich	Towards ultimate scaling: semiconducting nanowires and molecular electronics	Bauelemente auf Basis neuartiger physikalischer Prinzipien
Rudolf Gross	WMI	Solid state nanostructures for quantum electronics	Bauelemente auf Basis neuartiger physikalischer Prinzipien
Wolfgang Porod	Notre Dame University	Nanomagnetics for logic	Bauelemente auf Basis neuartiger physikalischer Prinzipien
Khaled Karrai	Attocube Systems	Ultra-compact long-range interferometric displacement sensing	Anwendungen
Oliver Hayden	Siemens Erlangen	Magnetic flow cytometry	Anwendungen
Stefan Harrer	IBM Yorktown	The DNA-Transistor: nanotechnology for DNA-sequencing	Anwendungen
Gerhard Mohr	Fraunhofer EMFT, München	Fluorescent nanosensors for application in medical research and biotechnology	Anwendungen

3 ERGEBNISSE

3.1 NAHZIELE

3.1.1 ERGEBNISSE ONLINE-BEFragung UND ROAD-MAP-WORKSHOP

Unter sechs verschiedenen Technologiebereichen, darunter die skalierte Mikroelektronik („More Moore“) und der Bereich neuer Bauelemente („Beyond CMOS“), wurden im Rahmen dieser breiten Online-Befragung die sogenannten „More than Moore“-Technologien, also die funktionelle Diversifizierung als besonders wichtig für die Europäische Industrie angesehen. Dies deckt sich auch mit Ergebnissen bisheriger Studien.⁵⁰ Die funktionelle Diversifizierung nanoelektronischer Komponenten ermöglicht neue und große Wachstumschancen für die in Deutschland sehr starken Industriezweige des Maschinen- und Anlagenbaus, der Automatisierungstechnik, des Automobilbaus und der Medizintechnik. Hinzu kommt die klassische Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Sie ist mittlerweile von elementarer Bedeutung für nahezu das gesamte wirtschaftliche und gesellschaftliche Leben. Die Produktionskapazitäten für Standardhalbleiterbauelemente sind derzeit überwiegend in Asien oder Nordamerika installiert.⁵¹ Damit entstanden neue Abhängigkeitsverhältnisse, deren geopolitische Implikationen ebenfalls zu beachten sind.⁵² Der uneingeschränkte Zugang zu den aktuellen Technologien im Bereich „More than Moore“ ist grundlegend für eine

erfolgreiche Weiterentwicklung der europäischen Volkswirtschaften und muss unabhängig von der Produktionsstätte gewährleistet sein. Die befragten Experten waren zudem der Meinung, dass europäische Produktionsstätten entlang der gesamten Wertschöpfungskette innovationsfördernd wirken würden. Daher sollte die europäische anwendende Industrie ein starkes Interesse an der Präsenz eines integrierten Geräteherstellers (IDM) in Europa besitzen, um damit Entwicklungspartnerschaften und Innovationen entlang der gesamten Technologiekette zu ermöglichen.

Ähnlich wie heute die skalierte Mikroelektronik („More Moore“) stand z. B. die Batterietechnologie in den 1990er Jahren in einem weltweiten Verdrängungswettbewerb und wanderte zunehmend nach Asien und Nordamerika ab. Inzwischen wurde die zentrale Bedeutung von lokalen Akteuren für die Innovationskraft von der Automobilindustrie und der Politik im Rahmen der E-Mobility-Initiativen erkannt. Mit großen Anstrengungen wird nun die Batterietechnologie in ihrer Bedeutung als Schlüsselkomponente für Deutschland gestärkt und ihre Entwicklung stark gefördert.

Ebenso kann eine Stützung des industriellen „More Moore“-Sektors in Europa mit seiner besonderen Bedeutung für die IKT-Industrie immer noch fruchten und ist zudem ein notwendiger Zwischenschritt zur Realisierung des für Deutschland so bedeutenden „More than Moore“-Sektors.

⁵⁰ Vgl. CATRENE 2007; ISTAG2003; Medea 2007.

⁵¹ Ausnahmen in Europa sind z.B. STMicroelectronics (Hauptsitz: Frankreich/Italien), NXP (Hauptsitz: Niederlande) und als Foundries XFab und LFoundry (beide Hauptsitz Deutschland). Allerdings haben sich diese auf anwendungsspezifische Prozesse mit größeren Strukturbreiten fokussiert. Die einzigen Produktionsstätten mit der Fähigkeit, kleinste Strukturen zu fertigen, sind das Werk des Unternehmens Global Foundries in Dresden, das sich im Besitz der nordamerikanischen AMD und ATIC des Emirates Abu Dhabi befindet, und die Fertigungsstätte von Intel in Irland.

⁵² vgl. ZTransfBw 2010.

In der Befragung wurde auch nach der Relevanz einzelner Technologien und dem Zeitpunkt ihrer Verfügbarkeit gefragt. Materialien, Prozesstechnologien und Systemkomponenten mit überdurchschnittlicher Relevanz lassen sich unter Berücksichtigung des Zeithorizonts herausfiltern und werden nachfolgend gelistet. Dabei sind solche Technologien wie etwa Silizium und Silizium-Germanium⁵³ ausgeblendet, für die kein Zeithorizont abgefragt wurde, da sie bereits heute verfügbar sind. Nachfolgend sind die Technologien und Verfahren aufgeführt, die unter Berücksichtigung des Zeithorizonts mit einer überdurchschnittlichen Relevanz beurteilt worden sind (nach baldiger Verfügbarkeit sortiert):

- im Bereich der Materialien und Prozesse
 - Double Patterning⁵⁴
 - Atomic Layer Deposition (ALD)⁵⁵
 - organische Halbleiter
 - EUV-Lithographie⁵⁶
 - kohlenstoff-basierte Materialien (C-Materialien)
- im Bereich der Systemkomponenten
 - CMOS (evolutionäre Fortentwicklung)
 - Selbstdiagnose⁵⁷
 - Through-Silicon Via⁵⁸
 - 3D-Integration⁵⁹

- nano- und optoelektronische mechanische Systeme (NOEMS)
- Selbstkorrektur⁶⁰
- piezoresistive Sensoren

Hervorzuheben sind hierbei die organischen und Flüssigphasen-prozessierbaren anorganischen Halbleitermaterialien, die unter den Materialien als überdurchschnittlich relevant gelten. Für die Prozesstechnologien nimmt diese Rolle die ALD-Technologie ein. Im Vergleich mit Materialien und Prozessen ist die Relevanzbewertung der Systemkomponenten deutlich breiter gestreut. Dennoch lassen sich Unterscheidungen vornehmen. Insbesondere wird Technologien zum Thema Selbstkorrektur eine große Relevanz zugesprochen. Als von immer noch großer, jedoch etwas geringerer Relevanz wurden piezoresistive Sensoren und NOEMS eingestuft, gefolgt von 3D-Integration und Selbstdiagnose. Die Umsetzung von Technologien zur Selbstdiagnose wird im Vergleich mit den übrigen drei Aspekten von fast zwei Dritteln der Befragten bereits in den kommenden drei Jahren erwartet. Die Befragungsteilnehmer wurden abschließend auch zu den im Diagramm gezeigten Thesen (Abb. 2) um ihre Meinung gebeten. Die überwiegende Zahl der Thesen fand Konsens unter den Experten und floss in die Formulierung von Empfehlungen ein.

⁵³ Kasper 2009.

⁵⁴ Unter „Double Patterning“ versteht man die Verkleinerung der Strukturbreite durch zwei aufeinanderfolgende Belichtungsschritte mit breiteren Strukturen.

⁵⁵ Abscheideverfahren, bei dem die Materialschicht durch sequenzielle Prozesse an der Oberfläche mit atomarer Genauigkeit aufwächst und damit sehr dünne Schichten ermöglicht.

⁵⁶ Belichtungsverfahren, bei dem fern ultraviolettes Licht (Wellenlänge < 15 nm) verwendet wird und das auf diese Weise sehr kleine Strukturen abbilden kann.

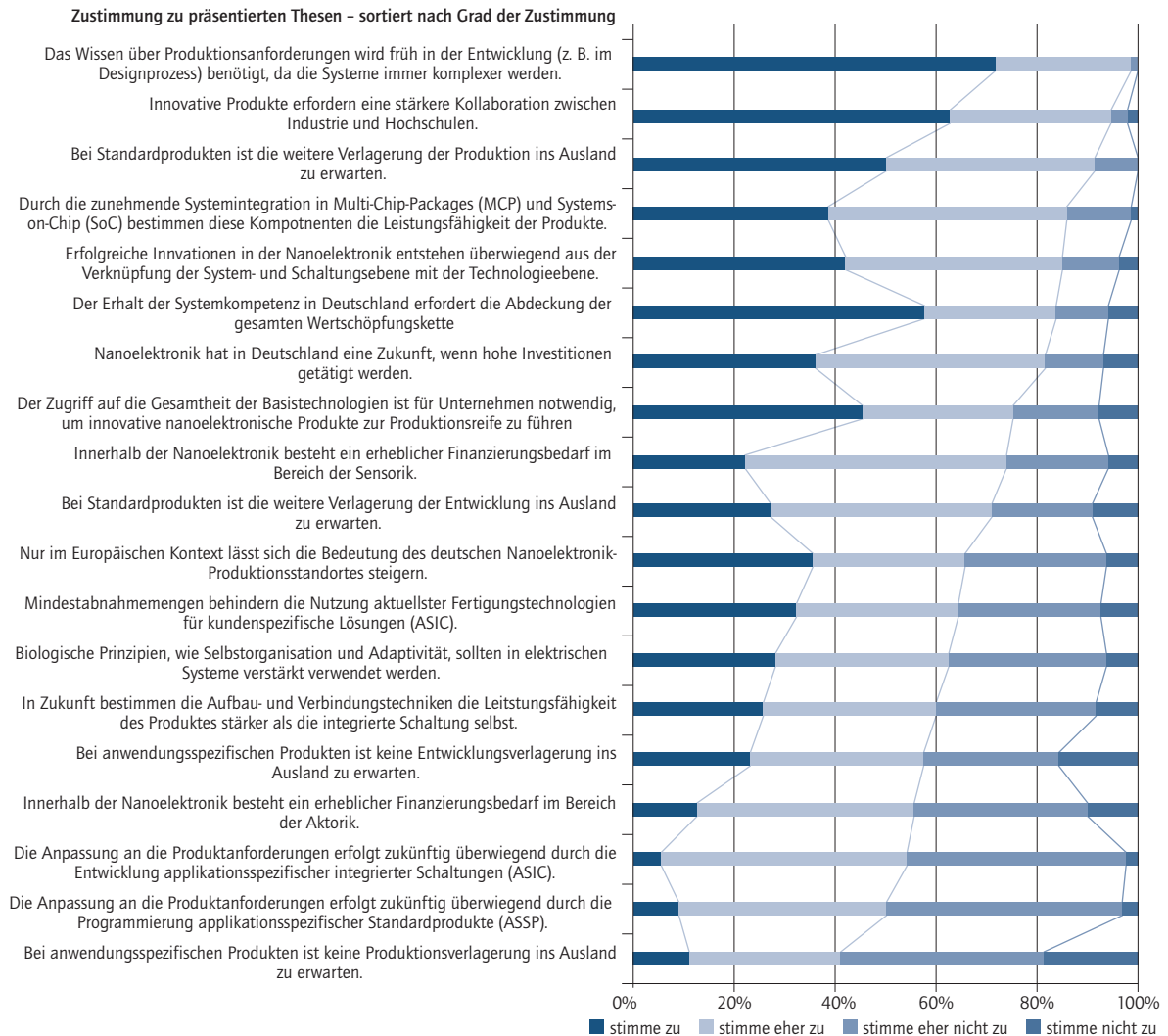
⁵⁷ Unter „Selbstdiagnose“ sind Verfahren zu verstehen, bei denen die elektrische Schaltung selbst ihren Funktionszustand erkennen kann. Fehler können von der Schaltung festgestellt und möglicherweise sogar lokalisiert und diagnostiziert werden.

⁵⁸ Verbindungstechnik, bei der mehrere Chips, anstatt mit Drähten, mit metallgefüllten Kontaktlöchern durch den Wafer hindurch elektrisch verbunden werden.

⁵⁹ Sammelbegriff für alle Aufbau- und Verbindungstechniken, die ein Stapeln von Chips und Schaltungen ermöglichen.

⁶⁰ Selbstkorrektur stellt eine Erweiterung der Selbstdiagnose dar, bei der eine Schaltung im Fehlerfall selbstständig Gegenmaßnahmen ergreift. Dies kann eine Änderung der Betriebsspannung und Frequenz bedeuten, sodass der Fehlerfall nicht mehr eintritt. Andere Verfahren ersetzen fehlerhafte Teile der Schaltung mit Reserveblöcken oder korrigieren die Fehler durch aufwendige Berechnungsverfahren.

Abb. 2: Befragungsergebnisse zum Zustimmungsgrad zu vorgegebenen Thesen





Die Befragungsergebnisse flossen in eine gerüstartige Grundlage für den Roadmap-Workshop ein, die dann während des Workshops detailliert dargestellt, gegliedert und vervollständigt wurde. Dazu zählt auch eine Verknüpfung von Technologien untereinander und zu den Beispielprodukten, um Abhängigkeiten und Einflüsse sichtbar zu machen. Abb. 3 zeigt das Resultat: Eine Roadmap, die sich in drei Zeitbereiche und sechs thematische Ebenen gliedert. Diese Information ist redundant hinterlegt, einerseits über Zahlen, die für Ausgangs- und Zielpunkt übereinstimmen, und andererseits über die Pfeile. Die Dicke und die Farbintensität der Pfeile veranschaulichen die Zahl der von einer einzelnen Technologie unterstützten weiteren Technologien. Die Verknüpfungen der in Abb. 3 dargestellten Technologieebenen sollen nachfolgend an zwei Beispielen exemplarisch erläutert werden

> Fallbeispiel 1

Als erstes Fallbeispiel werden die vielversprechenden Materialgruppen der Kohlenstoffnanoröhren (Carbon-Nano Tubes: CNT) und die Kohlenstoffmonolagen (Graphen)⁶¹ betrachtet. Durch die besonderen Materialeigenschaften wie hohe Leitfähigkeit und Transparenz für sichtbares Licht werden neue Schaltungskonzepte und Bauelemente ermöglicht. In drei aufeinanderfolgenden Entwicklungsstufen könnten diese Materialien nach Einschätzung der Experten Eingang in Anwendungen der Nanoelektronik finden. Für die Verwendung jeglicher neuer Materialien ist die Beherrschung der entsprechenden Schlüsselprozesse in Produktion und Verarbeitung entscheidend. Der Grad dieser Beherrschung spiegelt sich in der Qualität der produzierten Materialschicht wider. In der ersten Stufe ist die Qualität der CNT und von Graphen ausreichend für passive Strukturen wie beispielsweise Antennen und Leiterbahnen. Neue auf CNT basierte passive Komponenten, z. B. Antennenstrukturen, können direkte Anwendung in den Systemkomponenten der funktechnischen Inter- und Intra-Chip-Kommunikation finden. Diese werden besonders für Produkte mit großer Schnittstellenanzahl benötigt. Ein Beispiel hierfür sind medizinische Produkte im Bereich der Körperüberwachung. Die Transparenz von Graphen-Schichten andererseits ist prädestiniert für die Herstellung von Displays und berührungsempfindlichen Oberflächen (z. B. Touch-Screens).

Die beim Einsatz in passiven Komponenten erreichte industrielle Prozess Erfahrung im Umgang mit den kohlenstoffbasierten Materialien kann in einer zweiten Stufe bei der Entwicklung aktiver Bauelemente genutzt werden. Für ihre Funktionalität ist eine deutlich höhere Güte der Materialien notwendig. Mit diesen Materialien der Folgegeneration werden Graphen- bzw. CNT-Transistoren realisiert. Diese können wiederum Bestandteil neuer Systemarchitekturen

sein, welche essenziell für hochkomplexe Systeme wie humanoide Roboter als Assistenzsysteme oder zum Einsatz in industrieller Produktion sind.

Die dritte Stufe der Prozessbeherrschung ermöglicht eine konstant hohe Güte der CNT- und Graphen-Materialien auf einer größeren lateralen Fläche. Dies stellt die Grundvoraussetzung für die Herstellung komplexer integrierter Schaltungen (IC) dar, die auf Graphen- bzw. CNT-Transistoren basieren („Beyond Moore“).

> Fallbeispiel 2

Als zweites Fallbeispiel sollen die Technologien der Aufbau- und Verbindungstechnik betrachtet werden. In der Roadmap sind hierunter vier Schlüsselprozesse zusammengefasst. Diese sind Grundlage für acht verschiedene Aspekte der Roadmap. Bemerkenswert ist, dass kein anderes Element der Roadmap so zahlreiche Verbindungen und damit Auswirkungen auf weitere Elemente besitzt. Die vier erwähnten Schlüsselprozesse stellen hier die verschiedenen Verbindungsverfahren (sog. Bonding) dar. Dies betrifft sowohl die Verbindung einzelner Chips (sog. Dies) miteinander als auch die einzelner Dies mit ganzen Wafern. Die Integration mehrerer Wafer mittels Wafer-Bonding ist ebenfalls zu erwarten. Eine besonders effiziente und leistungsfähige Kontaktierung der einzelnen Komponenten erfolgt unter Einsatz von Through-Silicon Vias. Alle beschriebenen Integrationsverfahren, die auch unter dem Begriff „3D-Integration“ zusammengefasst werden können, stellen Basistechnologien zur Realisierung hybrider Strukturen dar und sind damit Grundlage der funktionellen Diversifizierung der Nanoelektronik. Mit diesen hybriden Strukturen können NEMS, NOEMS und MOEMS⁶² zusammen mit signalverarbeitenden Schaltungen zu Sensorsystemen bzw. autarken Funktionseinheiten verbunden werden. Anwendungsbeispiele,

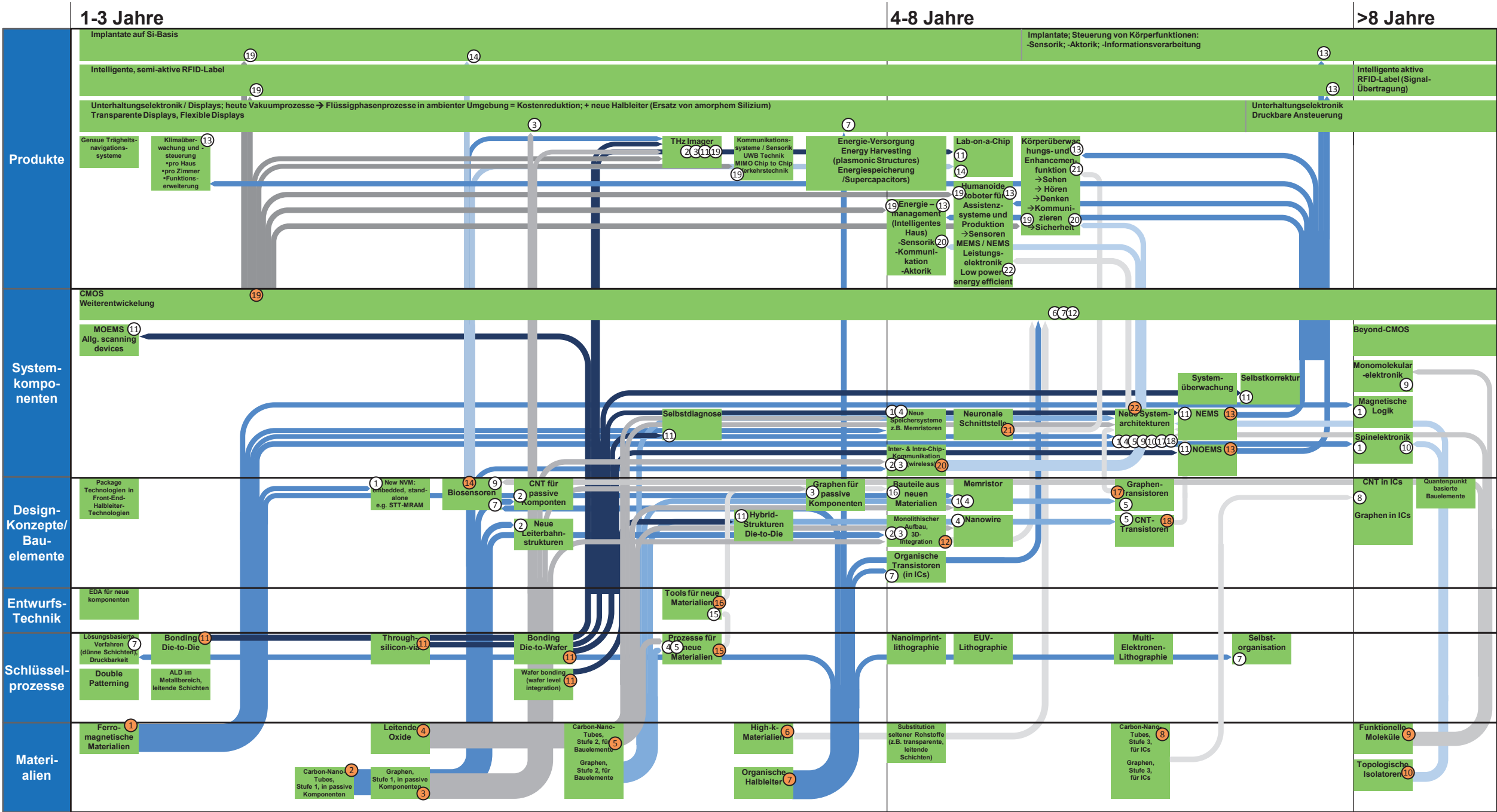
⁶¹ Die Bedeutung dieser Materialgruppe wird z. B. dadurch belegt, dass der Nobelpreis für Physik 2010 an Andre Geim und Konstantin Novoselov für ihre Forschungsarbeiten zu Graphen verliehen wurde.

⁶² MOEMS, NOEMS bzw. NEMS steht für Mikro/Nano(opto)elektronisch-mechanische Systeme.

Abb. 3: Roadmap Nanoelektronik als Workshop-Ergebnis.

ROADMAP ZUR NANOELEKTRONIK IN DEUTSCHLAND

Workshop am 6. Oktober 2010



Anmerkung
Die Verknüpfungen mit den Nummern 15-22 sind im Nachgang zum Workshop hinzugefügt worden.

Legende

1

Ausgangspunkt

1

Zielpunkt

Verknüpfung zweier Bestandteile, Ausgangspunkt findet Anwendung im Zielpunkt; je dunkler und breiter der Pfeil, desto zahlreicher die verknüpften Zielpunkte



wie sie im Roadmap-Workshop genannt wurden, sind ihre Nutzung in THz-Imagern, Lab-on-Chip-Systemen sowie Roboterassistenzsystemen und der medizinischen Körperüberwachung. Aber auch intelligente semi-aktive und aktive RFID-Aufkleber sowie moderne Implantate sind auf zuverlässige Signalverarbeitung angewiesen und lassen sich sinnvoll mit Sensorik und zum Teil auch Aktorik verbinden.

Auf der Materialebene wurde die Substitution seltener Rohstoffe in nanoelektronischen Prozessen und Strukturen als wichtiges Technologieelement von den Teilnehmern identifiziert. Dies ist eine Problemstellung, deren Bedeutung eng mit der Versorgungssicherheit von Rohstoffen wie z. B. Seltenen Erden verknüpft ist.

Im Bereich der Systemkonzepte ist auf der Roadmap noch der Aspekt „Neue Systemarchitekturen“ hervorzuheben. Er besitzt in der gesamten Roadmap die breiteste technologische Basis. Sieben verschiedene Materialien und Bauelemente tragen mit ihrer Technologie zu diesem Aspekt bei, dessen Realisierung und Verfügbarkeit mittelfristig erwartet wird. Unter den „neuen Systemarchitekturen“ sind Konzepte zu verstehen, die ergänzend zur klassischen CMOS-Logik die Anforderungen bestimmter Anwendungsfälle besser erfüllen als die heute etablierten Systeme. Welche Kenngröße für diesen Vergleich dient, ist stark von der Anwendung und den Märkten für solche Lösungen abhängig. Denkbar sind besonders energieeffiziente Systeme, aber auch Systeme mit besonders niedriger Wärmeabgabe, besonders hoher Zuverlässigkeit oder Fehlertoleranz. Zudem sind Systeme, die einzelne Aufgaben schneller als die generische CMOS-Logik bewältigen, möglich. Hierfür setzen sie die Stärken neuer Bauelemente und Materialien in anwendungsspezifischer Weise ein und erzielen so eine Verbesserung für den Kunden und damit Markterfolg.

Die Weiterentwicklung der CMOS-Technologien wird noch über den gesamten Betrachtungszeitraum von mehr als acht Jahren hinaus als relevant eingeschätzt. Dies wird auch durch die Umfrage gestützt, in der den CMOS-Technologien von über 80 Prozent der Befragten eine große bis sehr große Relevanz zur Erschließung weltweiter Marktpotenziale bescheinigt wird. Dies unterstreicht nochmals die eingangs erwähnte Notwendigkeit des uneingeschränkten Zugangs zu „More Moore“ Technologien.

Als wesentliches Ergebnis des Roadmap-Workshops ist der Konsens zu nennen, dass intelligente Produkte sowie Produkte, die einen hohen Anteil an kunden- und anwendungsspezifischer Entwicklungsleistung erfordern, für den deutschen Standort im Fokus stehen sollten. Bei den Erfolg versprechenden Produkten handelt es sich um spezialisierte Nicht-Massenprodukte mit hohen Margen, die somit eine Refinanzierung der Entwicklung gestatten. Darin verwendete Standardkomponenten ließen sich, sofern freier Handelszugang besteht, weiterhin kostengünstig etwa in Fernost produzieren und importieren. Die Entwicklung von Standardkomponenten allerdings wurde ebenso wie die Entwicklung und Produktion komplexer Komponenten weiterhin in Deutschland gesehen. Auch die Experten aus der Befragung gingen für die Entwicklung und Produktion komplexer Produkte davon aus, dass Standortverschiebungen nicht unmittelbar erwartet werden. Im Workshop wurde klar, dass Sensorik und Aktorik von zentraler Bedeutung für derartige Produkte sind und daher auch deren Erforschung und Entwicklung gefördert werden muss.

Die Innovationsbeiträge der Nanoelektronik werden nach Meinung der Workshop-Teilnehmer von den nachgelagerten Industrien in Ihrer Bedeutung zu wenig beachtet. Hier würde man sich ein deutlicheres Bekenntnis zur Wertschätzung der Innovationsbeiträge durch die Nanoelektronik (heute noch Mikroelektronik) wünschen. Die öffentliche



Einschätzung der Nanoelektronik wird davon abhängig sein, wie ihre Beiträge zu Lösungen der gesellschaftlichen Herausforderungen der Zukunft wahrgenommen werden. Hier könnte gerade eine ihrer Stärken, nämlich ihre unauffällige Allgegenwärtigkeit, die adäquate öffentliche Wahrnehmung als eine der Schlüsseltechnologien für den technischen Fortschritt in einer Vielzahl von Anwendungen und Industriezweigen verhindern. Es ist daher wichtig, dass ihre Bedeutung als Innovationsmotor für die Industrie ebenso wie ihre Beiträge zu den gesellschaftlichen Bedürfnissen an Energieeffizienz, Mobilität, Gesundheitsfürsorge und Umweltschutz genügend sichtbar gemacht werden.

3.1.2 FAZIT NAHZIELE

Es gibt einige Parallelen zwischen der hier zugrunde liegenden Untersuchung und einer kürzlich erschienenen Studie des Technikfolgenabschätzungsbüros des Deutschen Bundestages (TAB)⁶³ zu Blockaden bei der Etablierung von Schlüsseltechnologien, die sich in einem Fallbeispiel der Nanoelektronik als Schlüsseltechnologie widmet.

So ist es zufolge beider Befragungen erstrebenswert, die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschulen zu intensivieren, um innovative Produkte zu realisieren. Daraus leitet sich die Empfehlung ab, industrielle Forschungszentren in Deutschland aufzubauen und dabei regionale Konkurrenz zu vermeiden. Als wichtig wird auch die personelle Vernetzung angesehen, die über Austausch von Personal zwischen Wirtschaft und Wissenschaft erreicht wird. Auch die TAB-Studie erachtet dies als wichtig, insbesondere für den Bereich der „More than Moore“-Technologien, die in starkem Maß vom Mittelstand aufgegriffen und so erst nachgelagerten Branchen verfügbar gemacht werden. Gerade zur Unterstützung von KMU wird daher eine wechselseitige Entsendung von Wissenschaftlern empfohlen.

Einheitlich weisen zudem beide Studien darauf hin, dass die außereuropäischen Regionen Unternehmensansiedlungen subventionieren. Für den Bereich der Großindustrie für „More Moore“-Technologien wurden auch deshalb in den vergangenen Jahren zunehmend Standortentscheidungen zugunsten Asiens vermerkt. Betont wird dies unter dem Hinweis auf den so bedeutenden Bereich der „More than Moore“-Technologien, dessen Entwicklung direkt hiervon abhängt. Es wird ferner darauf hingewiesen, dass es in Europa Forschungs-, jedoch kaum Industrieförderung in diesem Bereich gibt. Standorte in Europa unterliegen dem EU-Beihilferecht.⁶⁴

Diese Untersuchung zu den „Nahzielen“ hat darüber hinaus ergeben, dass eine zunehmende Systemintegration in Multi-Chip-Packages und Systems-on-Chip zu erwarten ist, die dazu führt, dass diese Komponenten entscheidend die resultierende Leistungsfähigkeit der Produkte bestimmen. Technologien zur Systemintegration, etwa der Bereich der Aufbau- und Verbindungstechniken, sollten daher in Deutschland vorgehalten und weiterentwickelt werden, um diese Komponenten nicht zu vernachlässigen.

Gerade auch vor diesem Hintergrund ist es wichtig, die Kooperation zwischen der System-/Schaltungsebene und der Technologieebene weiter zu fördern. Von großer Bedeutung sind hier auch Test- und Entwurfsverfahren.⁶⁵ In der Nanoelektronik ist eine noch engere Kopplung von Entwurf – Simulation – Produktion – Test notwendig. Die Werkzeuge nach dem Stand der Technik erreichen hier schnell ihre Grenzen.

Ein Erhalt der Systemkompetenz in Deutschland sowie der Zugriff von Unternehmen auf die nanoelektronischen Basistechnologien und die Vorhaltung ebendieser Basistechnologien in Deutschland sind für Produktinnovation überaus bedeutend. Daher sollte sichergestellt werden,

⁶³ Thielmann et al. 2009.

⁶⁴ Die EU-Beihilfekontrolle wird in einer bald erscheinenden TAB-Studie auch für die Nanoelektronik thematisiert und untersucht.

⁶⁵ Eine Studie zu Entwurfsverfahren elektronischer Schaltungen wurde im Oktober 2010 dem BMBF übergeben, vgl. EDA 2010.

dass in Deutschland Unternehmen aus den verschiedenen Segmenten der Wertschöpfungskette tätig sind.

Es wurde betont, dass Informations- und Kommunikationstechnik, Verkehrstechnik, Sensorik und Aktorik, Energietechnik und Medizintechnik wichtige Anwendungsbereiche für nanoelektronische Technologien darstellen. Die Integration dieser unterschiedlichen Technologien wie auch die Gewähr der Zuverlässigkeit stellen hier allerdings besondere Herausforderungen dar. Zur Umsetzung von Innovationen außerhalb der Großindustrie wurde die Notwendigkeit festgehalten, dass aktuellste Fertigungstechnologien für kundenspezifische Lösungen verfügbar gemacht werden. Eine kostengünstige Verfügbarkeit kann hier durch den Aufbau von Zentren und Netzwerken zur Förderung der Kooperation gelingen.

Die Erforschung neuartiger Bauelemente, Materialien und Systemarchitekturen ist für eine nachhaltige und auf einen größeren Zeithorizont hin orientierte Entwicklung von großer Bedeutung. In den Bereichen der organischen sowie der kohlenstoffbasierten Materialien ist der Transfer der Forschungsergebnisse in die Entwicklung industrieller Produkte bereits in naher Zukunft zu erwarten. Hier ist die Kooperation von Industrie, Forschungsinstituten und Universitäten intensiv zu fördern.

Auf vielen Gebieten der Nanoelektronik können aus Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen hervorgehende Spin-Offs eine wichtige Rolle spielen. Universitäten und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen sollten derartige Initiativen ermuntern und großzügig unterstützen. Die Förderung durch die zuständigen Ministerien in Bund und Ländern wird hierbei als sehr wichtig erachtet.

Die Universitäten und Fachhochschulen sollten durch Einrichtung von Curricula mit dem Schwerpunkt Nanoelek-

tronik in den Studienrichtungen Elektrotechnik und Informationstechnik sowie Physik für die Ausbildung eines auf dem Gebiet der Nanoelektronik hervorragend qualifizierten Nachwuchses sorgen und dabei der hohen Interdisziplinarität der Nanoelektronik Rechnung tragen.

Das Bewusstsein für die Schlüsselrolle der Nanoelektronik für die positive zukünftige Entwicklung der deutschen Volkswirtschaft ist zu fördern. Die Politik sollte in verstärktem Maße Anstrengungen unternehmen, die Nanoelektronik-Industrie in Deutschland zu schützen, wenn sie durch internationale Wettbewerbsverzerrungen in Bedrängnis gerät. In all diesen Bereichen sind Standorte in Forschung, Entwicklung und Fertigung innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette in Deutschland und in Europa zu sichern.

3.2 FERNZIELE

Die dem Moore'schen Gesetz folgenden Entwicklungen haben die weitere Miniaturisierung von Schaltelementen mit Strukturgrößen von unterhalb 100 nm bis hinunter zu den physikalischen Grenzen der CMOS-Technologie sowie die komplette Systemintegration auf dem Chip zum Ziel. Dabei wird die Entwicklung innerhalb der nächsten beiden Dekaden mit Annäherung der Strukturgrößen an atomare Dimensionen an ihre physikalischen Grenzen und an Kosten Grenzen stoßen. Durch Kombination verschiedener Chips zu „Systems in Package“ und ähnliche Entwicklungen wird sich noch eine gewisse Steigerung der Leistungsfähigkeit konventioneller halbleiterelektronischer Systeme erreichen lassen. Ein wesentliches Voranschreiten der Entwicklung ist jedoch nur auf Basis neuartiger physikalischer Effekte, neuer Materialien und innovativer Bauelemente- und Systemkonzepte zu erwarten, die in elektronischen Systemen zu einem Paradigmenwechsel führen werden.

Es gibt in diesem Bereich eine Vielzahl von vielversprechenden Forschungsansätzen, wovon einige bereits an der Schwelle zur Entwicklung stehen, andere, hoch ambitionierte Konzepte jedoch weit ausgreifende Forschungsanstrengungen erforderlich machen. Zu letzteren gehört der Bereich der Quanteninformationsverarbeitung. Dementsprechend ist der Zeithorizont für die Erreichung der Fernziele weit gefächert und kann mit fünf bis zwanzig Jahren angesetzt werden.

Ein gutes Beispiel für einen innovationsgetriebenen Paradigmenwechsel in der Elektronik war der Übergang von der Vakuumelektronik zur Halbleiterelektronik in den 1950er Jahren. Dadurch konnten die der Vakuumelektronik immanenten Grenzen überwunden werden und eine stürmische, bis heute anhaltende, durch das Moore'sche Gesetz charakterisierte Entwicklung setzte ein. Die im Vergleich zur Vakuumelektronik höhere Ladungsträgerdichte im Festkörper ermöglichte die Miniaturisierung der festkörperelektronischen Bauelemente. So erfolgreich dieses Fernziel des letzten Jahrhunderts auch erreicht wurde, so sind doch die heutigen Bauelemente der Mikroelektronik nicht in der Lage, die Dichte der Festkörper voll auszunutzen. Der Grund dafür ist, dass alle Festkörperbauelemente der Chip-Technologie auf der Dotierung von Halbleitern beruhen. Diese Dotierung und die dadurch verfügbare Ladungsträgerdichte liegt jedoch ungefähr um einen Faktor 10^4 unterhalb der gesamten Elektronendichte im Festkörper. Die meisten Konzepte zur Realisierung von Fernzielen der Nanoelektronik beruhen auf der Idee, diesen Faktor von 10^4 zu gewinnen und Möglichkeiten zu finden, die durch die niedrigen Dichten der Dotierungen gesetzten Grenzen zu umgehen. Dieser Trend zur höheren Dichte folgt der berühmten Einladung des Physikers Richard Feynman: „there's plenty of room at the bottom“, die Nanowelt zu erforschen und die kleinsten Strukturen möglichst in dreidimensionalen Systemen zu verwerten.⁶⁶ Das Verhalten großer Systeme von nanoskalierten

Bauteilen führt zu völlig neuartigen und extremen Anforderungen und wird zu völlig neuartigen Architekturen, z. B. in Quantencomputern und Zellularen Automaten oder im Bereich der Biologie führen. Diese Architekturen versprechen entweder die hohen Bauelementedichten zu ermöglichen oder durch signifikante Erhöhung der Funktionalität der Bauelemente sogar mit kleineren Bauelementedichten auszukommen.

Auf Basis dieser Untersuchung ergibt sich der Überblick über diese Möglichkeiten in den folgenden Unterabschnitten.⁶⁷ Hier werden auch mögliche künftige Entwicklungen diskutiert, welche auf einer Kombination der Nanotechnologie mit anderen Gebieten beruhen. Der Einfluss nanostrukturierter Elektronik erstreckt sich auf viele Disziplinen, welche von Optoelektronik und Nanomechanik bis zur Biologie und Umwelttechnologie reichen. Der Einfluss künftiger nanoelektronischer Technologien auf die Technologieentwicklung im größeren Zusammenhang, wie zum Beispiel in der Informations- und Kommunikationstechnologie der „Grünen“ Energiewandlung und -speicherung, werden dargestellt.

Die derzeitige Literatur hat Kohlenstoff-Strukturen wie Nanoröhren sowie ein- und vielschichtigem Graphen einen großen Platz eingeräumt. Die enormen Beweglichkeiten der Elektronen in diesen Materialien sowie die interessante Tatsache einer gänzlich verschwindenden Masse der Elektronen in Graphen haben zu Recht Hoffnungen angeregt, diese Moleküle in großer Dichte vorteilhaft zu verwenden. Nachteile liegen jedoch ebenfalls auf der Hand: Die Energielücken sind in Graphen kleiner als in Silizium und bringen Schwierigkeiten für Anwendungen bei Raumtemperatur. Die Stärke neuer Ideen wird jedoch anhand der folgenden interessanten Möglichkeiten illustriert.

Elektronik auf der molekularen oder extrem nano-strukturierten Ebene ist natürlich sehr viel schwieriger zu realisie-

⁶⁶ Feynman 1959.

⁶⁷ Eine ausführliche Darstellung des Themengebietes Fernziele findet sich in Russer 2011.

ren als im Bereich der Halbleiter. Hier gibt es zahlreiche Hindernisse wie zum Beispiel den hohen Quantenwiderstand jedes Punktkontaktes (13 k Ω), Probleme elektrischer Verbindungen zu Bauelementen hoher Ladungsträgerdichte, Schwierigkeiten bei der elektrischen Isolation der einzelnen Schaltelemente (z. B. Auftreten des Tunneleffektes bei Isolatorstücken im Nanometerbereich), Probleme aufgrund des Verhältnisses des Widerstandes zwischen Ein- und Auszustand bei Transistoren und darüber hinaus Probleme bei der Ausnutzung von Quanteneffekten auf Signalverarbeitungs- und Systemniveau, wo zum Beispiel die Dekohärenz Grenzen setzt. Die Lösung dieser Probleme, auch im Zusammenhang mit der Wärmeerzeugung dichter Systeme, verlangt vollkommen neue Konzepte und Architekturen wie zum Beispiel zellulare Automaten oder Quantencomputer-Architekturen.

3.2.1 NEUE MATERIALIEN UND PROZESSE

Im Zentrum der Diskussionen zur Nanoelektronik stehen heute Halbleitermaterialien, vor allem Silizium. Deren physikalischen Eigenschaften werden sehr gut verstanden und die Technologie wird auf hohem Niveau beherrscht.

In den letzten Jahren haben erhebliche internationale Forschungsanstrengungen eine Anzahl neuer Materialien zu interessanten Kandidaten für die künftige Realisierung nanoelektronischer Bauelemente und Systeme werden lassen. Dazu zählen:

- kohlenstoffbasierte Materialien, wie z. B. Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes) und Graphen
- organische Materialien
- Flüssigphasen-prozessierbare anorganische Materialien
- magnetische Materialien für die Spin-Elektronik

- Nanodrähte⁶⁸ und nanostrukturierte metallische, halbleitende und dielektrische Materialien wie z. B. Metamaterialien, Photonic Band-Gap Structures und plasmatische Strukturen
- supraleitende Materialien
- biologische Materialien (Wet- vs. Dry-World, Nanobio-technologie)
- optische Metamaterialien

Zu nennen sind hier auch Methoden und Verfahren zur Abbildung und Visualisierung.

3.2.2 KOHLENSTOFFBASIERTE ELEKTRONIK

Elektronische Bauelemente und Schaltkreise auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren und Graphen eröffnen ein reichhaltiges Spektrum neuer Anwendungen.⁶⁹ Auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren können durch Drucktechnik auf Kunststoffsubstraten großflächige, flexible und kostengünstige Schaltkreise hergestellt werden. Darüber hinaus bieten Kohlenstoffnanoröhren und Graphen ein hohes Entwicklungspotenzial zur Realisierung von Transistoren und integrierten Schaltkreisen, die gegenüber Bauelementen der Halbleiterelektronik bessere Eigenschaften, z. B. höhere Betriebsfrequenzen, aufweisen können. Weitere interessante Anwendungen ergeben sich in der Vakuumelektronik für extrem kleine Feldemissionskathoden und in passiven Höchstfrequenzschaltungen.

3.2.3 ORGANISCHE ELEKTRONIK

Organische Dünnschichttransistoren lassen sich bei niedrigen Temperaturen von unterhalb 100 Grad Celsius herstellen. Organische Schaltungen lassen sich kostengünstig durch Drucktechnik und auch großflächig und flexibel herstellen.⁷⁰

⁶⁸ Abstreiter 2010; Awano 2010; Riel 2010; Russer 2010.

⁶⁹ Awano 2010; Banerjee 2010; Kurz 2010; Russer 2010.

⁷⁰ Hahn 2010.

Sie kommen mit niedrigen Betriebsspannungen von etwa 3 Volt aus und erreichen Betriebsfrequenzen bis zu 100 kHz. Damit lassen sich Bildschirme, sogenannte Thin film transistor liquid crystal displays (TFT-LCD) mit kritischen Strukturdimensionen von 10 Mikrometern realisieren. In Zukunft sind Reduktionen der Kanallängen bis auf 1 Mikrometer und organische Displays mit Frequenzen bis 1 MHz und möglicherweise sogar 10 MHz zu erwarten.⁷¹

acatech hat zum gesamten Feld der Organischen Elektronik in Deutschland einen Projektbericht vorgelegt, in dem die Situation bewertet wird und Empfehlungen für die Weiterentwicklung gegeben werden.⁷²

3.2.4 NEUE ARCHITEKTUREN

Die Nanoelektronik führt im Bereich der Informationsverarbeitung zu immer höheren räumlichen Bauelementekonzentrationen. Das wird auch im Bereich der herkömmlichen Schaltungstechnik zu neuen Schaltkreisarchitekturen führen. Effizienzsteigerungen werden von dem Ersatz der booleschen Logik (CMOS) für bestimmte Anwendungsfelder durch effizientere Schaltungs- und Systemkonzepte unter Verwendung nicht-linearer Bauelemente erwartet.⁷³ Zur Bewältigung der hohen Datenflüsse zwischen den Schaltelementen kommen optische und drahtlose⁷⁴ Signalübertragung sowohl innerhalb eines Chips als auch von Chip zu Chip infrage.

Im Bereich der spintronischen Bauelemente und der zellularen Automaten sowie bei bestimmten supraleitenden Bauelementen werden neuartige Methoden der Signalübertragung zwischen den Bauelementen durch Kopplung über elektrische und/oder magnetische Felder zu völlig neuartigen Systemarchitekturen führen.

Die Übertragung von Ergebnissen und Methoden aus der Chemie und Biologie in die Elektronik wird zu molekularen Architekturen führen und stellt eine große Herausforderung dar. So finden die chemischen und biologischen Experimente üblicherweise in Lösungen statt. In trockener Umgebung, wie in der Elektronik üblich, verhalten sich diese Systeme völlig verschieden.

Quanteninformationsverarbeitende Systeme wie z. B. Quantencomputer funktionieren auf Systemebene nach den Gesetzen der Quantenmechanik. Deren Architekturen werden sich grundsätzlich von den Architekturen klassischer Systeme unterscheiden.

3.2.5 MOLEKULARELEKTRONIK, SELBSTORGANISIERENDE STRUKTUREN

Sowohl einzelne Moleküle als auch Polymere werden zum Gebiet der Molekularelektronik gezählt. Eine wichtige Frage betrifft den Ladungsträgertransport in Molekülen. Hier werden Ansätze aus der Quantenchemie Antworten bringen. Vielversprechende Ansätze im Bereich der Molekularelektronik sind die positionierte Selbstorganisation (beispielsweise durch vorherige Oberflächenstrukturierung) sowie der Bereich der biomimetischen Moleküle, die sich etwa aus der DNA (Desoxyribonukleinsäure, DNS, engl. DNA) ableiten. Da organische Moleküle meist sehr groß sind, könnten kleinere Moleküle auf der Basis anorganischer Materialien eine bessere Wahl für die Nanoelektronik sein. Im Zusammenhang mit der Oberflächenstrukturierung für die Selbstorganisation ist Nanoimprinting auch eine ernst zu nehmende Alternative zur optischen Lithografie.

Grundsätzlich brauchen selbstorganisierende Strukturen Dynamik. Daher ist es schwierig, dieses Prinzip auf das von vorgegebenen, starren (Halbleiter-) Strukturen zu übertragen,

⁷¹ Klauk 2010.

⁷² acatech 2011.

⁷³ Schmitt-Landsiedel/Werner 2009.

⁷⁴ Russer et al. 2010a.

etwa für die Massenproduktion. Ein anderer Aspekt betrifft die dreidimensionale Strukturierung von Halbleitern. Die Ausdehnung in die dritte Dimension tritt beim Stranski-Krastanov Wachstum auf verspannten Kristalloberflächen auf. Damit können hoch geordnete Strukturen hergestellt werden.

Die Polymerelektronik mit ihren gedruckten Schaltungen hat bereits den Brückenschlag von der Forschung zur Anwendung geschafft und steht vor der Markteinführung. Firmen wie BASF, Bosch und Siemens haben bereits große Entwicklungen zum Thema organischer Photovoltaik und Polymerelektronik angestoßen. Die chemische Industrie in Deutschland ist an solchen Themen sehr interessiert. Freilich gibt es noch einige Hürden. So ist die Realisierung von n-leitenden Schichten auf polymerer Basis sehr schwierig. Verfahren wie Biomolecular Templating z. B. auf der Basis von DNA könnten interessant für „programmierbare Materie“ sein. Mit der Molekularelektronik können Gesamtfunktionalitäten evtl. direkt abgebildet werden, ohne sie auf Boolesche Digitaltechnik zu übertragen und dort zu lösen. Die mancherorts fast vergessenen Techniken der Analogschaltungen könnten hier neuartige Möglichkeiten bieten. Molekulare Schaltungstechnik lässt sich weder klar als analog noch als digital kennzeichnen. Hier sind neuartige Schaltungskonzepte zu erwarten, bei denen Europa eine Vorreiterrolle übernehmen könnte.

Interessante neue Architekturen stellen zelluläre Automaten dar.⁷⁵ Zelluläre Automaten sind flächenhafte oder räumliche Anordnungen von Zellen, die mit benachbarten Zellen elektrisch oder magnetisch verkoppelt sind. Die Zustände der Zellen werden durch die vorhergehenden Zustände der benachbarten Zellen beeinflusst. Auf zellulären Automaten lassen sich Algorithmen implementieren. Zelluläre Automaten lassen sich sowohl klassisch als auch quantenmechanisch (siehe Abschnitt 3.2.6) durch elektrisch gekoppelte Quantenpunkte oder durch magnetisch gekop-

pelte Nanomagnete realisieren. Es besteht die Hoffnung, mit klassischen zellulären Automaten leistungsfähige universelle Computer zu realisieren. Dazu wird allerdings noch ein erheblicher Forschungsaufwand zu leisten sein.

3.2.6 QUANTENCOMPUTER UND QUANTUM CELLULAR AUTOMATA (QCA)

Die Quanteninformationstechnik behandelt die Verarbeitung von Informationen, die durch Quantenzustände dargestellt sind, auf der Basis quantenmechanischer Algorithmen. Dieses Gebiet ist bereits ein Schwerpunktthema in der Forschung in Deutschland, jedoch ist bis zur Realisierung technischer Anwendungen noch ein sehr weiter Weg zurückzulegen. Die auf diesem Gebiet arbeitenden Wissenschaftler haben bereits sehr gute Ergebnisse erzielt und wichtige Erkenntnisse gewonnen, die für das physikalische Verständnis von Quantencomputern notwendig sind. Bisher wurden für Quantencomputer nur einige wenige Algorithmen für spezielle Anwendungen entwickelt. Das Potenzial von Quantencomputern lässt sich an der Tatsache erkennen, dass bei bestimmten Algorithmen klassische Hochleistungsrechner bereits durch Quantencomputer mit 48 Quantenbits übertroffen werden. Ob und inwieweit sich Quantencomputer für die Behandlung allgemeiner Aufgaben als Hochleistungsrechner einsetzen lassen, ist noch Gegenstand der Forschung. Durch den Quantenparallelismus, der es erlaubt, ein Problem für eine große Anzahl von Ausgangsparametern parallel abzuarbeiten, wird von Quantencomputern eine erhebliche Leistungssteigerung im Vergleich zu klassischen Computern erwartet. Für die Behandlung allgemeiner Aufgaben wird allerdings eine extrem große Anzahl an Quantenbits, etwa in der Größenordnung von klassischen Bits in heutigen PCs, benötigt. Quantenbits werden im Anschluss an eine Berechnung immer auf klassische Bits abgebildet. Die Realisierung von Systemen mit einer großen Anzahl kohärenter

⁷⁵ Csaba 2005; Porod 2010; Russer 2010.

Quantenbits ist jedoch noch nicht gelungen und stellt wegen des Dekohärenz-Problems eine große Herausforderung dar. In diesem Bereich können mesoskopische supraleitende Bauelemente auf Basis des Josephsoneffektes wegen ihrer steuerbaren Quanteneigenschaften und der langen Kohärenzzeit und ihrer Integrierbarkeit eine Rolle spielen.⁷⁶

Zellulare Automaten stellen auch interessante Architekturen für Quantencomputer dar. Ähnlich wie klassische zellulare Automaten lassen sie sich mit Quantenpunkten, Josephsonkontakten oder Nanomagneten realisieren. Das Problem der Erhaltung der Quantenkohärenz stellt im Vergleich zur Realisierung klassischer zellulärer Automaten eine erhebliche Hürde dar.

Die für die Realisierung technisch einsatzfähiger Quantencomputer zu lösenden Probleme sind erheblich und ihre Lösbarkeit wird von manchen Fachleuten angezweifelt.⁷⁷

3.2.7 ALTERNATIVE TECHNOLOGIEN UND SYSTEM-KONZEPTE

Alternative Technologien wurden bislang durch den hohen Entwicklungsstand und die ständigen Fortschritte der Siliziumtechnologie häufig bereits im Keim erstickt. Konzepte wie beispielsweise spin-basierte oder supraleitende Bauelemente, die nicht in direkter Konkurrenz zur Silizium-Technologie stehen, dürften die größten Realisierungspotenziale haben. Bei zukünftigen Konzepten kann man z. B. an probabilistische Konzepte für Single-Photon oder Single-Electron Bauteile denken. Es erscheint lohnend, neue und von der Natur inspirierte Systemkonzepte zur Informationsverarbeitung auf molekularer und biomolekularer Basis zu untersuchen. Eine wichtige Rolle bei zukünftigen Systemarchitekturen spielen die Verbindungstechniken. Beispiele innovativer Konzepte sind drahtlose Verbindungen⁷⁸ und 3D-Integration.⁷⁹

Im Zusammenhang mit der Entwicklung von neuen Bauelemente-, Technologie- und Systemkonzepten ist die Erforschung der Schnittstellen zur klassischen Elektronik wichtig.

3.2.8 FAZIT FERNZIELE

Nanoelektronik ist eine neue Basistechnologie, deren Beherrschung innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette für den Bestand einer Volkswirtschaft von entscheidender Bedeutung ist. Dazu gehört Führerschaft im Bereich der Technologieentwicklung und davon abgeleiteten Innovationen. Es existieren verschiedene Entwicklungslinien, wobei die klassische Siliziumtechnologie gegenwärtig volumenmäßig dominant ist und aus heutiger Sicht bis 2020 noch über ein erhebliches Entwicklungspotenzial verfügt. Trotzdem zeichnet sich deutlich ab, dass die Entwicklung der komplementären Silizium MOS Technologie an ihre inhärenten physikalischen (und Kosten-) Grenzen stoßen wird. Die Forschung auf vielen Gebieten der Nanoelektronik weist darüber hinaus ein beachtliches Potenzial für innovative Bauelemente und Systemarchitekturen auf. Im Sinne der Sicherung der europäischen Wirtschaft ist eine intensive Weiterentwicklung der Nanoelektronik sowohl in den Bereichen der klassischen Siliziumtechnologie als auch in den Bereichen innovativer organischer und kohlenstoffbasierter Halbleitermaterialien erforderlich. Dasselbe gilt für die Erforschung und frühzeitige Überleitung in die Entwicklung von stärker zukunftsorientierten Lösungsansätzen basierend auf neuartigen Materialien und neuartigen Bauelementen (Spintronik, Plasmonik, supraleitende Bauelemente). In all diesen Bereichen sind Standorte in Forschung, Entwicklung und Fertigung innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette in Deutschland und in Europa von großer Bedeutung.

⁷⁶ Averin 2000; Russer 2010; Gross 2010.

⁷⁷ Gea-Banacloche 2010.

⁷⁸ Russer 2010a.

⁷⁹ Fischbach/Lienig 2009.

4 EMPFEHLUNGEN

4.1 EMPFEHLUNGEN ZUR STRATEGISCHEN AUSRICHTUNG DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

> acatech empfiehlt,

den uneingeschränkten Zugang zu allen Basistechnologien der Wertschöpfungskette in Deutschland und Europa sicherzustellen und die Entwicklung der Nanoelektronik in Deutschland durch politische Maßnahmen zu fördern, da gegenwärtig globale Wettbewerbsverzerrungen für diese wichtigen Schlüsseltechnologien bestehen.

Für die Verfügbarkeit der gesamten technologischen Wertschöpfungskette muss der uneingeschränkte Zugang zu allen wichtigen Basistechnologien und ihrer Fortentwicklung gesichert werden. Sie ist die Basis für Gesamtsystemoptimierungen und für die Erhaltung der Innovationsfähigkeit und damit der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrielandschaft. Dabei ist es insbesondere wichtig, dass die für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit notwendigen Basistechnologien in Deutschland und Europa in der Forschung und der Industrie vorhanden sind. Alle Ebenen der Wertschöpfungskette sollten zumindest innerhalb der Europäischen Union vorhanden sein, damit die Möglichkeit besteht, auf geänderte wirtschaftliche Rahmenbedingungen zu reagieren. Auf diesem Gebiet empfiehlt acatech eine industriepolitische Förderung, z. B. auch durch das Wirtschaftsministerium (BMWi). Dabei sind insbesondere auch Maßnahmen zum Schutz der deutschen und europäischen Industrie vor den Folgen von Wettbewerbsverzerrungen durch die Förderpolitik und die staatliche Auftragsvergabe in außereuropäischen Regionen gefordert.

> acatech empfiehlt

die Entwicklung von Abläufen und Strukturen, die den wirtschaftlichen Zugang zu Technologien für Massenmärkte

auch für KMU ermöglichen. Das BMWi bietet sich hier für eine Koordinierung an.

In zunehmendem Maße werden neue Technologien in der Nanoelektronik zunächst für Massenmärkte und damit für Produkte mit großen Stückzahlen entwickelt. Daher sind die Auftragshersteller auf Massenproduktion ausgerichtet und stellen für den wirtschaftlichen Zugang zu ihren Technologien meist hohe Stückzahlenanforderungen. Insbesondere KMU mit spezialisierten Produkten in profitablen Nischenmärkten können daher die Möglichkeiten zur Verbesserung von Kosten und Leistungsfähigkeit in diesen Technologien nicht nutzen. Daher wird die Etablierung von Geschäftsprozessen empfohlen, die diese Zugangshürden reduzieren können. Eine Möglichkeit für eine solche Umsetzung besteht in der Bündelung der Aufträge einzelner Unternehmen, um gemeinsam ein höheres Auftragsvolumen zu erlangen.

> acatech empfiehlt,

die Systemkompetenz und Technologien zur Systemintegration in Deutschland vorzuhalten und fortzuentwickeln.

Durch zunehmende Verwendung von Multi-Chip Packages und System-on-Chip Ansätzen erlangen die hierfür verwendeten Basistechnologien, u. a. auch die 3D Integration, immer stärkere Bedeutung. Zudem gewinnen diese Komponenten immer größeren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.

> acatech empfiehlt,

auf eine abgestimmte Entwicklung der Technologie- und Systemseite zu achten.

Neue Technologien und Konzepte werden sich am Markt nur durchsetzen können, wenn sie zu besseren Problem-

lösungen im Vergleich zu bereits bestehenden Produkten führen. Daher muss die gesamte Technologiekette bis zum Gesamtsystem betrachtet werden. Bereits ab dem Beginn von Entwicklungsprojekten sollte die Technologie- und die Systemseite abgestimmt vorangetrieben werden.

4.2 EMPFEHLUNGEN ZU FORSCHUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG

> acatech empfiehlt

die verstärkte Förderung der Systemintegration und der Zuverlässigkeit von Sensorik und Aktorik.

Die Kombination von nanoelektronischen Systemen mit Sensorik und Aktorik ist ein starkes Innovationselement für viele wichtige Anwendungsbereiche. Darunter fallen in besonderem Maße die zukünftigen gesellschaftlichen Herausforderungen wie Umweltschutz, Energieeffizienz und eine alternde Bevölkerung. Gleichzeitig besteht ein erheblicher Entwicklungs- und Finanzierungsbedarf hinsichtlich der Systemintegration und einer Verbesserung der Zuverlässigkeit von sensorischen und aktorischen Komponenten.

> acatech empfiehlt

die Erforschung und Entwicklung von Bauelementen auf Basis von organischen Halbleitern.

Derartige Bauelemente sind für kostengünstige und großflächige Bauelemente, z. B. Bildschirme, von großer Bedeutung und bereits an der Schwelle zur industriellen Produktion.

> acatech empfiehlt

ein Engagement der Industrie in der Entwicklung von Bauelementen auf Basis von kohlenstoffbasierten Materialien und deren weitere Erforschung.

Materialien wie Kohlenstoff-Nanoröhren und Graphen haben hervorragende Eigenschaften als Basismaterialien für eine Vielzahl von innovativen Bauelementen. Mit Kohlenstoff-Nanoröhren lassen sich in Drucktechnik kostengünstig Transistoren und Schaltkreise herstellen. Integrierte Schaltkreise auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren oder Graphen können die Leistungsdaten der besten Halbleiterschaltkreise übertreffen. Integrierte Antennen auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren oder Graphen können vielfältige Anwendungen (Chip-to-Chip Kommunikation, Energy Harvesting) finden. Besonders interessant sind die Kohlenstoff-Nanoröhren und Graphen für Anwendungen in Superkondensatoren zur Energiespeicherung.

> acatech empfiehlt

die Erforschung und Entwicklung neuartiger Bauelemente wie z. B. magnetische Bauelemente, plasmonische Bauelemente, zelluläre Automaten, supraleitende Bauelemente, biologische Bauelemente.

Diese Bauelemente erfordern noch größere Forschungsanstrengungen bis zur Erreichung der Schwelle für die industrielle Entwicklung, haben jedoch eine so hohe zu erwartende Leistungsfähigkeit, dass es wichtig ist, diese Schwelle möglichst frühzeitig zu erreichen. Diese Forschungsanstrengungen sollten ermöglicht und unterstützt werden durch eine Finanzierung durch das BMBF. Durchgängig ist zu erarbeiten, welche Forschungsfelder die aussichtsreichsten sind und weiter zu verfolgen sind.

> acatech empfiehlt

intensive Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung.

Die Quanteninformationsverarbeitung hat sich inzwischen als Wissenschaftsdisziplin hervorragend etabliert und weist bereits beträchtliche wissenschaftliche Erfolge auf. Trotzdem sind viele wesentliche Fragen noch ungeklärt. Insofern ist auf diesem Gebiet ein sehr weiter zeitlicher Horizont anzusetzen. Wegen des sehr großen Potenzials der Quanteninformationsverarbeitung ist diesem Gebiet eine entsprechende Wichtigkeit beizumessen. Insbesondere ist bei diesen Entwicklungen verstärkt ein ingenieurmäßiges Systemdenken einzubringen.

4.3 EMPFEHLUNGEN ZU FORSCHUNG UND FORSCHUNGSSTRUKTUREN

> acatech empfiehlt

für Themenstellungen der Nanoelektronik die Etablierung von fokussierten Forschungszentren in Deutschland unter starker Einbeziehung der Industrie. Eine Doppelung von Strukturen, etwa in verschiedenen Regionen, ist dabei zu vermeiden. Die Initiative zu solchen Forschungszentren könnte vom BMBF ausgehen und gemeinsam mit den Forschungsorganisationen und den Hochschulen umgesetzt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass vorhandene deutsche Infrastrukturen einbezogen werden und eine Kooperation mit anderen europäischen Forschungseinrichtungen vorgesehen wird.

Auch und gerade im Bereich der Nanoelektronik ist es erstrebenswert, die Zusammenarbeit zwischen Industrie, Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrich-

tungen – insbesondere durch personelle Vernetzung – zu intensivieren, um innovative Produkte zu realisieren. Zugleich muss durch gegenseitige Abstimmung eine regionale Zersplitterung der Kompetenzen und Mittel in den Themengebieten der Nanoelektronik verhindert werden. Nur so können international sichtbare und erfolgreiche Zentren mit einem Keimzellencharakter für Innovationen und Produkte und Wirtschaftswachstum entstehen.

> acatech empfiehlt,

die Umsetzung der Nanoelektronik von der Forschung in die Produktion systematisch zu fördern.

Hierzu ist ein Prozess zu etablieren, um systematisch zu evaluieren, welche neuen Entwicklungen in der nationalen und internationalen Forschung für die deutsche Wirtschaft von besonderer Bedeutung sind. Auf solchen Feldern müssen gezielte produktorientierte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zügig in Gang gesetzt und gefördert werden. Dabei sind auch die Generierung von Schlüsselpatenten und die Förderung von Spin-Offs wichtig. Das vorrangige Ziel dieser Maßnahmen muss sein, der deutschen Industrie durch frühen Markteintritt mit neuen Produkten Differenzierungsvorteile zu verschaffen.

LITERATURVERZEICHNIS

Abstreiter 2010

III-V Based Hetero-Nanowires. (International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics, Technische Universität München, 8.-9.9.2010) unv. Ms., 2010.

acatech 2011

acatech (Hrsg.): Organische Elektronik in Deutschland. Bewertung und Empfehlungen für die Weiterentwicklung (acatech berichtet und empfiehlt, Nr. 6), Heidelberg u.a.: Springer Verlag, 2011.

Averin 2000

Averin, D.: "Quantum computing and quantum measurement with mesoscopic Josephson junctions", in: Fortschritte der Physik 48 (2000), Nr. 9-11, S. 1055-1074.

Awano 2010

Awano, Y./Sato, S./Nihei, M./Sakai, T./Ohno, Y. und Mizutani, T.: "Carbon Nanotubes for VLSI: Interconnect and Transistor Applications", in: Proceedings of the IEEE 98 (2010), Nr. 12, S. 2015-2031.

Banerjee 2010

Banerjee, S. K./Register, L. F./Tutuc, E./Basu, D./Kim, S./Reddy, D./MacDonald, A. H.: "Graphene for CMOS and Beyond CMOS Applications", in: Proceedings of the IEEE 98 (2010), Nr. 12, S. 2032-2046.

Borel 2009

Borel, J.: European Roadmap for design automation in semiconductor products. (vormals MEDEA + EDA Roadmap), 6. Aufl., Paris, 2009.

Cerofolini et al. 2005a

Cerofolini, G. F./Arena, G./Camalleri, C. M./Galati, C./Reina, S./Renna, L./Mascolo, G.: "A hybrid approach to nanoelectronics". In: Nanotechnology 16 (2005), Nr. 8, S. 1040-1047.

Cerofolini et al. 2005b

Cerofolini, G. F./Arena, G./Camalleri, C. M./Galati, C./Reina, S./Renna, L./Mascolo, G./Nosik, V.: "Strategies for nanoelectronics". In: Microelectronic Engineering 81 (2005), Nr. 2-4, S. 405-419.

Compañó 2001

Compañó, R.: Technology Roadmap for Nanoelectronics. (European Commission IST Programme Future and Emerging Technologies), Brüssel, 2001.

CORDIS 2009

Community Research and Development Information Service: What is FP6: Nanotechnologies and nano-sciences, knowledge-based multifunctional materials and new production processes and devices. URL: <http://cordis.europa.eu/fp6/nmp.htm> [Stand: 12.3.2009].

Crawley 2007

Crawley, T. (Hrsg.): Commercialisation of Nanotechnology – Key Challenges, Helsinki, 2007.

Csaba 2005

Csaba, G./Lugli, P./Csurgay, A./Porod, W.: "Simulation of power gain and dissipation in field-coupled nanomagnets", in: J. Comput. Electron. 4 (2005), Nr. 1-2, S. 105-110.

DEST 2006

Division of Ethics of Science and Technology: The Ethics and Politics of Nanotechnology, Paris, 2006.

EDA 2010

Edacentrum: Strategiepapier eDesign 2010-2014, Hannover, 2010.

ENIAC Working Group SRA 2005

ENIAC Working Group SRA: Strategic Research Agenda – Executive summary. (European Nanoelectronics Initiative Advisory Council), Eindhoven, 2005.

Feynman 1959

Feynman, R. P.: Plenty of Room at the Bottom. (Transcript of a talk presented to the American Physical Society in Pasadena on 29.12.1959), 1959.

Fischbach/Lienig 2009

Fischbach, R./Lienig, J.: 3D-Integration und 3D-Datenstrukturen – Eine Übersicht (Proceedings of the eda Workshop 09), S. 7-12, Berlin, VDE Verlag, 2009.

Friederich/Schmitt-Landsiedel 2011

Friederich, C./Schmitt-Landsiedel, D.: Elektronik im Kleinen – gestern und heute. In: Russer 2011.

Frost & Sullivan 2003

Frost & Sullivan Research Service: Nanoelectronics: Markets, Applications, and Technology Developments, Technical Insights. San Antonio, Texas, 2003.

Frost & Sullivan 2008

Frost & Sullivan Research Service: Nanoscale Electronics; Devices and Systems- Technology Analysis, D18A, Technical Insights. San Antonio, Texas, 2008.

Frost & Sullivan 2010

Frost & Sullivan Research Service: Nanomaterials Application Roadmap: The 2030 Szenario, D1CF, Technical Insights. San Antonio, Texas, 2010.

Gea-Banacloche 2010

Gea-Banacloche, J.: "Quantum Computers: A Status Update", in: Proceedings of the IEEE 98 (2010), Nr. 12, S. 1983-1985.

Glesner et al. 2011

Glesner et al.: „Podiumsdiskussion ‚Quo Vadis Nanoelektronik?‘“ In: Russer 2011.

Gross 2010

Gross, R.: Solid State Nanostructures for Quantum Electronics. (International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics, Technische Universität München, 8.-9.9.2010), unv. Ms., 2010.

Hahn 2010

Hahn, K.: Materials for high efficient organic LED. (International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics, Technische Universität München, 08.-09.09.2010) unv. Ms., 2010.

High Level Group of the European Commission 2004

High Level Group of the European Commission: Vision 2020 Nanoelectronics, Brüssel, 2004.

IEEE 2010

"Nanoelectronics Research for Beyond CMOS Information Processing" (Special Issue). Proceedings of the IEEE 98 (2010), Issue 12.

Islam/Miyazaki 2009

Islam, N./Miyazaki, K.: Nanotechnology Innovation System: "Understanding hidden dynamics of nanoscience fusion trajectories". In: Technological Forecasting and Social Change 76 (2009), Nr. 1, S. 128-140.

IST Advisory Group 2003

IST Advisory Group: Ambient Intelligence: from vision to reality. URL: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/istag-ist2003_consolidated_report.pdf [Stand: 17.12.2010].

Kasper 2009

Kasper, E./Kissinger, D./Russer, P./Weigel, R.: "High Speeds in a Single Chip". In: IEEE microwave magazine 10 (2009), Issue 7, S. 28-33.

Klauk 2010

Klauk, H.: Fabrication and Characteristics of Organic Nanoscale Transistors. (International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics, Technische Universität München, 8.-9.9.2010) unv. Ms., 2010.

KOM 2009

EU-Kommission: An die Zukunft denken: Entwicklung einer gemeinsamen EU-Strategie für Schlüsseltechnologien. (Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, Nr. 512.) Brüssel, 2009.

Kurz 2010

Kurz, H.: Graphene - Hype and Hope. (International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics, Technische Universität München, 8.-9.9.2010), unv. Ms., 2010.

Lux 2007

Lux Research: Profiting from International Nanotechnology. 2007.

MEDEA+ 2003

MEDEA+: Medea+ Applications Technology Roadmap. URL: http://www.catrene.org/web/downloads/ExecChapters_ATRM.pdf [Stand: 12.02.2011].

MEDEA Office Association 2007

MEDEAOfficeAssociation: CATRENE White Book. Part A: Rationale and Organisation. URL: http://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/EUREKA/e-dokuman/11.pdf [Stand: 12.02.2011].

Medea+ Working Group 2007

Medea+ Working Group: Towards and Beyond 2015. URL: <http://www2.imec.be/content/user/File/MEDEAreport.pdf> [Stand: 22.02.2011].

NNI 2007

Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology: The National Nanotechnology Initiative- Strategic Plan 2007. Washington, DC, 2007.

Porod 2010

Porod, W.: Magnet Logic., (International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics, Technische Universität München, 8.-9.9.2010), unv. Ms., 2010.

Riel 2010

Riel, H.: Towards Ultimate Scaling – Semiconducting Nanowires & Molecular Electronics. (International Symposium on Frontiers of the Nanoelectronics, Technische Universität München, 8.-9.9.2010), unv. Ms., 2010.

Rockman 2004

Rockman, H. B.: Intellectual property law for engineers and scientists. Hoboken, NJ, 2004.

Rötzer 2010

Rötzer, I. Intelligente Winzlinge, München, Fraunhofer-Gesellschaft, 2010, S. 47.

Ruge 1989

Diekhof, R./Schmidt-Klingenberg, M.: "Wichtig ist, daß wir nicht erpreßbar sind". (Spiegel-Gespräch mit Ingolf Ruge.) In: DER SPIEGEL 17/1989, S. 118-135

Russer et al. 2010

Russer, P./Fichtner, N.: "Nanoelectronics in Radio-Frequency Technology". In: IEEE Microwave Magazine 11 (2010), Nr. 3, S. 115-135.

Russer et al. 2010a

Russer, P./Fichtner, N./Lugli, P./Porod, W./Russer, J. A./Yordanov, H.: "Nanoelectronics based monolithic integrated antennas for electromagnetic sensors and for wireless communications". In: IEEE Microwave Magazine 11 (2010), Nr. 7, S. 58-71.

Russer et al. 2011

Russer, P./Lugli, P./Hess, K./Russer, J. A.: "Fernziele der Nanoelektronik". In: Russer 2011.

Russer 2011

Russer, P. (Hrsg.): Nanoelektronik, Heidelberg u. a.: Springer Verlag, im Erscheinen 2011 (acatech DISKUTIERT).

Schaffer 2005

Schaffer, B.: "Die Silizium-Pioniere". In: Pictures of the Future (Zeitschrift der Siemens AG für Forschung und Innovation) 5 (2005), Nr. 2, S. 94-95.

Schmitt-Landsiedel/Werner 2009

Schmitt-Landsiedel, D./Werner, C.: "Innovative Devices for Integrated Circuits – a Design Perspective". In: Solid-State-Electronics 53 (2009), Nr. 4, S. 411-417.

Smith 2007

Smith, A: Roadmapping Congestion? (Nanotechnology Industry Association), Brüssel, 2007.

SMWK 2009

Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst: Der Mikroelektronik-Standort Dresden und Umgebung, Dresden, 2009.

Stark 2007

Stark, D. (Hrsg.): Nanotechnology in Europe – Ensuring the EU Competes Effectively on the World Stage (Nanoforum), Düsseldorf, 2007.

Thielmann 2009

Thielmann, A./Zimmermann, A./Gauch, S./Nusser, M./Hartig, J./Wydra, S./Blümel, C./Blind, K.: TAB - Innovationsreport: Blockaden bei der Etablierung neuer Schlüsseltechnologien, Berlin, 2009.

Thompson/Parthasarathy 2006

Thompson, S. E./Parthasarathy, S.: "Moore's law: the future of Si microelectronics". In: Materials Today 9 (2006), Nr. 6, S. 20-25.

Tolfree/Smith 2009

Tolfree, D./Smith, A.: Roadmaps in the electronics industry, Leicester, 2009.

VDE 2008

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: Experten Panel Mikroelektronik (VDE Positionspapier), Frankfurt/Main, 2008.

VDE 2009

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: Integrierte Intelligenz: Perspektiven der Mikrosystemtechnik, Frankfurt/Main, 2009.

VDE/ZVEI 2010

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V./Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.: Berliner Protokolle (VDE/ZVEI-Expertenpanel Mikroelektronik), Frankfurt/Main, 2010.

VDI-TZ 2006

VDI-TZ GmbH (Hrsg.): Nanotechnologie in Dresden/Sachsen (Zukünftige Technologien Nr. 60), Düsseldorf, 2006.

Wang 2002

Wang, K. L.: "Issues of nanoelectronics: A possible roadmap". In: Journal of Nanoscience and Nanotechnology 2 (2002), Nr. 3-4, S. 235-266.

Wang et al. 2008

Wang, K. L./Galatsis, K./Ostroumov, R./Khitun, A./Zhao, Z./Han, S.: "Nanoarchitectonics for Heterogeneous Integrated Nanosystems". In: Proceedings of the IEEE 96 (2008), S. 212-229.

ZEW/TNO 2010

Aschhoff, B./Crass, D./Cremers, K./Grimpe, C./Rammer, C./Brandes, F./Diaz-Lopez, F./Klein Woolthuis, R./Mayer, M./Montalvo, C.: European Competitiveness in Key Enabling Technologies (Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Mannheim, Deutschland, und TNO, Delft, Niederlande), Mai 2010.

ZTransfBw 2010

Zentrum für Transformation der Bundeswehr: Peak Oil – Sicherheitspolitische Implikationen knapper Ressourcen, Straußberg, 2010.

**> BISHER SIND IN DER REIHE „acatech BEZIEHT POSITION“ FOLGENDE BÄNDE
ERSCHIENEN:**

acatech (Hrsg.): *Leitlinien für eine deutsche Raumfahrtspolitik* (acatech bezieht Position, Nr. 7), Heidelberg u.a.: Springer Verlag 2011.

acatech (Hrsg.): *Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann* (acatech bezieht Position, Nr. 6), Heidelberg u.a.: Springer Verlag 2010.

acatech (Hrsg.): *Intelligente Objekte – klein, vernetzt, sensitiv* (acatech bezieht Position, Nr. 5), Heidelberg u.a.: Springer Verlag 2009.

acatech (Hrsg.): *Strategie zur Förderung des Nachwuchses in Technik und Naturwissenschaft. Handlungsempfehlungen für die Gegenwart, Forschungsbedarf für die Zukunft* (acatech bezieht Position, Nr. 4), Heidelberg u.a.: Springer Verlag 2009.

acatech (Hrsg.): *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik in Deutschland. Empfehlungen zu Profilbildung, Forschung und Lehre* (acatech bezieht Position, Nr. 3), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

acatech (Hrsg.): *Innovationskraft der Gesundheitstechnologien* (acatech bezieht Position, Nr. 2), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

acatech (Hrsg.): *RFID wird erwachsen. Deutschland sollte die Potenziale der elektronischen Identifikation nutzen* (acatech bezieht Position, Nr. 1), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

> **acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN**

acatech vertritt die Interessen der deutschen Technikwissenschaften im In- und Ausland in selbstbestimmter, unabhängiger und gemeinwohlorientierter Weise. Als Arbeitsakademie berät acatech Politik und Gesellschaft in technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Darüber hinaus hat es sich acatech zum Ziel gesetzt, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu erleichtern und den technikwissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Zu den Mitgliedern der Akademie zählen herausragende Wissenschaftler aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. acatech finanziert sich durch eine institutionelle Förderung von Bund und Ländern sowie durch Spenden und projektbezogene Drittmittel. Um die Akzeptanz des technischen Fortschritts in Deutschland zu fördern und das Potenzial zukunftsweisender Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft deutlich zu machen, veranstaltet acatech Symposien, Foren, Podiumsdiskussionen und Workshops. Mit Studien, Empfehlungen und Stellungnahmen wendet sich acatech an die Öffentlichkeit. acatech besteht aus drei Organen: Die Mitglieder der Akademie sind in der Mitgliederversammlung organisiert; ein Senat mit namhaften Persönlichkeiten aus Industrie, Wissenschaft und Politik berät acatech in Fragen der strategischen Ausrichtung und sorgt für den Austausch mit der Wirtschaft und anderen Wissenschaftsorganisationen in Deutschland; das Präsidium, das von den Akademiemitgliedern und vom Senat bestimmt wird, lenkt die Arbeit. Die Geschäftsstelle von acatech befindet sich in München; zudem ist acatech mit einem Hauptstadtbüro in Berlin vertreten

Weitere Informationen unter www.acatech.de

> **DIE REIHE „acatech BEZIEHT POSITION“**

in der Reihe „acatech bezieht Position“ erscheinen Stellungnahmen der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften zu aktuellen technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Themen. Die Veröffentlichungen enthalten Empfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Die Stellungnahmen werden von acatech Mitgliedern und weiteren Experten erarbeitet und dann von acatech autorisiert und herausgegeben.

