

> Nanoelektronik

Kleiner – schneller – besser

Peter Russer/Paolo Lugli/
Marc-Denis Weitze (Hrsg.)

acatech DISKUSSION



Springer Vieweg



acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

> Nanoelektronik

Kleiner – schneller – besser

Peter Russer/Paolo Lugli/
Marc-Denis Weitze (Hrsg.)

acatech DISKUSSION

Juli 2013

Herausgeber

Prof. Dr. techn. Dr. h. c. Peter Russer
Institut für Nanoelektronik
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80333 München

Prof. Dr.-Ing. Paolo Lugli
Lehrstuhl für Nanoelektronik
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80333 München

Dr. Marc-Denis Weitze
acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften
Residenz München
Hofgartenstraße 2
80539 München

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2013

Geschäftsstelle
Residenz München
Hofgartenstraße 2
80539 München

Hauptstadtbüro
Unter den Linden 14
10117 Berlin

Brüssel-Büro
Rue du Commerce/
Handelsstraat 31
1000 Brüssel

T +49 (0) 89 / 5 20 30 90
F +49 (0) 89 / 5 20 30 99

T +49 (0) 30 / 2 06 30 96 10
F +49 (0) 30 / 2 06 30 96 11

T +32 (0) 2 / 5 04 60 60
F +32 (0) 2 / 5 04 60 69

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

Empfohlene Zitierweise:

Russer, Peter/Lugli, Paolo/Weitze, Marc-Denis (Hrsg.): *Nanoelektronik. Kleiner – schneller – besser* (acatech DISKUSSION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2013.

ISSN: 2192-6182/ISBN 978-3-642-35790-9/ISBN 978-3-642-35791-6 (eBook)

DOI: 10.1007/978-3-642-35791-6

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Lektorat: Holger-Jens Schnell

Layout-Konzeption: acatech

Konvertierung und Satz: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

DIE REIHE acatech DISKUSSION

Diese Reihe dokumentiert Symposien, Workshops und weitere Veranstaltungen der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Die Bände dieser Reihe liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgeber und Autoren.

> INHALT

- > **ELEIWORD** 8
Wolfgang M. Heckl
- > **EINLEIUNG** 8
Paolo Lugli/Peter Russer/Marc-Denis Weitze
- > **ELEKTRONIK IM KLEINEN – ENTWICKELN UND HEUTIGES
BEREICHSDEFINITION UND HINRICHTUNG ZUR NANOELEKTRONIK** 18
Christoph Friederich/Doris Schmitt-Landsiedel
- > **ZUSAMMENFASSUNG DES acatech/DFG-RUNDSPRACHS** 38
Nikolaus Fichtner/Christoph Friederich/Marc-Denis Weitze
- > **NAHZIELE IN DER NANOELEKTRONIK** 88
Wolfgang Arden
- > **HERAUSFORDERUNGEN IN DER NANOELEKTRONIK** 11
Nikolaus Lange
- > **DIE „NANOELEKTRONIKS RESEARCH INITIATIVE“** 88
Wolfgang Porod
- > **DIE FÖRDERUNG VON ELEKTRONIKSSEKTOR UND ELEKTROMOBILITÄT
DURCH DAS BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG** 83
Ulrich Katenkamp
- > **BEFRAGUNG ZUR ZUKUNFT DER NANOELEKTRONIK UNTER
NATIONALEN EXPERIMENTEN** 83
Elna Schirrmeister/Rolf Gausepohl/Sven Wydra

- > **HOCHEFFIZIENTE ORGANISIERTE BAUELEMENTE –
NEUE ENTWICKLUNGEN AUS SAARSEN** 123
Karl Leo/Annette Polte
- > **NOVALEKTRON DER IDEE ZUM PRODUKT** 130
Jan Blochwitz-Nimoth
- > **GEDANKEN ZUR ZUKUNFT DER ELEKTRONIK IN EUROPA** 100
Alex Dommann
- > **FERNZIELE DER NANOELEKTRONIK** 100
Peter Russer/Paolo Lugli/Karl Hess/Johannes Russer/Giuseppe Scarpa
- > **FRONTIERS OF THE NANO-ELECTRONICS PANEL DISCUSSION** 220
Manfred Glesner/Johannes Russer
- > **ANHANDLUNGSPROGRAMMABLAUFE DER VERANSTALTUNGEN** 203
- > **AUßERINNEN UND AUßEREN** 200

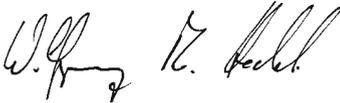
> ELEI WOR

WOLFAN M. HEKL

Bis heute besteht eine hohe Diskrepanz zwischen den großen Chancen, die man sich von Nanotechnologie verspricht, und deren geringer Bekanntheit in der Öffentlichkeit: Mehr als die Hälfte der Europäer haben von Nanotechnologie noch nichts gehört, wie etwa die EU-Studie „Europeans and Biotechnology in 2010“ feststellt. Nach Jahren intensiver Forschung befinden wir uns nun in einer Phase, in der „Nano“-Produkte auf den Markt kommen: Mehrere hundert Produkte enthalten synthetische Nanopartikel, also Teilchen mit Abmessungen im Bereich von Millionstel Millimetern. Tennis- und Golfschläger werden durch Nanozusätze im Kunststoff stabiler, Sonnencremes bieten mit Nanopartikeln aus Titandioxid einen besonders guten Schutz vor UV-Strahlung. Solche Anwendungen betreffen uns Menschen unmittelbar in Medizin, Kosmetik und Ernährung. Es stellen sich viele Fragen zu Chancen, Risiken und Problemlösungen: Was können wir uns von der Nanomedizin erhoffen? Wie wirken Nanomaterialien in Kosmetik? Wie schmeckt Nano – und ist es gesund? Diese Fragen behandelte acatech im Rahmen eines Symposiums „Nano im Körper“ im Jahr 2010.

All diese Fragen treffen die Nanoelektronik freilich nicht unmittelbar. Nanoelektronik birgt zunächst keine Gesundheits- und Umweltrisiken wie freie Nanopartikel. Zwar können sich wohl bei Produktion und Entsorgung Risiken ergeben, aber weniger beim Gebrauch. „Nano“ ist hier in makroskopische Bauteile verkapselt.

Die Herausforderungen der Nanoelektronik liegen woanders: Obwohl diese Technik unverzichtbar und allgegenwärtig ist, bleibt sie – ähnlich wie die Chemie oder Werkstoffe – meist verborgen hinter der Benutzeroberfläche, integriert in Autos oder andere Geräte. Nanoelektronik verschmilzt mit anderen Branchen und bleibt dabei allzu oft unsichtbar. Solche Unsichtbarkeit einer Schlüsseltechnologie bringt langfristig Probleme hinsichtlich des Nachwuchses: So entscheiden sich nur wenige junge Menschen für einen entsprechenden Beruf. Frühe Techniksozialisation wird durch Elektronik anscheinend nicht in dem Maße ermöglicht wie in vorangehenden Generationen durch Fahrrad-reparatur, Heimwerkertätigkeit, Plastikbausteine und Modellbahnen. Eine industriepolitische Förderung, wie sie von acatech empfohlen wird, könnte auch zu einer erhöhten Sichtbarkeit der Nanoelektronik beitragen – und eine Abwärtsspirale von Unsichtbarkeit und Unattraktivität stoppen.



Wolfgang M. Heckl

Generaldirektor des Deutschen Museums

Inhaber des Oskar von Miller Lehrstuhls für Wissenschaftskommunikation an der TUM School of Education

Sprecher des acatech Themennetzwerks Nanotechnologie

> EINLEITUNGEN

PAOLO LUZZI/PEER RUSSEK/MARCO DENIS WEIßE

Nano ist klein und wird mit Größenabmessungen um 1 bis 100 Nanometer verknüpft. Demnach wechselt die Mikroelektronik durch Miniaturisierung von Abmessungen der Mikrometer- zur Nanometerskala automatisch zur Nanoelektronik. Tatsächlich ist das bereits geschehen: „Die Mikroelektronik ist [...] durch intensive Forschungs- und Förderanstrengungen schon längst zur Nanoelektronik geworden“, hieß es im Jahr 2003.¹

Die Nanoelektronik 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 hinab zu molekularen und atomaren Dimensionen erreicht oder für die Zukunft angestrebt.

Bisweilen wird allerdings argumentiert, dass solch ein Übergang von „mikro“ nach „nano“ gar nicht gegeben sei, wenn sich zwar die geometrischen Abmessungen verkleinert haben, die Funktion der Strukturen aber gar nicht auf diese Miniaturisierung zurückzuführen ist.² Doch verlangt die Erzeugung der Strukturen unterhalb 100 Nanometer durchaus neue Verfahren, und Isolationsschichten sind mitunter nur wenige Atomlagen dick, sodass quantenmechanische Effekte auftreten, die man aus der Mikroelektronik gar nicht kennt.³ So entstehen auch neue Anwendungsfelder. Mithin ist es sinnvoll, von „Nanoelektronik“ als eigenem Feld zu sprechen.

In der im Frühjahr 2011 vorgestellten acatech POSITION über die Bedeutung der Nanoelektronik als Schlüsseltechnologie für den Industriestandort Deutschland (Abbildung 1) wurde die Wichtigkeit der Nanoelektronik als Basis- und Schlüsseltechnologie für weite Bereiche der Industrieproduktion und Wertschöpfung in Deutschland dargestellt.⁴ Elektronische Komponenten kommen heute in fast allen Geräten und Systemen der industriellen Produktion vor. Mehr als 50 Prozent der Wertschöpfung in entsprechenden Produkten und Dienstleistungen gehen heute auf Elektroniksysteme zurück, und das mit steigender Tendenz. Im Automotive-Bereich sind Elektronik und Elektrik Treiber von etwa 80 Prozent aller Innovationen.⁵

¹ BMBF 2003.

² Fiedeler et al. 2008, S. 2.

³ Schmitt-Landsiedel/Friederich 2011, S. 308 f.

⁴ acatech 2011.

⁵ VDE/ZVEI 2010.

Abbildung 1: Peter Russer präsentiert als Projektleiter das acatech Positionspapier zur Nanoelektronik auf dem Akademietag in Dresden im April 2011



Quelle: acatech.

Als Basis- und Schlüsseltechnologie ist die Nanoelektronik für große Bereiche der Industrieproduktion und Wertschöpfung von fundamentaler Bedeutung. Sie ist eine Zukunfts- und Schrittmachertechnologie mit umfassender Bedeutung für die Technologieentwicklung in weiten Bereichen der industriellen Produktion. In Anbetracht der Bedeutung, die die Elektronik künftig auf den Gebieten Kommunikation, Energieeffizienz, Mobilität, Medizintechnik und Umweltschutz haben wird, ist die Bedeutung der Nanoelektronik als Schlüsseltechnologie kaum zu überschätzen.

Die acatech POSITION kommt insbesondere zu dem Ergebnis, dass in Anbetracht der starken Position Deutschlands auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie sowie im Bereich der Nanotechnologie- und Nanoelektronik-Forschung die zunehmende Verlagerung von Produktionsstandorten nach Asien kritisch zu sehen ist. Für die Erhaltung der Innovationsfähigkeit und damit der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie wird die Verfügbarkeit der gesamten technologischen Wertschöpfungskette als unabdingbar erachtet. Ebenso müssen der uneingeschränkte Zugang zu allen wichtigen Basistechnologien sowie deren Fortentwicklung gesichert sein. Die uneingeschränkte Verfügbarkeit innovativer nanoelektronischer Schlüsselkomponenten ist die Basis für Gesamtsystemoptimierungen sowie für die Erhaltung der Innovationsfähigkeit und damit der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie. Es ist in diesem Zusammenhang auf

die acatech Publikation zur Migration von Wertschöpfung⁶ zu verweisen, in der auch die Anforderungen an die herstellende Industrie in Deutschland vor dem Hintergrund der Globalisierung untersucht werden.⁷ Zu den Vorteilen des Wertschöpfungsstandorts Deutschland gehören die mögliche enge Verkettung von Forschung, Entwicklung und Fertigung. Der grundsätzliche Zugriff auf wichtige Schlüsselbauelemente ist ein nicht zu überschätzender Faktor.

Die künftige Industrieproduktion in Deutschland und deren Wettbewerbsfähigkeit auf dem Weltmarkt wird wesentlich von der Verfügbarkeit elektronischer Komponenten höchster Leistungsfähigkeit abhängen. Deutschland steht vor der vierten industriellen Revolution, die durch eine fortschreitende Digitalisierung und das so genannte Internet der Dinge und Dienste gekennzeichnet ist.⁸ Das Internet der Dinge und Dienste besteht aus drahtlos untereinander und mit dem Internet vernetzten autonomen eingebetteten Systemen. Hier wird eine Vielfalt neuer Dienstleistungen entstehen.⁹ Intelligente Anwendungen der Informations- und Kommunikationstechnologie sind bereits heute in Büros, Fabriken, in Fahrzeugen, aber auch daheim unentbehrlich geworden und werden in Zukunft noch weiterreichende gesellschaftliche Konsequenzen und wirtschaftliche Potenziale entfalten.¹⁰ Besondere Bedeutung werden dabei sogenannte Cyber-Physikalische Systeme gewinnen. Dabei handelt es sich um Systeme, die auf der Verbindung von eingebetteten Systemen untereinander und mit Internetdiensten basieren und die das Internet der Dinge im Hinblick auf Komfort, Zuverlässigkeit, Information und Effizienz weiter zu entwickeln ermöglichen.¹¹ Nur durch innovative Entwicklungen auf diesen Gebieten wird Deutschland im globalen Wettbewerb in der Hochtechnologie und in der Produktionstechnik eine führende Position verteidigen können. Das Voranschreiten der Digitalisierung und der breitbandigen Vernetzung in den privaten, öffentlichen und industriellen Bereichen gestützt auf Cyber-Physikalische Systeme wachsender informationsverarbeitender Kapazität wird nur auf der Basis der Verfügbarkeit nanoelektronischer Komponenten höchster Leistungsfähigkeit möglich sein. Nur wenn in Deutschland und in Europa elektronische Bauelemente von im internationalen Vergleich höchster Leistungsfähigkeit entwickelt und gefertigt werden, lassen sich verhängnisvolle Abhängigkeiten vermeiden, die die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie in ihrer Gesamtheit existentiell gefährden würden.

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, wurden im Rahmen dieses Projekts Nahziele und Fernziele der Nanoelektronik mit jeweils eigener Methodik

⁶ Gausemeier/Tönshoff 2007.

⁷ Meyer 2007.

⁸ Kagermann 2012.

⁹ Heuser 2011.

¹⁰ Herzog/Schildhauer 2009.

¹¹ Geisberger 2012.

untersucht. Im Themenbereich Nahziele wurden insbesondere die industriennahe 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. Trotzdem wird in den kommenden Jahren die Siliziumelektronik noch den Massenmarkt dominieren. Hier ist es unverzichtbar, dass in Deutschland und in Europa eine Unabhängigkeit in der Produktion von Komponenten der Siliziumelektronik erreicht wird und verlorenes Terrain durch Reindustrialisierung im Bereich der Halbleiterproduktion zurückgewonnen wird.

Weiterhin finden mikroelektronisch-mechanische Systeme in vielen Anwendungen zunehmend Verwendung. Im Themenbereich Fernziele werden 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 Quanteninformationstechnologie. Dabei stellen sich die Übergänge zwischen diesen Themenbereichen fließend dar. Die Anstrengungen zur Entwicklung neuartiger elektronischer Komponenten sind ebenfalls mit großem Einsatz voranzutreiben, um für künftige Anforderungen der Informations- und Kommunikationstechnik optimal vorbereitet zu sein.

Der vorliegende Band fasst Beiträge zusammen, die im Rahmen der Arbeit der acatech Projektgruppe erstellt und diskutiert wurden und damit die Grundlage für die acatech POSITION *Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland* gebildet haben. Die Beiträge wurden teilweise aktualisiert.

LITERATUR

acatech 2011

acatech (Hrsg.): *Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland* (acatech BEZIEHT POSITION, Nr. 8), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

BMBF 2003

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): (BMBF-Staatssekretär Dudenhausen: Nanoelektronik made in Europe ist einer der wichtigsten Innovationsmotoren Pressemitteilung), 25. November 2003 (219/03). URL: http://www.bmbf.de/_media/press/pm_20031125-219.pdf [Stand: 30.08.2012].

Fiedeler et al. 2008

Fiedeler, U./Simkó, M./Gazsó, A./Nentwich, M.: *Zur Definition der Nanotechnologie* (NanoTrust-Dossier Nr. 001), Mai 2008, S. 2.

Tönshoff/Gausemeier 2007

Tönshoff, Hans Kurt/Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): *Migration von Wertschöpfung. Zur Zukunft von Produktion und Entwicklung in Deutschland* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Geisberger 2012

Geisberger, Eva/Broy, Manfred (Hrsg.): *agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems* (acatech STUDIE), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

Herzog/Schildhauer 2009

Herzog, Otthein/Schildhauer, Thomas (Hrsg.): *Intelligente Objekte. Technische Gestaltung – wirtschaftliche Verwertung – gesellschaftliche Wirkung* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Heuser 2011

Heuser, Lutz/Wahlster, Wolfgang (Hrsg.): *Internet der Dienste* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

Kagermann 2012

Kagermann, H./Wahlster, W./Helbig, J. (Hrsg.): *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*, Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, Oktober 2012. URL: <http://www.forschungsunion.de> [Stand: 30.08.2012].

Meyer 2007

Meyer, R.: „Entwickeln Sie schon auf Chinesisch? – Globalisierung als Chance für Entwicklung in Europa?“. In: Tönshoff, Hans Kurt/Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): *Migration von Wertschöpfung. Zur Zukunft von Produktion und Entwicklung in Deutschland* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007, S. 53 – 60.

Schmitt-Landsiedel/Friederich 2011

Schmitt-Landsiedel, D./Friederich, C.: „Von der Mikroelektronik zur Nanoelektronik“. In: Kehrt et al.: *Neue Technologien in der Gesellschaft*, 2011, S. 303 – 315.

VDE/ZVEI 2010

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

> ELEKTRONIK IM KLEINEN – ERSTERN UND HEUTER BEGRIFFSDEFINITION UND HINTERGRÜNDE ZUR NANOELEKTRONIK

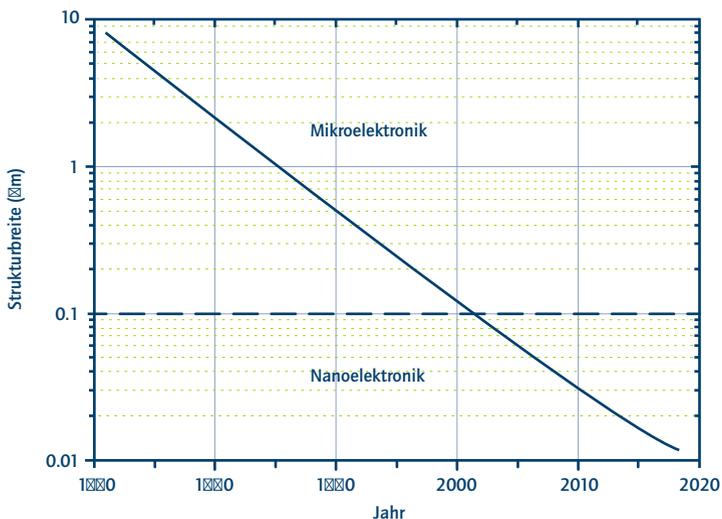
CHRISTOPH FRIEDRICH/DORIS SCHMIDLANDSIEDEL

1 NANOELEKTRONIK – BEGRIFFSDEFINITION

1.1 WAS IST NANOELEKTRONIK

Der Begriff „Nanoelektronik“ ist allein schon in seinen Wortbestandteilen eng mit dem Begriff „Mikroelektronik“ verwandt. Eine naive Interpretation kann also lauten, dass Nanoelektronik einfach Mikroelektronik im Nanometerbereich ist (das heißt mit Strukturgrößen kleiner als 100 nm, vgl. Abbildung 1). Aber rechtfertigt schon die fortschreitende Skalierung der Bauelemente, immerhin eines der Hauptcharakteristika der Mikroelektronik, bis in den Größenbereich unter 100 nm bereits einen neuen Begriff? Zur Klärung dieser Frage soll zunächst erörtert werden, was die Mikroelektronik auszeichnet, um analog den Begriff „Nanoelektronik“ zu motivieren.

Abbildung 1: Skalierung der Transistor Gate-Länge von 1970–2020 (Projektion)¹



¹ Sze/Ng 2007.

1.2 ENTSTEHUNG DER MIKROELEKTRONIK

Die ersten Anfänge der Mikroelektronik lassen sich bereits in der Erfindung der Vakuumröhre um 1900 sehen.² Die Vakuumröhre erlaubte als Diode gerichteten Stromtransport und als Triode die Verwendung als eine spannungsgeregelte Stromquelle.

Abbildung 2: Erster Transistor auf Germaniumbasis von Shockley, Bardeen und Brattain 1947/48



Quelle: Alcatel-Lucent.

Die gleiche Funktionalität realisieren die Halbleiterdiode und der Transistor (Abbildung 2) als klassische Bauelemente der Mikroelektronik. Bereits 1926 und in den Folgejahren³ wurde der Feldeffekttransistor von E. Lilienfeld bzw. 1934 von O. Heil⁴ zum Patent angemeldet und ist damit älter als der Bipolartransistor (1947). Ermöglicht wurden diese neuen Bauelemente durch den Einsatz von bislang in der Elektronik noch nicht verwendeten Materialien wie Silizium und Germanium.

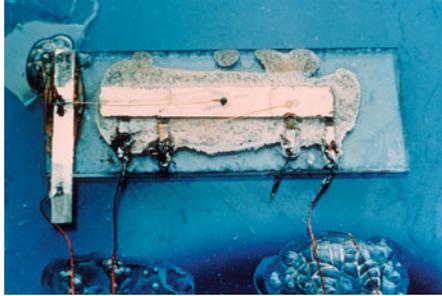
Den nächsten wichtigen Schritt für die Mikroelektronik stellte 1958 die erste Fertigung eines Integrierten Schaltkreises (Integrated Circuit: IC) durch J. Kilby bei Texas Instruments dar (Abbildung 3). Integrierte Schaltungen vereinen zuvor diskrete Bauelemente (Widerstände, Kondensatoren, Dioden, Transistoren) einer elektrischen Schaltung auf einem gemeinsamen Trägersubstrat.

² Cooper-Hewitt 1902.

³ Lilienfeld 1930, 1932 und 1933.

⁴ Heil 1935.

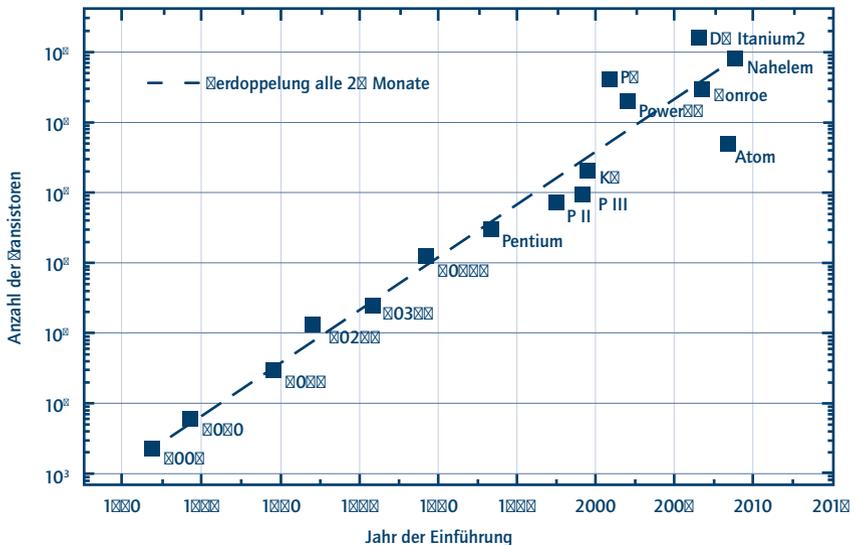
Abbildung 3: Integrierter Schaltkreis (Germanium)



Quelle: Courtesy of Texas Instruments.

Dies stellt den Startpunkt der seit über 50 Jahren betriebenen Skalierung elektronischer Schaltungen dar. Die Skalierung der elektronischen integrierten Schaltung, das heißt die Verkleinerung der physikalischen geometrischen Dimension, ist von einer zentralen Bedeutung, sodass Intel-Gründer Gordon Moore bereits 1965 das nach ihm benannte Gesetz⁵ formulierte.

Abbildung 4: Die zweijährliche Verdopplung der Anzahl der Transistoren in Mikroprozessoren von 1971 bis 2008



Quelle: Eigene Darstellung

⁵ Moore 1965.

Das Moore'sche Gesetz (Abbildung 4), das heißt die Vorhersage einer Verdoppelung der Integrationsdichte innerhalb von zwei Jahren, kann dabei als selbsterfüllende Prophezeiung angesehen werden, die allen Marktteilnehmern ein technisches und finanzielles Planungsinstrument an die Hand gibt.⁶ Zusammenfassend ist die Mikroelektronik integrierte Elektronik auf Mikrometerskala, durch fortschreitende Skalierung unter Verwendung neuer Materialien.

Hierbei profitierte die technische Entwicklung von dem Umstand, dass sich die elektrischen Kenngrößen eines Transistors (Grenzfrequenz, Stromverbrauch) proportional zur Verkleinerung seiner geometrischen Bauelementgröße verbesserten. Neuere Technologiegenerationen, mit Strukturgrößen unter 100 nm, konnten diesen erwünschten Zusammenhang allerdings nicht mehr vollständig erfüllen.

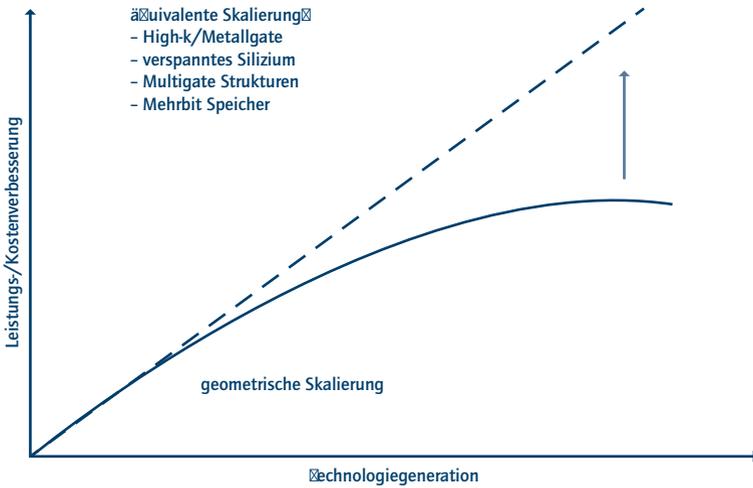
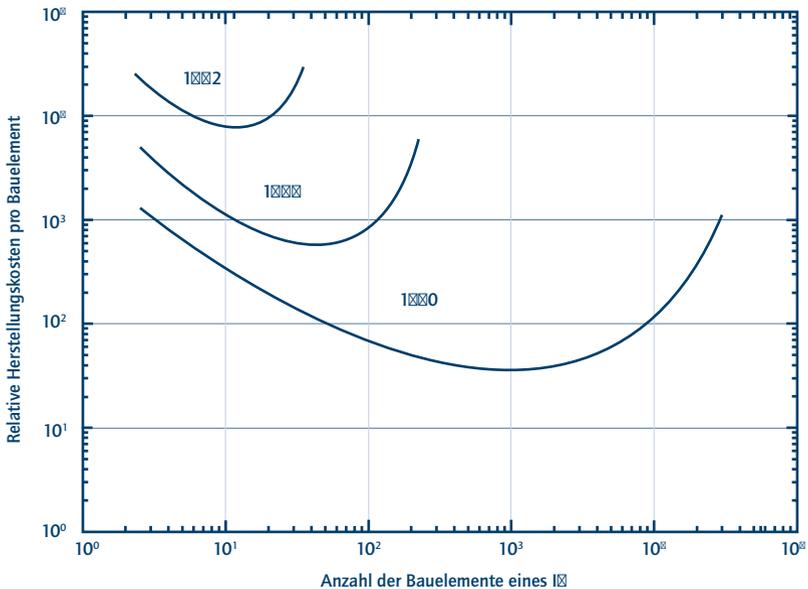
1.3 DER ÜBERGANG ZUR NANOELEKTRONIK („MORE MOORE“)

Der Grund für diese Entwicklung liegt in den technischen Schwierigkeiten, die beim Befolgen von herkömmlichen Skalierungsregeln auftraten. Eines dieser Probleme ist das Erreichen des direkten Tunnelstromregimes, ein eindeutig quantenmechanischer Effekt, bei der Skalierung der Gateoxiddicke eines MOSFET. Eine vorübergehende Lösung dieses Problems fand sich in der Verwendung eines Gatedielektrikums mit höherer dielektrischer Konstante (High-k), das zwar nicht mehr die physikalische Dicke, wohl aber die elektrische, äquivalente Dicke skalierte. Der Übergang von einem rein geometrischen Skalieren der Bauelementdimensionen und Schichtdicken hin zu einem Skalieren der elektrisch wirksamen Kenngrößen, also einer äquivalenten Skalierung, kann hierbei als ein Charakteristikum der Nanoelektronik angesehen werden (vgl. Abbildung 5).

Da Moore in seiner ursprünglichen Formulierung des Gesetzes (vgl. Abbildung 6) die Kostenreduktion und nicht die geometrische Skalierung als Kenngröße verwendete, bleibt es auch für die Nanoelektronik anwendbar, obwohl das Mittel der Kostenreduktion nicht mehr hauptsächlich die einfache Bauelementgrößenreduktion ist. Aus diesem Grund wird in der Forschungs- und Entwicklungsgemeinde der Halbleiterindustrie auch der Begriff „More Moore“ für die Weiterentwicklung der Mikro-/Nanoelektronik zu neuen, kostengünstigeren Technologiegenerationen verwendet. Ermöglicht wird diese Weiterführung des äquivalenten Skalierens auch durch die Verwendung völlig neuer Materialien aus Elementen⁷ wie beispielsweise Strontium, Barium, Cer und Dysprosium.

⁶ Disco/van der Meulen 1998.

⁷ Colinge 2008.

Abbildung 5: Ergänzung bzw. Ablösung der geometrischen Skalierung durch ein äquivalentes Skalieren⁸Abbildung 6: Ursprüngliche Formulierung des Moore'schen Gesetzes: Die Anzahl der Bauelemente eines integrierten Schaltkreises mit minimalen Herstellungskosten (Kostenoptimum) verdoppelt sich etwa alle zwei Jahre⁹⁸ Tagaki 2008.⁹ Moore 1965.

1. DIE GRENZEN DER SKALIERUNG („BEYOND MOORE“)

Bereits seit Jahrzehnten¹⁰ sind die Grenzen der Skalierung und deren zeitliches Ende in Diskussion. Die Geschichte lehrt, dass die Hindernisse, die als eine unüberwindbare Hürde zur Fortsetzung des Moore'schen Gesetzes erschienen, immer wieder umgangen werden konnten. Bis heute (2009) ist kein absolutes Ende der klassischen CMOS-Technologie in Sicht und die Forschungsgemeinde geht davon aus, noch 10–15 Jahre die heute bekannten Konzepte fortführen zu können.¹¹ Dennoch werden seit Jahrzehnten Alternativen zur klassischen Silizium MOSFET-Technologie diskutiert. Bauelemente und neue Konzepte, die einmal den Transistor als booleschen Schalter ablösen sollen, werden unter dem Begriff „Beyond Moore“ zusammengefasst.

Die ITRS¹² (International Technology Roadmap for Semiconductors) widmet sich innerhalb der Arbeitsgruppe Emerging Research Devices (ERD) traditionell diesen Bauelementkonzepten, vertritt aber bezüglich der Logik mittlerweile folgende Einschätzung¹³:

„Continued analyses of alternative technology entries likely will continue to yield the same result – nothing beats MOSFETs overall for performing Boolean logic operations at comparable risk levels.“ Aber: „Certain functions, e.g. image recognition (associative processing), may be more efficiently done in networks of non-linear devices rather than Boolean logic gates.“

Effizienzsteigerungen werden also in Zukunft von dem Ersatz der booleschen Logik (CMOS), für bestimmte Anwendungsfelder durch effizientere Schaltungs- und Systemkonzepte unter Verwendung nicht-linearer Bauelemente erwartet¹⁴. Die Findung solcher Konzepte und ihre Integration in bestehende Systeme sind neue Herausforderungen für die Nanoelektronik.

1. DIE NÄCHSTE EPOCHE DER INTEGRATION („MORE THAN MOORE“)

Die Mikroelektronik erlaubte durch die technische Realisierung von Bauelementkonzepten auf Basis neuer Materialien die Erhöhung der Integrationsdichte mithilfe der integrierten Schaltung. Zuvor diskrete Bauelemente konnten nun auf einen Substratträger zusammengefasst werden und ermöglichten dadurch eine Effizienzsteigerung. Wie im vorigen Abschnitt erläutert, werden zukünftige Effizienzsteigerungen insbesondere von der Verwendung spezieller Bauelemente für bestimmte eingeschränkte Anwendungsbereiche erwartet. Die besondere Herausforderung stellt hierbei die Integration dieser diversifizierten Technologien in ein Gesamtsystem dar.

Da dieser Ansatz über die Aussagen des Moore'schen Gesetzes hinausgeht, wird in Diskussionen der Begriff „More than Moore“ verwendet. Auch andere Arten der

¹⁰ Keyes 1975; Risch/Müller/Tielert 1987; SIA 1994.

¹¹ Iwai 2008.

¹² <http://www.itrs.net> [Stand: 12.08.2012].

¹³ Hutchby 2007.

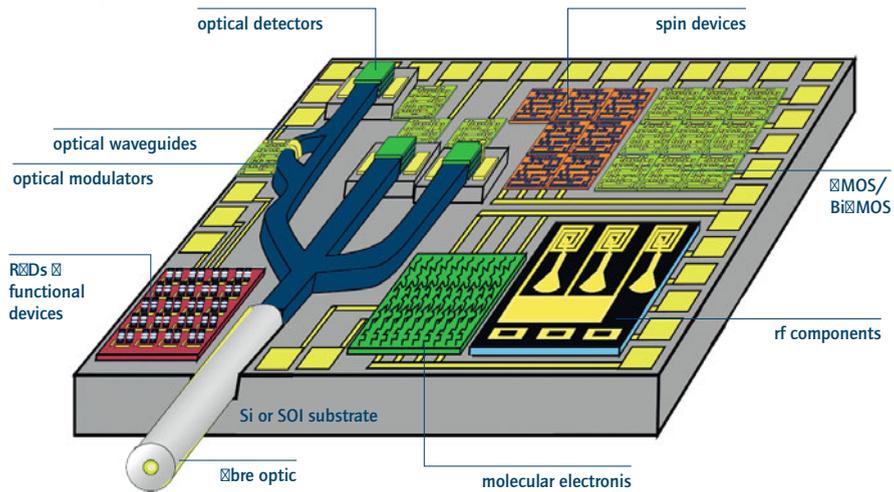
¹⁴ Vgl. Schmitt-Landsiedel/Werner 2009.

Implementierung von Funktionalitäten über klassische digitale und analoge Schaltungen hinaus gehören zu diesem Themenkreis. Hierbei stehen Technologien wie Multi Chip Packages (MCP), System-in-Package (SiP), System-on-Chip (SoC), aber auch Ansätze zur 3D-Integration wie Wafer Bonding und Through-Silicon-Vias (TSV) im Vordergrund. Ein voll integriertes SoC mit Baugruppen der Optik, Optoelektronik, Logik, Hochfrequenz und vieles mehr wird in Abbildung 7 illustriert.

Als Beispiel für den Trend, komplette Systeme, die zuvor mit den unterschiedlichsten diskreten Chips realisiert wurden, mit einem einzelnen SoC zu verwirklichen, kann der Infineon X-GOLD™ 110 – PMB 7900 dienen. Dieser in 65 nm Technologie gefertigte SoC vereint GSM/GPRS Baseband, RF Transceiver, Analog-Digital und Digital-Analog Wandler, Power Management, SRAM und RDS FM Radio auf einem einzigen Chip.

Eine Begleiterscheinung dieser immer höheren Komplexität ist darin zu sehen, dass das Systemwissen immer mehr von den Systemherstellern zu den Chipentwicklern verlagert wird.

Abbildung 7: Integration unterschiedlichster Technologien und Bauelementgruppen auf einem System-on-Chip (SoC). Copyright: European Community, 2000¹⁵



¹⁵ Compañó 2000.

1. DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG

Für den Begriff der „Nanoelektronik“ existiert ähnlich wie für die „Nanotechnologie“¹⁶ international noch keine allgemein anerkannte Definition. Die „National Nanotechnology Initiative“ (NNI, USA) schreibt zum Begriff „Nanoelectronics“¹⁷:

„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.“

Die Europäische Kommission umschreibt den Begriff „Nanoelektronik“ wie folgt¹⁸: „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.“

Obwohl die Nanoelektronik in vielen Bereichen eine direkte Fortführung der Mikroelektronik darstellt, besitzt sie zugleich viele neue Ansätze, Herausforderungen und Lösungsstrategien. Die Verwendung völlig neuer Materialien, Bauelementkonzepte und die Fortführung des Moore'schen Gesetzes durch äquivalente Skalierung können hierbei als charakteristische Eigenschaften dienen. Eine weitere Spezifizierung (Beschränkung auf Bauelemente mit eindeutig quantenmechanischem Funktionsprinzip oder Ähnliches) 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.

Am zielführendsten scheint der pragmatische Ansatz zu sein, neue Technologien, die neue Anwendungsmöglichkeiten erschließen und Strukturgrößen im Bereich von 1 – 100 nm verwenden, unter dem Begriff „Nanoelektronik“ zusammenzufassen, anstatt zunächst eine einheitliche allgemeingültige Definition zu fordern.

2. THEMENBEIHE DER NANOELEKTRONIK

In dem vorigen Abschnitt wurden die Hauptströmungen der Nanoelektronik (More Moore, More than Moore, Beyond CMOS) vorgestellt.

Folgende neue Bauelemente werden üblicherweise zur Nanoelektronik gezählt:

- Ballistic Transport Devices (Ballistic Transistors)
- Tunnel Field Effect Transistor (TFET)

¹⁶ Vgl. DEST 2006.

¹⁷ NNI 2007.

¹⁸ EC 2004.

- Single Electron Transistor (SET)
- Quantum Dots
- Silicon Nano Wires
- Metal Nano Wires
- Carbon Nano Tubes (CNT)
- Nanomagnets
- Spintronic
- Molecular Electronics
- Integrated Optics (IO)
- Quantum Turing Machines
- Nano Electro Mechanical Systems (NEMS)

Als lohnende Einsatzgebiete für diese, teilweise CMOS ergänzenden, Bauelemente werden folgende Anwendungen angesehen¹⁹:

- Image Recognition
- Speech Recognition
- DSP
- Data Mining
- Optimization
- Physical Simulation
- Sensory Data Processing
- Image Creation
- Cryptographic Analysis

Neben diesen Bereichen, die überwiegend der IT zugeschrieben werden können, stellen Systeme zur Energiespeicherung ebenfalls ein mögliches Anwendungsfeld dar. Erst kürzlich wurde die Verwendung von Silizium Nanowires als Anoden in Lithium-Ion-Batterien vorgeschlagen.²⁰ Aber auch andere Materialien und Verbundwerkstoffe aus CNT sowie nanoporöse Schichten und Puder werden untersucht.²¹

Zur molekularen Elektronik kann neben schaltenden, meist organischen, Verbindungen auch die Verwendung von klassischen Biomolekülen in DNA/RNA-Computern gezählt werden.²²

Zu den aktuellen Materialgruppen, die vorwiegend in der Nanoelektronik neue Anwendung finden, gehören:

¹⁹ Hutchby 2007.

²⁰ Chan et al. 2008.

²¹ Vgl. Chen et al. 2008; Liu et al. 2008; Zhang et al. 2008.

²² Win/Smolke 2008.

- High-k Dielektrika
- Low-k Dielektrika
- Metal Gates
- Dual-Silicides
- SiC, SiGe
- Non-Si Channel
- Graphene (C Monolayers)

3 FÖRDERUNGEN IN AUSSEREUROPISCHEN INDUSTRIENATIONEN

Weltweit gibt es sehr starke öffentliche Förderung im Bereich der Nanotechnologie.²³ Diese beinhaltet auch die Förderung der Nanoelektronik. Dabei verfolgen die einzelnen Staaten unterschiedliche Förderstrategien. Asiatische Schwellenländer wie China, Südkorea und Taiwan zeigen hierbei zu 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.²⁴ Nachfolgend werden die Aktivitäten exemplarisch in den USA und Japan vorgestellt.

3.1 FÖRDERUNG IN DEN USA²⁵

Die USA haben 2001 ihre Förderung der Nanotechnologie, die Mitte der 1990er Jahre initiiert wurde, in der „National Nanotechnology Initiative“ zusammengefasst. Sie umfasst inzwischen über 70 Forschungsanlagen, die teilweise auch externen Nutzern offen stehen. Dieses Netzwerk, das eng an die Hochschulen angebunden ist, soll Anreize für Industriebeteiligungen schaffen und das gemeinsame Forschen und Arbeiten an neuen kommerziellen Lösungen motivieren. Unterstützt wird die Initiative durch 25 beteiligte Behörden, darunter das „Council of Advisors on Science and Technology“ des US-Präsidenten und das „National Research Council“ der „National Academies“. Im Jahr 2008 belief sich der Förderumfang auf 1,45 Mrd. US-Dollar (1,1 Mrd. Euro).

Die Forschung zur Halbleiterelektronik wird in der „Semiconductor Research Corporation“ (SRC) koordiniert. Ein Bestandteil ist die „Global Research Collaboration“ (GRC), die insbesondere die weitere Skalierung der CMOS-Technologie vorantreibt. Das „Focus Center Research Program“ (FCRP) widmet sich den Grenzen der CMOS-Skalierung und deren weitgehender Verschiebung zu noch kleineren Strukturgrößen.

Schließlich wird in der „Nanoelectronics Research Initiative“ (NRI)²⁶ nach möglichen Folgetechnologien für CMOS im Jahre 2020 gesucht. Diese Grundlagenforschung wird an derzeit 30 Hochschulen betrieben und ist in universitätsübergreifenden Forschungszentren

²³ Stark 2007.

²⁴ Lux 2007.

²⁵ Ross 2007.

²⁶ NRI 2009.

(WIN, INDEX, SWAN, NSF, MIND) organisiert.²⁷ Industrielle Partner wie IBM, AMD, TI, Intel, Micron und Freescale sind sowohl an der Finanzierung der Forschung an den Hochschulen als auch an der späteren Kommerzialisierung der Forschungsergebnisse beteiligt.²⁸

3.2 FÖRDERUNGEN IN JAPAN²⁸

Nachdem 2001 die öffentlich finanzierten Forschungsanstalten Japans restrukturiert wurden, bildet das „National Institute of Advanced Industrial Science and Technology“ (AIST) eine regierungsunabhängige Forschungsinstitution. Sie ist hauptsächlich öffentlich finanziert und berichtet dem Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI). Das jährliche Budget beträgt ca. 1 Mrd. US-Dollar und setzt sich zu ca. 70 Prozent aus allgemeiner öffentlicher Finanzierung durch das METI und zu 30 Prozent aus projektspezifischer Förderung zusammen, die aber nur zu ca. 3 Prozent von privaten Unternehmen getragen wird.

Ziel des AIST ist die Verbesserung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der japanischen Industrie. Daher umfasst es nahezu alle Felder von industrieller Bedeutung (in Klammern nachfolgend der Anteil der in den Bereichen Beschäftigten, Stand 2008³⁰) wie Biowissenschaften und Biotechnologie (18 Prozent), Informations-, Kommunikations- und Computertechnologie, Elektronik und Photonik (16 Prozent), Umwelt- und Energietechnik (23 Prozent) sowie Nanotechnologie, Materialwissenschaften und Fertigungstechnik (17 Prozent), wobei die Nanotechnologie als Querschnittstechnologie auch in den anderen Bereichen zu finden ist.

Das AIST beschäftigt 2.500 feste wissenschaftliche Mitarbeiter. Darüber hinaus arbeiten 6.000 Doktoranden, Postdocs sowie Gastwissenschaftler aus Hochschulen und Industrie am AIST. Durch die interdisziplinäre Ausrichtung des AIST und den breiten Forschungsbereich soll die Kommerzialisierung von nanowissenschaftlichen Erkenntnissen erleichtert und der Wissenstransfer in Unternehmen gefördert werden. Hierzu verfolgt das AIST den sogenannten „IP Integration“ Ansatz, der industriellen Partnern vollständige Problemlösungen, bestehend aus relevanten AIST-Patenten und Anwendungswissen, zur Verfügung stellt.

Das 2001 gegründete Nanotechnology Research Institute (NRI) ist eines von 21 Forschungsinstituten des AIST und besitzt ein jährliches Budget von 20 Mio. US-Dollar, mit einem Drittmittelanteil von über 50 Prozent. Es umfasst Aktivitäten vom Quantum Computing bis hin zur industriellen Fertigung.

²⁷ Welser 2008.

²⁸ Welser 2008.

²⁹ Yokoyama 2008.

³⁰ Yokoyama 2008.

FÖRDERUNG IN EUROPA

1.1 EUROPÄISCHE FÖRDERPROGRAMME

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). Zu beachten ist, dass in den einzelnen Mitgliedsstaaten zusätzliche Programme und Förderungen existieren und traditionell eine große Bedeutung haben.

Im Rahmen des FP5 wurde das Nanoforum (European Nanotechnology Gateway)³¹ gegründet. Seit 2007 arbeitet es als Europäische Wirtschaftliche Interessenvereinigung (EWIV) und veröffentlichte bislang 39 Berichte zu Themen der Nanotechnologie (Stand: 3/2011). Besondere Beachtung verdienen die Berichte zur Kommerzialisierung der Nanotechnologie in Europa, die Ergebnisse von drei Workshops und Befragungen zusammenfassen.³² Mitglieder des Nanoforum sind unter anderem CEA-LETI (F), Institute of Nanotechnology (UK) und das VDI Technologiezentrum (D).

Das FP6 beinhaltete eine explizite Förderung der Nanotechnologie und Nanoelektronik in Höhe von 1,4 Mrd. Euro³³. Ausgehend von dem Bericht der „High Level Group“³⁴ wurde das „European Nanoelectronics Initiative Advisory Council“ (ENIAC)³⁵ 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. Euro aus Sachleistungen aus dem privaten Sektor bestehen. Die restlichen Finanzmittel werden überwiegend von den Mitgliedsstaaten und der EU gestellt.³⁶

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.

³¹ <http://www.nanoforum.org> [Stand: 15.08.2012].

³² Stark 2007; Crawley 2007.

³³ Cordis 2009.

³⁴ EC 2004.

³⁵ <http://www.eniac.eu> [Stand: 15.08.2012].

³⁶ <http://www.eniac.eu/web/JU/Key%20figures.php> [Stand: 15.08.2012].

Weitere geförderte Forschungsinitiativen stellen EUREKA-Projekte dar. Für diese gibt es keine speziellen Themenvorgaben und daher können sie nicht unmittelbar der Nanoelektronik zugeordnet werden. Mit MEDEA+³⁷ existiert aber seit 2001 ein erfolgreiches EUREKA-Projekt mit mikroelektronischer Themenausrichtung. Im Jahr 2008 wurde das MEDEA+ Programm vom CATRENE-Programm abgelöst; dieses EUREKA-Programm beinhaltet die Anwendungs- und Technologieentwicklung der Nanoelektronik.³⁸

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 wurde 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.

2.2 NATIONALE FÖRDERPROGRAMME

Neben den aus dem Haushalt der EU getragenen paneuropäischen Förderstrukturen stehen in den einzelnen Mitgliedsstaaten, wie bereits erwähnt, eigene Programme und Geldmittel zur Verfügung. Im Vergleich zu Deutschland³⁹ sind die Programme in anderen Staaten der EU, wie Frankreich (ca. bis 50 Prozent) und England (ca. bis 70 Prozent), finanziell deutlich schlechter ausgestattet.

2.3 DEUTSCHE FÖRDERPROGRAMME

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert die Nanotechnologie seit 2001 innerhalb der Hightech-Strategie „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“⁴⁰. 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 Förderprogrammes „IT-Forschung 2006“ durch das Förderkonzept „Nanoelektronik“ Projekte mit einem Gesamtvolumen von 396 Mio. Euro gefördert.

Der „Aktionsplan Nanotechnologie 2015“ beinhaltet keine explizite Förderung von mikro- bzw. nanoelektronischen Technologien mehr, da die Förderung nicht mehr an Technologien, sondern an Bedarfsweldern ausgerichtet wird. Implizit wird aber die Nanoelektronik von der Förderung des Spitzenclusters „Forum Organic Electronics“, der Elektromobilität sowie der Quantenkommunikation profitieren können.

³⁷ <http://www.medeaplus.org/>, <http://www.catrene.org/web/medeaplus/projects.php> [Stand: 09. 12. 2012].

³⁸ <http://www.catrene.org> [Stand: 15. 08. 2012].

³⁹ Stark 2007.

⁴⁰ BMBF 2006.