

> 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

Lektorat: Holger-Jens Schnell

Layout-Konzeption: acatech

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

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.springer.com

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

> GELEITWORT	7
Wolfgang M. Heckl	
> EINLEITUNG	9
Paolo Lugli/Peter Russer/Marc-Denis Weitze	
> ELEKTRONIK IM KLEINEN – GESTERN UND HEUTE: BEGRIFFSDEFINITION UND HINTERGRÜNDE ZUR NANOELEKTRONIK	15
Christoph Friederich/Doris Schmitt-Landsiedel	
> ZUSAMMENFASSUNG DES acatech/DFG-RUNDGESPRÄCHS	37
Nikolaus Fichtner/Christoph Friederich/Marc-Denis Weitze	
> NAHZIELE IN DER NANOELEKTRONIK	47
Wolfgang Arden	
> HERAUSFORDERUNGEN IN DER NANOELEKTRONIK	61
Nikolaus Lange	
> DIE „NANO-ELECTRONICS RESEARCH INITIATIVE“	69
Wolfgang Porod	
> DIE FÖRDERUNG VON ELEKTRONIKSYSTEMEN UND ELEKTROMOBILITÄT DURCH DAS BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG	73
Ulrich Katenkamp	
> BEFRAGUNG ZUR ZUKUNFT DER NANOELEKTRONIK UNTER NATIONALEN EXPERTEN	93
Elna Schirrmeister/Rolf Gausepohl/Sven Wydra	

> HOCHEFFIZIENTE ORGANISCHE BAUELEMENTE – NEUE ENTWICKLUNGEN AUS SACHSEN	123
Karl Leo/Annette Polte	
> NOVALED: VON DER IDEE ZUM PRODUKT	137
Jan Blochwitz-Nimoth	
> GEDANKEN ZUR ZUKUNFT DER ELEKTRONIK IN EUROPA	145
Alex Dommann	
> FERNZIELE DER NANOELEKTRONIK	149
Peter Russer/Paolo Lugli/Karl Hess/Johannes Russer/Giuseppe Scarpa	
> FRONTIERS OF THE NANOELECTRONICS PANEL DISCUSSION	225
Manfred Glesner/Johannes Russer	
> ANHANG: PROGRAMMABLÄUFE DER VERANSTALTUNGEN	253
> AUTORINNEN UND AUTOREN	259

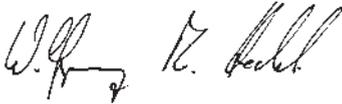
> GELEITWORT

WOLFGANG M. HECKL

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

> EINLEITUNG

PAOLO LUGLI/PETER RUSSEY/MARC-DENIS WEITZE

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.

Gausemeier/Tönshoff 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 – GESTERN UND HEUTE: BEGRIFFSDEFINITION UND HINTERGRÜNDE ZUR NANOELEKTRONIK

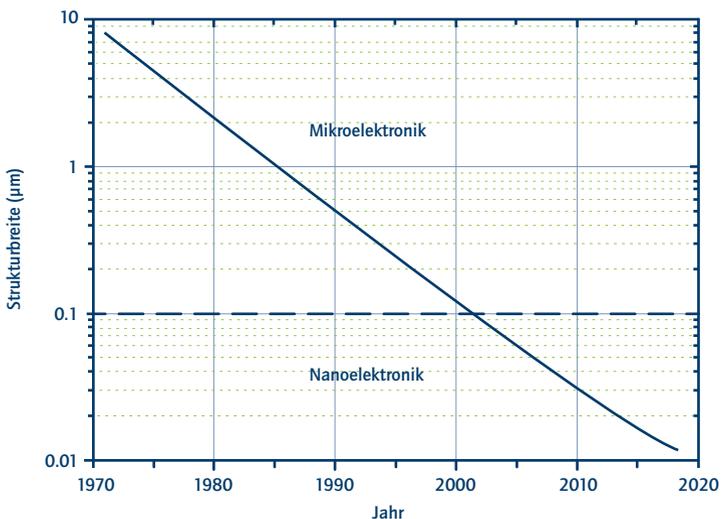
CHRISTOPH FRIEDERICH/DORIS SCHMITT-LANDSIEDEL

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 GESCHICHTE 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.

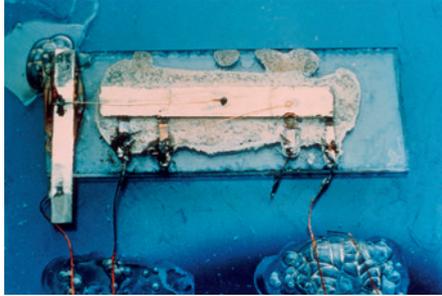
Den nächsten wichtigen Schritt für die Mikroelektronik stellte 1958 die erste Fertigung eines Integrierten Schaltkreises (Integrated Circuit: IC) durch J. Kilby bei Texas Instruments dar (Abbildung 3). Integrierte Schaltungen vereinen zuvor diskrete Bauelemente (Widerstände, Kondensatoren, Dioden, Transistoren)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

² Cooper-Hewitt 1902.

³ Lilienfeld 1930, 1932 und 1933.

⁴ Heil 1935.

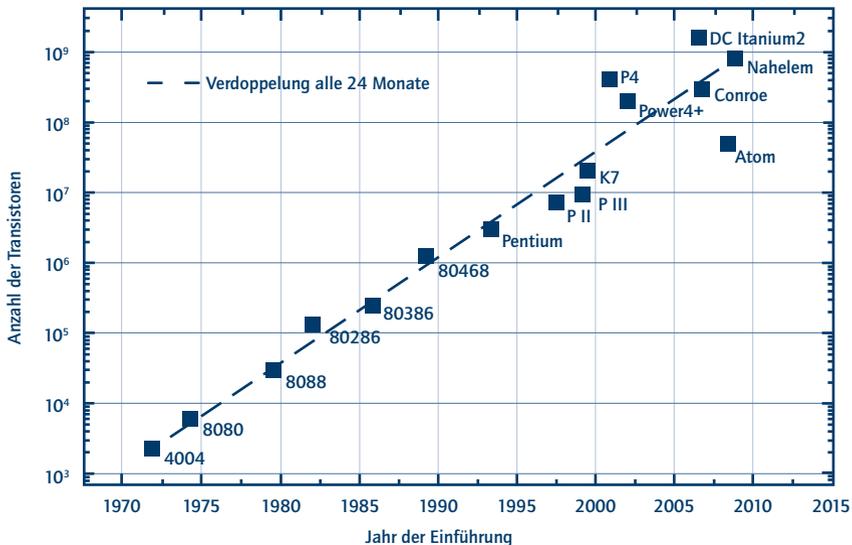
Abbildung 3: Integrierter Schaltkreis (Germanium)



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.

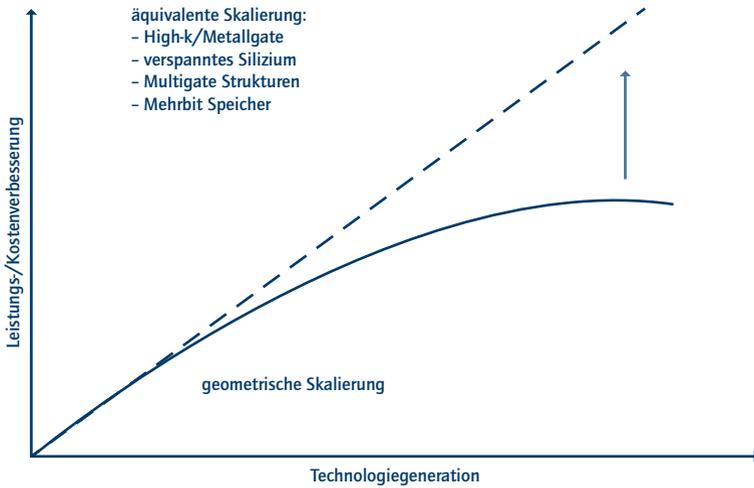
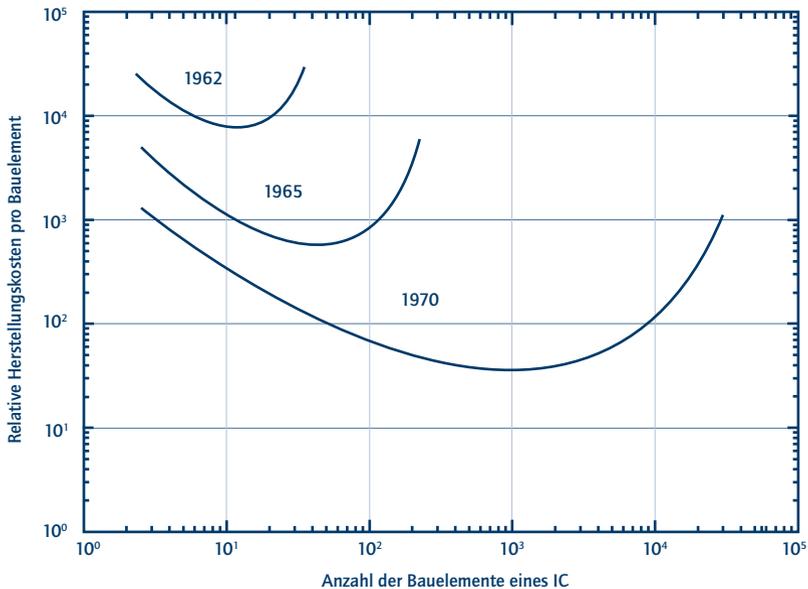
1.3 DER ÜBERGANG ZUR NANOELEKTRONIK („MORE MOORE“)

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 Gateoxidicke 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.

1.4 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.

1.5 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.

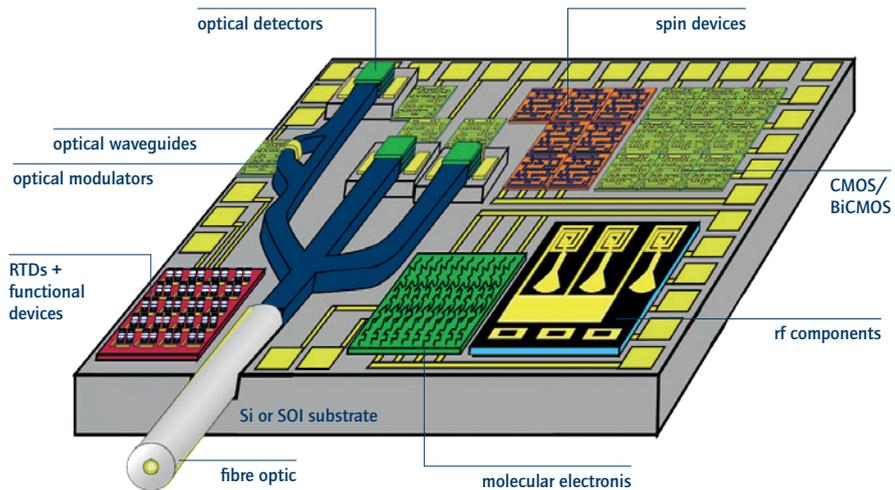
¹⁴ Vgl. Schmitt-Landsiedel/Werner 2009.

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.

1.6 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 THEMENGEBIETE 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 AUSSEREUROPÄISCHEN 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 JAPAN²⁹

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.

4 FÖRDERUNG IN EUROPA

4.1 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.

4.2 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.

4.3 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.

Konkret listet der Förderkatalog des BMBF 775 laufende Projekte mit einem „Nano“-Bezug auf (Stand 01/2011). 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.

Des Weiteren fördert das BMBF seit 1999 sogenannte „Kompetenzzentren der Nanotechnologie“ (CCN). Diese häufig regionalen Verbände von Forschungseinrichtungen, Hochschulen und industriellen Partnern existieren mit unterschiedlichen thematischen Bezügen. Hierbei stellen die Kompetenzzentren ihren beteiligten Partnern auch unterschiedlichste Dienstleistungen zur Verfügung.⁴¹

Eine Übersicht der Kompetenzzentren der Nanotechnologie bietet die Arbeitsgemeinschaft der Nanotechnologie-Kompetenzzentren Deutschlands (AGeNT-D)⁴². Eine Verbindung zur Nanoelektronik lässt sich für folgende Kompetenzzentren herstellen:

- NanOp – CC NanoOptoelektronik mit Sitz in Berlin⁴³
- UFS – CC Ultradünne funktionale Schichten mit Sitz in Dresden⁴⁴
- UPOB – CC Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung mit Sitz in Braunschweig⁴⁵

Zudem gibt es in den einzelnen Bundesländern Förderprojekte mit Bezug zur Nanoelektronik. Beispielhaft genannt sei der Forschungsverbund für Nanoelektronik (FORNEL) der Bayerischen Forschungsstiftung (2004–2007).

5 KOMMERZIALISIERUNG DER NANOELEKTRONIK

Von hoher Bedeutung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie ist das Vermögen, neue Forschungsergebnisse aus Universitäten und Forschungszentren in neuen Produkten umzusetzen. Dieser Wissenstransfer und die hierzu nötigen Finanzmittel sind in Abbildung 8 dargestellt. Erst hierdurch entsteht aus der Forschung Wertschöpfung, die den gesellschaftlichen Wohlstand sichern kann.

Vergleicht man nun die Finanzmittel für den Bereich der Nanoelektronik⁴⁶, ist auffällig, dass trotz ähnlicher öffentlicher Förderung in Europa und in den USA in den USA in Summe mehr Geld 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 Wagniskapitals⁴⁷. Nur 3,5 Prozent des weltweiten investierten Gesamtvolumens von

⁴¹ AGeNT-D 2009.

⁴² <http://www.ag-nano.de> [Stand: 15.08.2012].

⁴³ <http://www.nanop.de> [Stand: 15.08.2012].

⁴⁴ <http://www.nanotechnology.de> [Stand: 15.08.2012].

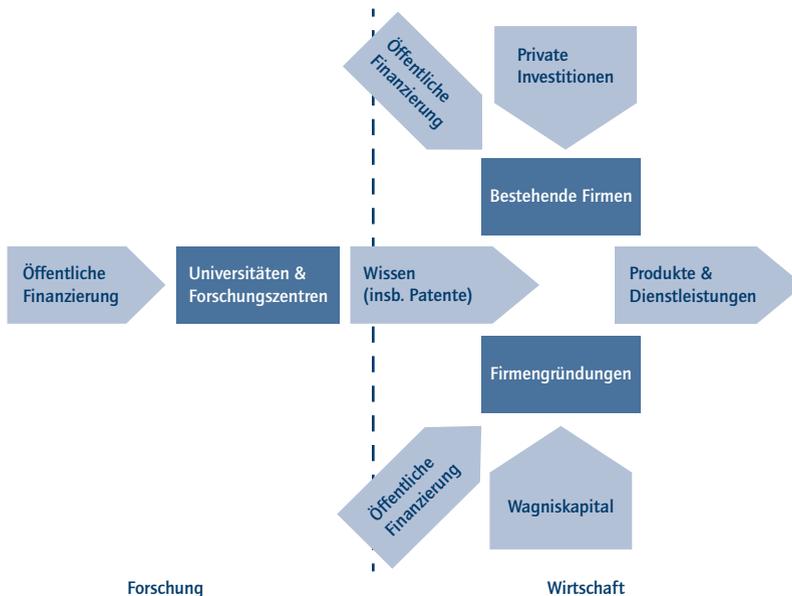
⁴⁵ <http://www.upob.de> [Stand: 15.08.2012].

⁴⁶ Crawley 2007.

⁴⁷ Stark 2007.

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 Nanotechnologie⁴⁸ 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 den USA (30 Prozent) und Asien (45 Prozent).⁴⁹

Abbildung 8: Wissenstransfer – vom geistigen Eigentum zum Produkt: beteiligte Schlüsselakteure und Finanzströme⁵⁰



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 einzubeziehen. Die Anzahl und Größe der Unternehmen, die im Bereich der Nanotechnologie aktiv sind, wären beispielsweise solche Indikatoren.

⁴⁸ Stark 2007.

⁴⁹ Eine ausführliche Analyse der Patentanmeldungen im Bereich der Mikro-/Nanoelektronik findet sich in ZEW/TNO 2010.

⁵⁰ Crawley 2007.

6 NANOTECHNOLOGIE UND NANOELEKTRONIK IN DEUTSCHLAND

Deutschland besitzt nicht nur in der Forschung, sondern auch in der Kommerzialisierung der Halbleitertechnologie eine lange Tradition. Bereits in den 1950er Jahren entwickelte Siemens ein Herstellungsverfahren für Reinstsilizium, nach dem auch heute noch ca. 80 Prozent der weltweiten Jahresproduktion hergestellt werden. Leistungsgleichrichter waren die ersten Produkte, die hiervon profitieren konnten.⁵¹ In den 1980er Jahren gab es mehrere Durchbrüche beispielsweise mit dem „Mega“-Projekt zur Entwicklung des 1Mbit DRAM- und später bei der Entwicklung des 4Mbit-Speichers⁵². Bei diesen Projekten wurde bereits in europäischer Kooperation gearbeitet, welche schließlich in das JESSI- (Joint European Submicron Silicon-) Projekt und weitere Folgeprojekte mündete.

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“⁵³ 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 Nanoelektronik 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.⁵⁴ Beispielhaft seien der „Strategiekreis Nanowelten“⁵⁵ und der „Cluster Nanotechnologie“⁵⁶ genannt.

Die Schwerpunkte des „Strategiekreises Nanowelten“ sind laut eigener Aussage:

- Unterstützung der gezielten *Überführung von wissenschaftlichen Erkenntnissen* in die angewandte Forschung und Entwicklung;
- *Brückenschlag* von der angewandten Nano-F+E zur nachhaltigen Eroberung neuer Märkte mit der Schaffung hochqualifizierter Arbeitsplätze;
- Mitgestaltung der *politischen Rahmenbedingungen*, zum Beispiel Unterstützung des Promoters für Nanotechnologie in der „Forschungsunion“ im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung;

⁵¹ Schaffer 2005.

⁵² Ruge 1989.

⁵³ <http://www.nano-map.de> [Stand: 15.08.2012].

⁵⁴ Eine Übersicht findet sich auf der Seite der „Initiative Kompetenznetze Deutschland“ des BMWi: <http://www.kompetenznetze.de> [Stand: 15.08.2012].

⁵⁵ <http://www.strategiekreis-nanowelten.de/> [Stand: 15.08.2012].

⁵⁶ <http://www.nanoinitiative-bayern.de> [Stand: 15.08.2012].

- Sichtbarkeit der *nachhaltigen und zukunftsweisenden Nanotechnologie* in den verschiedenen Branchen entlang der Wertschöpfungskette.

Zu den Schwerpunkten des „Cluster Nanotechnologie“ gehören laut eigener Aussage:

- Förderung von Nanotechnologie-Anwendungen durch Vernetzung von Forschung und industrieller Anwendung;
- Förderung des Nanotechnologie-Interesses bei Schülern, Lehrern und Studenten.

7 LITERATUR

AGeNT-D 2009

Arbeitsgemeinschaft der Nanotechnologie-Kompetenzzentren Deutschlands (AGeNT-D) (Hrsg.): *Kompetenzmatrix* (Berlin, 12.03.2009). URL: <http://www.ag-nano.de/Kompetenzmatrix2.pdf> [Stand: 15.08.2012].

BMBF 2006

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): *Nano-Initiative – Aktionsplan 2010*, Bonn, Berlin 2006.

Chan et al. 2008

Chan, C. K. et al.: "High-Performance Lithium Battery Anodes Using Silicon Nanowires". In: *Nature Nanotechnology*, 3, 2008.

Chen et al. 2008

Chen, Y.-J. et al.: "High Capacity and Excellent Cycling Stability of Single-Walled Carbon Nanotube/SnO₂ Core-Shell Structures as Li-Insertion Materials". In: *Appl. Phys. Lett.*, 92, 2008, S. 22.

Colinge 2008

Colinge, J.-P.: *The SOI MosFET: From Single Gate to Multigate*, Edinburgh, Scotland, UK: ESSDERC Tutorial 2008.

Compañó 2000

Compañó, R. (Hrsg.): *Technology Roadmap for Nanoelectronics*, Brüssel: European Commission 2000 (2. Aufl.).

Cooper-Hewitt 1902

Cooper-Hewitt, P.: *Improvements in the Method of and Means for Obtaining Uni-directional Current from a Single-phase or Poly-phase Alternating Current Source*. GB Patent 190304168, England, 30. Oktober 1902.

Cordis 2009

Cordis: *What is FP6: Nanotechnologies and Nano-Sciences, Knowledge-Based Multifunctional Materials and New Production Processes and Devices* (12.03.2009). URL: <http://cordis.europa.eu/fp6/nmp.htm> [Stand: 15.08.2012].

Crawley 2007

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

DEST 2006

Division of Ethics of Science and Technology (DEST): *The Ethics and Politics of Nanotechnology*, Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 2006.

Disco/van der Meulen 1998

Disco, C./van der Meulen, B.: *Getting New Technologies Together*, New York: Walter de Gruyter 1998.

EC 2004

European Commission (EC): *Vision 2020 – Nanoelectronics at the Centre of Change* (Report of the High Level Group, Brüssel, 2004). URL: <ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/e-vision-2020.pdf> [Stand: 15.08.2012].

Heil 1935

Heil, O.: *Improvements in or Relating to Electrical Amplifiers and Other*. GB Patent 439,457, England, 4. März 1935.

Hutchby 2007

Hutchby, J.: *Emerging Research Devices* (ITRS Winter Conference, Makuhari 2007), Makuhari, Japan, 2007 (Tagungsband).

Iwai 2008

Iwai, H.: *CMOS Technology after Reaching the Scale Limit* (IWJT'08. Extended Abstracts – 8th International Workshop on Junction Technology), 2008.

Keyes 1975

Keyes, R.: "Physical Limits in Digital Electronics". In: *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 63: 5, 1975.

Lilienfeld 1930

Lilienfeld, J. E.: *Method and Apparatus for Controlling Electric Currents*. US Patent 1,745,175, USA, 18. Januar 1930.

Lilienfeld 1932

Lilienfeld, J. E.: *Amplifier for Electric Currents*. US Patent 1,877,140, USA, 13. September 1932.

Lilienfeld 1933

Lilienfeld, J. E.: *Device for Controlling Electric Current*. US Patent 1,900,018, USA, 7. März 1933.

Liu et al. 2008

Liu, J. et al.: "Layered Double Hydroxide Nano- and Microstructures Grown Directly on Metal Substrates and Their Calcined Products for Application as Li-Ion Battery Electrodes". In: *Advanced Functional Material*, 18: 9, 2008.

Lux 2007

Lux Research: *Profiting from International Nanotechnology*, Lux Research, 2007.

Moore 1965

Moore, G.: "Cramming More Components onto Integrated Circuits". In: *Electronics*, 19: 3, 1965, S. 114 - 117. URL: ftp://download.intel.com/museum/Moores_Law/Articles-Press_Releases/Gordon_Moore_1965_Article.pdf [Stand: 15.08.2012].

NNI 2007

Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology (NNI): *The National Nanotechnology Initiative – Strategic Plan 2007*, Washington, D.C.: National Science and Technology Council 2007.

NRI 2009

NRI: *About Nanoelectronics Research Initiative* (12.03.2009). URL: <http://www.src.org/about/> [Stand: 15.08.2012].

Risch/Müller/Tielert 1987

Risch, L./Müller, W./Tielert, R.: „Probleme bei der Bauelemententwicklung im 4-Megabit-Speicher“. In: *ntz – Nachrichtentechnische Zeitung*, 40: 3, 1987.

Ross 2007

Ross, L.: „NNI in the Future“. In: *IEEE Nanotechnology Magazine*, 1: 2, 2007.

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.

Schaffer 2005

Schaffer, B.: „Die Silizium-Pioniere“. In: *Pictures of the Future* (Zeitschrift der Siemens AG, Forschung und Entwicklung), 5: 2, 2005, 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: 4, 2009.

SIA 1994

Semiconductor Industry Association (SIA): *National Technology Roadmap for Semiconductors*, 1994.

Stark 2007

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

Sze/Ng 2007

Sze, M./Ng, K.: *Physics of Semiconductor Devices*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons 2007.

Takagi 2008

Takagi, S.: *CMOS at the Bleeding Edge*, Edinburgh, Scotland, UK: ESSDERC Tutorial 2008.

Welser 2008

Welser, J. (Hrsg.): *NIST & SRC Nanoelectronics Research Initiative: Partnership for Innovation* (National Institute of Standards and Technology, Visiting Committee on Advanced Technology (VCAT), October Meeting, 2008, in Boulder, Colorado, USA), Boulder, Colorado, USA, 2008.

Win/Smolke 2008

Win, M. N./Smolke, C. D.: "Higher-Order Cellular Information Processing with Synthetic RNA Devices". In: *Science*, 322: 5900, 2008.

Yokoyama 2008

Yokoyama, H.: "The Best of the AIST". In: *IEEE Nanotechnology Magazine*, 2: 2, 2008.

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* (Hrsg.: Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Mannheim, Deutschland, sowie TNO innovation for life, Delft, Holland), Mai 2010.

Zhang et al. 2008

Zhang, H. et al.: „High-Rate Lithium-Ion Battery Cathodes Using Nanostructured Poly-aniline/Carbon Nanotube Array Composites". In: *Electrochemical and Solid-State Letters*, 11/12, 2008.

> ZUSAMMENFASSUNG DES acatech/ DFG-RUNDGESPRÄCHS

NIKOLAUS FICHTNER/CHRISTOPH FRIEDERICH/MARC-DENIS WEITZE

Die nachfolgende Zusammenfassung der Diskussionen beim Rundgespräch vom 17. April 2009 dokumentiert die dort wichtigsten Diskussionspunkte, Meinungen und offenen Fragen.

1 NAHZIELE

1.1 FERTIGUNGSKOMPETENZ, TESTING

Angesichts der Diskussion zu „fabless“-Strategien und der gleichzeitigen Betonung der eigenen Fertigungskompetenzen im Hinblick auf „More than Moore“-Technologien stellt sich die Frage: Wie viel Technologie und Know-how braucht man in Europa?

Auch bei „fabless“-Strategien sind die Firmen an der Standardtechnologienentwicklung ihrer Foundries¹ beteiligt. Dann ist die Forschung und Entwicklung, wie zum Beispiel die Hochfrequenz-Modellierung, die für die Entwicklung von Chips mit hohen Taktfrequenzen wesentlich ist, nach wie vor im eigenen Haus. „More than Moore“-Technologien bedürfen eigener Entwicklungen, da sie eigene Wertschöpfungspotenziale und Wettbewerbsmerkmale besitzen. Daher ist auch der Übergang von SoC (System on Chip) zu SiP (System in Package)² wichtig, da nur auf diese Weise „More than Moore“ und „More Moore“ getrennt voneinander gefertigt werden können.

Es ist eine Tatsache, dass die Halbleiterfertigungen für Logik und Speicher in Standard- („More Moore“-) Technologien Europa verlassen („fablight“- bzw. „fabless“-Konzepte). Freilich sind bereits seit den 1970er Jahren das „Packaging“³ und das dazugehörige „Testing“ für diese Produkte nach Asien abgewandert. Wird die nun zu erwartende Abwanderung auch der Front-End-Fertigung⁴ gravierenden Folgen haben? Seit Jahren ist eine Tendenz abzusehen, dass nur noch Forschung, Entwicklung und Design in Europa verbleiben. Ist das mittelfristig stabil oder werden auch diese Bereiche abwandern?

Werden sich neue Themen und Konzepte finden, beispielsweise im „Testing“ (das immer weiter entwickelt werden muss), die es erlauben, diese Bereiche wieder zurück

¹ Halbleiterfabriken für die Auftragsfertigung von elektronischen Bauelementen nach Vorgabe des Kunden.

² Es handelt sich dabei um einen Integrationsansatz in der Mikroelektronik, wodurch Halbleiter-Chips, passive Bauteile und weitere Komponenten in einem Gehäuse vereint werden.

³ „Packaging“ bezeichnet das „Vergießen“ des Halbleiterchips in ein entsprechendes Gehäuse.

⁴ Das heißt jene Fertigungsprozesse noch im Reinraum.

nach Europa zu holen? Sowohl die Entwicklung der neuen Testverfahren (etwa im Bereich SiP, siehe oben) als auch die Erstellung der Software der Testprogramme findet am Standort der Produktentwicklung statt.

Hinsichtlich Molekularelektronik bestehen aufgrund des noch sehr frühen Entwicklungs- und Forschungsstadiums etwa bei Infineon keine konkreten Entwicklungsprojekte. Fragen der Fertigung zukünftiger auf Molekularelektronik basierender Rechner lassen sich noch nicht beantworten.

1.2 ZUKUNFTSAUSSICHTEN DER HALBLEITERUNTERNEHMEN

In welchen Bereichen von „More than Moore“ spielt Nanoelektronik überhaupt eine Rolle? Welche dieser Bereiche der Nanoelektronik sind in Deutschland realisierbar (angesichts der Tatsache, dass keine oder nur noch wenige der früheren Industriepartner der Halbleitertechnologie vorhanden sind)? (Internationale Gremien und Technologiestrategien, wie beispielsweise die ITRS-Roadmap⁵, sind ja nicht spezifisch für Deutschland.) Was kann spezifisch in Deutschland getan werden, was andere Länder nicht leisten können (Rahmenbedingungen bzgl. Infrastruktur und personeller Aufstellung)? Wo hat die Nanoelektronik ein großes Potenzial für F&E in Deutschland? Wo kann sie ein starker Treiber sein?

So mag es aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein, klassische Halbleiterunternehmen für den umsatzstärkeren Systemmarkt zu öffnen. Aber dieser Markt beinhaltet auch die Servicedienstleistungen. Die Frage ist, ob unsere Halbleiterunternehmen mit den im Markt etablierten Systemherstellern auch im Servicebereich konkurrieren können. Zudem ist eine stärkere Spezialisierung im Bereich der Halbleiter erkennbar. Das ist ein Charakteristikum gesättigter Märkte und Industrien. Einige Firmen haben sich zum Beispiel nur auf Service im Bereich der Halbleiterelektronik spezialisiert, da sich mit Service sehr gute Umsätze erzielen lassen. Hier kann die Halbleiterindustrie von anderen Märkten lernen, die diesen Übergang bereits hinter sich gebracht haben. Halbleiterunternehmen können durch die Erweiterung ihrer Systemkompetenz den klassischen Systemherstellern vorgefertigte Teillösungen bieten. Sie werden Dienstleister des Systemherstellers, aber ersetzen ihn nicht.

Halbleiterprodukte sind mittlerweile vergleichbar mit Massenprodukten wie zum Beispiel Schrauben. Jedoch besteht ein großer Unterschied in der Komplexität. Es ist zu erwarten, dass insbesondere im Bereich von „More Moore“ und „More than Moore“ die Komplexität weiter ansteigen wird, insbesondere im Hinblick auf den Entwurf und das „Testing“. Die Standardbauelemente werden bereits nur noch in Foundries gefertigt. Aber wie soll diese Entwicklung weitergehen? Eine breite Förderung und Unterstützung von F&E ist damit nicht mehr gegeben (siehe unten, Abschnitt „Förderstrukturen“).

In der nahen Vergangenheit musste eine große deutsche Halbleiterfirma Insolvenz anmelden. Welche Schlussfolgerungen können wir aus solch einer Zäsur ziehen? Welche Verbesserungsansätze ergeben sich daraus?

⁵ <http://www.itrs.net> [Stand: 09.08.2012].

1.3 ROLLE DER AKADEMISCHEN FORSCHUNG

Welche Bedeutung hat die akademische Forschung für die Industrie und wie findet der Wissenstransfer in die Industrie statt? Die Forschung an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen ist wichtig hinsichtlich der Fernziele („Beyond CMOS“). Gerade Hochschulen können zudem sehr gut an Schaltungstechniken, Algorithmen und anderen neuen Konzepten arbeiten. Hierfür ist auch kein teurer experimenteller Aufwand notwendig. Man kann mitunter von „Vorfeldarbeiten zur Ermittlung zukünftiger Produktchancen“ sprechen. Der Anwendungsbezug ist dabei jedoch nicht immer deutlich.

1.4 AUSBILDUNG

Die Hochschulen können der Industrie bei der Entwicklung neuer nanoelektronischer Produkte helfen, indem sie für eine gute, interdisziplinäre Ausbildung der Studenten sorgen. Aus der Sicht der Industrie bilden die deutschen Hochschulen durchaus Absolventen mit erstklassiger Methodenkompetenz aus.

Defizite lassen sich bei Kompetenzen für fachübergreifende Forschung in Deutschland erkennen. Diese werden gerade in Forschungsverbänden (zum Beispiel Nano-systems Initiative Munich, NIM⁶) sichtbar und können zugleich in ihnen überwunden werden: Die nanoelektronischen Bauelemente selbst mögen sehr gute Eigenschaften haben, jedoch wird der nächste Schritt zur Integration dieser Bauteile von den Forschern nicht immer bedacht. So entsteht eine Lücke in der Wertschöpfungskette von neuen Bauelementen zu den integrierten Endprodukten; es fehlen die Konzepte und Methoden für eine Systemintegration. Es ist wichtig, dass sich die verbesserten Eigenschaften der Bauelemente auch in verbesserten Systemeigenschaften wiederfinden.

Ist es derzeit möglich, gute Leute für die Nanoelektronik zu bekommen? Haben diese eine Perspektive? Es ist schon jetzt teilweise zu beobachten, dass es schwierig ist, gute Leute aus der Elektrotechnik für die Mikro- oder Nanoelektronik zu gewinnen. Dagegen ist man zum Beispiel in der Energietechnik durch eine öffentliche Ökologie- und Effizienzdebatte erfolgreich bei der Nachwuchswerbung. Wie gelingt dies in der Nanoelektronik?

Kritisch zu sehen ist es, wenn durch vermehrte Firmeninsolvenzen (unter anderem Qimonda, Spansion) oder aufgrund der „fabless“-Modelle (wie zum Beispiel bei AMD, Qualcomm oder Xilinx) Absolventen im Bereich der Nanoelektronik keine Arbeitsplatzperspektive in Europa haben.

2 FERNZIELE, TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN

2.1 NEUE MATERIALIEN

Im Zentrum der Diskussionen zur Nanoelektronik stehen meist Halbleiter. Deren physikalische Eigenschaften sind sehr gut verstanden und die Technologie ist gut beherrschbar (Dotierung usw.). Dennoch stellt sich die Frage, ob Halbleiter auch in Zukunft das

⁶ <http://www.nano-initiative-munich.de> [Stand: 09.08.2012].

dominante Material sein werden. Welche Rolle werden Supraleiter spielen bzw. molekulare Architekturen?

2.2 WET- VERSUS DRY-WORLD

Im Bereich der Fernziele könnten große Chancen der Nanobiotechnologie liegen. Die Übertragung von Ergebnissen und Methoden aus der Chemie und Biologie in die Elektronik ist freilich nicht trivial. So finden die chemischen und biologischen Experimente üblicherweise in Lösungen statt. In trockener Umgebung, wie in der Elektronik üblich, verhalten sich diese Systeme natürlich ganz anders. Die „wet-“ und die „dry-world“ sind sehr unterschiedlich und haben ganz unterschiedliche Eigenschaften.

2.3 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 von 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 Nanoimprinting⁷ auch eine ernst zu nehmende Alternative zur optischen Lithographie. Grundsätzlich brauchen selbstorganisierende Strukturen Dynamik. Daher ist es schwierig, dieses Prinzip auf das von vorgegebenen, starren (Halbleiter-) Strukturen zu übertragen, 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 den Brückenschlag von der Forschung zur Anwendung geschafft und steht bereits 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 p- und n-Transistoren, also CMOS-Schaltungen auf Basis von Polymeren sehr schwierig. Verfahren wie Biomolecular Templating zum Beispiel auf der Basis von DNA könnten interessant für „programmable matter“ sein.

Mit der Molekularelektronik können Gesamtfunktionalitäten eventuell direkt abgebildet werden, ohne sie auf Boolesche Digitaltechnik zu übertragen und dort zu lösen.

⁷ Hierbei handelt es sich um ein Nanolithographieverfahren mittels nanostrukturierter Stempel, das für die Chipfertigung im Bereich von 32 und 20 nm relevant werden könnte.

Die teilweise fast vergessenen Techniken der Anlogschaltungen 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.

2.4 QUANTENCOMPUTER UND QUANTUM CELLULAR AUTOMATA (QCA)

Die Quanteninformationstechnik (also die Entwicklung von Algorithmen auf der Basis von Quanteneffekten) ist bereits ein Schwerpunkt in der Forschung in Deutschland, jedoch ist ein „langer Atem“ eine wichtige Voraussetzung. 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. Aus Sicht der Elektrotechnik und der Informationstechnik wurden die sich gesteckten Ziele jedoch nicht erreicht. Quantencomputer werden wohl kaum konventionelle Computer ersetzen, sondern auf einige spezielle Anwendungen beschränkt bleiben.

Quantencomputer stehen erst ganz am Anfang ihrer Entwicklung. Sie werden wohl in der Lage sein, ganz allgemeine, komplexe Probleme zu lösen. Dazu benötigt man allerdings eine extrem große Anzahl an Quantenbits, etwa in der Größenordnung von klassischen Bits in heutigen PCs. Quantenbits werden im Anschluss an eine Berechnung immer auf klassische Bits abgebildet. Die Realisierung mehrerer, gleichzeitig kohärenter Quantenbits ist jedoch sehr schwierig. In diesem Bereich können Supraleiter wegen ihrer steuerbaren Quanteneigenschaften und der langen Kohärenzzeit eine Rolle spielen.

Im Vergleich zu Quantencomputern können mit Quantum Cellular Automata (QCA), bei denen klassische Logikelemente mit Quantenpunkten realisiert und dadurch stark miniaturisiert werden, ziemlich allgemein gehaltene Probleme formuliert und gelöst werden.

2.5 VERBINDUNGSTECHNIK

Wie können neuartige Bauelemente miteinander verbunden werden (Stichwort: „Interconnection“)? Das ist sehr relevant, zumal im Bereich von Nanometern, dass die Anzahl der frei wählbaren Einstellungsparameter geringer wird. Das Systemverhalten, zum Beispiel der Widerstand, ist durch die Naturkonstanten bestimmt (siehe dazu als Beispiel den Widerstand zwischen Quantenpunkten, welcher lediglich von der Elektronladung und der Planck-Konstante abhängt). Aus diesem Grund sind makroskopische Konzepte nicht einfach auf die Nanoebene zu übertragen. In ersten Versuchen werden die Ausgangsmoleküle mit metallischen Bestandteilen funktionalisiert. Andere Verfahren verwenden Viren zur Oberflächenstrukturierung. Der Weg zur Gesamtfunktionalität wird in Zukunft häufiger Bottom-Up⁸ verlaufen.

⁸ Im Gegensatz zu „Top-Down“-Verfahren, bei denen aus groben Strukturen immer feinere gefertigt werden, entstehen bei „Bottom-Up“-Verfahren durch Synthese bzw. Selbstorganisation feine Strukturen, die sich zu größeren Verbänden zusammenschließen können.

Eine andere wichtige Frage ist die Adressierung. Wie kann man 2D oder 3D strukturieren und zugleich adressieren? Das gilt in derselben Weise auch für selbstorganisierende Strukturen. In dieser Hinsicht sind wiederum QCA-Konzepte sehr interessant, da diese jeweils nur mit dem nächsten Nachbarn interagieren.

2.6 ALTERNATIVE TECHNOLOGIEN UND SYSTEMKONZEPTE

Alternative Technologien wurden bislang durch die immensen Fortschritte und die allgemeine Bedeutung der Siliziumtechnologie häufig bereits im Keim erstickt. Konzepte wie beispielsweise spinbasierte oder supraleitende Bauelemente, die nicht in direkter Konkurrenz zur Siliziumtechnologie stehen, dürften daher die größten Realisierungspotenziale haben. Bei zukünftigen Konzepten kann man zum Beispiel an probabilistische Konzepte für Single-Photon- oder Single-Electron-Bauteile denken.

Benötigt man neue Computing Paradigms, etwa Systemkonzepte, die von der Natur inspiriert sind? Tatsächlich gibt eine ganze Reihe von Arbeiten, die den Begriff „Computing“ auf Molecular and Biomolecular Information Processing erweitern. So haben zum Beispiel Eric Winfree (Caltech) und Ehud Shapiro (Weizmann Institute) Ansätze und Proof of Concept-Experimente beschrieben, die zeigen, dass ein „Universal Computing“ innerhalb der Reichweite solcher Ansätze ist. Auch die EU setzt in ihren Calls im Bereich von IST-FET bewusst auf diese Linie.⁹ Letztlich zielt auch „Systems Chemistry“ in diese Richtung.¹⁰

Für viele Unternehmen ist ein „Leben nach Silizium“ freilich noch in weiter Ferne und wird in F&E-Projekten dort kaum berührt.

2.7 NEUE ANWENDUNGEN

Die Nanotechnologie nutzt neue Materialien etwa für die Optik und die Optoelektronik. Durch neue Verarbeitungs- und Herstellungsverfahren können etwa die optischen Eigenschaften von Materialien (fast bzw. theoretisch) beliebig verändert werden (siehe zum Beispiel „Tarnkappen“).

Die Suche nach neuen Anwendungen ist für die Nanoelektronik sehr wichtig, ebenso die Forschung an den Schnittstellen von neuen, nanoelektronischen Systemen zur klassischen Elektronik. Neue Anwendungen sind auch eine Voraussetzung, um Themen an die Öffentlichkeit zu vermitteln und um mit einer Empfehlung bei der Politik Gehör zu finden. Bereits bei der Grundlagenforschung an neuen Bauelementen ist im Sinne eines „Concurrent Engineering“ schon die Forschung an dazu passenden neuen Systemkonzepten und Architekturen möglich. Für daraus entstehende Produkte ist dann wieder eine Produktion in Europa denkbar.

⁹ Zum Beispiel der Call Chem IT (vgl. http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fet-proactive/chemit_en.html [Stand: 10.08.2012]). Bereits im FP6 gab es Projekte, mit denen Chemie und Informationswissenschaften zusammengeführt wurden (zum Beispiel EU IST FET „PACE“, <http://www.istpace.org> [Stand: 10.08.2012]).

¹⁰ Vgl. etwa http://w3.cost.esf.org/index.php?id=189&action_number=CM0703 [Stand: 10.08.2012].

2.8 MARKTBEDÜRFNISSE

Wenn man an High-k-Materialien¹¹ für Silizium oder auch an III-V Halbleiter (zum Beispiel Galliumarsenid) auf Silizium-Substrat denkt, ist bereits heute ein gewisser Marktbezug vorhanden. Eine gute Verbindung von Forschung und marktreifen Produkten im Bereich High-k und „beyond CMOS“ gibt es zum Beispiel bei Intel Research¹².

3 UNTERNEHMENSGRÜNDUNGEN

3.1 ERFOLGSFAKTOREN

Ein erfolgreicher Unternehmer braucht eine visionäre Sicht für die Bedürfnisse zukünftiger Märkte und eine gewisse Risikobereitschaft. Beide Eigenschaften lassen sich nur schwer in der Ausbildung vermitteln.

Wichtig ist, dass ein innovatives Produkt vorhanden ist. Für eine erfolgreiche Ausgründung ist es wichtig, dass es eine genaue Anwendung für das neue Produkt gibt. Es ist nicht ausreichend, wenn man ein Bauteil mit schönen Eigenschaften präsentiert, für das es aber keine genaue Anwendung gibt. Ein Problem der Nanoelektronik ist, dass sie oft sehr abstrakt bleibt. Für die Erfolge der Nanoelektronik müssen genaue Anwendungen da sein.

Physikalische Effekte und neue, darauf aufbauende Bauteile sind interessant. Aber entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg ist der Markt für Produkte, die Kundenprobleme durch diese Bauelemente besser lösen können. Bei nanoelektronischen Entwicklungen gibt es im Allgemeinen eine Lücke zwischen dem eigentlichen Bauteil und der Anwendung.

Es gibt oft sehr einfache Gründe für den Erfolg eines Unternehmens oder von Produkten. Man denke dabei an die Mobilkommunikation. An das Bedürfnis der Menschen, immer und überall erreichbar zu sein. Oder auch an die Kompressionsverfahren wie mp3, welche es erlauben, Informationen speicherschonend aufzubereiten. Zwei Märkte könnten in Zukunft sehr wichtig werden: Health Care – die Gesellschaft wird im Schnitt immer älter. Das Bedürfnis nach Prophylaxe und Gesundheitskontrolle steigt. Ein weiteres Beispiel für einen Markt, der in Deutschland nicht sehr entwickelt ist, sind Kinderspielzeuge. Diese sind heute kaum mit elektronischer Intelligenz ausgestattet. In derartigen Märkten liegt ein großes Innovations- und Wachstumspotenzial für die Halbleiterindustrie.

3.2 RAHMENBEDINGUNGEN IN ÖSTERREICH UND DEUTSCHLAND

Die Rahmenbedingungen für Firmenneugründungen haben sich in den letzten Jahren in Österreich verschlechtert.¹³ Das liegt daran, dass zum einen die Teilrechtsfähigkeit der Universitätsinstitute in Österreich abgeschafft worden ist. Auch die

¹¹ „High-k“ bezeichnet eine Erhöhung der Dielektrizitätskonstante des Gate-Isolationsmaterials. Damit kann die Gatekapazität erhöht werden, ohne dass unerwünschte Leckströme steigen.

¹² <http://techresearch.intel.com> [Stand: 10.08.2012].

¹³ Anmerkung des Protokollanten: Der Vortrag (R. Weigel) betraf ein Beispiel aus Österreich.

Patenteigentumsregelung wurde geändert. Heute ist in allen Entscheidungsprozessen ein zeitraubender Verwaltungsprozess über die Hochschulleitung nötig. Ein wichtiger Erfolgsfaktor für eine genannte Firmengründung war die günstige Unternehmensbesteuerung zu dieser Zeit in Österreich.

Trotzdem gibt es sicherlich noch die Möglichkeit, auch in Deutschland auszugründen. Meist zunächst im Rahmen einer Nebentätigkeit. Die Frage nach den Patenten ist damit aber noch nicht gelöst. Die vorhandenen Strukturen und Förderungen müssen aber auch von den Gründern genutzt werden. So kann eine schrittweise Gründung ohne die Hilfe von Kapitalgesellschaften und Banken erfolgreich sein.

Eine Gründung in der Hightech-Elektroindustrie ohne Venture Capital (VC) ist kaum oder nur sehr schwer möglich, da hohe Stückzahlen über die Rentabilität entscheiden. Alternativ wird ein kapitalkräftiger Geschäftspartner benötigt, der langfristig denkt.

3.3 STAATLICH GEFÖRDERTE UNTERNEHMENSGRÜNDUNGEN

Staatlich geförderte, systematische Unternehmensgründungen gelingen in Taiwan. Dort gibt es die Möglichkeit von Institutsausgründungen. Die Laufzeit ist begrenzt auf sechs Jahre, die Förderung erfolgt zum Beispiel mit einer großzügigen Erstausrüstung. Danach erfolgt eine Firmenausgliederung – oder auch nicht. Alle Halbleiterunternehmen in Taiwan sind auf diesem Weg entstanden.

Die Förderung von Hochschulausgründungen sieht sich von dreierlei Seiten mit Kritik konfrontiert: Die Industrie befürchtet Wettbewerbsverzerrung durch öffentliche Gelder. Die Hochschule befürchtet die Ablenkung der Hochschulmitarbeiter von ihren dienstlichen Aufgaben. Die Öffentlichkeit kritisiert die Verwendung öffentlicher Gelder zur Erzeugung privater Gewinne.

In Kanada werden Forschungsaufwendungen steuerlich berücksichtigt. Das IRAP (Industrial Research Assistent Program)¹⁴ fördert hoch riskante industrielle Forschung finanziell.

4 FÖRDERSTRUKTUREN

4.1 ALLGEMEINES

Forschung und Entwicklung im Bereich der Mikro- und Nanoelektronik ist sehr teuer und wird in Zukunft noch teurer werden. Im Vergleich zu den steigenden Forschungskosten steigen aber die Fördermittel nicht in gleichem Maße. Diese stagnieren oder sind sogar rückläufig. Das stellt ein großes Problem für die Forschung und auch die Förderung dar. Forschung ist teilweise überhaupt nur noch durch Kooperationen auf internationaler Ebene zu finanzieren.

Da die Entwicklungskosten (und zwar sowohl die Fertigungsentwicklung als auch die Forschungsaufwendungen) in der Halbleitertechnologie exponentiell steigen,¹⁵

¹⁴ <http://irap-pari.nrc-cnrc.gc.ca> [Stand: 3. 1. 2013].

¹⁵ Siehe der Beitrag von C. Friederich/D. Schmitt-Landsiedel in diesem Band.

können sie auch längst nicht mehr von einer Institution alleine getragen werden. Technologieentwicklungen werden daher in der Regel in Industriekonsortien gemeinschaftlich betrieben. Das Abdecken der gesamten Wertschöpfungskette in F&E ist gar nicht mehr möglich.

Die Chemieindustrie spielt eine große Rolle im Bereich der Nanoelektronik. Die Frage ist: Wie kann die chemische Industrie mit den elektrotechnischen und physikalischen Entwicklungen kombiniert werden?

4.2 STRUKTUR DER DFG

Die DFG setzt von sich aus keinen Fokus auf Nanoelektronik. Hierzu muss der Bedarf anhand von Anträgen und Projekten erkennbar sein. Der Wunsch muss aus der Forschung heraus kommen.

Die DFG wird, auch international, wegen des Bottom-Up-Prinzips, also der selbstbestimmten Themenwahl durch die Wissenschaftler, beneidet. Die DFG sieht im Moment keine ausländischen Fördermodelle, bei denen es sich lohnen würde, diese zu kopieren.

Es ist kritisch zu sehen, dass in europäischen Forschungsrahmenprogrammen vordefinierte Themen die Förderung bestimmen. Demgegenüber dient die Struktur der DFG mit ihren „Normalverfahren“ als Vorbild für das European Research Council.

Verbesserungen hinsichtlich der Fördermöglichkeiten der DFG für risikoreiche Projekte stellen neue Vergabeverfahren wie beispielsweise Reinhart Koselleck-Projekte dar. Diese Verfahren ergänzen die bisherigen Förderungen und erlauben riskante Forschung, ohne die Bedingung einschlägiger Vorarbeiten.

4.3 KOORDINATION DFG UND BMBF

Wie lassen sich die Förderungen durch DFG und BMBF besser koordinieren, um zu gewährleisten, dass für DFG-geförderte Projekte eine Anschlussförderung vorhanden ist? Beispiel: Langfristige DFG-Projekte mit Anwendungsbezug, an die eine Förderung durch das BMBF anschließt. Eine Einbeziehung des Bundesministeriums für Wirtschaft in diese Fragen wäre ebenfalls denkbar.

Man muss hier freilich berücksichtigen, dass die Ministerien eine politische Zielsetzung und die DFG eine wissenschaftliche Zielsetzung haben. Zudem haben DFG und BMBF ganz unterschiedliche Förderungsansätze, die eine Koordination erschweren. Auch die Zuständigkeit zwischen BMBF und BMWi ist in jedem Einzelfall zu klären.

Es scheint, dass das BMBF sehr stark Projekte mit der Zielsetzung von marktfähigen Produkten fördert, weil damit Arbeitsplätze gesichert bzw. geschaffen werden können. Diese Entwicklung ist dann kritisch zu beurteilen, wenn nach der Förderung viele Bereiche ins Ausland ausgegliedert werden. Dann kann nämlich trotz rechtzeitiger staatlicher Förderung eine Abhängigkeit entstehen, wie sie schon im Bereich der Kernenergie

oder der Li-Ionen-Batterien zu beobachten ist. Ein späterer Einstieg in diese Technologien ist äußerst schwierig.

Vorschlag: Das BMWi bzw. das BMBF könnten die DFG als Gradmesser für die aktuell stattfindende Forschung verwenden. Die DFG könnte der Politik Anregungen für notwendige Förderprogramme geben.

> NAHZIELE IN DER NANOELEKTRONIK

WOLFGANG ARDEN

1 EINFÜHRUNG

Im Themenblock Nahziele des von der DFG und acatech am 17. April 2009 veranstalteten Rundgesprächs wurden die Anforderungen künftiger informations- und kommunikationstechnischer (IKT) Systeme aus der Sicht der deutschen Großindustrie und insbesondere der hier ansässigen Halbleiterindustrie an die Nano-Elektronik vorgestellt. Im Vordergrund stand dabei, welche Anforderungen sich daraus für die industrienah und die anwendungsorientierte Forschung in Deutschland ergeben und welche Entwicklungen in den nächsten Jahren auf den Gebieten der Nano-Elektronik – dabei insbesondere der Schaltungstechnik und Herstelltechnologien – von besonderer Bedeutung sein werden.

2 MÄRKTE UND ANWENDUNGEN

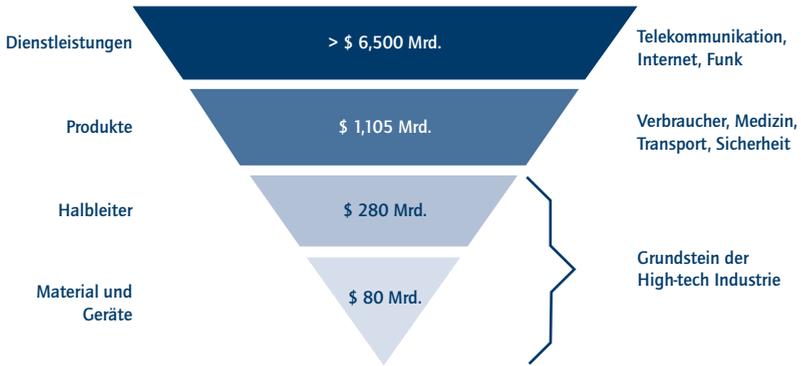
Der Weltmarkt für Halbleiter belief sich im Jahre 2008 auf 279 Mrd. US-Dollar. Davon entfielen auf die Datenverarbeitung 37 Prozent, auf die Konsumelektronik 22 Prozent, die drahtlose und drahtgebundene Kommunikation 19 bzw. 6 Prozent und auf Industrie- und Automobil-Elektronik 9 bzw. 6 Prozent. Die Informations- und Kommunikationstechnik macht somit den weitaus größten Anteil des Halbleiterumsatzes aus. Wie Abbildung 1 zeigt, hebt die Halbleiter-Industrie einen 4-fachen Umsatz bei Produkten und einen etwa 25-fachen Umsatz bei den Diensten bei Telekom-, Breitband- und Internet-Anwendungen.¹

Schaut man sich die regionale Landschaft der Halbleiter-Industrie (Abbildung 2) an, so muss man feststellen, dass der Halbleiter-Verbrauch in Europa zwar bei 17 Prozent liegt, der Anteil an der Halbleiter-Fertigung in Europa jedoch nur 11 Prozent ausmacht. Die Asiaten dominieren beim Verbrauch mit 53 Prozent des Weltmarktes und bei der Fertigung mit 46 Prozent, wobei der letzte Wert auch sehr stark durch den großen Fertigungsanteil der asiatischen Foundry's bestimmt wird. Bezogen auf die Standorte der Halbleiterfirmen, stellen die USA mit einem Anteil von 46 Prozent den höchsten Part, den schnell wachsenden Beitrag der sogenannten „Fabless Companies“ mit einbezogen.²

¹ Vgl. Strategic Research Agenda des Europäischen Nano-Elektronik-Programms ENIAC, <http://www.eniac.eu> [Stand: 03.08.2012].

² CATRENE 2009.

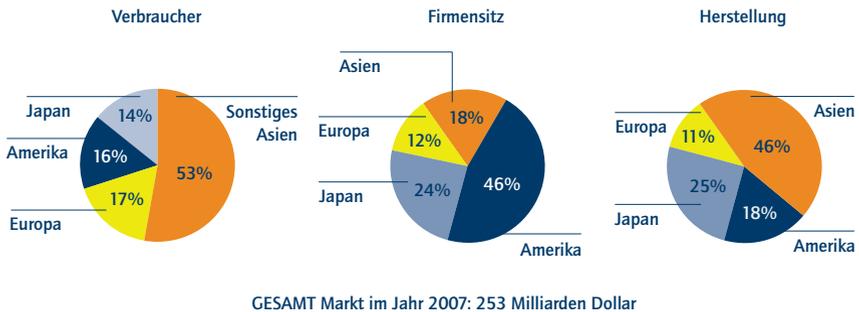
Abbildung 1: Hebelwirkung der Halbleiter-Industrie in Bezug auf Produkte und Dienste der Kommunikations-Industrie



Quelle: ENIAC Strategic Research Agenda 2007 (<http://www.eniac.eu/web/downloads/SRA2007.pdf>).

Die Wachstumsraten des Halbleitermarktes sind von gemittelten Werten von ca. 14 Prozent pro Jahr während der 1980er und 1990er Jahre seit der Jahrtausendwende auf einstellige Werte gesunken. Das Marktwachstum wird derzeit im Wesentlichen von vier Anwendungsschwerpunkten getragen: Kommunikation, Sicherheit, Energieeffizienz und Gesundheit.

Abbildung 2: Regionale Landschaft der Halbleiter-Industrie

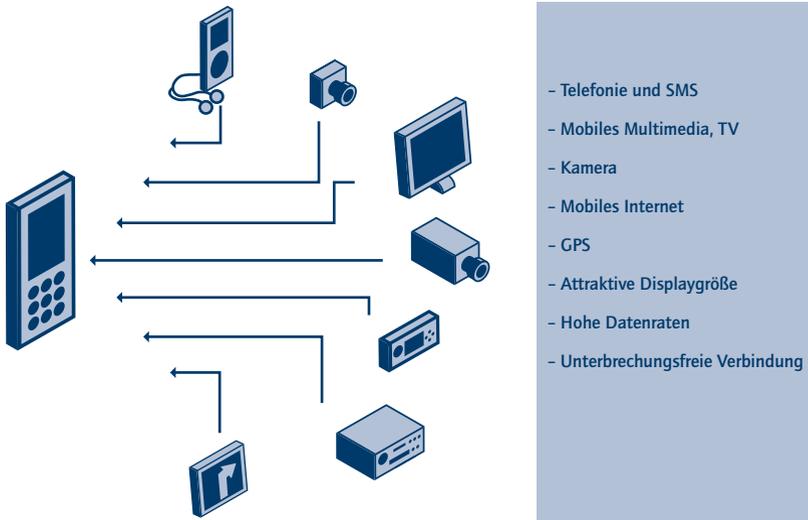


Quelle: Impact of Micro-/Nanoelectronics on the European Economy (Study of the CATRENE EUREKA program, Fig. 11, source: WSTS, ISuppli).

Bei den Sicherheitssystemen sind die Hauptwachstumstreiber chipbasierte Ausweise, Zahlungsfunktionen und Embedded Security bei Computing und Kommunikation. In der Kommunikation liegt der Entwicklungsfokus bei der Übertragung von Daten und

Sprache – zu jeder Zeit und überall. Das mobile Internet, IP-Netzwerke, Mobilfunk-Breitband, Home Gateways und Smart Phones sind hier die technischen Schlagworte. Beim Breitband-Internet steht die Single Chip-Lösung für ADSL Gateways mit Gigabit Ethernet im Vordergrund. In der drahtlosen Kommunikation werden mobile Endgeräte zur „All-In-One Solution“, die zahlreiche Funktionen, wie in Abbildung 3 dargestellt, abdecken. Ein Hauptziel bei der mobilen Kommunikation ist die „Single-Chip-Integration“, bei der fast alle Mobilfunk-Funktionen auf einem einzigen Chip vereint sind und die Anzahl der Komponenten signifikant reduziert wird. Die Mobilkommunikation spielt auch in der Medizin eine zunehmende Rolle, wie zum Beispiel beim Tele-Monitoring in der Diagnose. Bei der Energieeffizienz spielt insbesondere die Leistungselektronik eine herausragende Rolle. Innovative und leistungsstarke Halbleiterlösungen mit Best-in-Class Technologien tragen dazu bei, Energie zu sparen und die Umweltbelastung zu senken. Leistungshalbleiter – das heißt Halbleiterbausteine, die höhere Spannungen und Ströme schalten können – spielen hier eine Schlüsselrolle. Zusammenfassend kann ein Zitat aus dem Programm „IKT 2020“ des BMBF zitiert werden: „Bereits heute hängen mehr als die Hälfte der Industrieproduktion und über 80 % der Exporte Deutschlands vom Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnik und elektronischer Systeme ab“³.

Abbildung 3: Mobile Endgeräte werden zur „All-In-One Solution“



Quelle: Infineon Technologies AG.

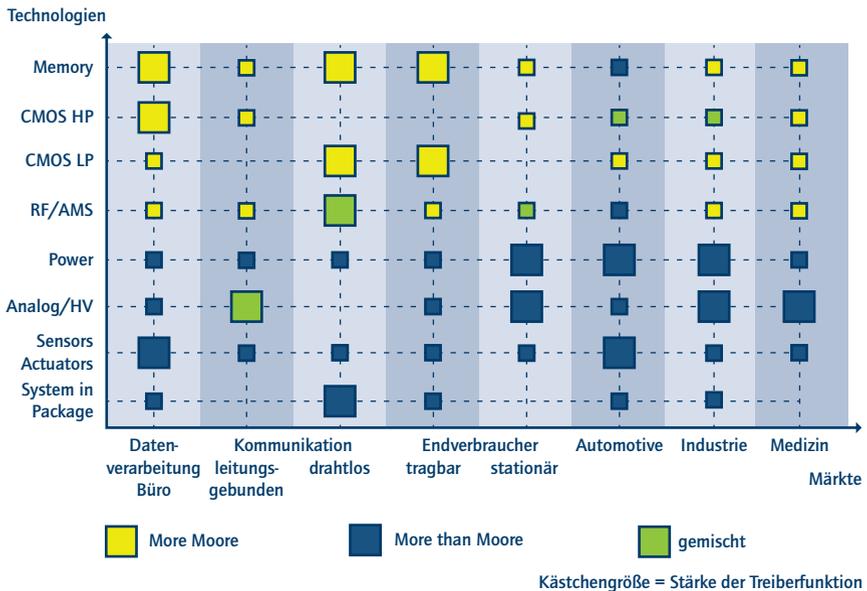
³ BMBF 2007.

3 ANFORDERUNGEN AN FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

3.1 TECHNOLOGIE

Die Trends und kurz- sowie langfristigen Anforderungen in der Halbleiterindustrie werden seit 1998 von einem Expertengremium unter dem Dach der „International Technology Roadmap for Semiconductors“, kurz ITRS, untersucht und definiert.⁴ Über 800 Experten bearbeiten alle wichtigen Teilgebiete der Halbleitertechnologie wie Designaspekte, Bauelemente, Verdrahtung, Lithografie, Packaging usw.⁵ In einem alle zwei Jahre erscheinenden Bericht werden zukünftige Anforderungen an die Halbleiterbauelemente und die Technologie definiert und potenzielle Lösungen vorgeschlagen. Anhand der ITRS Roadmap definieren Forschungseinrichtungen und Universitäten ihre Forschungsvorhaben. Für die IC-Hersteller dient die ITRS als Benchmark wie auch als Referenz für ihre F&E-Planungen⁶. Auch die öffentliche Förderung von Halbleiterentwicklungen orientiert sich an den Vorgaben und Studien der ITRS. Die Integrationsdichte von CMOS-basierten Bauteilen folgt seit etwa 40 Jahren dem bekannten Moore'schen Gesetz, das 1965 von Gordon E. Moore eingeführt wurde.⁷

Abbildung 4: Markttreiber für die Technologie Roadmap



Quelle: Infineon Technologies AG.

⁴ Vgl. <http://public.itrs.net> [Stand: 02.08.2012].

⁵ Arden 2003.

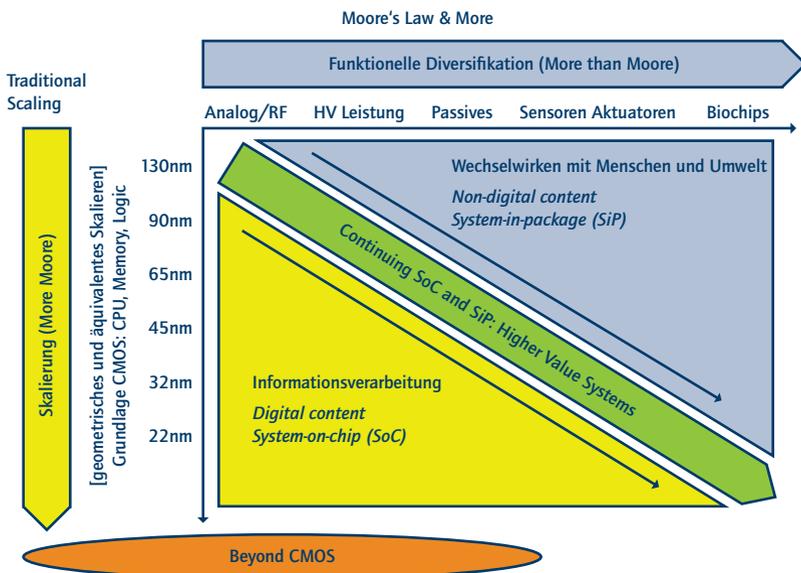
⁶ Arden 2003.

⁷ Moore 1965 und 1997.

Die Anforderungen der Halbleiter-Märkte an die Halbleiter-Technologien lässt sich sehr gut über eine Matrix abbilden, wie sie in Abbildung 4 dargestellt ist. Im Rahmen der Internationalen Technologie Roadmap für Halbleiter (ITRS) sind hier die verschiedenen Halbleiter-Technologien wie Speicher, High-Performance (HP) und Low-Power (LP) CMOS, Analog/Mixed-Signal und Leistungselektronik wie auch Sensoren/Aktuatoren über die verschiedenen Anwendungen aufgetragen. Die Größe der Kästchen stellt die Treiberfunktion der Anwendung in Bezug auf die Technologie dar. Bei der Farbe wird zwischen More-Moore- und More-than-Moore-Technologien differenziert.

Eine differenzierende Darstellung dieser beiden Technologietrends zeigt Abbildung 5.

Abbildung 5: Diagramm zur Differenzierung zwischen „More-Moore“- und „More-than-Moore“-Technologien



Quelle: <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/2011Chapters/2011ExecSum.pdf>, S. 10, Fig. 5.

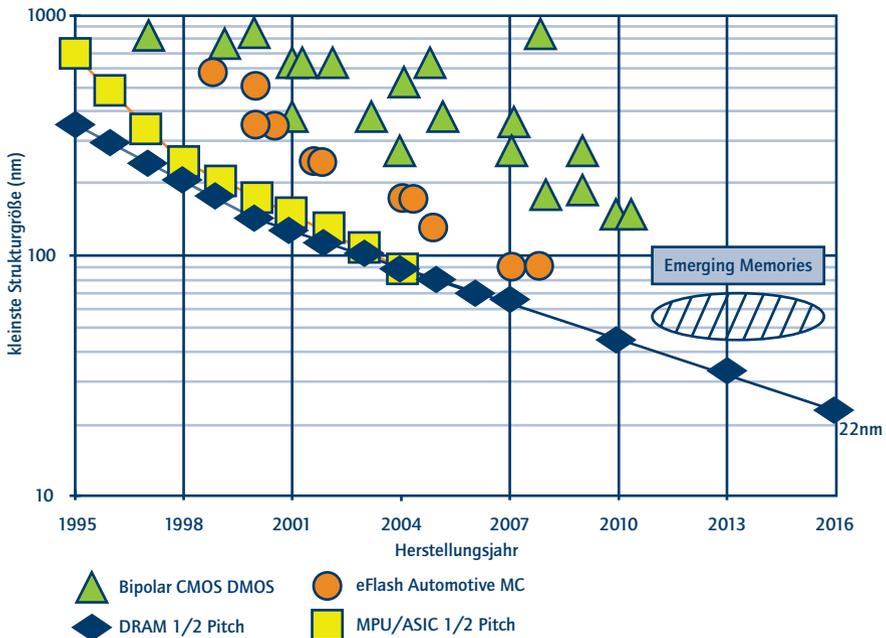
Während das traditionelle Skalieren der Halbleitertechnologien für Speicher und CMOS Logik („store and compute“) weiterhin nach dem Moore’schen Gesetz⁸ verläuft (More-Moore, vertikale Achse in Abbildung 5), bieten die sogenannten More-than-Moore-Technologien (horizontale Achse) die Integration zusätzlicher Funktionalitäten wie HF, Analog/Mixed Signal, Leistung und über die Sensoren/Aktuatoren die Verbindung zur Außenwelt.⁹ Wir sehen dabei in Abbildung 4, dass die Entwicklung

⁸ Moore 1965 und 1997.

⁹ <http://public.itrs.net> (ITRS 2009 Edition, Seite 20) [Stand: 02.08.2012].

von More-Moore-Technologien von Speicher- und Logik-Anwendungen getrieben werden, während die Treiber von More-than-Moore im Bereich der Industrie-, Automobil- und Medizinelektronik liegen. Dabei nutzt die Industrie- und Automobilelektronik die „leading edge“ Halbleitertechnologien für Speicher und Logik mit einem gewissen zeitlichen Nachlauf („trailing edge“), wie in Abbildung 6 gezeigt wird.

Abbildung 6: Halbleitertechnologien für Automobil-Elektronik folgen dem Moore'schen Gesetz mit Abstand



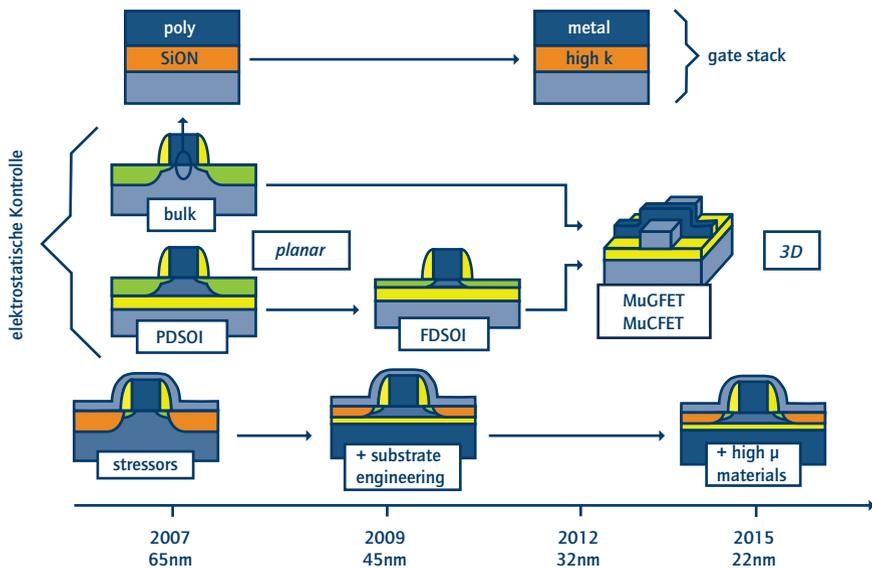
Quelle: Infineon Technologies AG.

Der Mainstream der Silizium-Technologieentwicklung wird derzeit und in näherer Zukunft von CMOS-basierten Bauelementen geprägt. Jedoch ist es evident, dass eine unbegrenzte Skalierung nicht möglich ist. Die grundsätzliche Idee der Skalierung ist, dass alle Strukturgrößen, Spannungen und die Dotierungen so eingestellt werden, dass ein kleinerer FET entsteht, mit identischem elektrostatischen Verhalten.¹⁰ Mit zunehmender Skalierung der Gate-Längen erhöhen sich jedoch die Verluste (Leckströme), und die traditionelle Skalierung aller Strukturlängen herkömmlicher CMOS-Transistoren führt zu Einbußen in der Leistungsfähigkeit. Durch die Einführung neuer Materialien und neuer Bauelement-Konzepte können jedoch kleinere Transistorgrößen

¹⁰ Frank 2006.

realisierbar werden.¹¹ Zu den neuartigen Bauteilkonzepten gehören zum Beispiel Double- und Multi-Gate-Transistoren, Silicon-on-Insulator- (SOI-) Bauelemente oder vertikal integrierte Transistoren (Abbildung 7)¹². Die Problematik unerwünschter Tunnelströme bei dünnen Gate-Isolationsschichten kann durch High-k-Dielektrika beseitigt werden. Alle diese Verfahren zur Erhöhung der Bauteildichte werden oft durch den Begriff „More-Moore“ charakterisiert, in der ITRS verwendet man hierzu den Begriff der „äquivalenten Skalierung“.

Abbildung 7: Vereinfachte Transistor-Roadmap



Quelle: <http://www.itrs.net/ITWG/archives.html> (2008, summer, San Francisco, Overall Roadmap Technology Characteristics).

Wie bereits erwähnt, können durch „funktionelle Diversifikation“ die More-Moore-Technologien ergänzt werden.¹³ Darunter wird die Integration verschiedenster Systeme und Dienste wie zum Beispiel Audio, Video, Sicherheit, PC, Kamera, Sensoren, TV etc. in einem einzigen Chip oder Gehäuse verstanden. Bei dieser Integration werden verschiedene Technologien wie zum Beispiel CMOS, BiCMOS, IGBT und andere verwendet und in einem System-on-Chip (SOC) und System-in-Package (SIP) zusammengeführt.¹⁴

¹¹ <http://public.itrs.net> (ITRS 2011 Edition, - chapter Process integration, devices and structures) [Stand: 02.08.2012].

¹² <http://www.eniac.eu> (ITRS 2011 Edition - chapter Emerging Research Devices) [Stand: 02.08.2012].

¹³ Arden 2008.

¹⁴ Arden 2008.

3.2 SCHALTUNGSTECHNIK

Die Technologieentwicklung wird flankiert durch komplementäre Maßnahmen der Schaltungstechnik zur Performance-Steigerung und Reduktion von Verlustleistung. Die schaltungstechnischen Maßnahmen hängen dabei stark von den Anforderungen der spezifischen Anwendungen ab.

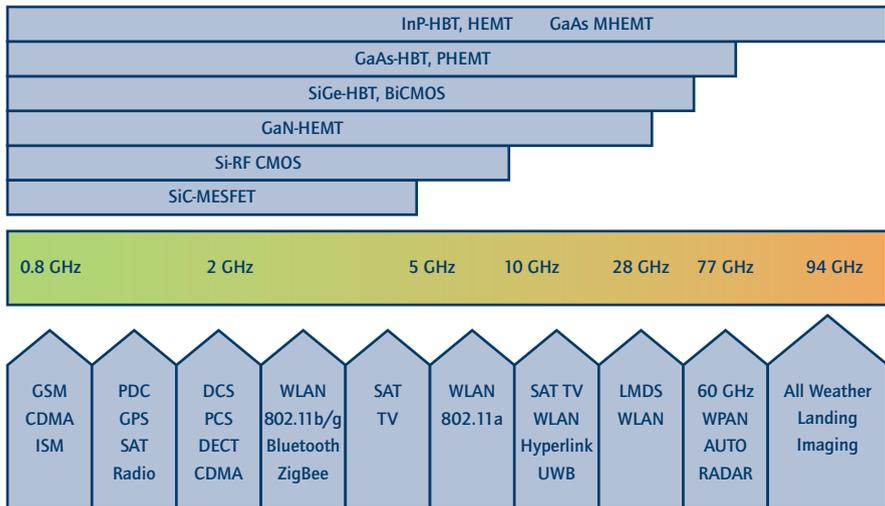
Die Herausforderungen an die ICs für die drahtgebundene Kommunikation liegen zum Beispiel bei der Senkung des Energieverbrauchs in Vermittlungsstationen der Netzbetreiber (Central Office) bei gleichzeitig hoher Anforderung an die Verfügbarkeit, während in der drahtlosen Kommunikation der Fokus im IC-Design auf der Beherrschung der Signalverarbeitungskomplexität neuer Mobilfunkstandards (3.75G und LTE) liegt; dabei übersteigt die Anforderung der Multistandard-Funktionalität den Geschwindigkeitszuwachs durch die Performance-Steigerung der Transistoren nach dem Moore'schen Gesetz. Außerdem muss das Energiebudget durch die geringe Zunahme der Batterielaufzeit stark eingeschränkt werden. Die entsprechenden schaltungstechnischen Maßnahmen sind die Kombination modernster CMOS-Technologien mit Parallelverarbeitung sowie die Reduktion des Energieverbrauchs durch Senkung der Spannung bei hoher Robustheit gegenüber Variationen. Dies erfordert den Einsatz neuester Modellierungs- und Entwurfstechniken. Die verschiedenen Anwendungen der drahtlosen Kommunikation mit den Betriebsfrequenzen und den zugeordneten Technologien zeigt Abbildung 8.¹⁵

In der Automobilelektronik sind die Herausforderungen an das Schaltungsdesign beispielsweise durch neue Abgasnormen gegeben, die eine immer anspruchsvollere Rechenleistung zur Steuerung erfordern. Dabei muss der Prozessor auch unter den rauen Automobilbedingungen (zum Beispiel hohe Temperatur) mit äußerster Zuverlässigkeit funktionieren. Die Realisierung der geforderten Rechenleistung erfolgt auch hier durch Verwendung von Parallelverarbeitung (Multithreading, Multiprozessoren). Die Zuverlässigkeit ist dabei ein Muss und die Beherrschung von Prozessvariationen in den Schaltungen dafür eine notwendige Voraussetzung.

In der Medizinelektronik ist bei den portablen Diagnose-Systemen wegen des Betriebs mit "Knopfzellen" ein minimales Energie-Budget zu realisieren. Auch hier spielt die Beherrschung der Sensitivität von CMOS Analog- und Digital-Schaltungen gegenüber Prozess-Variationen eine große Rolle. Design-Lösungen liegen hier im Betrieb von CMOS Analog- und Digital-Schaltungen bei Spannungen unterhalb der Technologie-Spezifikation.

¹⁵ <http://public.itrs.net> (ITRS 2011 Edition – chapter RF and A/MS Technologies) [Stand: 02.08.2012].

Abbildung 8: Anwendungsspektrum der drahtlosen Kommunikation



Quelle: <http://www.itrs.net/ITWG/archives.html> (2008, summer, San Francisco, RF and A/MS technologies for wireless communications).

4 DER TREND VOM KLASSISCHEN IDM ZUM FABLITE-KONZEPT IN DER HALBLEITER-INDUSTRIE

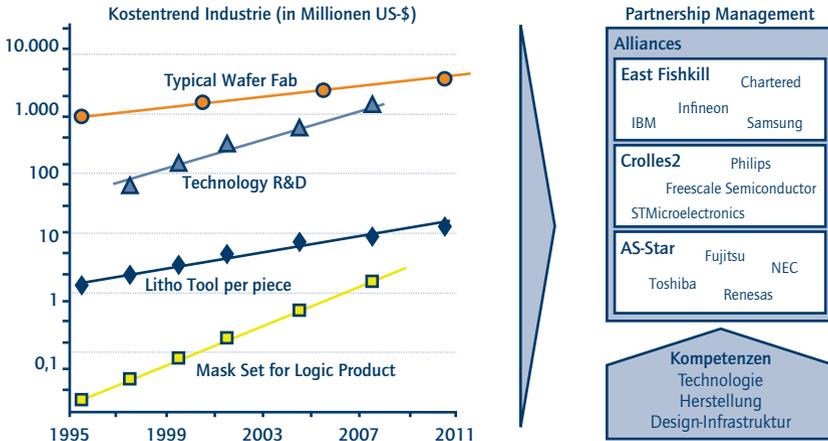
Infolge der ständig steigenden Kosten bei der Entwicklung der Halbleiter-Technologien und der Investitionen für moderne Halbleiter-Fertigungen¹⁶ haben sich in den letzten Jahren zwei wesentliche Trends herausgebildet (vgl. Abbildung 9): erstens die Bildung globaler Entwicklungsallianzen und zweitens der Trend zur sogenannten „Fablite“-Strategie. Während der Trend zu Entwicklungsallianzen schon seit zwei Jahrzehnten anhält, haben sich Ansätze zu Fablite-Konzepten erst kürzlich entwickelt.

Wegen der zunehmenden Fertigungs-Investitionen für neue CMOS-Technologien werden nur solche IDMs noch eigene Fertigungen aufbauen, die hochvolumige Commodity-Produkte wie Speicher oder Prozessoren herstellen. Applikationsspezifische ICs in fortschrittlichen („leading edge“) CMOS-Technologien werden zunehmend von Foundry's gefertigt werden. Nur für Produkte in More-than-Moore-Technologien (Leistung, Hochvolt, Embedded Control) werden die meisten Halbleiterfirmen noch eigene Fertigungen unterhalten.

Bedingt durch die globalen Entwicklungsallianzen und durch die Vorgaben der ITRS Roadmap folgen die CMOS-Technologien heute weitgehend einem Mainstream. Sie sind nicht mehr entscheidendes Differenzierungsmerkmal der Halbleiterfirmen; die Differenzierung erfolgt hier überwiegend über die Design-Systeme und Produkte. Dies

¹⁶ <http://www.icinsights.com/services/mcclean-report/> [Stand: 03.01.2013].

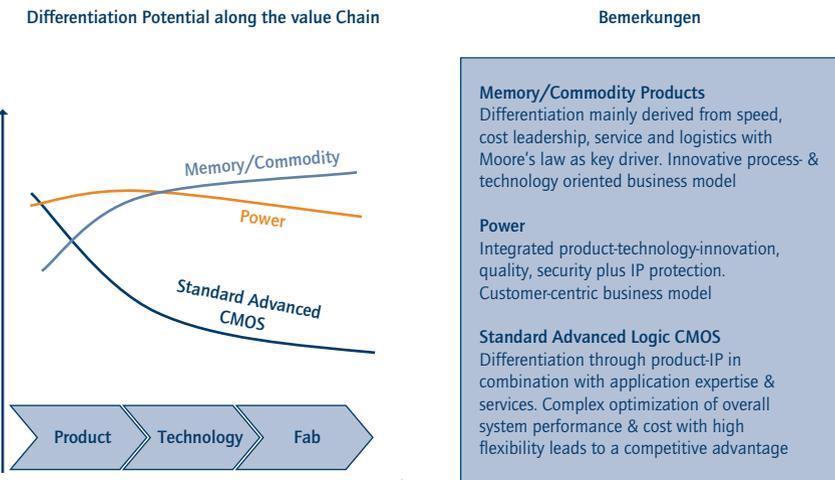
Abbildung 9: Explodierende Kosten für neue Technologien und der Trend zu globalen Allianzen



Quelle: Infineon Technologies AG.

gilt auf jeden Fall für Standard Advanced CMOS, während für Speicherprodukte und Leistungstechnologien auch die Technologien neben den Produkten nach wie vor wettbewerbsentscheidend sind (Abbildung 10).

Abbildung 10: Differenzierungsmerkmale entlang der Wertschöpfungskette für verschiedene Produkt-Segmente



Quelle: Infineon Technologies AG.

„More than Moore“-Technologien bedürfen eigener Entwicklungen, da sie eigene Wertschöpfungspotenziale und Wettbewerbsmerkmale besitzen. Hier ist der Übergang von SoC (System on Chip) zu SiP (System in Package) wichtig, da nur auf diese Weise „More than Moore“ und „More Moore“ getrennt voneinander gefertigt werden können.

5 NANOELEKTRONIK-FÖRDERUNG IN DEUTSCHLAND UND EUROPA

Für die Förderung der Forschung und Entwicklung von Halbleiter-Technologien stehen in Deutschland und Europa derzeit verschiedene Programme zu Verfügung. Bei den nationalen FuE-Förderprogrammen liegen die Schwerpunkte für die Grundlagen-Entwicklungen bei den Nanoelektronik- und Kommunikationsreferaten des BMBF und für die eher forschungsorientierten Themen bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Die nationalen Programme werden durch die regionale Förderung der Mikroelektronik vor allem in Sachsen (Wirtschafts- und Aufbauministerium, SMWA) und in Bayern (Wirtschaftsministerium) ergänzt.

Wenn geeignete Partner für Förderprojekte nicht im regionalen oder nationalen Umfeld zu Verfügung stehen, kann man auf die europäischen Programme zurückgreifen. Da sind insbesondere die EUREKA-Programme CATRENE¹⁷ für die Nano-Elektronik, EURIPIDES¹⁸ für Gehäuse- und Board-Techniken sowie ITEA¹⁹ für die Informationstechnologie zu nennen. Die Projekt-Definition und -bewertung erfolgt hier auf europäischer Ebene, die Förderung durch die beteiligten nationalen Regierungen. Daneben gibt es noch die neu aufgelegten Programme ENIAC²⁰ für die Nanoelektronik- und ARTEMIS²¹ für Embedded Systems Software, beide Programme mit anteiliger Förderung durch die EU und die betroffenen Nationen. Der Schwerpunkt liegt bei diesen Programmen auf industrienahen Projekten. Das rein durch die EU geförderte ICT-Programm eignet sich dagegen eher für forschungsorientierte Vorfeldprojekte.

Infolge der globalen Ausrichtung der Halbleiter-Industrie haben die europäischen Programme gegenüber den nationalen und regionalen Programmen in den letzten beiden Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen. Zur Effektivitätssteigerung und stärkeren strategischen Ausrichtung dieser Programme ist eine noch intensivere Zusammenarbeit zwischen den nationalen und europäischen Fördereinrichtungen wünschenswert.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die wesentlichen Schlussfolgerungen lassen sich in folgende kurze Statements zusammenfassen:

¹⁷ Webseite des CATRENE-Programms: <http://www.catrene.org> [Stand: 02.08.2012].

¹⁸ Webseite des EURIPIDES-Programms: <http://www.euripides-eureka.eu> [Stand: 02.08.2012].

¹⁹ Webseite des ITEA-Programms: <http://www.itea2.org/> [Stand: 03.01.2013].

²⁰ Webseite des ENIAC-Programms: <http://www.eniac.eu> [Stand: 03.08.2012].

²¹ Webseite des ARTEMIS-Programms: <http://www.artemis-ju.eu> [Stand: 03.08.2012].

- Zukünftige Schlüsselanwendungen für die Halbleiter-Industrie sind Automobil- und Industrie-Elektronik, Sicherheit, Kommunikation, Energieeffizienz und Medizin-Elektronik.
- Die traditionelle Skalierung nach Moore's Law für Datenverarbeitung und -speicherung geht derzeit noch ungebremst weiter.
- More-than-Moore-Technologien sind eine Europäische Stärke und gewinnen für die Schlüsselanwendungen zunehmend an Bedeutung.
- Die zukünftigen Anwendungen der Mikroelektronik erfordern im Nahbereich die Einführung neuer CMOS Transistor-Architekturen und innovativer Schaltungskonzepte.
- Die CMOS-Technologien folgen einem Mainstream, werden in Firmen übergreifenden Kooperationen entwickelt und sind nicht mehr entscheidendes Differenzierungsmerkmal der Halbleiterfirmen. Die Differenzierung erfolgt zunehmend über die Anwendungen.

7 LITERATUR

Arden 2003

Arden, W.: "Roadmap Key Challenges". In: *materials today*, 6: 5, Mai 2003, S. 40–44.

Arden 2008

Arden, W.: *The Semiconductor Technology Roadmap and its Economic Impact* (EC Workshop on economics of ICT, 08. April 2008). URL: http://ec.europa.eu/information_society/events/wks_eco_impact/documents/TechnologyRoadmap-ECWorkshop%20Brussels-Arden2008_04.pdf [Stand: 03.08.2012].

BMBF 2007

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): *IKT 2020: Forschung für Innovationen*, Bonn, Berlin 2007. URL: <http://www.bmbf.de/pub/ikt2020.pdf> [Stand: 02.08.2012].

CATRENE 2009

CATRENE: *Impact of Micro/Nanoelectronics on the European Economy* (Studie des Europäischen Nanoelektronik-Förder-Programms CATRENE), 2009 (auf Anfrage erhältlich über <http://www.catrene.org>).

Frank 2006

Frank, D. J.: *The Limits of CMOS Scaling from a Power-Constrained Technology Optimization Perspective* (Purdue University Seminar, 4. Oktober 2006). URL: <http://nanohub.org/resources/1885/download/2006.10.04-frank.pdf> [Stand: 03.08.2012].

Moore 1965

Moore, G. E.: "Cramming more Components onto Integrated Circuits". In: *Electronics*, 38: 8, 1965.

Moore 1997

Moore, G. E.: *PC Magazine*, 25. März 1997.

Moore 2003

Moore, G. E.: "No Exponential is Forever: But 'Forever' Can Be Delayed!" (IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., 10. Februar 2003, Vortragsmanuskript), 2003.

> HERAUSFORDERUNGEN IN DER NANOELEKTRONIK

NIKOLAUS LANGE

1 EINFÜHRUNG

Seit mehr als 40 Jahren sind Intel Chips elementarer Bestandteil von Computern, Servern und Netzwerkprodukten der IT- und Kommunikationsindustrie. Bestreben des Unternehmens ist es, intelligente Lösungen für die unterschiedlichsten Lebensbereiche bereit zu stellen, die eine immer höhere Leistung bei größtmöglicher Energieeffizienz bieten. Als einer der wichtigsten Motoren der Digitalisierung in unserer Gesellschaft liefert Intel heute intelligente und sichere Lösungen für die Cloud bis hin zum vernetzten Endgerät. Das Spektrum umfasst Server-, Speicher- und Netzwerk-Technologien für die steigenden Anforderungen im Rechenzentrum, die Entwicklung zukunftsweisender Produktkategorien wie Ultrabooks sowie Innovationen für mobile Endgeräte und das Internet der Dinge.

Dem breiten Marktspektrum tragen auch die eingesetzten Technologien Rechnung. Seit seiner Gründung ist das Unternehmen Intel ein Technologie-Vorreiter. Den rasanten Fortschritt der Halbleitertechnologie spiegelt die kontinuierlich steigende Anzahl der verwendeten Transistoren wieder, das Kernelement der Mikroprozessoren. Während in Intels erstem Mikroprozessor 4004 im Jahr 1971 „nur“ 2300 Transistoren eingesetzt wurden, passen in heutiger 22nm tri-gate Technologie allein 100 Millionen Transistoren auf den Kopf einer Stecknadel. Andererseits arbeitet ein heutiger 22nm Prozessor etwa 400 mal schneller während er 5000 mal weniger Energie verbraucht. Dabei ist der einzelne Transistor um etwa den Faktor 50.000 billiger geworden. Nachfolgend werden Kernpunkte einer erfolgreichen Innovationskultur sowie die damit zu bewältigenden Herausforderungen im Bereich der Nanoelektronik erläutert.

2 INTEL IN DEUTSCHLAND

Intel entwickelt komplette Technologieplattformen bestehend aus Mikroprozessor, Chipsatz, Kommunikationsbausteinen und entsprechender Software. Im Fokus steht dabei eine immer bessere Rechenleistung bei größtmöglicher Energieeffizienz, Sicherheit und Konnektivität. Neben der Weiterentwicklung von Smartphones, mobilen Computern und Desktop PCs sowie Servern liegt das Augenmerk von Intel auf Embedded Lösungen, die intelligente Technik unter anderem für die Bereiche Automobil, Transport und Verkehr oder die Automatisierungsindustrie bereitstellen. Weltweit beschäftigt Intel an

300 Standorten in mehr als 50 Ländern über 100.000 Mitarbeiter, von denen mehr als die Hälfte technische Abschlüsse besitzen.

Intel ist in Deutschland seit dem Jahr 1974 präsent und stellt seitdem einen wichtigen Baustein in der weltweiten Wachstums- und Zukunftsstrategie des Unternehmens dar. In Deutschland ist Intel mit zwei unabhängigen Geschäftsbereichen an insgesamt elf Standorten in acht Städten vertreten (München/Feldkirchen, Braunschweig, Ulm, Karlsruhe, München/Neubiberg, Duisburg, Nürnberg, Dresden, Regensburg). Von den mehr als 2.500 Mitarbeitern sind weit über 50 Prozent im Bereich Forschung und Entwicklung beschäftigt.

Die Intel GmbH betreut gemeinsam mit der englischen Niederlassung in Swindon federführend die Märkte Europa, den Mittleren Osten und Afrika. Neben der Vermarktung der klassischen Intel Halbleitertechnologie, bestehend aus Mikroprozessoren, Chipsatz, Kommunikationsbausteinen und entsprechender Software sowie der Weiterentwicklung der entsprechenden Märkte, treibt Intel hier auch Forschungs- und Entwicklungsarbeit sowie Corporate Responsibility Themen voran. Am Hauptsitz in Feldkirchen/München befinden sich die zentralen Vertriebs- und Marketingabteilungen, sowie die Intel Investment Abteilung Intel Capital, die Intel Software & Services Group und die Intel Open Labs München. Darüber hinaus gehören die Forschungs- und Entwicklungsstandorte Braunschweig und Ulm zur Intel GmbH.

2012 eröffnete Intel mit dem Automotive Innovation & Product Development Center in Karlsruhe seinen jüngsten Standort in Deutschland, der künftig zum weltweiten Kompetenzzentrum für den Automobil-Sektor von Intel ausgebaut wird.

Die Intel Mobile Communications (IMC) GmbH entwickelt und vermarktet innovative Halbleiterprodukte und Lösungen für die Mobilkommunikation, insbesondere in den rasant wachsenden Marktsegmenten Smartphones und Tablets sowie low-cost Mobiltelefone. Von den weltweit rund 4.000 Mitarbeitern arbeiten rund 1.700 in Deutschland, davon allein etwa 1.200 in der Firmenzentrale in Neubiberg bei München. Weitere Standorte sind Ulm, Regensburg, Duisburg, Dresden, Braunschweig sowie Nürnberg. Insgesamt ist Intel Mobile Communications weltweit in 17 Ländern vertreten und verfügt über eine starke Präsenz in den asiatischen Wachstumsmärkten

2.1 FORSCHUNGSSTANDORT DEUTSCHLAND

Zu den wichtigsten Forschungsgebieten Intels in Deutschland zählt die Fortentwicklung künftiger Generationen von Mikroprozessoren. So befindet sich am Standort Braunschweig eine der größten Chipentwicklungszentren Intels in Europa. Ein weiterer Fokus liegt auf der Softwareprogrammierung, speziellen Tools zur Softwareentwicklung sowie zukunftsweisen den Grafik und Visual Computing-Technologien. Des Weiteren arbeiten Intel Experten in Deutschland an Verbesserungen der Energieeffizienz in allen Bereichen des Computing, von Supercomputern einerseits zu batteriebetriebenen System on Chips. Zudem entwickeln

Intel Experten in Deutschland innovative Halbleiterprodukte und Lösungen für die Mobilkommunikation in den rasant wachsenden Marktsegmenten Smartphones, Tablets sowie kostengünstige Mobiltelefone (ultra low-cost).

Der Braunschweiger Standort entwickelt traditionell neue Technologien und verantwortet die Verifizierung und Weiterentwicklung innovativer Architekturen. Derzeit werden hier in Strukturbreiten bis hinunter zu 14nm entwickelt, während die Komplexität der „Systems on Chips“ immer weiter zunimmt und ganze Applikationsprozessoren eines Smartphones mit aller erdenklicher Peripherie auf einem einzigen Stück Silizium integriert werden kann. Die deutschen Standorte sind dabei ein wichtiges Standbein innerhalb Intels Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

3 PRODUKTENTWICKLUNG

Die große Bedeutung die Intel seiner technologischen Vorreiterrolle beimisst, äußert sich in dem Anteil des Konzernumsatzes der wieder in Forschung und Entwicklung zurück fließt. Auch in schwierigen gesamtwirtschaftlichen Phasen wurden in den letzten 10 Jahren mindestens 11 Prozent des jährlichen Umsatzes in Forschung und Entwicklung investiert. Hinzu kommen die Ausgaben für neue Fertigungsanlagen um Produkte auf dem neuesten Stand der Technik herstellen zu können. Nimmt man beides zusammen fließen durchschnittlich 30 Prozent des Umsatzes in neue Investitionen und bilden damit die Grundlage folgender Produktlösungen. Diese gewaltigen Investitionen sind notwendig um Kunden und insgesamt der Gesellschaft die gewaltigen Kostenvorteile, welche sich aus dem von Intel Mitgründer Gordon Moore entwickeltem Mooreschen Gesetz ergeben, zur Verfügung zu stellen (Abbildung 1).¹

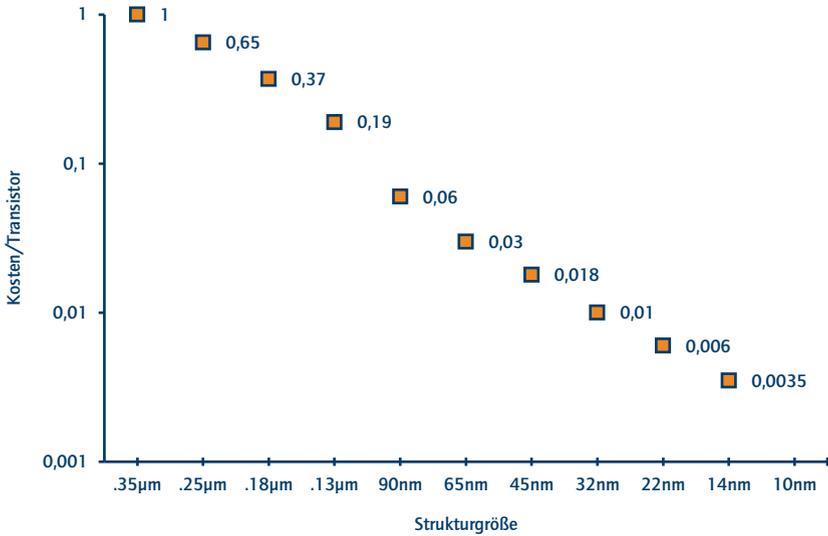
Ein Ergebnis der Intel Innovationsphilosophie ist die „Tick-Tock“ Strategie, bei der alle zwei Jahre eine neue Prozessortechnologie mit verkleinerten Strukturen vorgestellt wird. In den Jahren dazwischen präsentiert das Unternehmen jeweils eine neue Generation der Mikroarchitektur. Nur aus dem Zusammenspiel der Architektur mit ihrer technologischen Realisierung können dem Anwender überzeugende Produkte hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz angeboten werden.

Am Beispiel der Entwicklung der 45nm Technologiegeneration kann die typische Aufteilung der Investitionen zwischen Ausrüstung, Prozesstechnologie und Produktdesign abgelesen werden. In 45nm wurden hauptsächlich die drei Produktlinien Penryn, Nehalem und Silverthorne entwickelt. Mit US\$ 2Mrd. entfielen auf das Design dieser drei Produktfamilien etwa ein Sechstel der Gesamtausgaben von US\$ 12 Mrd. Die Entwicklung der eigentlichen Prozesstechnologie mit der Einführung von high-k Dielektrika und Metal Gate²

¹ Vgl. <http://www.intel.ie/content/dam/www/public/us/en/documents/backgrounders/standards-22nm-3d-tri-gate-transistors-presentation.pdf>.

² Bei der 45nm Technologiegeneration führte Intel ein neues Gatedielektrikum mit einer höheren dielektrischen Konstante ein. Zusammen mit einer metallischen Gateelektrode kann damit die elektrische Kontrolle des Transistors verbessert werden, ohne die physikalische Dicke der Gateisolation zu verringern. Dies führt zu einer Reduktion der Leckströme und damit der Verlustleistung der elektrischen Schaltung. Später in 22nm hat Intel dann als erstes Halbleiterunternehmen den sogenannten Tri-Gate Transistor in die Produktion eingeführt.

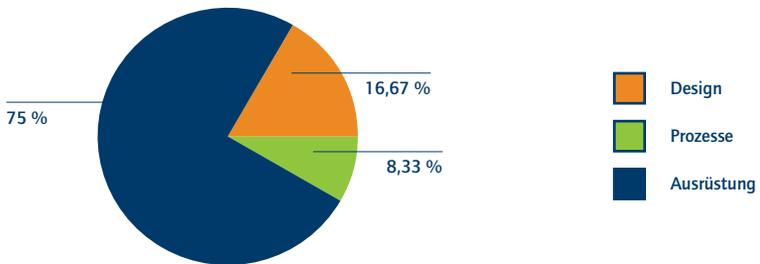
Abbildung 1: Die Kosten je Transistor aufgetragen gegen die Strukturgröße



Quelle: Eigene Darstellung.

war mit 1 Milliarde US-Dollar nur halb so teuer. Die restlichen Kosten in Höhe von 9 Milliarden US-Dollar flossen in die vier Fertigungsstätten (Fabs) in New Mexico, Oregon, Arizona und Israel. Häufig wird die Ansiedelung einer Fab gerade wegen dieses hohen Anteils der Gesamtinvestitionen von der Politik als besonders attraktiv angesehen und mit staatlichen Mitteln gefördert. Im Gegensatz zur Produkt- oder Technologieentwicklung fließt dabei aber ein Großteil der Investition an die Hersteller der Fertigungsanlagen, zudem in

Abbildung 2: Anteil der Investitionen in Ausrüstung, sowie Forschung und Entwicklung der letzten 10 Jahre



Quelle: Intel.

modernen Halbleiterfabriken ein immens hoher Automatisierungsgrad, d.h. ein eher abnehmender Arbeitskräftebedarf, vorherrscht. Entwicklungsstandorte profitieren hingegen von der vor Ort erzeugten Wertschöpfung in einer viel größeren und nachhaltigeren Weise (Abbildung 2).

4 FERTIGUNG, ENTWICKLUNG, FORSCHUNG

Während der technologischen Entwicklungsphase werden die vielfältigen Prozessvarianten zu einem leistungsfähigen und zuverlässigen Produktionsprozess zur Reife gebracht. In dieser neu entwickelten Technologiegeneration werden anschließend unterschiedliche Produkte üblicherweise vier Jahre lang gefertigt. Vor der eigentlichen Entwicklungsphase steht aber die Forschung an einer Vielzahl von Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Prozesse, der Materialien und auch der Bauelemente. Neben der optischen Lithographie für immer feinere Strukturen, können hier beispielhaft Multi-Gate Strukturen, sowie Maßnahmen zur Verbesserung der Ladungsträgermobilität, wie verspanntes Silizium oder auch III-V Kanalmaterialien genannt werden. Auf dem Weg aus den Forschungslaboren, über die Entwicklung, hin zur Produktion steigt dabei der Einsatz an Mitarbeitern und Aufwendungen immer stärker an. Damit einher geht eine immer stärkere Fokussierung auf die erfolgversprechendsten Lösungsansätze, die letztendlich in eine, für den Kunden spürbare, Verbesserung des Produktes münden. Mit seinen Partnern und einem Netzwerk aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen arbeitet Intel auch an völlig neuen Konzepten. Mit der Einführung des Tri-Gate-Transistors in 22nm wurde erstmalig die dritte Dimension im Halbleiterdesign genutzt. Dies erlaubt eine bessere Kontrolle des Stromflusses im Transistor, d.h. maximaler Strom für beste Leistung wenn der Transistor eingeschaltet ist, und umgekehrt minimalen Stromfluß und somit geringe Ruhestromaufnahme wenn der Transistor ausgeschaltet ist. Mit diesem Halbleitermaterial lassen sich schon heute hochperformante und leistungsfähige Chips herstellen, die z.B. in einem Smartphone die Rechenleistung liefern welche vor Jahrzehnten nur Supercomputern vorbehalten waren, aber andererseits die Stromaufnahme in einen Bereich bringen der mit handlichen Batterien bedient werden kann. All dies ist nur ein kleiner Teil der vielseitigen Forschungsfelder, die auf der Suche nach alternativen technischen Lösungen bearbeitet werden. Möglicherweise stehen am Ende dieser Suche Lösungen, die in Zukunft die Standard CMOS Logik in bestimmten Anwendungsfällen ergänzen können.

5 HERAUSFORDERUNGEN FÜR INTEL DEUTSCHLAND

Für den Intel Entwicklungsstandort Deutschland steht an oberster Stelle die Verbesserung der Energieeffizienz, d.h. die Erhöhung der Rechenleistung pro verbrauchter Energie. Damit leistet Intel einen aktiven Beitrag zur gesellschaftlichen Aufgabe des Klimaschutzes und der Forderung nach immer mehr Mobilität. Gleichzeitig ermöglicht eine verbesserte

Energieeffizienz die Erhöhung des Funktionsumfanges, die auch heute schon durch die maximal zulässige Wärmeentwicklung bzw. bei mobilen Anwendungen zusätzlich durch die Batteriekapazität begrenzt wird. Dies kann durch verbesserte Prozesse und Bauelemente erreicht werden. Eine weitere Steigerung der Effizienz erfolgt durch eine optimierte Verwendung der existierenden CMOS Technologie und Architektur. Hier verspricht die parallele Ausführung mehrerer Aufgaben eine verbesserte Nutzung der vorhandenen und verfügbaren Rechenleistung. Zu dieser Parallelisierung müssen aber nicht nur die Prozessoren technisch in der Lage sein, sondern auch die Anwendungen müssen lernen die zusätzlichen Ressourcen zu nutzen und sinnvoll zu verwenden. Dies ist ein Beispiel dafür, dass die Architekturentwicklung Hand in Hand mit der Anwendungs- und Programmentwicklung erfolgen muss. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden liefert Intel von der Architektur über den Systementwurf bis zu Programmierwerkzeugen ganzheitliche Lösungen. Schlüsselement einer solchen Betrachtung ist aber ein funktionierendes Netzwerk der Mikroelektronik in Deutschland. In diesem kann ein Dialog über die Fortentwicklung der Hard- und Software stattfinden, der für eine nachhaltige Entwicklungslandschaft in Deutschland notwendig ist. Untrennbar damit verbundenen ist die Aufgabe der Nachwuchsförderung.

Hier engagiert sich Intel als Gründungsmitglied bereits seit 1999 in der Initiative D21³, die einen Beitrag dazu leisten möchte, die Wissens- und Informationsgesellschaft im Deutschland des 21. Jahrhunderts zu stärken. Dies beginnt bereits in den Schulen mit Lehrer-Fortbildungen hinsichtlich der didaktischen Nutzung von Computern und neuen Medien im Unterricht. Mit der Intel-Leibniz-Challenge, dem größten bundesweiten Schülerwettbewerb nach „Jugend forscht“, soll Schülern die Faszination der Naturwissenschaften vermittelt sowie ihr Interesse für Ingenieursberufe frühzeitig geweckt werden. Die Beziehungen zu den Hochschulen haben langfristigen und strategischen Charakter und konzentrieren sich auf Gebiete, die wichtig für die Zukunft der gesamten IT-Industrie sind. Dazu gehören beispielsweise Plattform-Architekturen, computergestützte Designtechniken, sowie die Kommunikationstechnik. In Deutschland kooperiert Intel mit mehreren so genannten „Fokus-Universitäten“, z.B. den akademischen Spitzenzentren TU München, TU Berlin, TU Braunschweig, Universität Karlsruhe und der Universität Hannover. Intel unterstützt dort Forschungsprojekte, vergibt Stipendien, Praktikumsplätze und Studienarbeiten an Studenten, stellt modernste IT-Ausstattung für Laboratorien bereit und finanziert ein Programm für Gastprofessuren.

6 FAZIT

Wie hier skizziert, wird die CMOS Technologie der Intel Plattform Architektur beständig verbessert und fortentwickelt. Für die Zukunft sind dabei zahlreiche technische Erweiterungen der Prozesstechnologie, der Transistoren aber auch der Systeme zu erwarten.

³ In diesem parteien- und branchenübergreifenden Netzwerk fördern mehr als 400 Vertreter von Parteien, Unternehmen, Vereinen und anderen Einrichtungen gemeinnützige Projekte zu Themen wie Bildung, Qualifikation und Chancengleichheit, eGovernment oder Sicherheit im Internet.

Dabei entsteht in einem kreativen Umfeld, ein äußerst interessantes Arbeitsfeld für junge, talentierte Ingenieure. Entsprechend der immer stärkeren Durchdringung aller Lebensbereiche mit informationstechnischen Technologien, steigt auch deren Bedeutung für die gesamte Volkswirtschaft. Es ist an allen Akteuren, also der Politik, den Hochschulen und auch den Unternehmen, die Sichtbarkeit des Berufsbildes, entsprechend seiner Bedeutung für Deutschland zu fördern. Denn nur eine überzeugende Nachwuchsförderung ermöglicht auch in Zukunft die Entwicklung von konkurrenzfähigen und innovativen Produktlösungen in Deutschland.

> DIE „NANOELECTRONICS RESEARCH INITIATIVE“

WOLFGANG POROD

1 VORGESCHICHTE

In den frühen 2000er Jahren begann die *Emerging Research Device Technical Working Group* der *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)*, fundamentale und praktische Probleme (hauptsächlich Hitzeezeugung) für zukünftiges Skalieren zu studieren und potenzielle alternative post-CMOS-Technologien zu identifizieren. Es sei hier angemerkt, dass diese Suche nach einem neuen Digitalbauelement nicht ohne Präzedenz ist: Der erste Festkörpertransistor, basierend auf bipolarer Technologie, wurde entwickelt, als Vakuumröhren und mechanische Schalter ähnliche Hitzelimits in den späten 1940er Jahren erreichten, und der heutige Feldeffekt-Transistor ersetzte den Bipolaren Transistor in den späten 1980er Jahren aus demselben Grund.

Die *Semiconductor Research Corporation (SRC)* und die *National Science Foundation (NSF)* organisierten zusammen eine Reihe von Workshops mit Beteiligung von Industrie, Wissenschaft und Regierung¹, um ein Programm zur Entwicklung eines neuen Schaltungsbauelements zu strukturieren. Parallel dazu hielt das *Technology Strategy Committee* der *Semiconductor Industry Association (SIA)* mehrere Workshops ab, um Forschungsinitiativen zu definieren mit dem Ziel, IC-Technologie über Skalierungslimits weiterzuentwickeln. Diese Aktivitäten identifizierten 13 Forschungsvektoren von Bedeutung für den neuen Schalter, und die fünf mit der höchsten Priorität sind: (1) Zustandsgröße, welche nicht auf Ladung basiert, (2) Nichtgleichgewichtssysteme, (3) Transportmechanismen, welche nicht auf Ladung basieren, (4) Phonon Engineering für Hitzemanagement und (5) Self-Assembly solcher Strukturen.

2 DAS NRI-FORSCHUNGSPROGRAMM

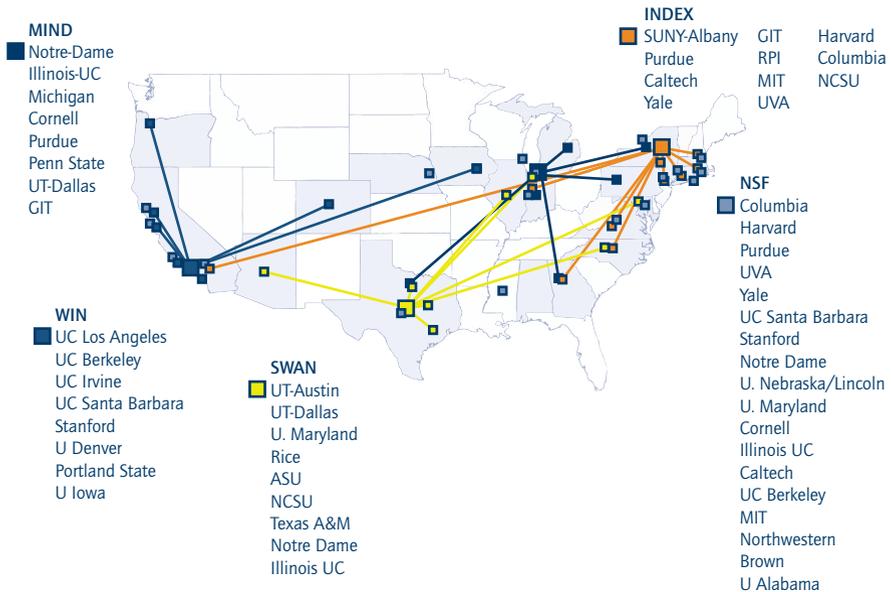
Im Jahre 2005 initiierte die SIA ein Forschungsprogramm, um diese Vektoren zu verfolgen. Die *Nanoelectronics Research Initiative (NRI)*, welche von der SRC verwaltet wird, hatte die Aufgabe, neue Bauelemente zu entwickeln, welche den CMOS FET als den Logikschalter im Zeitraum bis 2020 ersetzen könnten. Diese neuen Bauelemente sollten signifikante Vorteile gegenüber den ultimativen FETs haben bezüglich Leistung (Hitzentwicklung), Arbeitsleistung (Performance), Dichte und Kosten, um die historischen Trends der Halbleiterindustrie weiterhin zu ermöglichen.

¹ Cavin/Zhirnov 2004; Cavin et al. 2005; Cavin et al. 2006.

Um diese Ziele zu erreichen, hat sich die NRI-Forschung auf neuartige Bauelemente mit neuen Zustandsgrößen und Schaltungsmechanismen fokussiert. Zusätzlich ist die NRI auch interessiert an neuen Interconnect-Technologien und neuen Schaltkreisen und Architekturen sowie auch an Nichtgleichgewichtssystemen für besseres Hitzemanagement und an neuen Materialien und Fabrikationsmethoden. Letztendlich sollten diese neuen Technologien mit CMOS kompatibel sein, um den Übergang auf einen neuen Skalierungspfad zu erleichtern.

Die NRI-Mitglieder sind führende US-Halbleitertechnologie-Firmen (AMD/Global-Foundries, IBM, Intel, Micron und Texas Instruments), welche in Partnerschaft mit Federal Agencies und auch mit State Departments Forschung an US-Universitäten fördern. Zurzeit fördert dieses Programm Forschung an über 30 Universitäten in 20 Staaten (siehe Abbildung 1) mit zwei verschiedenen Modellen.

Abbildung 1: NRI Forschungsprogramme



Quelle: nri.src.org.

3 DIE FORSCHUNGSZENTREN

Der Hauptteil der NRI-Forschung geschieht in vier virtuellen universitären Zentren, mit finanzieller Unterstützung von der Industrie, dem *National Institute of Standards and Technology (NIST)* und dem jeweiligen US-Staat sowie der lokalen Regierung.

Jedes dieser Zentren hat seinen eigenen Fokus auf der Suche nach einem post-CMOS-Logikschalter (siehe auch Tabelle 1):

- WIN: Western Institute of Nanoelectronics, UCLA, Kalifornien (Direktor: Prof. Kang Wang); mit Fokus auf Spintronics und verwandten Phänomenen einschließlich Materialien, Device-Strukturen und Interconnects für Logikanwendungen.
- INDEX: Institute for Nanoelectronics Discovery and Exploration, SUNY-Albany, New York (Direktor: Prof. Alain Kaloyeros); mit Fokus auf neuen Phänomenen für Logikbauelemente, organisiert in Kompetenzzentren um exzitonische, Quanten-Punkt Spin, magnetische und Graphen-Devices, mit Betonung auf Fabrikation und Charakterisierung.
- SWAN: SouthWest Academy for Nanoelectronics, UT-Austin, Texas (Direktor: Prof. Sanjay Banerjee); mit Fokus auf Graphen, Pseudospins, Plasmonik und magnetischen und multiferroischen Materialien sowie Metrologie, Theorie und Device Integration.
- MIND: MidWest Institute for Nanoelectronics Discovery, University of Notre Dame, Indiana (Direktor: Prof. Alan Seabaugh); mit Fokus auf Tunneltransistoren, Nanomagnetismus und Nichtgleichgewichtssystemen für Energie-effiziente Bauelemente und Architekturen.

Tabelle 1: NRI-NIST Forschungszentren

WIN Western Institute of Nanoelectronics	INDEX Institute for Nanoelectronics Discovery & Exploration	SWAN SouthWest Academy for Nanoelectronics	MIND Midwest Institute for Nanoelectronics Discovery
UCLA, UCSB, UC-Irvine, Berkeley, Stanford, U Denver, Iowa, Portland State	SUNY-Albany, GIT, RPI, Harvard, MIT, Purdue, Yale, Columbia, Caltech, NCSU, UVA	UT-Austin, UT-Dallas, TX A&M, Rice, ASU, Notre Dame, Maryland, NCSU, Illinois-UC	Notre Dame, Purdue, Illinois-UC, Penn State, Michigan, UT-Dallas, Cornell, GIT
<ul style="list-style-type: none"> - Spin-Bauelemente - Spin-Schaltungen - Bezugswerte & Metrik - Spin-Messtechnik 	<ul style="list-style-type: none"> - Bauelemente mit neuen Zustandsgrößen - Herstellung & Selbstassemblierung - Modellierung & Architektur - Theorie & Simulation - Roadmap - Messtechnik 	<ul style="list-style-type: none"> - Logik-Bauelemente mit neuen Zustandsgrößen - Materialien & Strukturen - Thermisches Management im Nanobereich - Verbindungsleitungen & Architektur - Charakterisierung im Nanobereich 	<ul style="list-style-type: none"> - Graphene-Bauelemente: Thermisch, Tunneleffekt & Spin - Interband-Tunneleffekt-Bauelemente - Nanomagnetische Logik - Modellierung und Messung von Systemen im Ungleichgewicht - Nanoarchitektur

Quelle: nri.src.org.

Zusätzlich fördert die NRI 18 Projekte zusammen mit der NSF an 15 existierenden NSF *Nanoscience Centers*: an den *Nanoscale Science and Engineering Centers (NSECs)*, den *Materials Research Science and Engineering Centers (MRSECs)* und am *Network for Computational Nanotechnology (NCN)*.²

4 VISION UND ZIELE

Die Vision der NRI ist es, ein zielorientiertes, grundlegendes Forschungsprogramm zu fördern – eines, welches Forschern die Freiheit gibt, ein weites Spektrum von grundlegenden Ideen zu verfolgen, aber geleitet von dem Endziel, ein neues Bauelement zu finden. Ein wichtiger Aspekt dieses Programms besteht darin, technische Experten der Mitgliedsfirmen und von NIST in direktem Kontakt mit Forschern an den Universitäten zu haben – einmal, um den Akademikern Einsicht in praktische Industrieprobleme zu geben, und zum anderen, um den Transfer von viel versprechenden Ideen zu den Firmen für die weitere Entwicklung zu ermöglichen.

5 LITERATUR

Cavin/Zhirnov 2004

Cavin, R. K./Zhirnov, V. V.: "Silicon Nanoelectronics and Beyond: Reflections from a Semiconductor Industry-Government Workshop". In: *Journal of Nanoparticle Research*, 8, 2004, S. 137 – 147.

Cavin et al. 2005

Cavin, R. K./Zhirnov, V. V./Bourianoff, G. I./Hutchby, J. A./Herr D. J. C./Hosack, H. H./Joyner, W. H./Wooldridge, T. A.: "A Long-Term View of Research Targets in Nanoelectronics". In: *Journal of Nanoparticle Research*, 7, 2005, S. 573 – 586.

Cavin et al. 2006

Cavin, R. K./Zhirnov, V. V./Herr D. J. C./Avila, A./Hutchby, J.: "Research Directions and Challenges in Nanoelectronics". In: *Journal of Nanoparticle Research*, 8, 2006, S. 841 – 858.

² Weitere Information über alle Forschungsprogramme und Forschungszentren ist erhältlich auf der NRI-Website: <http://nri.src.org> [Stand: 22.08.2012].

> DIE FÖRDERUNG VON ELEKTRONIKSYSTEMEN UND ELEKTROMOBILITÄT DURCH DAS BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG

ULRICH KATENKAMP

Dieser Text bezieht sich auf den Stand 2011.

1 EINLEITUNG

Die Entwicklungen im Bereich der Elektronik sind zu einem entscheidenden Innovationstreiber in vielen volkswirtschaftlichen Bereichen geworden. Dies betrifft nicht nur die sogenannte Consumerelektronik, deren Endprodukte heute vor allem in Fernost produziert werden (wie PCs, MP3-Player, Smartphones, Digitalkameras, Flachbildschirmfernseher usw.). Dies betrifft vor allem auch die Industrieelektronik und damit die für die Exportwirtschaft Deutschlands wichtigen Industriezweige der Automobilwirtschaft, des Anlagen- und Maschinenbaus, der Medizintechnik, der Energiewirtschaft und anderes mehr.

Mehr als 50 Prozent der Wertschöpfung in entsprechenden Produkten und Dienstleistungen gehen heute auf Elektroniksysteme zurück. Im Automotive-Bereich sind Elektronik und Elektrik Treiber von etwa 80 Prozent aller Innovationen. Die Tendenz ist steigend. Ohne Elektronik geht nichts mehr in einem modernen Fahrzeug – vom Komfort über die Sicherheit bis hin zu den immer wichtiger werdenden, umweltverträglichen alternativen Antrieben.

Der Industriestandort Deutschland hängt in entscheidendem Maße davon ab, wie es gelingt, leistungsfähige, energieeffiziente und zuverlässige Elektroniksysteme als Grundlage für international wettbewerbsfähige Produkte zu entwickeln. Die Frage danach, wie neue Innovationen geschaffen werden können, ist die wichtigste Frage für ein Hochlohnland wie Deutschland, das auf freien Märkten nur mit Produkten höchster Qualität und Leistung dauerhaft wettbewerbsfähig sein kann. Auch in Zeiten zunehmender Globalisierung und Standortverlagerungen, auch unter den gegenwärtigen weltwirtschaftlichen Bedingungen hat Deutschland alle Voraussetzungen dafür, erfolgreich zu bleiben. Dies fällt uns aber nicht von selbst in den Schoß, wir müssen etwas dafür tun.

Bei der Forschungsförderung spielt die Höhe eingesetzter Finanzmittel aus dem öffentlichen Bereich nicht immer die wichtigste Rolle. Deutschland verfügt über viele Forschungsstrukturen, die gut ausgerüstet sind. Oftmals sind es vielmehr geeignete Rahmenbedingungen, intelligente Vernetzungen und effektive Strukturen, die darüber entscheiden, ob aus Forschungsergebnissen innovative Produkte und Dienstleistungen entstehen.

Hier setzt die Forschungs- und Innovationspolitik des BMBF an. Die richtigen Akzente zu setzen, ist gerade in einem hoch dynamischen, von Umbrüchen und neuen

Im Bereich der Elektroniksysteme und Elektromobilität kommen unterschiedliche Förderinstrumente zum Einsatz (Abbildung 2):

Abbildung 2: Beispiele für BMBF-Förderinstrumente im Bereich „Elektroniksysteme, Elektromobilität“

BMBF Rahmenprogramm IKT 2020



- Innovationsallianz Automobilelektronik
- Spitzencluster Cool Silicon
- KMU Innovativ
- EUREKA/CATRENE
- ENIAC Joint Technology Initiative

... und entsprechende
Förderbekanntmachungen



Quelle: BMBF.

Es sind dies Programme oder Richtlinien, die mit Förderbekanntmachungen angekündigt werden und thematische Schwerpunkte verfolgen; Beispiele hierfür sind „Leistungselektronik zur Energieeffizienzsteigerung“ (2009), „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität“ (2010) oder „Intelligente Elektronik-Systeme für Anwendungen im Geräte-/Anlagenbau und in der Medizintechnik“ (2011). Darüber hinaus können Fördermaßnahmen auch auf spezielle Kompetenznetzwerke in Regionen („Spitzencluster“) oder volkswirtschaftlich besonders wichtige Strukturen („KMU-innovativ: IKT“) ausgerichtet sein.

Die Innovationsgeschwindigkeit ist im IKT-Sektor besonders hoch. Am Markt erfolgreiche Spitzenprodukte entstehen in der Regel nur in einer engen Symbiose zwischen Forschung, Produktion und Markteinführung. Einerseits benötigt die Forschung die Rückmeldung von den Unternehmen für eine konkrete Ausrichtung. Andererseits können Unternehmen von dem stetigen, engen Kontakt mit universitären und außer-universitären Forschungseinrichtungen dadurch profitieren, dass sie zusätzliche Impulse für attraktive Produkte und neue Systemlösungen erhalten. Im Mittelpunkt der BMBF-Förderung stehen daher die sogenannten „Verbundprojekte“ – Forschungsprojekte, in denen Gruppen aus Forschungseinrichtungen mit Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft intensiv kooperieren.

Die Zusammenarbeit im Bereich der Mikroelektronik ist aber auch aus ganz pragmatischen Gründen Voraussetzung dafür, Spitzenforschung außerhalb der Unternehmen überhaupt in nennenswertem Umfang betreiben zu können: Die extrem hohen Bau-, Investitions- und Folgekosten für Anlagen, Reinsträume und deren Betrieb würden auf Dauer jeden auf sich allein gestellten Institutshaushalt sprengen. In Dresden hatten sich deshalb hierzu verschiedene Kooperationsformen entwickelt (Public Private Partnership, Joint Venture).

Das Ziel, durch solche Verbundprojekte Ergebnisse schneller aus der Forschung in die Unternehmen, in die Anwendung und den Produktbereich zu transferieren, gilt nicht nur für die nationale Förderung. Sie gilt auch für die europäische Zusammenarbeit. Die beiden Programme CATRENE (EUREKA) und ENIAC (JTI – Joint Technology Initiative) bilden den Rahmen für entsprechende Kooperationen im Bereich der Mikroelektronik. Beide Ansätze sind industriegeführt. Die Finanzierungsmodelle sind zwar jeweils unterschiedlich, in beiden Fällen aber werden die Forschungsprojekte mit zusätzlichen nationalen Fördermitteln unterstützt. Etwa 35 – 40 Prozent der Fördermittel des BMBF-Haushaltstitels „Elektroniksysteme, Elektromobilität“ sind im Jahr 2011 für die deutschen Partner solcher europäischer Verbundvorhaben zur Verfügung gestellt worden. Auf die Schwierigkeiten, zu einer gemeinsamen und abgestimmten Konzeption beider Programme zu kommen, wird später eingegangen.

Auch im Rahmen der gegenwärtigen Diskussionen zu den sogenannten „Key Enabling Technologies“ spielt die Mikroelektronik eine wichtige Rolle. Mit welchen Maßnahmen und in welchem Rahmen Schlüsseltechnologien in Zukunft in Europa unterstützt werden sollen, ist noch nicht entschieden. Für die Mikroelektronik wird gegenwärtig unter anderem die Etablierung sogenannter „Pilotlinien“ diskutiert – hiermit verbinden sich viele Erwartungen, vor allem in finanzieller Hinsicht. Aber auch hier gilt: Zunächst muss klar definiert sein, welche übergeordneten Ziele im gesellschaftlichen Interesse und welche Umsetzungsschritte nötig sind und schließlich, welche Partner sich hieran in welchem Umfang beteiligen wollen.

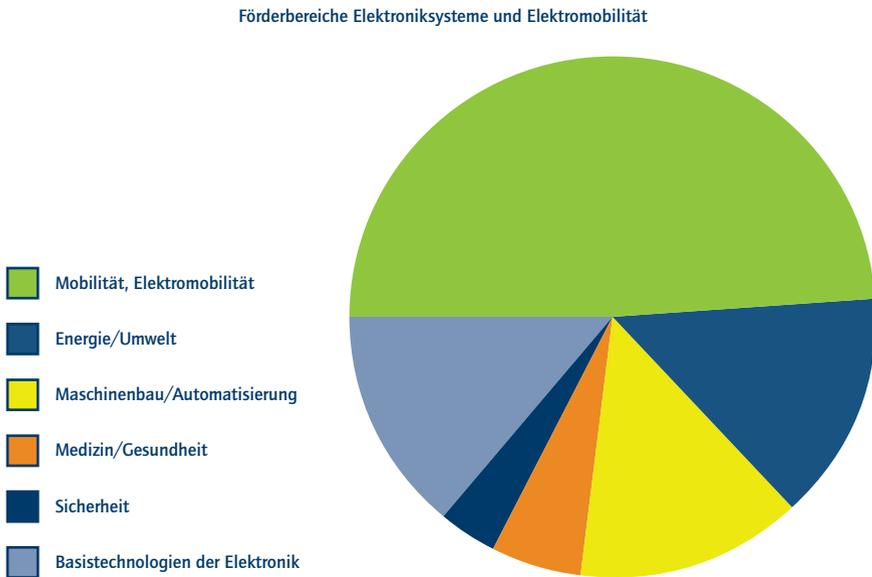
Die gegenwärtige Förderung verschiedener Themenbereiche aus dem BMBF-Haushaltstitel „Elektroniksysteme, Elektromobilität“ zeigt Abbildung 3.

Der größte Anteil entfällt auf den Anwendungsbereich der Mobilität, dann folgen die Bereiche Energie/Umwelt, Maschinenbau und Technologien in jeweils etwa dem gleichen Umfang.

Die Automobilindustrie ist nach wie vor einer der wichtigsten Industriezweige in Deutschland. Fast jeder dritte Forscher und Entwickler ist in dieser Branche tätig, jeder siebte Arbeitsplatz in Deutschland hängt von der Automobilindustrie ab. Automotive-Halbleiter machen zwar nur rund 8 Prozent des weltweiten Halbleitermarktes aus, die prognostizierten Wachstumsraten sind aber beachtlich. Dies hängt nicht nur mit der wachsenden Zahl der weltweit produzierten Fahrzeuge zusammen, sondern auch damit, dass der Halbleiteranteil bei Neufahrzeugen in jedem Jahr um 6 – 8 Prozent steigt.

Ein wesentliches Motiv für den Einsatz öffentlicher Fördermittel ist die Herausforderung, Mobilität nachhaltig zu gestalten. Deutschland ist als Industriestandort auf Mobilität angewiesen, nicht zuletzt auch als Logistikkreuzung zwischen West- und Osteuropa. Angesichts des steigenden Verkehrs- und Transportaufkommens sind Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz von zentraler Bedeutung.

Abbildung 3: Förderbereiche im Haushaltstitel „Elektroniksysteme, Elektromobilität“



Quelle: BMBF.

Elektronikanwendungen im Mobilitätsbereich machen in Abbildung 3 rund 49 Prozent aus. Darin enthalten sind vor allem Forschungsmittel für die immer wichtiger werdenden umweltfreundlichen und energieeffizienteren Antriebe und Fahrzeuge, insbesondere im Bereich der Elektromobilität (zum Teil auch Projekte zu Sicherheitsaspekten und Fahrerassistenzsystemen). Wichtige Beiträge kamen von einem Verbund aus 34 Fraunhofer-Instituten zum Thema „Systemforschung Elektromobilität“, der ab Frühjahr 2009 mit Mitteln aus dem Konjunkturprogramm 2 gefördert wurde. Fast zeitgleich zu diesem Ansatz sind das größte europäische Verbundprojekt im Rahmen von ENIAC (E3Car) sowie ein nationales, ebenfalls von BMBF gefördertes Großprojekt angelaufen (ePerformance).

Für die Anwendungsbereiche Energie/Umwelt sowie Maschinenbau/Automatisierung werden je ca. 13 Prozent der Fördermittel eingesetzt. Im Mittelpunkt stehen hier Leistungselektronik für die Erzeugung regenerativer Energien und Beiträge zur Energieeffizienzsteigerung durch elektronische Systeme in verschiedenen Branchen. In den Bereichen Medizinelektronik und Sicherheit (elektronische ID-Dokumente) werden ca. 10 Prozent der Fördermittel eingesetzt, der Rest entfällt auf die Förderung wichtiger Technologien.

Insgesamt ist die in Abbildung 3 gezeigte Aufteilung Ausdruck einer konsequenten Neuausrichtung der Forschungspolitik des BMBF seit dem Start von IKT2020 im Jahr 2007. Früher standen für das BMBF vor allem die Technologieförderung und der Aufbau von Kompetenzzentren der Mikro- und Nanoelektronik im Mittelpunkt. Durch seine Forschungsförderung hat das BMBF so die Entwicklung Dresdens zum wichtigsten Mikroelektronikcluster nachhaltig unterstützt. Vor 5–8 Jahren entstand ein Netzwerk neuer Strukturen: das Maskenhaus (AMTC), das Zentrum für Nanoelektronische Technologien (CNT-FhG), das Labor für Materialien der Nanoelektronik (NaMLab) – und all dies eingebettet in viele Forschungsverbünde mit großen Halbleiterherstellern, KMU, Forschergruppen der Technischen Universität Dresden, der FhG, der Leibniz-Gemeinschaft usw.

Heute, Ende 2011, macht die Technologieförderung noch rund 14 Prozent des Haushaltstitels „Elektroniksysteme, Elektromobilität“ aus. Gefördert werden hier Beiträge zur Lithographieentwicklung in der europäischen Zusammenarbeit zwischen ASML (Niederlande) und Zeiss SMT. Ebenfalls erfasst sind hier außerdem eine Vielzahl von Projekten zum Entwurf neuer Chiparchitekturen (Electronic Design Automation), die deutschlandweit vor allem in dem Bereich der Industrieelektronik (analog, mixed-signal) eine große Bedeutung haben. 2009 wurden in Dresden zusätzlich das BMBF-Spitzencluster „CoolSilicon“ gestartet sowie das neue FhG-Zentrum ASSID („All Silicon System Integration Dresden“), das die Entwicklung von 3D-Integrationstechnologien zum Ziel hat. Sowohl CoolSilicon als auch ASSID setzen thematisch (Energieeffizienz) und technologisch (Hochintegration) neue Akzente, die für eine Verwertung der Forschungsergebnisse am Standort Deutschland eine große Bedeutung haben. Auch für den Mikroelektronikcluster Dresden werden hierdurch neue Impulse ausgelöst.

Insgesamt ist die in Abbildung 3 gezeigte Verteilung nicht festgeschrieben. Die Projektförderung – und dies ist ein großer Vorteil dieses Instruments – kann immer wieder kurzfristig an neue Herausforderungen und aktuelle Erfordernisse angepasst werden. Grundsätzlich setzt die BMBF-Projektförderung der Mikroelektronik im vorwettbewerblichen Bereich an. Sie soll helfen, strategisch wichtige Aktivitäten auf den Weg zu bringen. Sie ist zeitlich befristet und keine Dauerfinanzierung – weder was Themen noch was Strukturen oder Einrichtungen betrifft. Voraussetzung für eine BMBF-Unterstützung ist die Mitfinanzierung der Projektkosten durch die entsprechenden Einrichtungen bzw. Unternehmen sowie die Erarbeitung und spätere Umsetzung sogenannter

Verwertungspläne. Diese Verwertungspläne sollen die in der Perspektive geplante Umsetzung der FuE-Ergebnisse in innovative Produkte und Dienstleistungen am Standort Deutschland aufzeigen. Übergeordnetes Ziel ist die Stärkung des IKT-Standortes Deutschland.

Gerade diese Umsetzungsorientierung zog in der Vergangenheit oft Diskussionen zum Thema „Grundlagenforschung versus anwendungsorientierte Forschung“ nach sich. Dies ist wenig sinnvoll, denn die Grenzen sind fließend. Einen „Königsweg“ gibt es auch hier nicht. Letztlich müssen alle relevanten Bereiche berücksichtigt werden – von der Grundlagenforschung über die Technologieentwicklung bis hin zu konkreten Anwendungen und Umsetzungen. Hierfür gibt es auch unterschiedliche Programme, vielfältige Fördermöglichkeiten und Strukturen. Wünschenswert wäre im Bereich der Mikroelektronik ein einheitliches national (oder sogar europäisch) abgestimmtes Konzept, das im Sinne einer „Roadmap“ alle Aspekte und Beiträge berücksichtigt.

In jedem Fall ist bei einer Förderung der Einsatz öffentlicher Mittel, das heißt der Einsatz von Steuermitteln, besonders zu begründen. In jedem einzelnen Fall ist bei der BMBF-Förderung der Mikroelektronik zu prüfen, in welchem Umfang die geplanten Projekte zur Sicherung des IKT-Standortes Deutschland beitragen können – auf welcher Zeitskala auch immer.

Im Folgenden wird beispielhaft auf zwei wichtige Schwerpunkte der gegenwärtigen Elektronikförderung des BMBF eingegangen – auf den Spitzencluster „CoolSilicon“ in Europas wichtigstem Mikroelektroniknetzwerk in Dresden und auf den Bereich der Elektromobilität.

3 DAS SPITZENCLUSTER „COOLSILICON“

Bei der Elektronikentwicklung in der Region Dresden geht es vor allem um die weitere Entwicklung von Spitzentechnologien für innovative und hochintegrierte Bauelemente und Geräte der Elektronikfertigung. Neue Materialien, Design, Hochintegration, Zuverlässigkeit und Energieeffizienz sind Aspekte, die in allen Anwendungsbereichen der Elektronikentwicklung von hoher Bedeutung sind. Die hier gewonnenen Erfahrungen gehen zugleich ein in neue Entwicklungen und Innovationen anderer Branchen. Silicon Saxony zeigt längst auch in anderen Bereichen (wie Organische Elektronik, Photovoltaik, Mikrosysteme, Software, Kommunikationstechnologien usw.) eine bemerkenswerte Entwicklung, die oftmals von dem „Pionier Mikroelektronik“ profitiert hat. Grundlage für das Aufblühen dieser Region insgesamt ist aber auch die Tatsache, dass nach dem Zusammenbruch der DDR so viele hervorragend ausgebildete und hoch motivierte Fachkräfte für den wirtschaftlichen Aufschwung zur Verfügung standen.

Diese positive Entwicklung während der letzten 15 – 20 Jahre hat nicht verhindern können, dass die beiden damals größten Investoren im Halbleiterbereich in Dresden – Qimonda (Hersteller von Speicherchips/Ausgründung von Infineon, vormals Siemens)

und AMD (US-Hersteller von Mikroprozessoren) – in den Jahren 2007–2009 unabhängig von der damaligen Wirtschaftskrise in Schwierigkeiten geraten sind. Am 01.04.2009 ist Qimonda in Konkurs gegangen, und AMD hat seine Fabriken in ein neues Unternehmen einbringen müssen (GlobalFoundries mit Finanzinvestor aus Abu Dhabi). Hiermit waren einschneidende Auswirkungen auf das gesamte Dresdener Mikroelektronik-Netzwerk verbunden.

So schmerzlich diese Entwicklung war, gerade mit Blick auf die hoch qualifizierten Mitarbeiter und Technologien von Qimonda, aber auch was insgesamt den deutschen Hochtechnologiestandort betrifft, Silicon Saxony muss die internationale Entwicklung in diesem Bereich als Herausforderung annehmen und auf seine Stärken setzen. Eine der allerwichtigsten Stärken ist – neben der Verfügbarkeit gut ausgebildeter und hoch motivierter Menschen – die Clusterbildung, die vielfältige Kooperation zwischen kleinen und großen Unternehmen, Halbleiterproduzenten, Geräteherstellern, Zulieferern, die Vernetzung mit zahlreichen Forschungsinstituten ganz unterschiedlicher Fachgebiete. Es sind die „kurzen Wege“, die Möglichkeit unmittelbarer Kontakte und enger Vor-Ort-Kooperationen, die so wichtig sind. Dies alles hat Dresden stark gemacht und ist auch für die zukünftige Entwicklung von entscheidender Bedeutung. Alle künftigen Konzepte müssen diese Erfahrung beachten: Nur die intensive Zusammenarbeit und Vernetzung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, gerade in einer Branche mit einem so hohen Innovationstempo, macht eine solche Entwicklung, wie sie in Dresden in der Vergangenheit abgelaufen ist, möglich.

Vor Kurzem hat die KOMINAS („Kommission für Mikro- und Nanoelektronik in Sachsen“, 2009 eingesetzt vom Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst) Empfehlungen für den weiteren Ausbau des Mikroelektronikclusters vorgelegt. Hierbei sind eine Reihe von Themen adressiert worden, die zum Teil über die „klassische“ Mikroelektronik hinausgehen (3D, Organische Elektronik, Medizinelektronik etc.). Auch hier wird es darum gehen müssen, die Erfahrungen der Vergangenheit zu berücksichtigen.

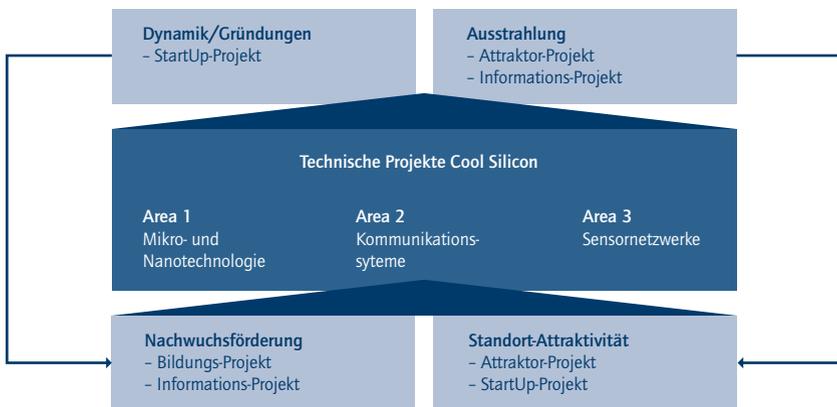
Vor dem Hintergrund der dynamischen Entwicklung seit 1990 verwundert es nicht, dass der Dresden-Cluster in der ersten Runde des Spitzenclusterwettbewerbs des BMBF im Jahr 2008 erfolgreich war. Diese neue Form der BMBF-Förderung unterstützt in einer Region strategische Partnerschaften, bei denen Unternehmen, Forschungseinrichtungen und weitere regionale Gruppen gemeinsam mit Schlüsseltechnologien an der Entwicklung von Innovationen arbeiten.

Der Spitzencluster „Cool Silicon – Energy Efficiency Innovations from Silicon Saxony“ wird von 2009 bis 2013 vom BMBF mit 40 Millionen Euro gefördert. Deutlich mehr als 50 Unternehmen und Forschungseinrichtungen der Region arbeiten hier zusammen.

Hauptziel ist die Erarbeitung von Lösungen, die den Energieverbrauch im IKT-Bereich deutlich senken und zum Teil auch energieautarke Lösungen ermöglichen. Drei Bereiche stehen im Mittelpunkt (vgl. Abbildung 4):

- 1) Computing („CoolComputing“ – höhere Energieeffizienz elektronischer Bauteile, vom Chip bis zur Systemebene),
- 2) Mobilfunk („CoolReader“ – mobiler Empfang von Zeitungen/Dokumenten, mittels Solarzellen nahezu energieautark),
- 3) Vernetzte Sensorik („CoolSensornet“ – energieautarke Sensorsysteme zur Überwachung von Leichtbauflügeln in der Luftfahrt).

Abbildung 4: Spitzencluster „CoolSilicon“



Quelle: BMBF.

Auch wenn die Informationstechnik große Chancen bietet, viele Systeme, Produkte und Dienstleistungen effizienter zu machen, müssen zugleich die IKT-Systeme selbst energieeffizienter werden. Mit der Vielfalt von elektronischen Dienstleistungen („e-Services“), der zunehmenden Internetnutzung, größeren Bandbreiten und Übertragungsgeschwindigkeiten wächst der Umfang des Datentransfers und damit auch des Energieverbrauchs.

Nach VDE|ITG-Angaben benötigen IKT-Systeme allein für "e-Services" heute weltweit etwa 8 Prozent (160 GW) der global erzeugten elektrischen Leistung. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Anteil auf etwa 15 Prozent im Jahr 2020 anwachsen wird. Noch bis vor Kurzem musste zum Beispiel genauso viel Energie für die Kühlung und den Betrieb von Datenzentren aufgewendet werden wie für die Server selbst.

Es ist nicht unwahrscheinlich, dass alle mit dem Internet zusammenhängenden Entwicklungen auch in den nächsten zehn Jahren nichts an ihrer Dynamik verlieren werden. Damit wird die IKT selbst zu einem immer wichtigeren Faktor in der globalen Bilanz von Treibhausgasemissionen. Forschung und Entwicklung müssen deshalb einen

essenziellen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz von IKT-Systemen leisten. Nur so kann auf Dauer das IKT-Wachstum von einem weiteren Anstieg des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen entkoppelt werden.

Das Thema „IKT und Energieeffizienz“ findet weltweit in zunehmendem Maße Beachtung. Wir müssen die guten Voraussetzungen, die in Deutschland bestehen, entscheidende Beiträge zur Energieeffizienzsteigerung zu liefern, entschlossen nutzen. Das Thema Energieeffizienz wird zum Schlüssel der Wettbewerbsfähigkeit im 21. Jahrhundert. Diese Chance dürfen wir nicht verpassen!

„CoolSilicon“ zu fördern, war eine richtige Entscheidung, wie der Zwischenbericht Ende 2010 zu den ersten Ergebnissen der 40 Verbundprojekte zeigt. „CoolSilicon“ zu fördern, ist auch aus förderpolitischer Sicht ein wichtiger Schritt, aber es ist nur ein erster Schritt – weitere müssen folgen, nicht nur in Dresden.

Energieeffizienz als Schlüssel zur Energieeinsparung und damit zum Ressourcen- und Umweltschutz hat in allen Bereichen eine herausragende, oftmals noch nicht vollständig erkannte Bedeutung. Die Ereignisse in Fukushima haben den Übergang zu regenerativen Energien beschleunigt. Das Thema Energieeffizienz ist und bleibt zentral, auch und gerade bei den neuen Herausforderungen der Energieerzeugung und -verteilung.

4 ELEKTROMOBILITÄT

Die Entwicklung zu elektrischen Antrieben von Fahrzeugen wird getrieben durch den weltweiten Trend zum umweltfreundlichen Auto (Senkung von Treibstoffverbrauch und Abgasen) und den begrenzten Vorrat an fossilen Rohstoffen („weg vom Öl“).

Insbesondere in den Megacities dieser Welt wird sich mittelfristig individuelle Mobilität nur noch „nachhaltig“ realisieren lassen, das heißt auf Hybrid- oder rein elektrische Antriebe stützen müssen. Auch in Europa zwingen vor dem Hintergrund der Notwendigkeit des Klimaschutzes steigende Abgas- und CO₂-Normen zum Umdenken. Will die deutsche Automobil- und Zulieferindustrie nicht ihre weltweit führende Rolle verlieren, muss sie auch in den Bereich der Elektromobilität investieren und FuE-Anstrengungen verstärken.

Es geht nicht nur darum, die Elektrifizierung des Antriebsstrangs zügig voranzutreiben und das Energie- und Klimamanagement völlig neu zu konzipieren. Es geht auch um völlig neue Fahrzeugkonzepte. Die Zeitenwende im klassischen Automobilbau hin zum Elektroauto wurde vom Audi-Entwicklungsvorstand Michael Dick so charakterisiert: „Wir stehen an einer Schwelle, vergleichbar mit der von der Schreibmaschine zum Computer.“ Übersetzt heißt dies, wir stehen vor einem radikalen Kurswechsel im Bereich der Mobilität. Es wird in Zukunft nicht mehr reichen, ausschließlich über stetige, inkrementelle technische Verbesserungen des konventionellen Antriebsstrangs nachzudenken. Längst sind die Rahmenbedingungen gesetzt, die das Tempo diktieren: In Europa wurde 2007 im Durchschnitt ein CO₂-Wert von durchschnittlich 157 g CO₂/km erreicht (PKW); das geplante Langfristziel 2020 beträgt 98 g CO₂/km, das bedeutet eine Reduzierung um

ca. 40 Prozent. Solche Ziele lassen sich nur realisieren, wenn alle Möglichkeiten genutzt werden, also neben der Verbesserung der klassischen Antriebe auch die zügige Einführung verschiedener Hybridvarianten bis hin zum „Full Electric Car“.

Regionen, die bisher kaum in der Lage waren, der hoch entwickelten deutschen Technik Paroli zu bieten, setzen nun zum Auf- und Überholen an. Mit Milliardenbeträgen fördert China in seiner staatlich gelenkten Volkswirtschaft die Entwicklung von Hybrid- und Elektroautos. China will hier Weltmarktführer werden. Ehrgeizige Ziele hinsichtlich der baldigen Einführung eines Vollelektrofahrzeugs mit 400 km Reichweite und 160 km/h Spitzengeschwindigkeit mussten zwar zunächst wieder korrigiert werden, es kann aber kein Zweifel daran bestehen, dass sich China zu einem ernst zu nehmenden Konkurrenten entwickeln wird. Zugleich ist es auch ein hoch attraktiver Absatzmarkt für deutsche Fahrzeuge. Die USA, Japan und Frankreich, nur um die wichtigsten Länder zu nennen, setzen ebenfalls auf diesen neuen Trend der elektrischen Antriebe. Deutschland muss also aus ganz verschiedenen Gründen reagieren.

Bereits im August 2009 wurde deshalb ein Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität vorgestellt. Er wird getragen von vier Ressorts der Bundesregierung (BMWi/Wirtschaft, BMVBS/Verkehr, BMU/Umwelt und BMBF/Bildung und Forschung). Im Mai 2010 hat die Bundeskanzlerin die Nationale Plattform Elektromobilität mit ca. 155 Unternehmen, Einrichtungen, Verbände und Organisationen einberufen.

Ein Jahr später wurde das Regierungsprogramm Elektromobilität veröffentlicht², auch als Reaktion auf die inzwischen erarbeiteten Berichte der Nationalen Plattform und ihrer sieben Arbeitsgruppen. Das Regierungsprogramm Elektromobilität stellt die Weichen für die Maßnahmen und Umsetzungsschritte der nächsten Jahre. Ziele sind, dass 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen fahren und sich Deutschland zu einem Leitanbieter für Elektromobilität entwickelt.

Was bedeutet dies nun für die Bildungs- und Forschungspolitik des BMBF?

Die Förderung der Automobilelektronik mit dem Ziel der Entwicklung umweltfreundlicher und sicherer Automobile ist bereits im BMBF-Forschungsprogramm IKT 2020 (2007) verankert. Die Forschungsförderung hat sich hierauf ausgerichtet (Projektförderung/Innovationsallianz Automobilelektronik). 2008 wurden die ersten Weichen für Projekte zur Elektromobilität gestellt. Im Frühsommer 2009 starteten neue Großprojekte:

- *E3Car (Energy Efficient Electrical Car)*: in dem bislang größten europäischen Projekt arbeiten 33 Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus insgesamt elf Staaten daran, Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb um etwa 35 Prozent effizienter zu machen. Energiemanagement und Leistungselektronik sind die wesentlichen Grundlagen. Die Ergebnisse des E3Car-Projektes sollen dazu beitragen, Europa zum weltweit führenden Standort für die Herstellung und

² http://www.bmbf.de/pubRD/programm_elektromobilitaet.pdf.

Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen zu machen. Das Gesamtbudget für das dreijährige E3Car-Projekt beläuft sich auf rund 44 Millionen Euro, die zur Hälfte von den Industrie- und Forschungspartnern erbracht werden bzw. von den nationalen Fördergebern, voran dem BMBF und der Organisation ENIAC (European Nanoelectronics Initiative Advisory Council).

- *Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität*: dieses Großprojekt, an dem 34 Fraunhofer-Institute beteiligt waren, hatte das Ziel, den Wandel zu einer nachhaltigen „All-electric Economy“ zu untersuchen. Alle Wertschöpfungsstufen der Elektromobilität wurden betrachtet – von der Energieerzeugung über die Verteilung der Energie durch die Stromnetze, die Schnittstellen zwischen Stromnetz und Fahrzeug, die Energiespeicherung bis hin zu neuen Fahrzeugkonzepten. Das BMBF unterstützte diesen Ansatz mit 34,5 Millionen Euro aus dem Konjunkturprogramm 2 in den Jahren 2009–2011. Ein begleitender Industriebeirat hat sichergestellt, dass die Arbeiten eng an praktischen Fragestellungen ausgerichtet waren und Voraussetzungen dafür geschaffen wurden, dass die Ergebnisse möglichst zeitnah für die deutsche Automobil- und Zulieferindustrie zur Verfügung stehen. Vor diesem Hintergrund wurden die erreichten Ergebnisse durchweg positiv bewertet, in einigen Bereichen wird eine enge Kooperation mit den Unternehmen bereits fortgesetzt.
- *ePerformance*: Mit insgesamt 22 Millionen Euro fördert das BMBF dieses Projekt (2009–2012), in dem von Audi, Bosch, der RWTH Aachen und anderen Forschungseinrichtungen in den kommenden Jahren ein neuartiges Systemkonzept für leistungsfähige Elektroautos entwickelt werden soll. Ein vom Markt akzeptiertes Elektrofahrzeug kann nur Realität werden, wenn von Anfang an bei der Entwicklung des Fahrzeugs, des Antriebsstrangs, der Batterie, der Bordelektronik und der Sicherheitskonzepte ein ganzheitlicher Ansatz des Energiemanagements verfolgt wird. In einem Elektrofahrzeug müssen viele unterschiedliche Komponenten optimal zusammenwirken und abgestimmt sein. Gleichzeitig sind Reichweite, Leistung, Zuverlässigkeit, Alltagstauglichkeit und Sicherheit zu gewährleisten. Auch dieses ganzheitliche Entwicklungskonzept bündelt im Rahmen der BMBF-Förderung die Kompetenzen aus Industrie, Universitäten und Forschungseinrichtungen und hilft somit, entsprechende Kooperationsnetzwerke aufzubauen.

Nicht eingegangen werden soll in diesem Zusammenhang auf die Bereiche Materialforschung, Elektrochemie, Batterie- und Produktionsforschung. All diese Bereiche stellen ebenfalls ganz wichtige Beiträge zum Thema Elektromobilität dar und werden vom BMBF bereits seit Jahren gefördert. Vor allem der Batterieforschung fällt eine Schlüsselrolle zu. Herausragendes Beispiel ist die Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie 2015 (LIB 2015)“. In der Ende 2007 geschlossenen Innovationsallianz LIB 2015 hat

sich ein Konsortium aus BASF, BOSCH, EVONIK, LiTec und VW verpflichtet, gezielt in die Forschung und Entwicklung für Lithium Ionen-Batterien zu investieren. Die Eigenmittel der Industrie in Höhe von 360 Millionen Euro werden ergänzt durch eine zusätzliche BMBF-Förderung mit 60 Millionen Euro. Inzwischen sind darüber hinaus weitere Maßnahmen auf den Weg gebracht, wie die Einrichtung von Kompetenzzentren, die Nachwuchs gezielt fördern und Forschung im Batteriebereich bündeln sollen. Der Aufbau einer Pilotanlage zur Erforschung geeigneter Fertigungsbedingungen von Lithium Ionen-Batterien ist in Planung.

Im Bereich Fahrzeugelektronik und Gesamtsystemansatz hat sich auf der Basis der BMBF-Innovationsallianz „Automobilelektronik“ im Jahr 2009 der Strategiekreis „Elektromobilität“ aus führenden Automobilherstellern und Zulieferern gebildet („eNOVA“). Die Empfehlungen dieses Kreises waren eine wichtige Grundlage für die erste umfassende Förderrichtlinie des BMBF im Bereich der Elektromobilität: die Förderbekanntmachung „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“. Sie wurde im April 2010 veröffentlicht, zielt auf neue Fahrzeugkonzepte und deckt alle hierfür nötigen Aspekte von der Batterie, Materialfragen bis hin zur Leistungselektronik und Fahrzeugantrieben ab. Mit rund 120 Millionen Euro Fördermitteln unterstützt das BMBF rund 40 Verbundvorhaben während der nächsten Jahre. Eine Nachfolgeaktivität (STROM 2) fokussiert auf das Energiemanagement im E-Fahrzeug sowie Zuverlässigkeits- und Sicherheitsfragen, befindet sich bereits in der Umsetzung.

Insgesamt sind, auch ergänzt durch BMBF-Förderaktivitäten in den Bereichen Leichtbau und Produktionsforschung, gute Voraussetzungen geschaffen worden, um durch öffentliche Forschungsförderung rechtzeitig die Grundlagen für den Kompetenzaufbau zur erfolgreichen Herstellung von Elektrofahrzeugen zu legen. Ergänzend und flankierend unterstützen die anderen Ressorts wichtige Aktivitäten in ihren Bereichen, denn es geht auch um intelligente Stromnetze, geeignete Infrastrukturen, Ressourcen- und Umweltfragen und vieles andere mehr. In Abbildung 5 sind die Förderschwerpunkte des BMBF im Bereich Elektromobilität zusammengefasst – der Umfang der Fördermittel ist Ausdruck einer konsequenten Fokussierung auf dieses Thema.

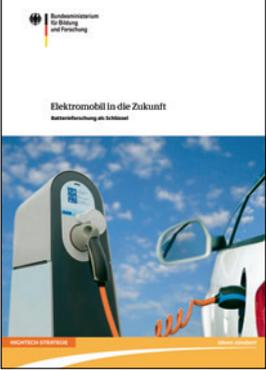
Eine ganz wesentliche Voraussetzung dafür, dass in Deutschland produzierte Elektrofahrzeuge erfolgreich auf dem Weltmarkt sein werden, aber auch hier gekauft, gewartet und in unsere Mobilitätskonzepte eingebunden werden, sind hoch motivierte und gut ausgebildete Fachkräfte. „Aus- und Weiterbildung“ ist daher ein wichtiges Querschnittsthema (siehe auch Arbeitsgruppe 6 der Nationalen Plattform). Es spielt sowohl im beruflichen als auch akademischen Bereich eine wichtige Rolle und ist gleichermaßen bedeutsam für die Automobilhersteller und Zulieferer, die Industrie- und Handelskammern, das Handwerk, den Servicebereich, die Fach- und Hochschulen usw. Auf Empfehlung der Nationalen Plattform hat das BMBF deshalb eine erste Nationale Bildungskonferenz Elektromobilität im Juni 2011 in Ulm begleitet und unterstützt.³ Ein

³ <http://www.uni-ulm.de/in/npe-qemo.html>.

erstes Pilotprojekt („Qualifizierung für die Elektromobilität“, QEMO) von der Universität Ulm und dem Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e. V. (WBZU), zu 100 Prozent vom BMBF finanziert, widmet sich in enger Zusammenarbeit mit Automobilunternehmen der Gestaltung und Standardisierung der Unterrichtsmaterialien einschließlich des Aufbaus von Musterpraktika zur akademischen und beruflichen Unterrichtspraxis („train the trainer“). Auf andere BMBF-Maßnahmen in diesem Kontext, wie Schüler- und Studentenwettbewerbe („DRIVE-E“⁴, „SolarMobil Deutschland“⁵, „Invent a Chip“⁶), sei nur am Rande hingewiesen.

Abbildung 5: Förderung der Elektromobilität durch das BMBF

Schwerpunkte des BMBF – Status und Strategie

<p>Forschung und Entwicklung</p> <ul style="list-style-type: none"> – Batterieforschung, seit 2007 <i>von der Elektrochemie bis zur Batterieproduktion</i> – Energiemanagement, seit 2008 <i>Energieeffizienz des Gesamtsystems</i> – Nachwuchsförderung, Aus- und Weiterbildung, seit 2009 <i>(u.a. Studentenwettbewerb DRIVE-E, Bildungskonferenz Ulm)</i> – Gezielte KMU-Förderung, seit 2009 <i>(im Bereich Elektromobilität)</i> <p>2007-2011: >250 Mio. € 2012-2015: >600 Mio. €</p>	 <p>The image shows the cover of a report titled 'Elektromobilität in die Zukunft' (Electric Mobility in the Future) published by the German Federal Government (BMBWF). The cover features a photograph of an electric car charging station with a car plugged in. The text on the cover includes the BMBWF logo and the title 'Elektromobilität in die Zukunft'.</p>
---	---

Quelle: BMBF.

Insgesamt haben sich in den letzten beiden Jahren die Aktivitäten zum Thema Elektromobilität schnell entwickelt und zu einer heute kaum überschaubaren Vielfalt von Strukturen, Ankündigungen und ersten Maßnahmen geführt. Neben den Bundesaktivitäten haben auch einzelne Bundesländer eigene Kompetenzzentren und Programme etabliert. Auf EU-Ebene wurden erstmalig 2010 Forschungsvorhaben innerhalb der sogenannten „European Green Cars Initiative“ ausgeschrieben. Diese Maßnahme, die in enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt wurde, ist Bestandteil des europäischen Konjunkturpaketes, das Ende letzten Jahres von der EU-Kommission beschlossen wurde. Weitere Ausschreibungen beschäftigen sich ebenfalls mit diesem Thema oder Teilaspekten („Sustainable Surface Transport“, „Sustainable automotive electrochemical storage“ usw.).

⁴ <http://www.drive-e.org>.

⁵ <http://www.solarmobil-deutschland.de>.

⁶ <http://www.invent-a-chip.de>.

Eine besondere Herausforderung wird darin bestehen, die Vielzahl der Maßnahmen und Aktivitäten auf Länder-, Bundes- und EU-Ebene abzustimmen und strategisch auszurichten. In dem im August 2009 veröffentlichten McKinsey-Report („Der Trend zu energieeffizienten PKW“) wird ein „Masterplan Elektromobilität“ empfohlen. Ziel müsse eine Koordination aller beteiligten Partner sein, um den „business case“ profitabel zu gestalten, schnell einen Skaleneffekt zu erreichen und globale Standards zu setzen.

Auch die Medien räumen dem Thema Elektromobilität in ihrer Berichterstattung einen breiten Raum ein. Teilweise wird beklagt, dass sich der deutsche Automobilstandort nicht rechtzeitig auf diese Entwicklung eingestellt habe. Sicher sind es nicht die Fahrzeuge deutscher Hersteller, die die ersten auf dem Markt sein werden. Über die Frage, wie entscheidend bei einer komplett neuen Technologie ein möglichst früher Markteintritt ist, wird allerdings diskutiert. Unbestritten aber ist: Das Elektrofahrzeug von übermorgen wird eine derartige Herausforderung sein, dass wir heute mit Nachdruck Bildung und Forschung so ausrichten müssen, dass morgen Innovationen möglich werden.

Schließlich sollte auch nicht übersehen werden, dass die Frage, wie Elektromobilität zum Klimaschutz und zu einer nachhaltigen Mobilität beitragen kann, letztlich von der Art der eingesetzten Energie, von den Prozessschritten bei der Herstellung und von den entstehenden Kosten abhängen wird. Der gegenwärtige Energiemix in Deutschland favorisiert das Elektrofahrzeug im Vergleich zu sparsamen Dieselvarianten noch nicht in ausreichendem Maße. Vor allem die gegenwärtig viel zu hohen Batteriekosten müssen durch neue Entwicklungen drastisch gesenkt werden.

Im Jahr 2009 waren in Deutschland 41 Millionen PKW zugelassen. Auch wenn 2020 auf deutschen Straßen 1 Millionen PKW mit Hybridantrieb oder reinem Elektroantrieb rollen sollten, würde dies zunächst nur einen kleinen Beitrag zur Entlastung unserer Emissionsbilanz ausmachen. Wichtig für den Klimaschutz ist es daher, die Verbrennungsmotoren weiter zu verbessern und mit verschiedenen Hybridvarianten zu kombinieren. Fachleute gehen hier noch von großen Einsparpotenzialen aus. So werden insgesamt modifizierte und verbesserte Verbrennungsmotoren wohl noch für eine ganze Weile – aus Kostengründen, aber auch was die Nutzungseigenschaften (Reichweite, Kühlung und Heizung) betrifft – für viele Käufer das Mittel der Wahl bleiben.

Durch welche Schritte und wann auch immer – die Entwicklung immer leistungsfähigerer und energieeffizienterer Elektroniksysteme ist entscheidend dafür, die internationale Konkurrenzfähigkeit deutscher Produkte im Automobilbereich zu erhalten und weiter auszubauen.

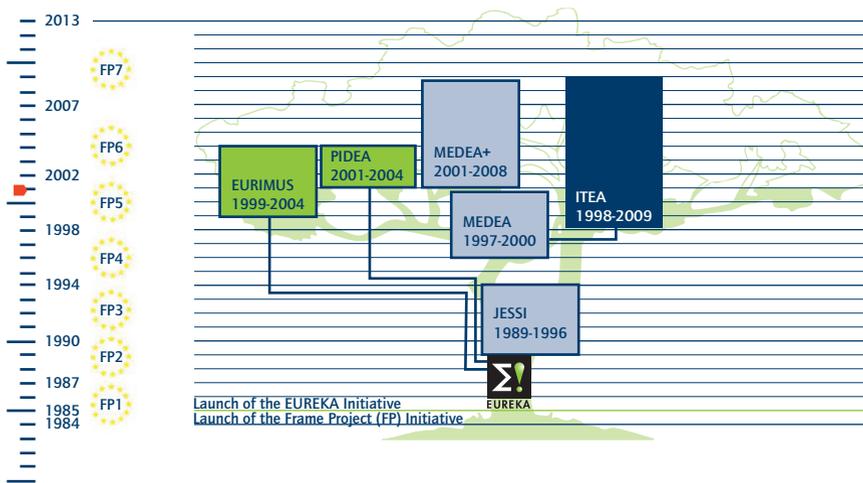
5 EUROPÄISCHE ZUSAMMENARBEIT

Längst gehen die Kooperationen zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen über den nationalen Rahmen hinaus. Durch die gemeinsam geschaffenen Grundlagen und die in Brüssel gesetzten Rahmenbedingungen werden Weichen für einen

europäischen Wirtschafts- und Forschungsraum gestellt. Diese Bedingungen gilt es dort zu nutzen, wo durch eine enge Zusammenarbeit und durch entsprechende Synergieeffekte unmittelbarer Nutzen für die Kooperationspartner entsteht und wo sich hieraus Vorteile für Europas Stellung im globalen Wettbewerb ergeben. Ein prominentes Beispiel sind gemeinsame Aktivitäten zur Definition von Normen und Standards, die für entsprechende Produkte weltweit Märkte öffnen können.

Das erste Cluster der europäischen Forschungsinitiative EUREKA war JESSI (Joint European Submicron Silicon Initiative). JESSI startete vor ca. 20 Jahren und hat ganz maßgeblich dazu beigetragen, wichtige Grundlagen für die europäische Mikroelektronik zu legen. Etwa 10 Jahre später gab es nicht nur ein Nachfolgeprogramm, sondern auch Initiativen in anderen Bereichen (Software, Mikrosystemtechnik). Dies ist in der Abbildung 6 dargestellt. Nur innerhalb weiterer sieben Jahre ist die Programmlandschaft durch zahlreiche neue Programme noch erheblich komplizierter geworden (Abbildung 7). Die in 2008 nun erreichte Vielfalt – oftmals mehr die Strukturen und Instrumente betreffend als die Inhalte – ist selbst für Insider kaum noch überschaubar.

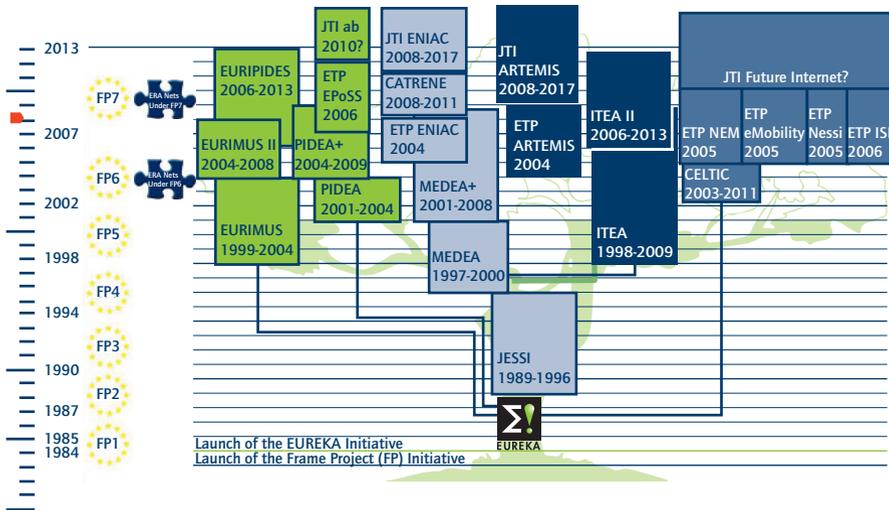
Abbildung 6: Europäische IKT-Initiativen 2001



Quelle: DLR/BMBF.

Aspekte der Elektromobilität werden heute auf europäischer Ebene im EUREKA-Cluster CATRENE, den JTI's ENIAC und ARTEMIS, im EU-Rahmenprogramm FP7 mit der European Green Cars Initiative und anderen Programmen gefördert.

Abbildung 7: Europäische IKT-Initiativen 2008



Quelle: DLR/BMBF.

Hierdurch entsteht freilich folgendes Problem: Hochintegrierte Systeme, die auf vielen, miteinander verknüpften Komponenten beruhen, werden von einer ganzen Reihe von Programmen zugleich adressiert, Programmen mit eigenen Schwerpunkten, aber letztlich nur geringfügig unterschiedlichen Ausrichtungen. Der Programmvielfalt steht die inhaltliche Entwicklung gegenüber: Zentrale FuE-Themen orientieren sich immer mehr an Gesamtsystemen und überspringen Programmengrenzen. Mit Teilkompetenzen lassen sich komplexe Probleme nicht lösen, systemische Ansätze nicht realisieren. So hinkt die Programmlandschaft dem Entwicklungstrend zu Gesamtsystemen („Smart Systems“) hinterher.

Das Selbstbeharrungsvermögen einmal geschaffener Strukturen, Partialinteressen und fehlende Schnittstellen ziehen „Parallelwelten“ nach sich und verhindern eine wirklich strategische Ausrichtung. Vielfalt ergibt nur dann Sinn, wenn verschiedene Aufgaben klar definiert sind, unterschiedliche Stärken sich ergänzen und ein gemeinsames Verständnis zu übergeordneten Zielen vorliegt.

Durch das Nebeneinanderbestehen zu vieler Programme besteht die Gefahr, Potenzial zu verspielen, Zeit zu verlieren, Geld zu vergeuden. Europäische Forschungsprogramme dürfen nicht den Charakter breit angelegter Subventionsmaßnahmen annehmen oder vorrangig Beiträge zu einer europäischen Kohäsionspolitik liefern wollen. Sie müssen vielmehr die für Europa wichtigsten Ziele identifizieren, auf Stärken setzen, entsprechende Leitprojekte definieren und durch optimale Rahmenbedingungen

Voraussetzungen dafür schaffen, dass diese Ziele gemeinsam mit einer konzertierten Anstrengung erreicht werden können.

Wenn es Europa wirklich ernst damit meint, die Herausforderungen durch andere Standorte (USA, Asien) im Bereich der Mikroelektronik anzunehmen und erfolgreich zu bestehen, muss gehandelt und ein Konzept gefunden werden, die Rahmenprogramme, die ERA-Nets, die EUREKA-Cluster, die JTI's, die Technologieplattformen, das Joint Programming usw. optimal aufeinander abzustimmen und auf größtmögliche Effektivität auszurichten. Es ist zu hoffen, dass dieses nicht ganz neue Problem bei der Vorbereitung des nächsten Forschungsrahmenprogramms („Horizon 2020“) angemessen berücksichtigt wird. Europa braucht klare und effiziente Strukturen, auch in der Forschungs- und Innovationsförderung.

Die mühsamen und langwierigen Versuche, im Bereich der Mikroelektronik spezifische Programminhalte für CATRENE und ENIAC zu definieren (als ein erster Schritt in Richtung einer nötigen inhaltlichen Fokussierung, Abstimmung und gemeinsamen Ausrichtung), zeigen, wie steinig dieser Weg ist. Wir haben aber keine andere Wahl – die Welt wartet weder auf Deutschland noch auf Europa. Entweder wir stellen die richtigen Weichen oder wir verlieren den Wettlauf mit anderen Regionen, die längst mit aller Konsequenz auf die neuen Schlüsseltechnologien gesetzt haben und zielstrebig bei der strategischen Ausrichtung auf die Märkte der Zukunft vorgehen.

6 FAZIT

In keiner anderen Branche gab es weltweit in den letzten zwei Jahrzehnten wohl eine derart dynamische Entwicklung wie bei den Informations- und Kommunikationstechnologien, insbesondere der Mikroelektronik. Die Massenproduktion kleinster, hocheffizienter Chipstrukturen („More Moore“) trieb die Consumerelektronikentwicklung, und jeder neue Technologieknoten erforderte immer größere Investitionen. So wuchs der Kapitalbedarf für Entwicklung und Produktion drastisch an: Während eine moderne Chipfabrik in den 1990er Jahren noch etwa eine Milliarde Euro kostete, liegen die Investitionskosten heute um einen Faktor 2–4 darüber. Wechselnde wirtschaftliche Entwicklungen, der Dollarkurs und Nachfrageschwankungen stellen zusätzliche Risiken dar.

Der hohe Preis- und Innovationsdruck führte zu einer starken Globalisierung der Halbleiterbranche. Produktion und Entwicklung wurden zum Teil zu hoch subventionierten Standorten in Asien verlagert. Für eine Reihe von Firmen führte der Weg zu Forschungsallianzen mit anderen Unternehmen, für einige zu Fab-lite- oder Fabless-Strukturen.

Das klassische Geschäftsmodell der IDM (Integrated Device Manufacturer), bei dem das Unternehmen seine Produkte selbst entwickelt, produziert und vermarktet, scheint nicht mehr in allen Bereichen Erfolg versprechend zu sein für europäische Unternehmen. Bei einer Konzentration lediglich auf die Schaltkreisentwicklung (Design) oder auf Test

und Vermarktung ist die Frage zu stellen, wo der Hauptteil der Wertschöpfung entsteht und welche Konsequenz eine solche Entwicklung für die Arbeitsplätze in Deutschland hat. Das „Fabless“-Modell erfordert auf der anderen Seite die sogenannten Auftragsfertiger (Foundries), die sich ausschließlich auf die Produktion konzentrieren. In welchem Maße fließt hier das Know-how des Auftragsgebers ab, und kann dieser ohne eigene Prozess- und Produktionsfertigkeiten mittelfristig wettbewerbsfähig bleiben? Hierauf eindeutige Antworten zu geben, fällt angesichts der Dynamik des Halbleitermarktes, der unterschiedlichen Produkte und Umsatzmargen selbst Spezialisten schwer.

Auch wenn auf europäischer Ebene die Diskussion über unsere Standortbedingungen im Vergleich zu Amerika und Asien immer wieder neu geführt werden muss – eines ist klar: Den internationalen Wettbewerb kann Europa auf Dauer nicht über Lohnkosten oder Steuervorteile gewinnen. Das Ziel muss vielmehr sein, durch innovationspolitische Ansätze neue Anwendungen zu erschließen, um weltweit wettbewerbsfähige Hightech-Produkte der Elektronikbranche herzustellen und erfolgreich zu vermarkten. Adressiert werden müssen dabei die Branchen und Strukturen, die das Rückgrat unserer Volkswirtschaft darstellen – Bereiche, mit denen die Exportnation Deutschland weltweit punkten kann, Bereiche, bei denen möglichst weitgehend die Wertschöpfungskette noch in Europa bzw. Deutschland vorhanden ist.

Wichtig ist die Feststellung, dass „Elektronik in Deutschland“ keinesfalls eine homogene Landschaft darstellt. Wir verfügen vielmehr über sehr unterschiedliche Unternehmen mit ganz verschiedenen Kompetenzen, Forschungs- und Fertigungsprofilen. Sie sind unentbehrlich für Branchen, die Deutschland einige Jahre lang zum Exportweltmeister Nr. 1 gemacht haben, wie der Automobil-, Anlagen- und Maschinenbau. Hier geht es nicht vordergründig um Miniaturisierung, sondern vielmehr um Diversifizierung und um sehr applikationsspezifische Ausrichtungen. Spezialwissen, langjährige Erfahrungen und eine hohe Qualität begründen dabei in vielen Fällen Alleinstellungsmerkmale im internationalen Wettbewerb. Dies prägt den Mikroelektronikstandort Deutschland nachhaltig. Der neue Forschungs- und Förderungsschwerpunkt der 3D-Integration soll in diesem Zusammenhang vor allem dabei helfen, über die Chipebene hinaus die Entwicklung innovativer Smart Systems für ganz verschiedene Anwendungsbereiche voranzubringen.

Entscheidend hierbei muss die Sicht der Anwender und deren Wettbewerbsfähigkeit sein. Bei der beispielsweise im Bereich der Elektromobilität geschilderten Entwicklung ist es aus strategischen Gründen undenkbar, dass sich die deutsche Automobilindustrie komplett in Abhängigkeit von Halbleiterprodukten asiatischer Hersteller gibt.

Die Entscheidung Infineons im Sommer 2011, eine 300 mm-Linie für Leistungshalbleiter in Dresden aufzubauen, hat daher eine große Bedeutung für den Standort Deutschland. Sie zeigt zugleich, dass wir durchaus auch eine Zukunft als Produktionsstandort haben können – wenn die Bedingungen passen. Dresden hat viele Vorteile, wie

bereits ausgeführt – Deutschland als Land des Automobils, des Anlagen- und Maschinenbaus und der regenerativen Energien aber auch. Hier sind die Wege zum Kunden kurz.

Vor diesem Hintergrund zielt die Forschungspolitik des BMBF – nachhaltig und strategisch ausgerichtet – auf den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Mikroelektronik am Standort Deutschland. Angesichts der globalen Markt- und Technologietrends müssen wir auf das Motto „Stärken stärken“ setzen und international wettbewerbsfähige Forschungsstrukturen weiter ertüchtigen. Das Ziel dabei ist klar: Im Vergleich zu den Mitbewerbern muss Deutschland immer einen Schritt voraus sein – nur Innovationen schaffen Vorsprung und neue Produkte.

Bei der öffentlichen Förderung muss der Fragmentierung der FuE-Landschaft entgegengewirkt werden: Diversifizierung ja – Fragmentierung nein! Die europäische und deutsche Halbleiterindustrie muss sich daher auf zentrale Stärken und Herausforderungen durch entsprechende Leuchtturmprojekte konzentrieren; ein „Gießkannenprinzip“ der öffentlichen Förderung ist nicht geeignet, langfristig zur Wettbewerbsfähigkeit der Elektronikindustrie beizutragen.

Alle Maßnahmen im FuE-Bereich müssen stärker flankiert werden durch noch größere Anstrengungen in dem Bereich der Aus- und Weiterbildung bzw. Qualifikation. Bereits heute sind gut ausgebildete Ingenieure und Naturwissenschaftler im IKT-Bereich Mangelware. Die Verfügbarkeit hoch qualifizierten Personals erhält als zentraler Standortfaktor eine immer größere Bedeutung. Vorsorge dafür zu treffen, dass deutsche Unternehmen auch in Zukunft über eine ausreichende Zahl qualifizierter Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verfügen, ist eine „Gemeinschaftsaufgabe“. Nicht zuletzt auch aus diesem Grund hat das BMBF im Elektronikbereich inzwischen seine Fachprogramme geöffnet für die Förderung von Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen, die im Kontext zu den FuE-Fragestellungen stehen.

Auch wenn sich insgesamt viel geändert hat auf der Landkarte der Mikroelektronik in Deutschland – Gründe zum Resignieren gibt es nicht. Deutschland hat vielmehr alle Voraussetzungen dafür, die Herausforderungen der Zukunft erfolgreich zu bewältigen. Es kommt darauf an, geeignete Rahmenbedingungen zu schaffen, Strategien konsequent umzusetzen und die Ressourcen gezielt einzusetzen.

Diesen Weg wird die Bildungs-, Forschungs- und Innovationspolitik des BMBF auch in Zukunft fortsetzen. Auch und gerade im Bereich der Elektronik.

> BEFRAGUNG ZUR ZUKUNFT DER NANOELEKTRONIK UNTER NATIONALEN EXPERTEN

ELNA SCHIRRMEISTER/ROLF GAUSEPOHL/SVEN WYDRA

1 PROJEKTZIEL UND VORGEHEN

Mithilfe dieses durch das BMBF geförderten Projekts sollte ein Meinungsbild gezeichnet werden, in welchen Bereichen Chancen für die Entwicklung der Nanoelektronik in Deutschland liegen und wie man diese realisieren kann. Insbesondere sollten Anforderungen für industrienah und anwendungsorientierte Nanoelektronik-Forschung herausgearbeitet werden.

Zur Erreichung dieser Ziele wurde eine Befragung unter rund 100 deutschen Experten durchgeführt. Im Sommer 2010 wurde diese in Form einer Online-Befragung realisiert und es wurden 214 Experten angesprochen. Die Kontakte hierfür stellten die Projektpartner der TU München und der acatech zur Verfügung. Den angesprochenen Experten wurde die Möglichkeit gegeben, weitere Personen zur Teilnahme an der Befragung einzuladen. Technisch wurde die Befragung durch das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI mithilfe der Software EFS Survey der Firma Global-Park umgesetzt. Die Konzeption der Befragung erfolgte in enger Abstimmung zwischen dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und dem Lehrstuhl für Technische Elektronik an der TU München.

2 AUFBAU DER BEFRAGUNG UND DES BERICHTS

Auf einer Eingangsseite zur Befragung wurden die angesprochenen Experten zum Hintergrund der Befragung und ihrem Aufbau informiert. Zudem bestand die Möglichkeit, die der Befragung zugrunde liegende Definition des Begriffs „Nanoelektronik“ nachzulesen.¹

Der erste Teil der Befragung thematisierte Materialien und Produktionsverfahren als zusammengenommene Themen sowie die beiden Bereiche Systemkomponenten und Anwendungsgebiete. In diesem ersten Teil wurde nach der Relevanz und der Verfügbarkeit von Einzeltechnologien gefragt. Die Befragten konnten in Abhängigkeit ihrer

¹ „Unter dem Begriff Nanoelektronik werden nachfolgend Technologien und Methoden verstanden, die mittels Bauelementen oder Strukturen von lateraler Dimension unter 100nm elektronische Schaltungen und Systeme realisieren. Dazu gehört die skalierte Mikroelektronik („More Moore“), Nachfolgetechnologien mit neuartigen Bauelementen („Beyond More“), aber auch weitere Entwicklungspfade wie Mikro/Nano-Elektrisch-Mechanische Systeme (MEMS/NEMS) und integrierte sensorische und aktorische Systeme („More than Moore“). Hinzugezählt werden schließlich auch neue Integrationswege wie die 3D-Integration und die für die Integration in makroskopische Bauelemente notwendigen Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT).“

Expertise aus den genannten drei Bereichen diejenigen auswählen, die sie beantworten wollten. Dadurch ergeben sich für die weiter unten gezeigten Ergebnisdiagramme die unterschiedlichen Fallzahlen der einzelnen Themengebiete.

Ein zweiter Teil folgte einem auf Thesen basierten Vorgehen. In Vorbereitung der Befragung wurden durch den Lehrstuhl für Technische Elektronik der TU München Expertengespräche geführt, aus denen durch Diskussion in der acatech-Projektgruppe Thesen für die Befragung generiert wurden. Die Thesen deckten dabei die Bereiche Wissensgenerierung, Wissenstransfer und kommerzielle Umsetzung ab. In diesem Teil der Befragung wurden die Befragten um ihre Meinung zu den einzelnen Thesen gebeten.

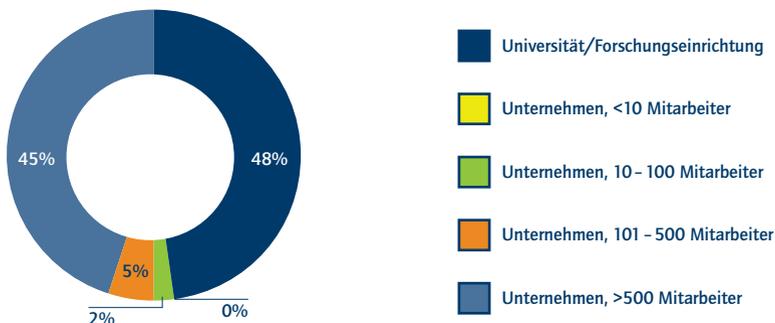
Die nachfolgende Ergebniszusammenstellung orientiert sich an dem hier skizzierten Befragungsaufbau. In den Diagrammen ist der jeweilige Wortlaut der Fragen mit aufgelistet.

3 BEFRAGUNGSERGEBNISSE

3.1 TEILNEHMERSTRUKTUR

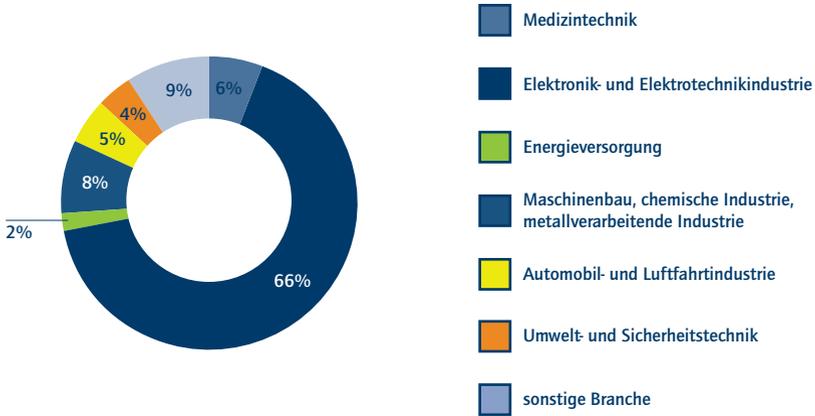
Die 109 Teilnehmer der Befragung kamen zu 48 Prozent aus dem Bereich der Wissenschaft und zu weiteren 45 Prozent aus Industrieunternehmen mit mehr als 500 Mitarbeitern (siehe Abbildung 1). Dabei ordnete sich der überwiegende Teil der Befragten (66 Prozent) der Branche Elektronik- und Elektrotechnikindustrie zu (Mehrfachnennungen waren gestattet). Dem 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 bedeutender Anteil von 9 Prozent konnte sich keinem der gelisteten Sektoren zuordnen (siehe Abbildung 2).

Abbildung 1: Teilnehmerstruktur der Befragung entsprechend ihres Umfelds



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 2: Zuordnung der Befragten nach Industriesektoren



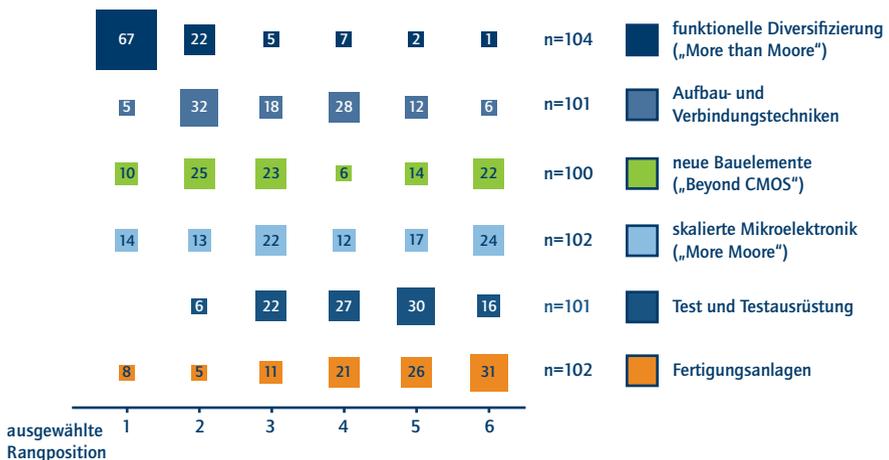
Quelle: Eigene Darstellung.

3.2 ERÖFFNUNGSFRAGE

Um unabhängig vom Spezialisierungsfeld der Teilnehmer eine Einschätzung zu den großen Entwicklungsströmungen innerhalb der Nanoelektronik abzufragen, war der eigentlichen Befragung eine Eröffnungsfrage vorangestellt. Sechs vorgegebene Entwicklungsbereiche sollten ihrer Bedeutung nach sortiert werden (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Eröffnungsfrage zu sechs Hauptthemengebieten

Bitte ordnen Sie die Themenbereiche der nachfolgenden Liste gemäß ihrer Bedeutung für die deutsche Industrie auf der rechten Seite von oben nach unten an.



Quelle: Eigene Darstellung.

Im Diagramm in Abbildung 3 sind in unterschiedlichen Farben die sechs Bereiche repräsentiert, die gemäß ihrer Bedeutung für die deutsche Industrie zueinander in eine Reihenfolge gebracht werden sollten. Die Sortierung von oben nach unten erfolgte in abnehmender Rangfolge. Das vollständige Meinungsbild ist von links nach rechts dargestellt. Es ist gezeigt, wie viele Befragte ein Thema auf einem bestimmten Rang positionierten. Die Quadratfläche spiegelt dabei die Zahl der Nennungen pro Rang wider.

Demnach wurde mit klarem Abstand die *funktionelle Diversifizierung* (auch bekannt als „More than Moore“-Technologien) als wichtigste Technologie für die deutsche Industrie eingestuft. Mit der geringsten Bedeutung für die deutsche Industrie und damit mit Rang sechs wurde der Bereich der *Fertigungstechnologien* ebenfalls eindeutig bewertet. Auch die *Test- und Testausrüstungstechnologien* erhielten nur eine geringe Bewertung. Sie befinden sich direkt über den *Fertigungstechnologien* und wurden auf Rang fünf positioniert.

Herauszustellen ist die gespaltene Meinung der Experten bei den verbliebenen drei Themengebieten. Hier zeigt sich ein uneinheitliches Bild davon, welche Bedeutung den Bereichen für die deutsche Industrie beizumessen ist. Dies soll am Beispiel der *neuen Bauelemente* („Beyond CMOS“) exemplarisch erläutert werden. Wenngleich 25 beziehungsweise 23 Antwortende diese Technologie in der Bedeutung für Deutschland hoch einschätzten (Rang zwei und drei), so wurde das Gebiet gleichzeitig von 22 Antwortenden auf den sechsten und damit unbedeutendsten Rang gesetzt. Eine ähnliche Situation ergibt sich auch für die Aktivitätsbereiche *Aufbau- und Verbindungstechniken* sowie *skalierte Mikroelektronik*. Im Zuge der Auswertung wurde untersucht, inwiefern die Priorisierung der Aktivitätsbereiche mit der Zugehörigkeit der Befragten zu industriellen Sektoren oder der Tätigkeit in Universität oder Industrie korreliert. Dabei konnte keinerlei Korrelation festgestellt werden.

3.3 DETAILLIERTE ABFRAGE VON TECHNOLOGIEN UND ANWENDUNGEN

3.3.1 Material- und Produktionstechnologien

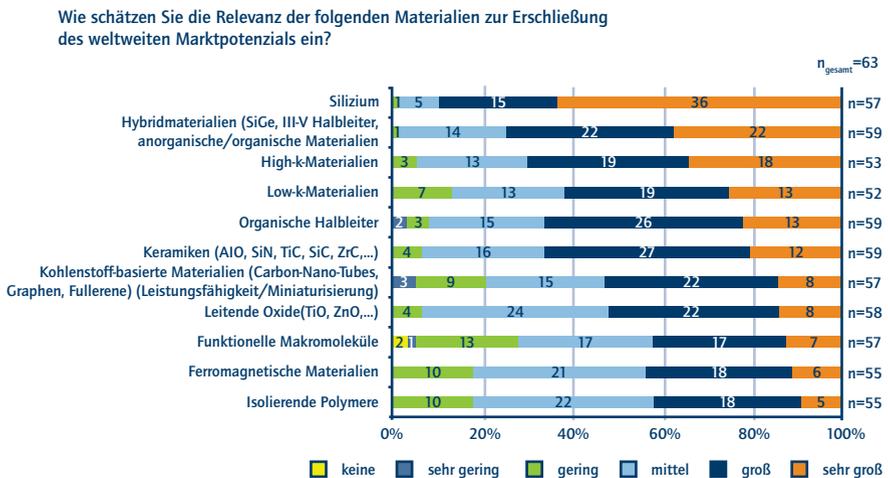
3.3.1.1 Relevanz und Verfügbarkeit von Materialtechnologien

Die Befragten hatten die Möglichkeit, die Relevanz eines Materials auf einer sechsstufigen Skala von „keine Relevanz“ bis hin zu „sehr große Relevanz“ zu bewerten. Sortiert man die Liste anhand der Stimmen für „sehr große Relevanz“, wurde *Silizium* mit Abstand als das Material mit der größten Relevanz eingestuft (siehe Abbildung 4). Hieran schließen sich die *Hybridmaterialien* als Materialgruppe mit der zweithöchsten Relevanzbewertung an, in denen Silizium ebenfalls zum Einsatz kommt.

Drei Arten organischer Materialien wurden zur Bewertung vorgelegt. Dabei wurden die *funktionellen Makromoleküle* als am geringsten relevant eingestuft, wenn man die negativen Kategorien in Summe betrachtet. Den geringsten Wert bei „sehr großer

Relevanz“ hingegen besitzen die *isolierenden Polymere*. Als dritte Gruppe unter den organischen Materialien sind die *organischen Halbleiter* aufgeführt. Von den Polymeren sind sie mit der höchsten Relevanz bewertet. Insbesondere im Vergleich mit den *Kohlenstoffbasierten Materialien* sind sie von höherer Relevanz für die Erschließung des weltweiten Marktpotenzials.

Abbildung 4: Relevanzabschätzung der gelisteten Materialien

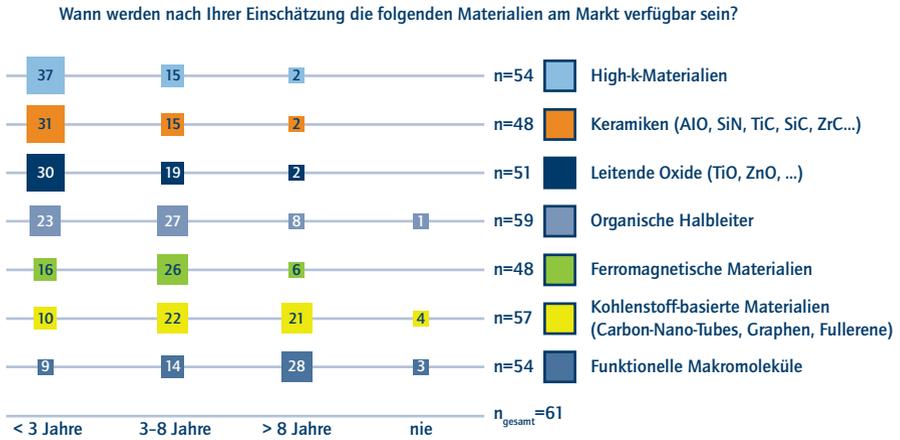


Quelle: Eigene Darstellung.

Materialien, die heute noch nicht breit industriell verfügbar sind, wurden neben der Relevanz noch bezüglich ihrer zukünftigen Verfügbarkeit eingeschätzt. Die Befragungsteilnehmer konnten hierbei auswählen, ob das Material in den nächsten drei Jahren, in den nächsten drei bis acht Jahren, darüber hinaus oder niemals verfügbar sein wird. Im Diagramm (siehe Abbildung 5) sind die zu bewertenden Materialien, sortiert nach baldiger Verfügbarkeit, von oben nach unten aufgeführt. Dabei spiegelt die Quadratgröße die Anzahl der Nennungen der jeweiligen Kategorie wider.

Betrachtet man erneut die Polymere, so fällt auf, dass *funktionelle Makromoleküle*, die als am wenigsten relevant eingestuft wurden, von der Mehrheit der Experten auch erst in mehr als acht Jahren am Markt erwartet werden. Auf der anderen Seite wurden *High-k-Materialien* mit sehr großer Relevanz bewertet und ihre baldige Verfügbarkeit erwartet. Durch eine kombinierte Betrachtung der Angaben zu Relevanz und Verfügbarkeit sollen diejenigen Technologien identifiziert werden, die als relevant eingestuft werden, obwohl sie vermutlich erst mittel- oder gar langfristig industriell verfügbar sein werden.

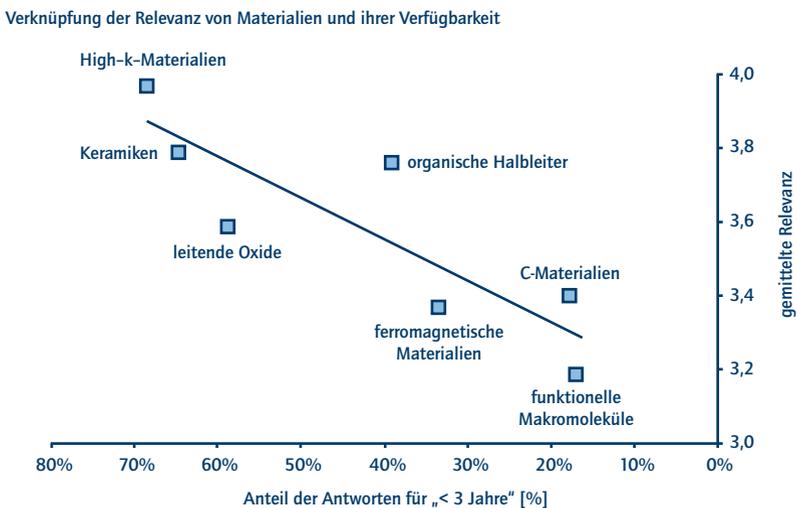
Abbildung 5: Erwartete Materialverfügbarkeit



Quelle: Eigene Darstellung.

Aus einer kombinierten Betrachtung von Relevanz und Verfügbarkeit ergibt sich, dass die *organischen Halbleiter* unter den Materialien in ihrer Bedeutung hervorstechen (siehe Abbildung 6). Verglichen mit den anderen Materialien wurde ihre Relevanz als hoch eingestuft, wenngleich ihre industrielle Verfügbarkeit am Markt erst mittelfristig erwartet wird.

Abbildung 6: Gekoppelte Analyse von Relevanz und Verfügbarkeit von Materialien

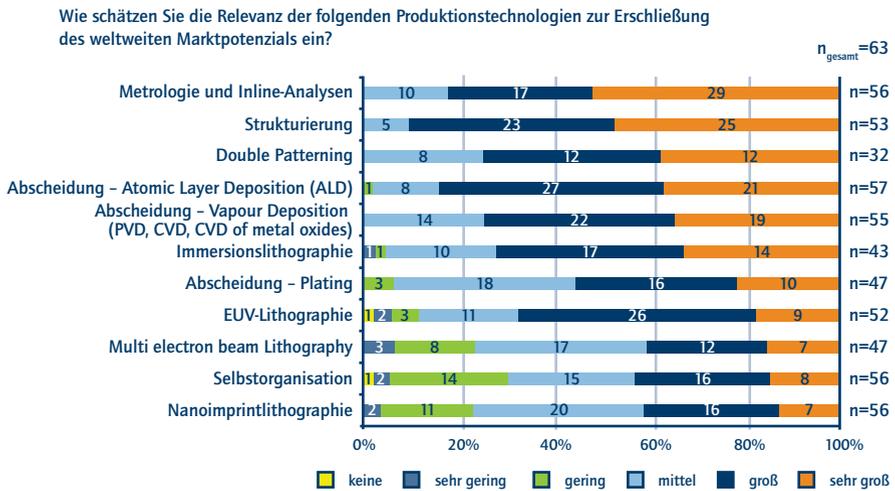


Quelle: Eigene Darstellung.

3.3.1.2 Relevanz und Verfügbarkeit von Produktionstechnologien

Sortiert nach „sehr großer Relevanz“ sind bei den Produktionstechnologien mit *Metrologie und Inline-Analysen* sowie dem Gebiet der *Strukturierung* wie auch bei den Materialien zwei bereits verfügbare Technologien ganz oben aufgeführt und mit höchster Relevanz bewertet worden (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7: Relevanzabschätzung zu Produktionstechnologien



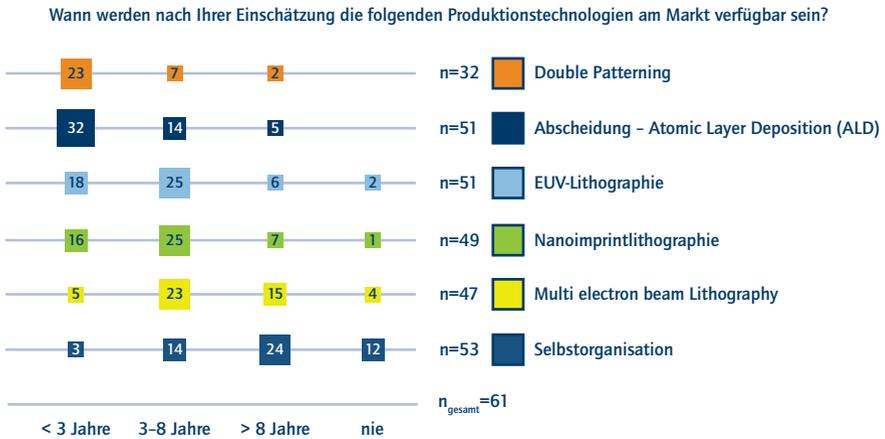
Im Gegensatz hierzu sind die drei Technologien *Multi-Elektronenstrahl-Lithographie*, *Nanoimprintlithographie* sowie *Selbstorganisation* dadurch gekennzeichnet, dass eine Gruppe von über 20 Prozent der Experten diesen Technologien nur eine geringe Relevanz beimisst. Mit Blick auf die Einschätzung der Technologieverfügbarkeit am Markt wird ersichtlich, dass es sich bei diesen drei Gebieten um Technologien handelt, die erst in ferner Zukunft verfügbar sein werden (siehe Abbildung 8).

Bei der gekoppelten Analyse von Relevanz und Verfügbarkeit ist auch nur die Produktionstechnologie zur *Abscheidung atomarer Lagen (ALD)* ein wenig relevanter als die anderen gelisteten Themen (siehe Abbildung 9).

Zuletzt sollen die Material- und Produktionstechnologien noch gemeinsam einer gekoppelten Analyse von Relevanz und Verfügbarkeit unterzogen werden (siehe Abbildung 10). Diese Möglichkeit ergibt sich, da beide Bereiche von denselben Personen bewertet wurden. Auffällig ist hierbei, dass die Produktions- gegenüber den Materialtechnologien im Schnitt ein höheres Relevanzniveau erreichen. Aus dieser integrierten

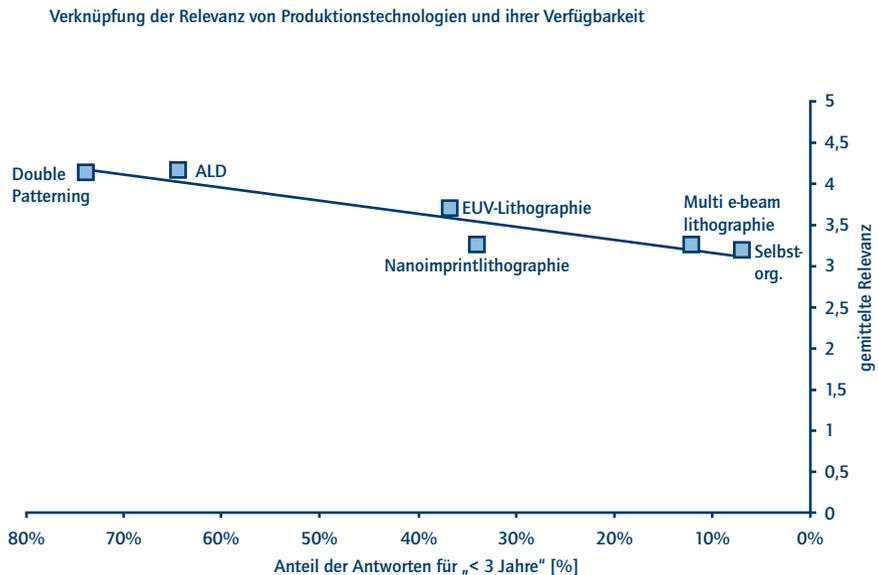
Analyse wird deutlich, dass die *organischen Halbleiter* sowie die *Kohlenstoff-basierten Materialien* als besonders relevante Materialtechnologien hervorzuheben sind.

Abbildung 8: Erwartete Verfügbarkeit von Produktionstechnologien



Quelle: Eigene Darstellung.

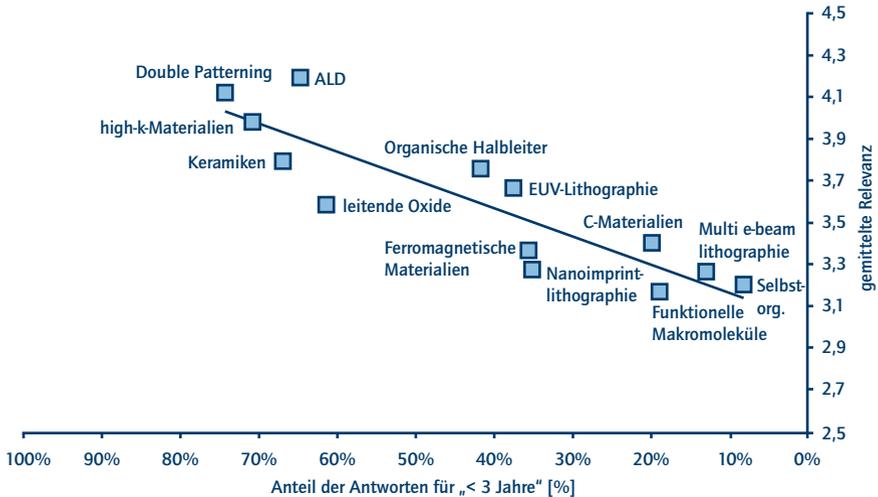
Abbildung 9: Gekoppelte Analyse von Relevanz und Verfügbarkeit von Produktionstechnologien



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 10: Integrierte Verfügbarkeits-Relevanz-Analyse von Material- und Produktionstechnologien

Verknüpfung der Relevanz von Materialien und Produktionstechnologien und ihrer Verfügbarkeit



Quelle: Eigene Darstellung.

3.3.1.3 Fortschrittsbeiträge von Material- und Produktionstechnologien

Zuletzt sollte für diesen ersten Themenbereich noch betrachtet werden, welche Fortschrittsbeiträge von den einzelnen Material- und Produktionstechnologien nach Meinung der befragten Experten zu erwarten sind.

Dabei konnten aus den folgenden sechs Auswahlkriterien bis zu zwei Bereiche ausgewählt werden:

- Leistungsfähigkeit/Miniaturisierung
- Fehlertoleranz/Ausfallsicherheit
- Funktionsintegration/neue Funktionen
- Energieverbrauch/Wirkungsgrad
- Produktionskosten
- Kompatibilität

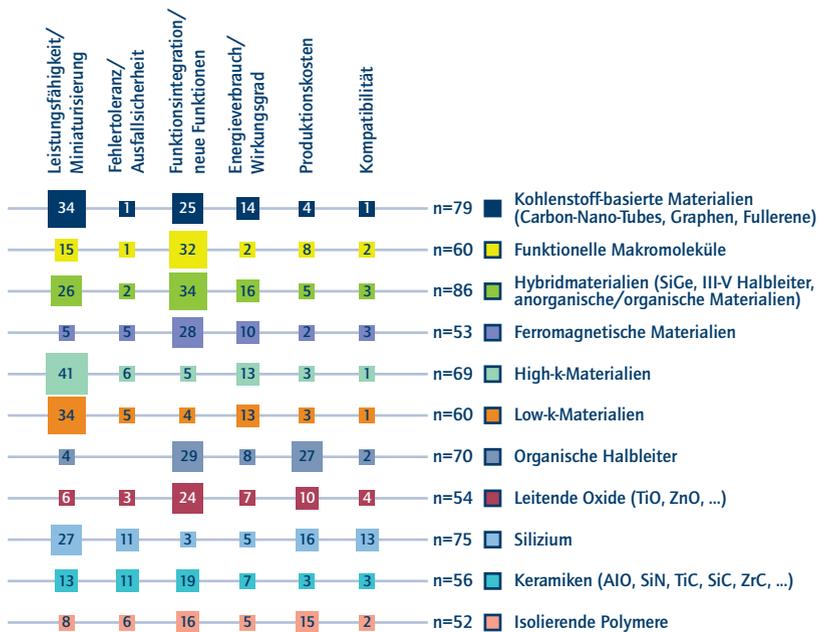
In Abbildung 11 sind in den einzelnen Spalten die Fortschrittskriterien gelistet, deren Bedeutung für die einzelnen Materialien anhand der Quadratgröße bemessen werden kann. Beispielhaft soll dies anhand der *Kohlenstoffbasierten Materialien* und *organischen Halbleiter* erläutert werden.

Den Ergebnissen zufolge ist insbesondere durch den Einsatz *Kohlenstoff-basierter Materialien* zu erwarten, dass die Leistungsfähigkeit gesteigert, beziehungsweise verkleinerte Komponenten hergestellt werden können. Gleichzeitig erhofft man sich die Ermöglichung neuer Funktionen und mit der Verkleinerung auch eine Integration mehrerer Funktionen in einem Bauteil. Zuletzt wird auch ein Beitrag zur Steigerung des energetischen Wirkungsgrades erwartet.

Die Stärke der *organischen Halbleiter* liegt nach Meinung der Experten hingegen darin, gleichermaßen zu einem Fortschritt in Bezug auf neue Funktionen respektive Funktionsintegration sowie in Bezug auf sinkende Produktionskosten beizutragen (siehe Abbildung 11).

Abbildung 11: Fortschrittsbeiträge von Materialtechnologien

Auf welchen Gebieten werden die folgenden Materialien Fortschritte ermöglichen?
Wählen Sie bitte jeweils bis zu zwei Bereiche aus.

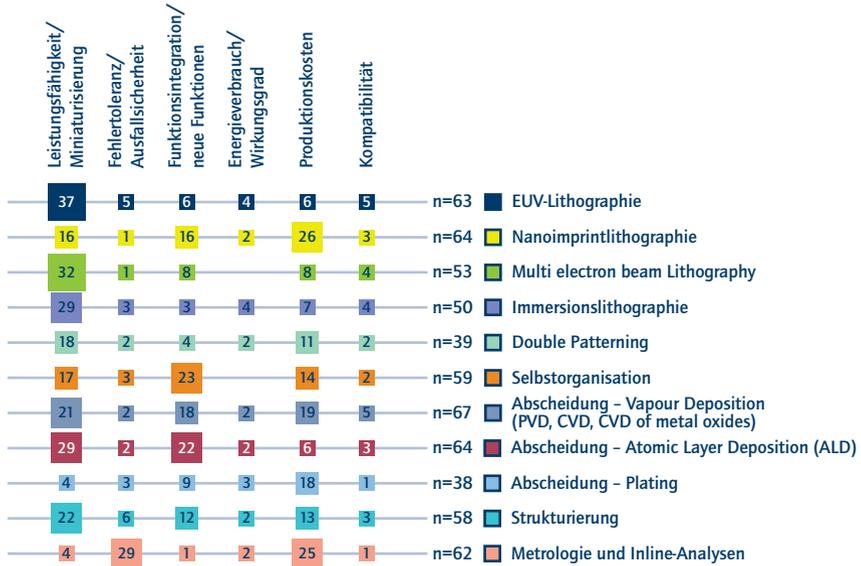


Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Produktionstechnologien sei das Beispiel der *Abscheidung atomarer Lagen (ALD)* herausgegriffen. Fortschrittsbeiträge erhofft man sich durch diese Technologie insbesondere hinsichtlich gesteigerter Leistungsfähigkeit sowie Funktionsintegration (siehe Abbildung 12).

Abbildung 12: Fortschrittsbeiträge von Produktionstechnologien

Auf welchen Gebieten werden die folgenden Produktionstechnologien Fortschritte ermöglichen?
Wählen Sie bitte jeweils bis zu zwei Bereiche aus.



Quelle: Eigene Darstellung.

3.3.2 Systemkomponenten und Designkonzepte

Wie im vorangegangenen Gebiet, so wurden auch Systemkomponenten hinsichtlich ihrer Relevanz und ihrer Verfügbarkeit eingeschätzt. Dabei wurden 26 Beispieltechnologien aus sieben Themenfeldern abgefragt. In einer Übersicht (Abbildung 13) ist die Einschätzung der Aktivitätsfelder, von oben nach unten sortiert nach absteigender Relevanz, dargestellt.

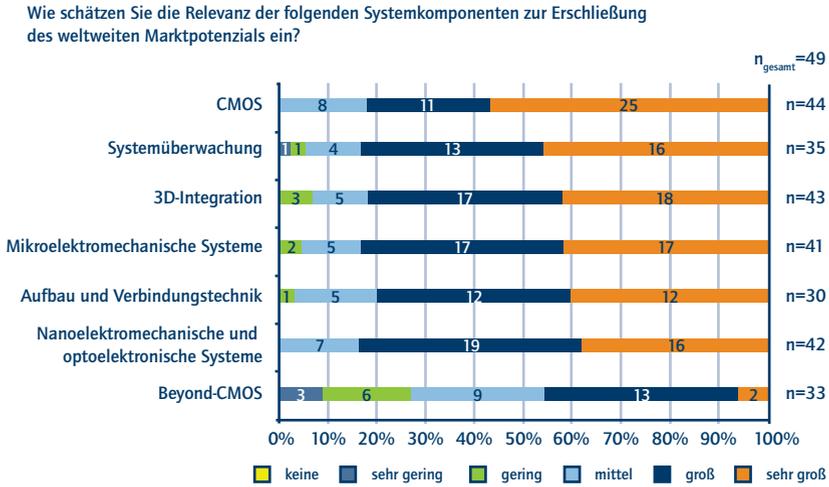
Eine klare Einschätzung findet sich für CMOS-Technologien, die eindeutig als das relevanteste Aktivitätsfeld eingestuft wurden. Ebenso eindeutig ist die Einschätzung hinsichtlich der Technologien aus dem Bereich „Beyond-CMOS“. Sie finden sich abge schlagen am anderen Ende der Skala wieder.

In Anbetracht der klaren Verhältnisse sei an das Ergebnis aus der Eingangsfrage erinnert (siehe Seite 2). An der hier präsentierten Stelle der Befragung wurde nach der Relevanz zur Erschließung des weltweiten Marktpotenzials gefragt und ein deutlich klareres Votum erzielt als bei der Befragung aller Teilnehmer vor dem Hintergrund der Bedeutung für die deutsche Industrie.

Zu den Aktivitätsfeldern wurden zusätzlich noch die erwähnten Beispieltechnologien zur Einschätzung vorgelegt. Die ausführlichen Ergebnisse sind in Abbildung 14

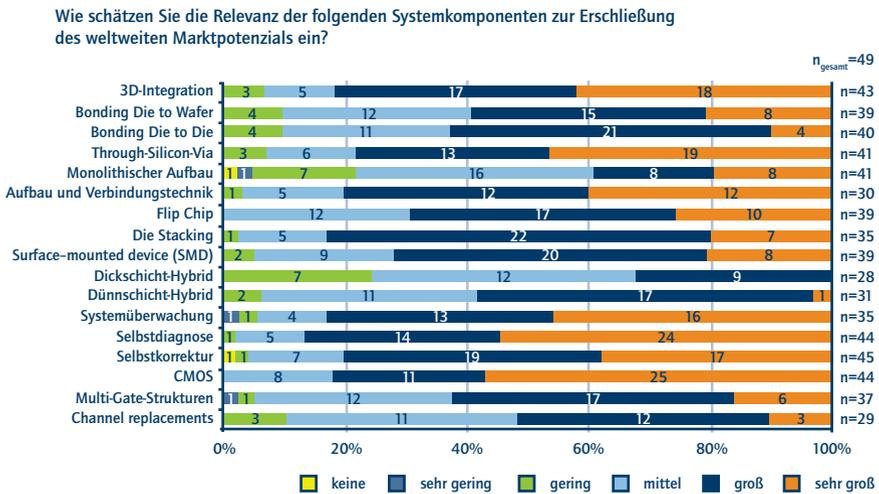
und Abbildung 15 zu sehen. Die Auflistung der Themengebiete und Einzeltechnologien erfolgt in chronologischer Reihenfolge wie in der Umfrage.

Abbildung 13: Relevanzabschätzung von Aktivitätsfeldern



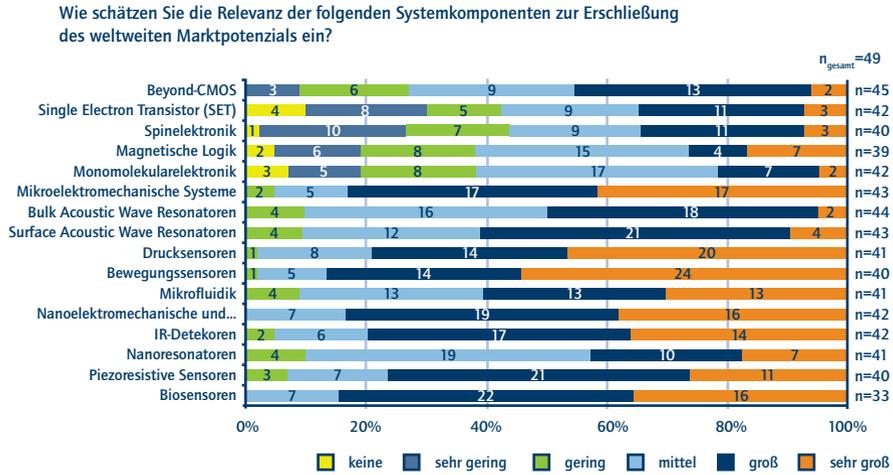
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 14: Relevanzabschätzung von Systemkomponenten – Teil 1



Quelle: Eigene Darstellung.

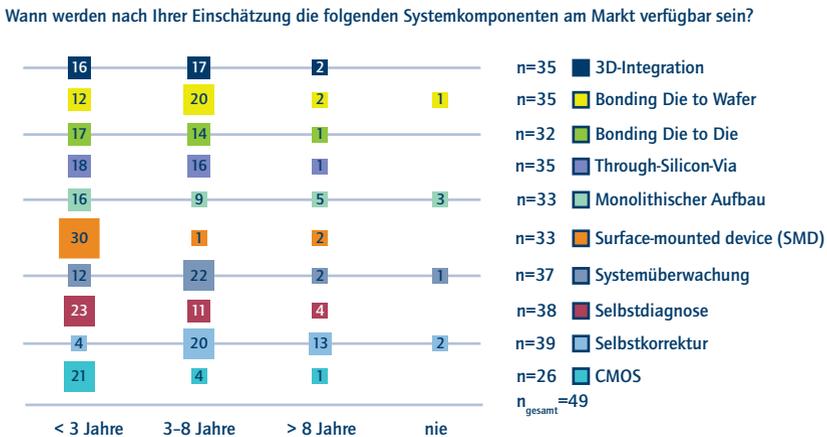
Abbildung 15: Relevanzabschätzung von Systemkomponenten – Teil 2



Quelle: Eigene Darstellung.

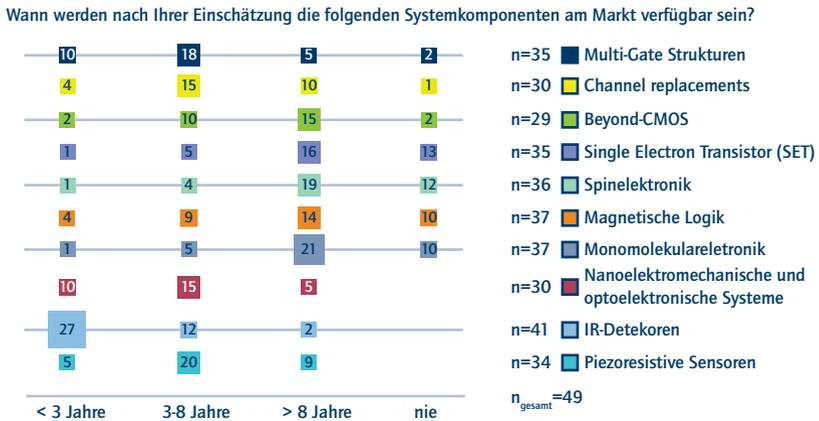
Ebenso wie auch bei den Materialien und Produktionstechnologien wurde auch hier die voraussichtliche Verfügbarkeit von Systemkomponenten erfragt, die heute noch nicht industriell verfügbar sind (siehe Abbildung 16 und 17). Wiederum erfolgt die Darstellung im Diagramm in chronologischer und thematisch sortierter Reihenfolge.

Abbildung 16: Verfügbarkeit von Systemkomponenten – Teil 1



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 17: Verfügbarkeit von Systemkomponenten – Teil 2



Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der Frage nach dem Markteintritt der Beispielttechnologien für den Bereich „Beyond-CMOS“ wählten rund 30 Prozent der Teilnehmer die Option „nie“ aus. Im Vergleich hierzu wählten bei der entsprechenden Relevanzabschätzung nur rund 6 Prozent die Option „keine Relevanz“ aus.

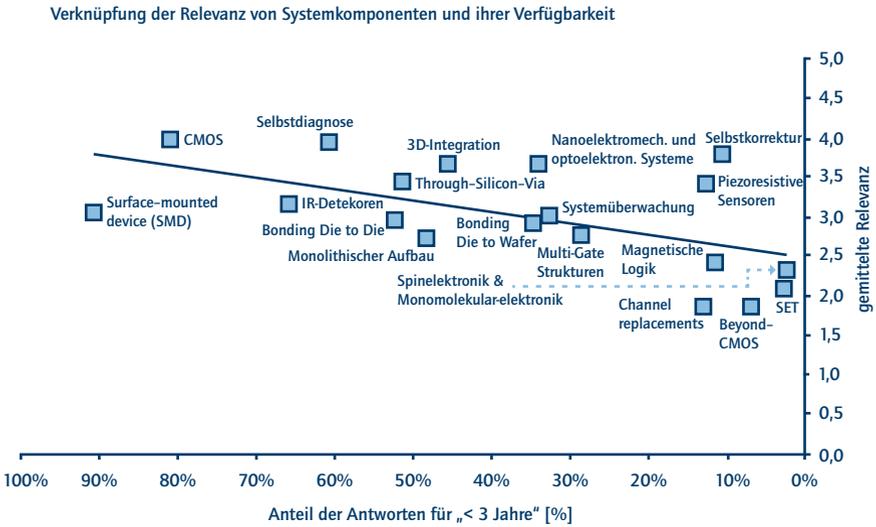
Eine kombinierte Analyse von Relevanz und voraussichtlicher Verfügbarkeit führt auch in diesem Fall zu einer deutlicheren Aussage (siehe Abbildung 18). Es fällt auf, dass die Spanne der Relevanzbewertung deutlich breiter als diejenige ist, die die Experten der Material- und Prozesstechnologien nutzten.

Die folgenden Themenfelder stellen sich nach dieser Analyse als besonders relevant dar:

- CMOS
- Selbstdiagnose
- Through-Silicon Via
- 3D-Integration
- Nano- und Optoelektronisch Mechanische Systeme (NOEMS)
- Selbstkorrektur
- Piezoresistive Sensoren

Am deutlichsten sticht das Thema „Selbstkorrektur“ hervor, dessen Realisierung erst mittel- bis langfristig erwartet wird.

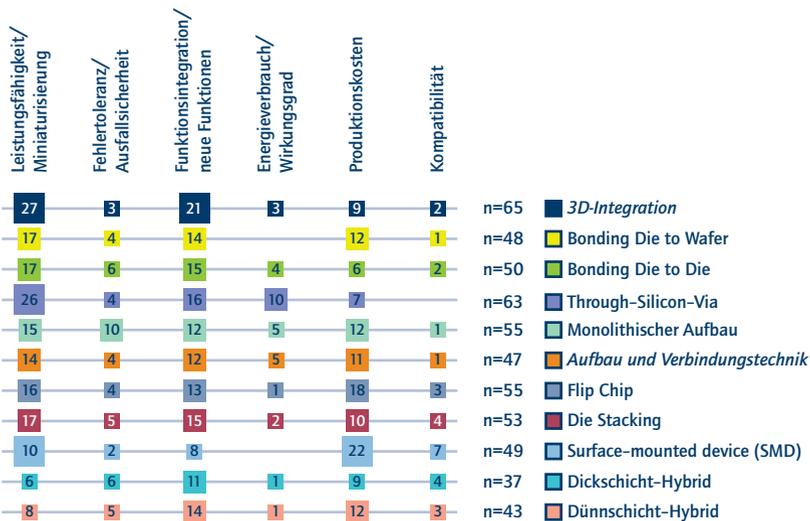
Abbildung 18: Kombinierte Relevanz-Verfügbarkeits-Analyse für Systemkomponenten



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 19: Erwarteter Fortschrittsbeitrag durch Systemkomponenten – Teil 1

Auf welchen Gebieten werden die folgenden Systemkomponenten Fortschritte ermöglichen?
Wählen Sie bitte jeweils bis zu zwei Bereiche aus.



Quelle: Eigene Darstellung.

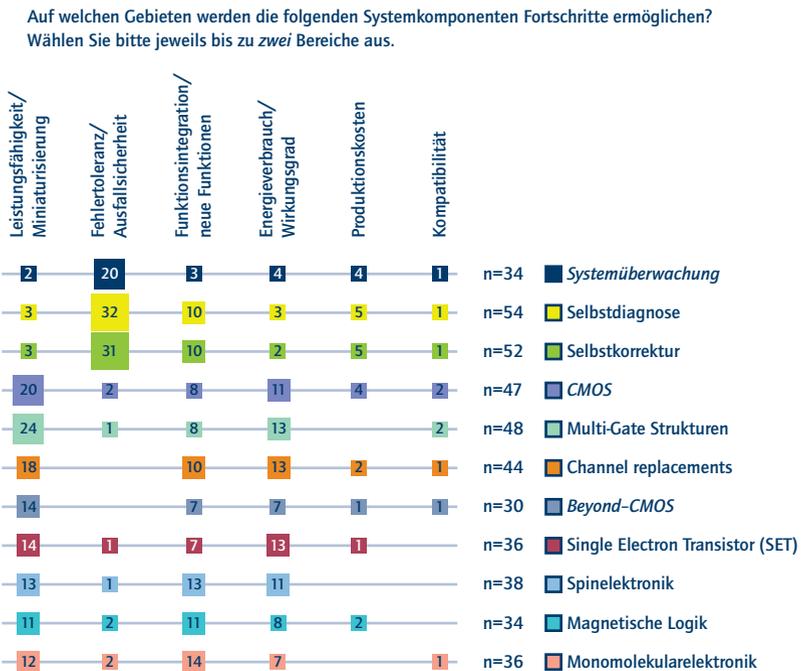
Hier sei nochmals auf die Eingangsfrage der Befragung hingewiesen (siehe Abschnitt 3.2). Die „More-than-Moore“-Technologien wurden dort als besonders bedeutend für Deutschland eingeschätzt. Die *3D-Integration*, die zu diesem Themenbereich zu zählen ist, wurde in dem nun beschriebenen Abschnitt der Befragung ebenfalls als sehr relevant eingestuft, auch wenn hier der Schwerpunkt der Frage auf der Erschließung des Marktpotenzials lag.

Zuletzt wurden auch für die Systemkomponenten und Designkonzepte die Experten um ihre Einschätzung gebeten, hinsichtlich welcher Kriterien Fortschrittsbeiträge erwartet werden. Hierfür standen wiederum die sechs Auswahlkriterien von Leistungsfähigkeit bis hin zu Kompatibilität zur Verfügung. Die Ergebnisse sind in Abbildung 19, 20 und 21 thematisch sortiert aufgelistet.

Für die einzelnen Themenbereiche und ihre Beispieltechnologien wird ein einigermaßen einheitliches Muster erkennbar.

Über alle Technologien betrachtet, wird für den Bereich der Kompatibilität der geringste Fortschrittsbeitrag erwartet.

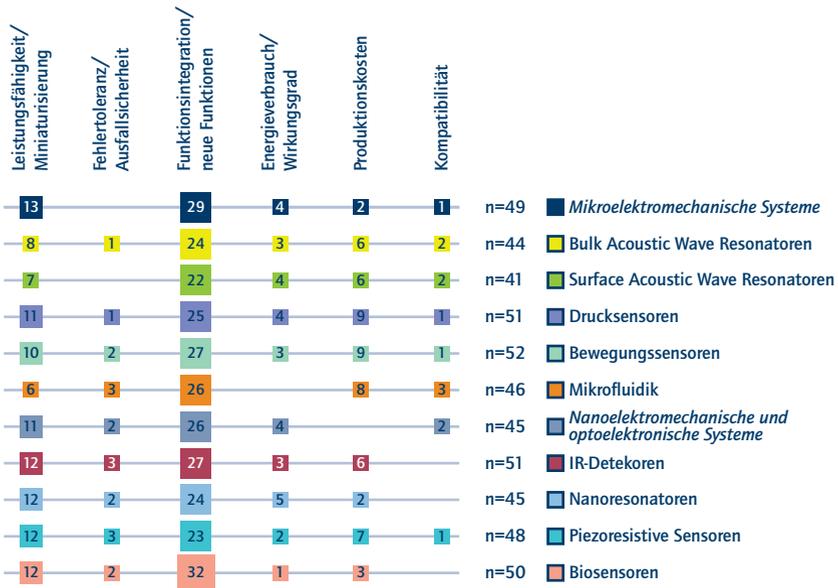
Abbildung 20: Erwarteter Fortschrittsbeitrag durch Systemkomponenten – Teil 2



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 21: Erwarteter Fortschrittsbeitrag durch Systemkomponenten – Teil 3

Auf welchen Gebieten werden die folgenden Systemkomponenten Fortschritte ermöglichen?
Wählen Sie bitte jeweils bis zu zwei Bereiche aus.



Quelle: Eigene Darstellung.

3.3.3 Anwendungsgebiete

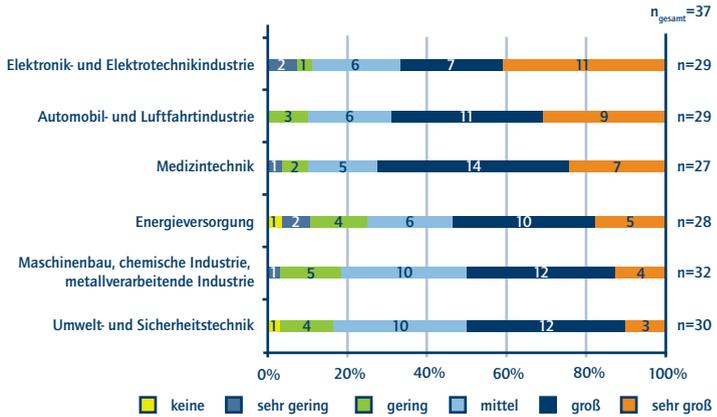
In einem weiteren Abschnitt der Befragung wurden den Experten Anwendungen aus verschiedenen Industriesektoren zur Einschätzung vorgelegt. In einem ersten Schritt sollte die Bedeutung der Nanoelektronik für die Industriesektoren und die darunter aufgeführten Beispielanwendungen abgeschätzt werden. Abbildung 22 zeigt die verschiedenen Sektoren von oben nach unten sortiert nach „sehr großer Relevanz“. Hieraus wird eine besonders hohe Relevanzeinschätzung für die folgenden drei Bereiche deutlich:

- Elektronik- und Elektrotechnikindustrie
- Automobil- und Luftfahrtindustrie
- Medizintechnik

Die umfassende Darstellung der Relevanzabschätzung der Nanoelektronik für Anwendungen ist in Abbildung 23 und 24 wiedergegeben.

Abbildung 22: Relevanz der Nanoelektronik für einzelne Industriesektoren

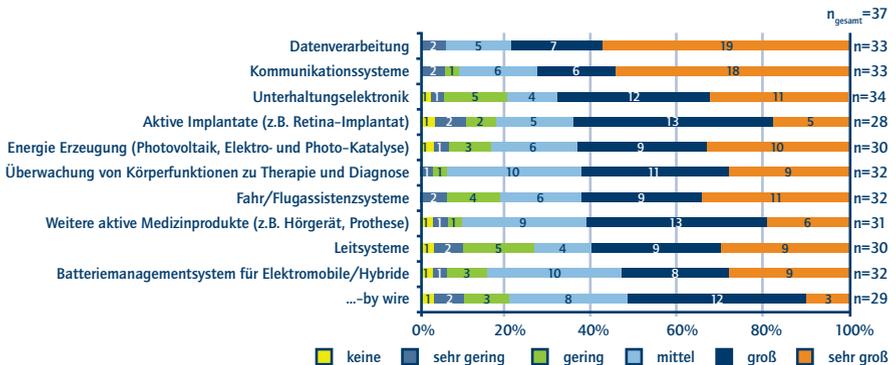
Bitte benennen Sie die Relevanz der Nanoelektronik für die einzelnen industriellen Bereiche bzw. Beispielanwendungen



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 23: Relevanzabschätzung von Beispielanwendungen – Teil 1

Bitte benennen Sie die Relevanz der Nanoelektronik für die einzelnen industriellen Bereiche bzw. Beispielanwendungen

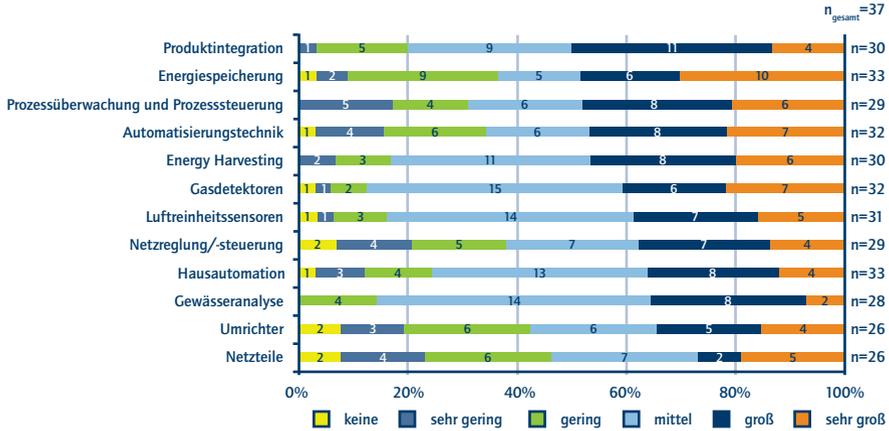


Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Sektoren und entsprechende Beispielanwendungen wurde der Fortschrittsbedarf hinsichtlich der bereits vorab genannten Fortschrittskriterien erfragt. Wie aus den detaillierten Diagrammen deutlich wird (siehe Abbildung 25, 26 und 27), sind sektorale Muster deutlich erkennbar.

Abbildung 24: Relevanzabschätzung von Beispielanwendungen – Teil 2

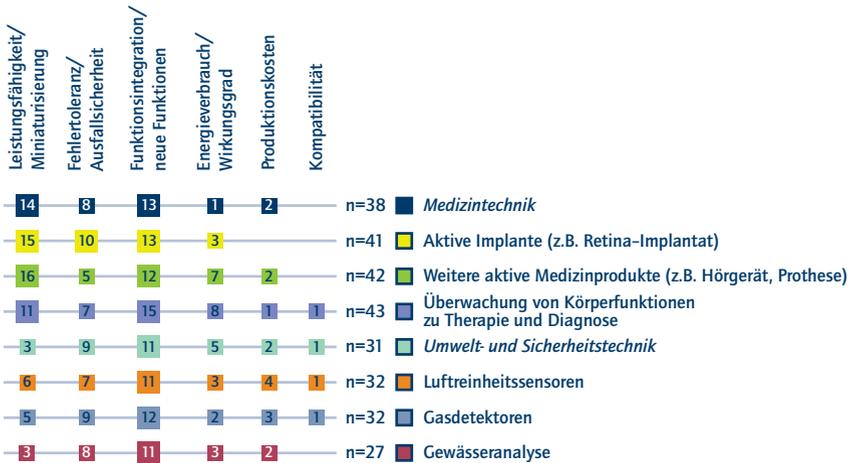
Bitte benennen Sie die Relevanz der Nanoelektronik für die einzelnen industriellen Bereiche bzw. Beispielanwendungen



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 25: Fortschrittsbedarf einzelner Anwendungen an die Nanoelektronik – Teil 1

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



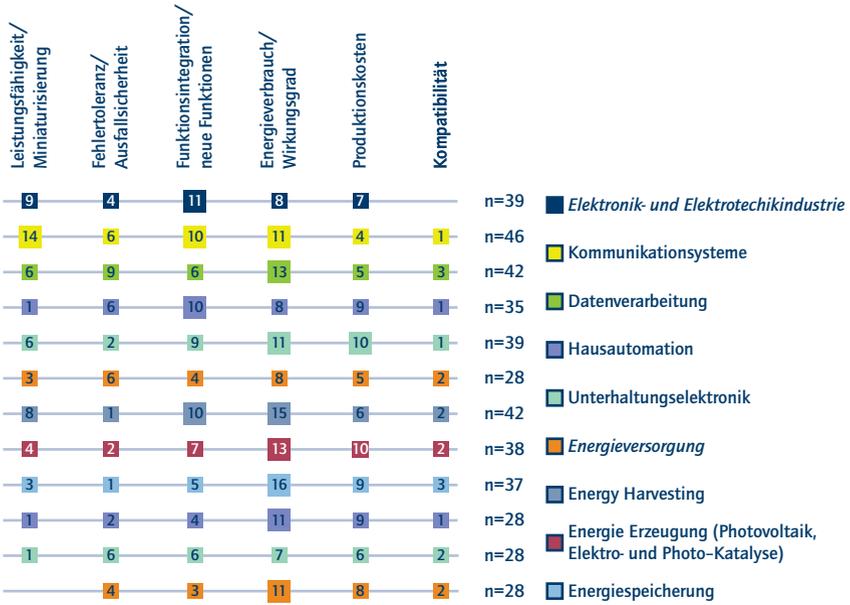
Quelle: Eigene Darstellung.

Mit Abbildung 28 wird eine Übersicht über die einzelnen Industriesektoren zur Verfügung gestellt. Hieraus werden die folgenden Schwerpunktsetzungen in den einzelnen Industriesektoren ersichtlich:

- *Automobil- und Luftfahrtindustrie*: Der Schwerpunkt liegt hier auf der Fehlertoleranz und Ausfallsicherheit.
- *Maschinenbau, chemische Industrie, metallverarbeitende Industrie*: Hier wurde Weiterentwicklungsbedarf insbesondere für *Funktionsintegration und neue Funktionen* gesehen.
- *Energieversorgung*: Hier steht das Gebiet *Energieverbrauch und Wirkungsgrad* im Vordergrund.
- *Elektronik- und Elektrotechnikindustrie*: *Funktionsintegration und neue Funktionen* stehen im Fokus, dicht gefolgt von *Leichtbau/Miniaturisierung*.
- *Umwelt- und Sicherheitstechnik*: Auch hier wurde insbesondere *Funktionsintegration und neue Funktionen* als Bereich ausgewählt, der hier gefolgt wird von *Fehlertoleranz/Ausfallsicherheit*.
- *Medizintechnik*: Dieses Gebiet erfordert nach Meinung der Befragten die Weiterentwicklung der Nanoelektronik zum Zweck des *Leichtbaus/der Miniaturisierung*, nahezu gleichwertig mit dem Zweck *der Funktionsintegration und neuen Funktionen*.

Abbildung 26: Fortschrittsbedarf einzelner Anwendungen an die Nanoelektronik – Teil 2

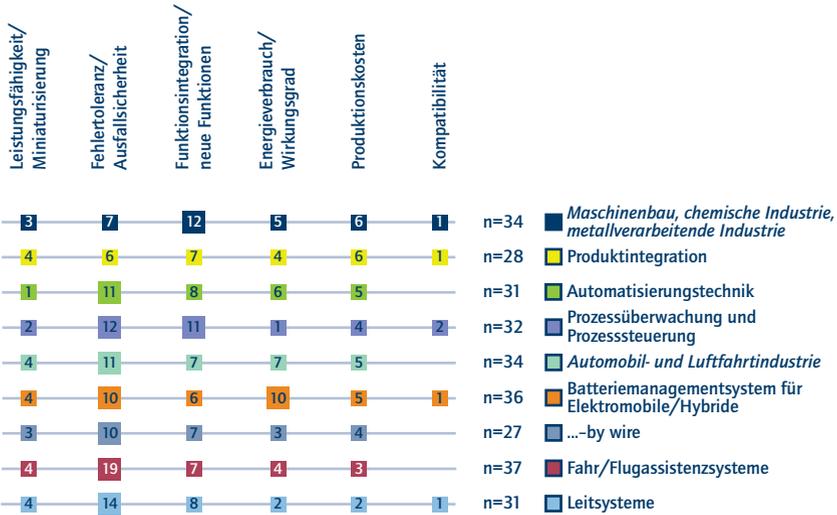
Welche Entwicklungsziele der Nanoelektronik sollten in den einzelnen industriellen Bereichen bzw. Beispielanwendungen vornehmlich verfolgt werden? Wählen Sie bitte jeweils bis zu zwei Bereiche aus.



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 27: Fortschrittsbedarf einzelner Anwendungen an die Nanoelektronik – Teil 3

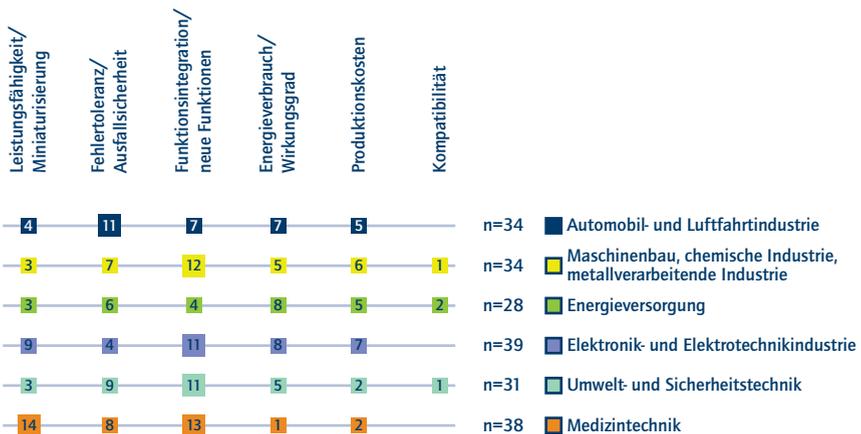
Welche Entwicklungsziele der Nanoelektronik sollten in den einzelnen industriellen Bereichen bzw. Beispielanwendungen vornehmlich verfolgt werden? Wählen Sie bitte jeweils bis zu zwei Bereiche aus.



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 28: Fortschrittsbedarf einzelner industrieller Sektoren an die Nanoelektronik

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



Quelle: Eigene Darstellung.

3.3.4 Verknüpfung von Technologien mit Anwendungen über die sechs Auswahlkriterien

Für die einzelnen Anwendungen wurden aus den sechs Auswahlkategorien ein bis zwei Hauptentwicklungsbedarfe ausgewählt. Ebenso finden sich bei den Materialien, Prozesstechnologien und Systemkomponenten ein bis zwei Schwerpunktgebiete, in denen durch die Nanoelektronik besondere Fortschrittsbeiträge von den Umfrageteilnehmern erwartet wurden. Materialien, Prozesstechnologien und Systemkomponenten lassen sich somit anhand der Fortschrittskriterien mit den aufgeführten Anwendungen in Verbindung bringen.

In Abbildung 29 sind technologische Komponenten und Anwendungsbeispiele einander gegenübergestellt. Die Ansicht stellt nur diejenigen Aspekte dar, für die eine Verbindung identifiziert werden konnte. Zur Interpretation wurden innerhalb des Technologie- und des Anwendungsbereichs jeweils die Felder mit den höchsten Werten markiert. Die Auswahl betraf dabei die 20 Prozent an Feldern mit den höchsten Werten. Dies führte auf Technologieseite zu einem Grenzwert von 30 Prozent, ab dem eine rote Markierung vorgenommen wurde. Mindestens 30 Prozent der Antwortenden hatten somit eine bestimmte Fortschrittskategorie wie etwa Leistungsfähigkeit ausgewählt. Auf Anwendungsseite beträgt dieser Grenzwert 29 Prozent. Die Felder, bei denen mindestens 29 Prozent der Antworten unter eine Kategorie fallen, sind mit einer grünen Markierung versehen.

Folgende Verbindungen sind hieraus ersichtlich:

- *Leistungsfähigkeit/Miniaturisierung*: Entwicklungen hier sind insbesondere für Kommunikationssysteme erwünscht. Insgesamt finden sich 16 Aspekte, die im Bereich Leistungsfähigkeit/Miniaturisierung einen Fortschrittsbeitrag leisten können und hier geeignet scheinen. Am deutlichsten ausgeprägt ist dies für die Multi-Elektronenstrahl-Lithographie.
- *Fehlertoleranz/Ausfallsicherheit*: Der Anwendungsbereich der Automobil- und Luftfahrtindustrie mit seinen Anwendungsbeispielen benötigt nach Meinung der Befragungsteilnehmer durch die Nanoelektronik insbesondere Entwicklungsfortschritte hinsichtlich Fehlertoleranz und Ausfallsicherheit. Unterstützende Technologien finden sich im Kapitel Systemüberwachung mit den Aspekten Selbstkorrektur und Selbstdiagnose.
- *Funktionsintegration/neue Funktionen*: Hierfür wurde von den Befragungsteilnehmern ein Entwicklungsbedarf nanoelektronischer Technologien für sensorische Anwendungen (Gasdetektoren, Überwachung von Körperfunktionen, Luftreinheitssensoren) sowie für Hausautomation identifiziert. Diese Schwerpunktsetzung findet sich bei den meisten (insgesamt 19) Aspekten, angefangen bei Biosensoren bis hin zu den Dickschicht-Hybriden.

- *Energieverbrauch und Wirkungsgrad*: Hier findet sich der gesamte Bereich der Energieversorgung samt der genannten Anwendungsbeispiele. Auch für die Datenverarbeitung und Unterhaltungselektronik wurden diese Aspekte als primäre Entwicklungsbedarfe ausgewählt. Technologien, von denen man sich insbesondere einen Fortschrittsbeitrag zu Energieverbrauch und Wirkungsgrad erhofft, sind das Plating als Abscheidetechnik, Surface-mounted devices (SMDs), Nanoimprintlithographie und Flip Chip.
- *Leistungsfähigkeit kombiniert mit Funktionsintegration*: Die Kombination von zwei Aspekt-Bereichen, nämlich von Leistungsfähigkeit/Miniaturisierung mit Funktionsintegration/neuen Funktionen, ist nach Meinung der Befragten eine Anforderung, die durch Medizintechnik und dortige Anwendungen gestellt wird. Hierzu gibt es acht Technologien, denen ein gleichzeitiger Fortschrittsbeitrag zu diesen beiden Bereichen zugetraut wird, von denen über die Hälfte Technologien aus dem Bereich „Beyond-CMOS“ sind.

Abbildung 29: Gegenüberstellung von Fortschrittsbeitrag und Fortschrittsbedarf

	Leistungsfähigkeit/Miniaturisierung	Fehleroleranz/Ausfallsicherheit	Funktionsintegration/neue Funktionen	Energieverbrauch/Wirkungsgrad	Produktionskosten	Kompatibilität		Leistungsfähigkeit/Miniaturisierung	Fehleroleranz/Ausfallsicherheit	Funktionsintegration/neue Funktionen	Energieverbrauch/Wirkungsgrad	Produktionskosten	Kompatibilität	
Multi electron beam Lithography	60%	2%	15%	0%	15%	8%		30%	13%	22%	24%	9%	2%	Kommunikationssysteme
High-k-Materialien	59%	9%	7%	19%	4%	1%								
EUV-Lithographie	59%	8%	10%	6%	10%	8%								
Immersion-lithographie	58%	6%	6%	8%	14%	8%								
Low-k-Materialien	57%	8%	7%	22%	5%	2%								
Multi-Gate Strukturen	50%	2%	17%	27%	0%	4%								
Beyond-CMOS	47%	0%	23%	23%	3%	3%								
Double Patterning	46%	5%	10%	5%	28%	5%								
CMOS	43%	4%	17%	23%	9%	4%								
Through-Silicon-Via	41%	6%	25%	16%	11%	0%								
Strukturierung	38%	10%	21%	3%	22%	5%								
Silizium	36%	15%	4%	7%	21%	17%								
Bonding Die to Wafer	35%	8%	29%	0%	25%	2%								
Die Stacking	32%	9%	28%	4%	19%	8%								
Abscheidung – Vapour Deposition (PVD, CVD, CVD of metal oxides)	31%	3%	27%	3%	28%	7%								
Aufbau und Verbindungstechnik	30%	9%	26%	11%	23%	2%								

Selbstkorrektur	6%	60%	19%	4%	10%	2%	11%	51%	19%	11%	8%	0%	Fahr-/Flugassistenzsysteme
Selbstdiagnose	6%	59%	19%	6%	9%	2%	13%	45%	26%	6%	6%	3%	Leitsysteme
Systemüberwachung	6%	59%	9%	12%	12%	3%	11%	37%	26%	11%	15%	0%	...by wire
							3%	35%	26%	19%	16%	0%	Automatisierungstechnik
							12%	32%	21%	21%	15%	0%	Automobil- und Luftfahrtindustrie

Biosensoren	24%	4%	64%	2%	6%	0%	16%	28%	38%	6%	9%	3%	Gasdetektoren
Mikroelektromechanische Systeme	27%	0%	59%	8%	4%	2%	9%	21%	35%	15%	18%	3%	Maschinenbau, chemische Industrie, metallverarbeitende Industrie
Nanoelektromechanische und optoelektronische Systeme	24%	4%	58%	9%	0%	4%	26%	16%	35%	19%	2%	2%	Überwachung von Körperfunktionen zu Therapie und Diagnose
Mikrofluidik	13%	7%	57%	0%	17%	7%	19%	22%	34%	9%	13%	3%	Luftreinheitssensoren
Bulk Acoustic Wave Resonatoren	18%	2%	55%	7%	14%	5%	3%	17%	29%	23%	26%	3%	Hausautomation
Surface Acoustic Wave Resonatoren	17%	0%	54%	10%	15%	5%	23%	10%	28%	21%	18%	0%	Elektronik- und Elektrotechnikindustrie
Nanoresonatoren	27%	4%	53%	11%	4%	0%							
Funktionelle Makromoleküle	25%	2%	53%	3%	13%	3%							
IR-Detektoren	24%	6%	53%	6%	12%	0%							
Ferromagnetische Materialien	9%	9%	53%	19%	4%	6%							
Bewegungssensoren	19%	4%	52%	6%	17%	2%							
Drucksensoren	22%	2%	49%	8%	18%	2%							
Piezoresistive Sensoren	25%	6%	48%	4%	15%	2%							
Leitende Oxide (TiO, ZnO, ...)	11%	6%	44%	13%	19%	7%							
Selbstorganisation	29%	5%	39%	0%	24%	3%							
Keramiken (AlO, SiN, TiC, SiC, ZrC, ...)	23%	20%	34%	13%	5%	5%							
Dünnschicht-Hybrid	19%	12%	33%	2%	28%	7%							
Isolierende Polymere	15%	12%	31%	10%	29%	4%							
Dickschicht-Hybrid	16%	16%	30%	3%	24%	11%							

Abscheidung - Atomic Layer Deposition (ALD)	45%	3%	34%	3%	9%	5%	38%	12%	29%	17%	5%	0%	Weitere aktive Medizinprodukte (z. B. Hörgerät, Prothese)
Kohlenstoffbasierte Materialien (Carbon-Nano-Tubes, Graphen, Fullerene)	43%	1%	32%	18%	5%	1%	37%	21%	34%	3%	5%	0%	Medizintechnik
3D-Integration	42%	5%	32%	5%	14%	3%	37%	24%	32%	7%	0%	0%	Aktive Implantate (z. B. Retina-Implantat)
Spinelektronik	34%	3%	34%	29%	0%	0%							
Bonding Die to Die	34%	12%	30%	8%	12%	4%							
Monomolekularelektronik	33%	6%	39%	19%	0%	3%							
Magnetische Logik	32%	6%	32%	24%	6%	0%							
Hybridmaterialien (SiGe, III-V Halbleiter, anorganische/organische Materialien)	30%	2%	40%	19%	6%	3%							

3.4 THESENBEWERTUNG

Die Befragungsteilnehmer wurden in dem zweiten Hauptteil der Befragung mit Thesen konfrontiert (siehe Tabelle 1) und hierzu um ihre Meinung gebeten. Die Thesen entstammen den drei Themenbereichen Wissensgenerierung, Wissenstransfer und kommerzielle Umsetzung.

Tabelle 1: Auflistung der zur Einschätzung vorgelegten Thesen

WISSENS-GENERIERUNG	Erfolgreiche Innovationen in der Nanoelektronik entstehen überwiegend aus der Verknüpfung der System- und Schaltungsebene mit der Technologieebene.
	In Zukunft bestimmen die Aufbau- und Verbindungstechniken die Leistungsfähigkeit des Produktes stärker als die integrierte Schaltung selbst.
	Durch die zunehmende Systemintegration in Multi-Chip-Packages (MCP) und Systems-on-Chip (SoC) bestimmen diese Komponenten die Leistungsfähigkeit der Produkte.
	Biologische Prinzipien, wie Selbstorganisation und Adaptivität, sollten in elektrischen Systemen verstärkt verwendet werden.
WISSENS-TRANSFER	Der Zugriff auf die Gesamtheit der Basistechnologien ist für Unternehmen notwendig, um innovative nanoelektronische Produkte zur Produktionsreife zu führen.
	Der Erhalt der Systemkompetenz in Deutschland erfordert die Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette.
	Das Wissen über Produktionsanforderungen wird früh in der Entwicklung (z. B. im Designprozess) benötigt, da die Systeme immer komplexer werden.
	Innerhalb der Nanoelektronik besteht ein erheblicher Finanzierungsbedarf im Bereich der Sensorik.
	Innerhalb der Nanoelektronik besteht ein erheblicher Finanzierungsbedarf im Bereich der Aktorik.
	Innovative Produkte erfordern eine stärkere Kollaboration zwischen Industrie und Hochschulen.
KOMMERZIELLE UMSETZUNG	Mindestabnahmemengen behindern die Nutzung aktuellster Fertigungstechnologien für kundenspezifische Lösungen (ASIC).
	Bei Standardprodukten ist die weitere Verlagerung der Produktion ins Ausland zu erwarten.
	Bei Standardprodukten ist die weitere Verlagerung der Entwicklung ins Ausland zu erwarten.
	Bei anwendungsspezifischen Produkten ist keine Produktionsverlagerung ins Ausland zu erwarten.

Bei anwendungsspezifischen Produkten ist keine Entwicklungsverlagerung ins Ausland zu erwarten.
Nanoelektronik hat in Deutschland eine Zukunft, wenn hohe Investitionen getätigt werden.
Nur im Europäischen Kontext lässt sich die Bedeutung des europäischen Produktionsstandortes steigern.
Die Anpassung an die Produkthanforderungen erfolgt zukünftig überwiegend durch die Programmierung applikationsspezifischer Standardprodukte (ASSP).
Die Anpassung an die Produkthanforderungen erfolgt zukünftig überwiegend durch die Entwicklung applikationsspezifischer integrierter Schaltungen (ASIC).

Die überwiegende Zahl der Thesen fand Konsens unter den befragten Experten. Abbildung 30 zeigt die Gesamtheit der Thesen nach Zustimmungsgrad sortiert.

Die These mit der höchsten Zustimmung (99 Prozent) stammt aus dem Bereich Wissenstransfer:

Das Wissen über Produktionsanforderungen wird früh in der Entwicklung (z. B. im Designprozess) benötigt, da die Systeme immer komplexer werden.

Ebenso unterstützten fast alle Befragungsteilnehmer (94 Prozent) die These, dass die Entwicklung innovativer Produkte eine Verstärkung der Kooperation von Industrie und Hochschule bedarf.

Fünf weitere Thesen fanden immer noch über 80 Prozent Zustimmung und umfassen die Themen Produktionsverlagerung von Standardprodukten, Bedeutung von Systemintegration, technologische Voraussetzung erfolgreicher Innovationen sowie Bedingungen für Deutschlands Erfolg hinsichtlich Systemkompetenz und der gesamten Nanoelektronik.

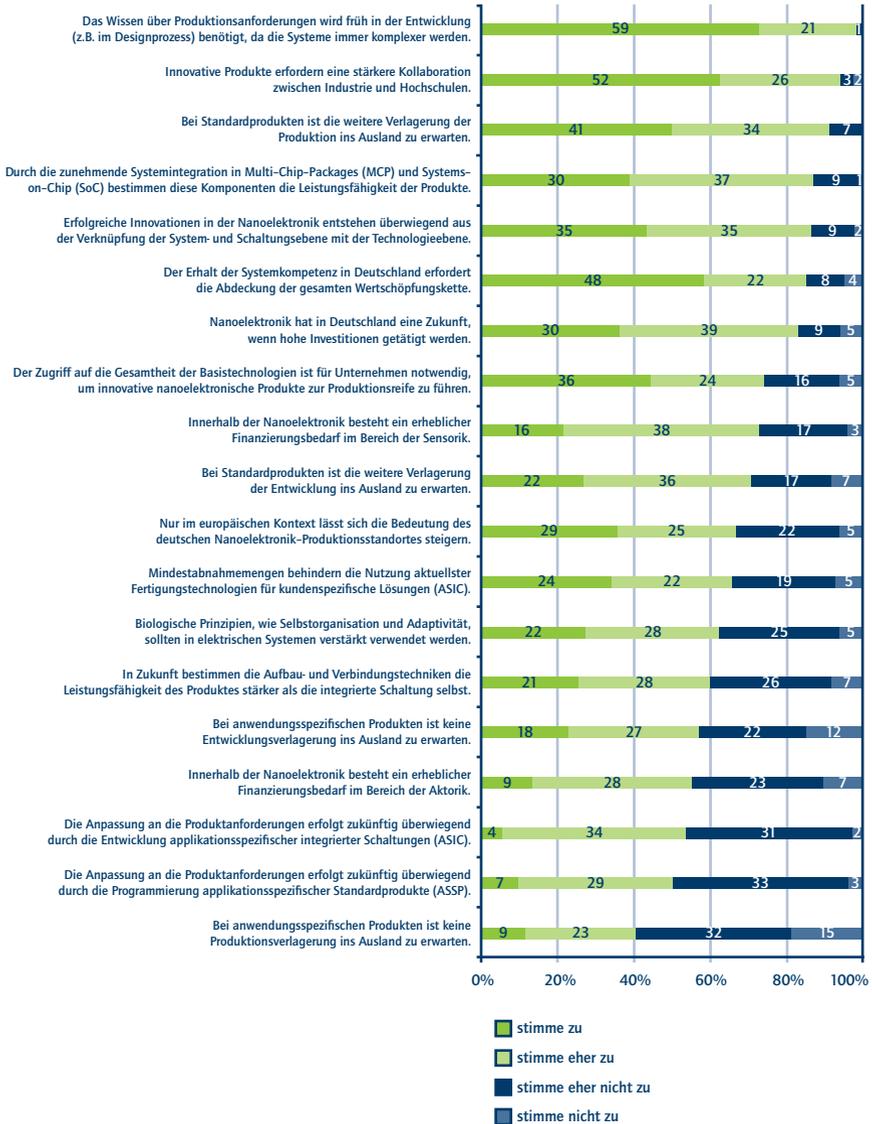
Gerade einmal sechs Thesen verzeichneten einen Zustimmungsgrad von unter 60 Prozent. Das gilt auch unter der Berücksichtigung, dass zwei Thesen, nämlich die Standortverlagerung von Produktion und Entwicklung, in negierter Form präsentiert wurden.

Abschließend wurde untersucht, ob Teilnehmer aus universitärem Umfeld ein anderes Antwortverhalten zeigten als solche aus der Industrie. Hier konnte für fünf Fragen eine offensichtliche Diskrepanz (größer als 10 Prozent) identifiziert werden (siehe Abbildung 31). Drei der Fragen sind dabei unter den sechs Thesen wiederzufinden, deren Gesamtzustimmungsgrad nur bis zu 60 Prozent betrug (siehe oben).

Die Universitätsangehörigen waren deutlich stärker der Meinung, dass zukünftig Produktdifferenzierung über Programmierung unter Nutzung von Standardprodukten ablaufen wird (27 Prozent mehr als Industrieangestellte). Ebenso erwartete dieselbe Gruppe, deutlich mehr noch als Mitarbeiter aus der Industrie, dass die Aufbau- und Verbindungstechniken die zukünftige Leistungsfähigkeit treiben werden (25 Prozent Unterschied im Meinungsbild).

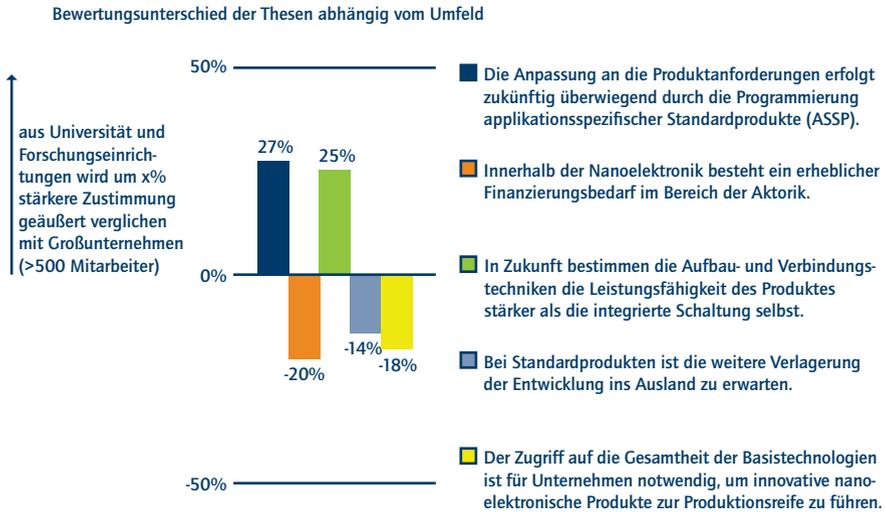
Abbildung 30: Zustimmungsbild zu den Thesen

Bitte geben Sie nachfolgend an, inwieweit Sie den vorliegenden Thesen zustimmen können oder diese ablehnen.



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 31: Meinungsunterschiede größer als 10 Prozent zwischen Universität und Industrie



Quelle: Eigene Darstellung.

Umgekehrt pflichteten die Befragungsteilnehmer aus der Industrie deutlich stärker einem hohen Finanzierungsbedarf der Aktorik bei. Auch erwarteten sie noch stärker als Universitätsangehörige eine Entwicklungsverlagerung für Standardprodukte ins Ausland. Zuletzt erschien den Industrieangestellten der Zugriff auf die Gesamtheit der Basistechnologien zum Zweck der Produktentwicklung deutlich notwendiger als den Teilnehmern aus Universitäten.

> HOCHEFFIZIENTE ORGANISCHE BAUELEMENTE – NEUE ENTWICKLUNGEN AUS SACHSEN

KARL LEO/ANNETTE POLTE

1 ORGANISCHE ELEKTRONIK – WAS IST DAS?

Organische Elektronik nutzt eine neue Klasse funktioneller Materialien, die zusammen mit innovativen Herstellungsverfahren viele neue Anwendungen ermöglichen. Das Marktpotenzial ist riesig. Organische Elektronik leistet nicht nur einen Beitrag zu höherem Komfort im Privatleben, sondern gibt auch Antworten auf drängende Menschheitsprobleme.

Preisgünstig, klein, flach, flexibel und ökologisch verträglich – so sind die Verheißungen einer neuen Schlüsseltechnologie, die sich insbesondere durch ihre Interdisziplinarität auszeichnet. Man geht davon aus, dass die organische Elektronik, die selbstbewusst auch als „Green Electronics“ bezeichnet wird, eine Schlüsseltechnologie darstellt, die Antworten auf Zukunftsfragen in den Bereichen Energie, Umwelt, Information, Kommunikation, Mobilität und Gesundheit geben kann. Was steckt dahinter?

Nehmen wir das Thema Energie. Durch die Herstellung von Strom aus Kohle, Erdöl und Gas werden große Mengen Treibhausgase – vornehmlich CO₂ – freigesetzt, die bis zum Jahre 2100 zu einer globalen Erderwärmung um 2–6 °C führen werden – mit dramatischen Auswirkungen auf das Weltklima. Auf der anderen Seite führt der steigende Energiehunger der Menschheit dazu, dass im Jahre 2050 weltweit durchschnittlich 4,5 bis 6 Milliarden Kilowatt elektrische Leistung erzeugt werden müssen. Das entspricht dem Drei- bis Vierfachen der heute benötigten Menge. Um eine Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgas zu erreichen, gibt es zwei Wege. Das sind einerseits die verstärkte Nutzung sauberer und erneuerbarer Quellen, zum Beispiel der Photovoltaik, zur Deckung des steigenden Energiebedarfs und andererseits die Reduktion des Energieverbrauchs durch Energieeinsparung bzw. den Einsatz energieeffizienterer Technologien. Zu Ersterem kann die organische Elektronik durch preisgünstig herstellbare organische Solarzellen, zu Letzterem durch die äußerst energieeffizienten organischen Leuchtdioden (OLED) beitragen, was insbesondere vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Beleuchtung ein Drittel des Energieverbrauchs privater Haushalte ausmacht, von immenser Bedeutung ist.

Schon seit ca. 100 Jahren ist bekannt, dass organische Materialien nicht nur als Isolatoren, sondern auch als Leiter und Halbleiter fungieren können. „Organische Materialien“ meint dabei nicht nur Holz, Kork oder Gartenerde, sondern die riesige,

vielgestaltige und uns überall begegnende Gruppe der Kohlenwasserstoffverbindungen, zu der Methangas genauso gehört wie Stärke, Benzin, Autolack und Kunststoffe.

Die speziellen Moleküle in der organischen Elektronik haben eines gemeinsam. Sie sind wegen ihres konjugierten π -Elektronensystems ungesättigte Verbindungen des Kohlenstoffs. Damit sind sie durch Licht leicht anregbar und zeigen interessante physikalische Eigenschaften, oft sind sie farbig. Von diesen Molekülen gibt es unzählig viele, ständig werden neue synthetisiert. Durch kleine oder große Variationen der Molekülstrukturen, also mithilfe der präparativen organischen Chemie, lassen sich die physikalischen Eigenschaften organischer Halbleiter in weiten Bereichen steuern. Damit ist die Herstellung maßgeschneiderter Materialien möglich. Weitere Vorteile der organischen Halbleiter sind ihre niedrigen Schmelzpunkte ebenso wie geringe Sublimationswärmen. Ein Beispiel sind die Phthalocyanine, die seit über 100 Jahren als Farbstoffe bekannt sind und zum Beispiel die blauen Autobahnschilder in Deutschland färben, aber seit einigen Jahren auch in organischen Solarzellen Verwendung finden.

2 WAS MACHT DIE ORGANISCHEN HALBLEITER BESONDERS? EIN VERGLEICH

Beim Vergleich von organischen Halbleitern mit ihren anorganischen Pendanten ergibt sich folgendes Bild: Klassische anorganische Halbleiter wie Silizium (Si), Galliumarsenid (GaAs) oder Cadmiumtellurid (CdTe) werden gewöhnlich in einkristalliner Form verwendet, deren Herstellung mit einem hohen Energieeinsatz in komplizierten mehrstufigen diskontinuierlichen Herstellungsprozessen verbunden ist. Der Vorteil anorganischer Materialien liegt in der hohen Beweglichkeit für Ladungsträger, was erst die hohen Schaltgeschwindigkeiten und komplexen Prozesse in heutigen Prozessoren möglich macht und damit für den Fortbestand dieser Technologie in diesem Feld sorgen wird.

Organische Halbleiter bestehen dagegen aus den oben beschriebenen organischen Materialien und werden gewöhnlich als großflächige dünne Schichten polykristalliner oder amorpher Natur abgeschieden. Die Moleküle sind untereinander nur durch schwache Van-der-Vaals-Wechselwirkungen gebunden, wodurch die elektronische Kopplung zwischen den Molekülen wesentlich geringer ist. Die Ladungsträger sind auf den Molekülen lokalisiert und werden durch Ladungsträger-Hopping zwischen den Molekülen transportiert. Gegenüber anorganischen Halbleitern zeichnen sich die organischen Moleküle durch bessere optische Eigenschaften, das heißt höhere Absorption und Emission aus. Dadurch können Bauelemente aus organischen Halbleitern als sehr dünne Schichten verwendet werden.

Solch dünne Schichten, gedruckt wie unsere Zeitung oder im Vakuum bei niedrigen Temperaturen aufgedampft wie bei entspiegelten Brillengläsern, ermöglichen Energie- und Materialeinsparung bei der Herstellung, neue Anwendungsfelder durch die Nutzung großflächiger flexibler Substrate und kostengünstige Massenproduktion in kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozessen.

3 ZUKUNFTSCHANCEN – WERDEN ORGANISCHE HALBLEITER DAS SILIZIUM VERDRÄNGEN?

Ausgehend von den drei Bauelementgruppen organische lichtemittierende Dioden (OLED), organische Solarzelle (OSZ) und elektronische Bauelemente wie Dioden, Transistoren und Speicher ergeben sich für die organische Elektronik die folgenden, wesentlichen Anwendungsmöglichkeiten: Beleuchtung, Solarzellen, Displays, Elektronik und Integrated Smart Systems.

So sind organische Solarzellen in Form transparenter Folien für Fahrzeug- und Gebäudefenster vorstellbar, deren Kosten auf Werte fallen können, die von klassischen Solarzellen nicht erreichbar sind. OLEDs werden die Beleuchtung revolutionieren und gleichzeitig unseren CO₂-Ausstoß stark reduzieren; denkbar sind Lichtkacheln oder Leuchttapeten. Intelligente Bauelemente auf der Basis von gedruckten organischen Schaltkreisen, Sensoren und Energiequellen werden neue Wege in der Logistik, der Konsumgüterverpackung und der Medizintechnik möglich machen. Neue flexible Displays mit extrem niedrigem Energieverbrauch können überall und jederzeit genutzt werden. Sehr schnelle Bauelemente sind allerdings mit organischen Halbleitern aufgrund des erwähnten Hopping Transports weniger gut zu realisieren.

Die organische Elektronik, wegen der geringeren Kosten pro Fläche sinnvoller für weniger anspruchsvolle Anwendungen, wird die anorganischen Halbleiter also nicht verdrängen, sondern neue Anwendungen erschließen. Die sich heute schon abzeichnende große Breite der möglichen Anwendungen in Informationstechnik, Beleuchtung, Energieerzeugung, Medizintechnik, Warenwirtschaft etc. macht die organische Elektronik zu einer typischen Querschnittstechnologie. Eine neuere Marktstudie sagt für 2027 einen Gesamtmarkt von 330 Milliarden US-Dollar voraus, wobei Logik/Speicher, Display, Photovoltaik und OLED-Beleuchtung die vier größten Märkte mit jeweils über 30 Milliarden US-Dollar sein werden.

Der Markt für organische elektronische Schaltungen, welcher langfristig als größter Markt prognostiziert wird, hält eine Vielfalt von Anwendungsmöglichkeiten bereit. Man spricht von intelligenten Verpackungen, elektronischem Markenschutz, autonomer flexibler Energieversorgung, biomedizinischen Einwegsensoren, flexiblen großflächigen Sensoren für Umweltmonitoring und Bautenschutz sowie funktionellen Folien und Textilien.

Die Dünnschichttechnologie ermöglicht in Kombination mit neuen Fertigungsverfahren die großflächige billige Herstellung und die Erschließung ganz neuer Anwendungsfelder. Dabei ergeben sich große Chancen auch für Industriezweige, die bisher weniger mit der Elektronik verknüpft waren; Grenzen zwischen Industriezweigen verschwimmen, verschwinden oder werden verschoben. Das betrifft nicht nur die Anwendungsseite (zum Beispiel Medizintechnik, Warenwirtschaft, Textilindustrie, Verpackungsindustrie, Konsumgüterindustrie), sondern auch Industrien entlang der

ganzen Wertschöpfungskette von den Materialien über Komponenten, Maschinen (zum Beispiel Maschinenbau, Drucktechnik) und Instrumente bis hin zur Automatisierung. Durch die große Vielfalt der Anwendungen wird die organische Elektronik viele der etablierten Industrien beeinflussen und existierende Wertschöpfungsketten revolutionieren.

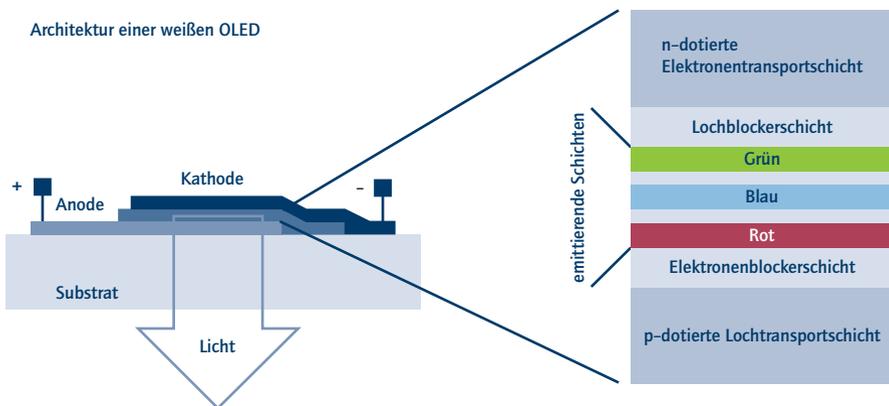
4 LEUCHTENDE ZUKUNFT – ORGANISCHE LEUCHTDIODEN (OLED)

Um diese Zukunftsaussichten wahr werden zu lassen, sind noch einige Anstrengungen in der Forschung notwendig. Das lässt sich am Beispiel der OLED, der schon am weitesten fortgeschrittenen Technologie, verdeutlichen. Erste Produkte wie Fernseher, MP3-Player oder Handy nutzen bereits Displays aus organischen Leuchtdioden und profitieren daher von der hohen Energieeffizienz und dem überragenden Kontrast der OLEDs.

Ihre ganze Stärke hinsichtlich ihres geringen Energiebedarfs spielen die organischen Leuchtdioden allerdings bei einem anderen Anwendungsfeld aus: der Beleuchtungstechnik. Um im Beleuchtungsmarkt jedoch möglichst erfolgreich zu sein, sollten OLEDs in Zukunft die Effizienz der Leuchtstoffröhre übertreffen, das heißt Effizienzen von mehr als 100 lm/W erzielen und angemessene Lebensdauern gewährleisten. Welche Fragen bewegen die Forschung momentan?¹

4.1 AUFBAU UND WIRKUNGSWEISE DER OLED

Abbildung 1: Aufbau einer weißen organischen Leuchtdiode. Mithilfe von Elektronen- und Lochtransport-schichten werden die Ladungen effizient zu den farbigen Emissionsschichten transportiert, wo Licht aller Grundfarben erzeugt wird.

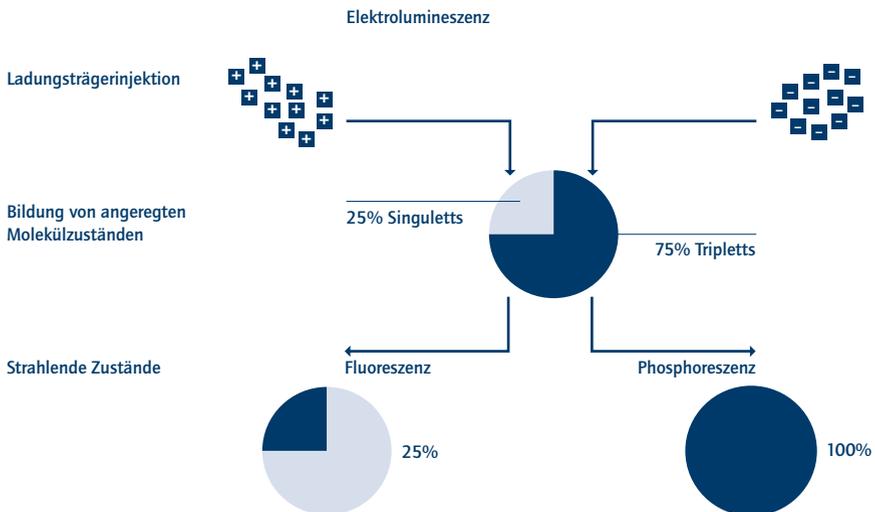


Quelle: Eigene Darstellung.

¹ Lüssem et al. 2010.

Eine organische Leuchtdiode besteht aus einer Anzahl von dünnen organischen Schichten, die aus kleinen, auf Kohlenstoff basierenden Molekülen bestehen (wie oben beschrieben) und jede für sich nur wenige Nanometer dick sind. Diese Schichten werden derzeit meist auf Glassubstrate aufgebracht. In Abbildung 1 ist ein typischer Aufbau einer OLED gezeigt. Das Bauelement besteht aus Ladungstransportschichten – den sogenannten Elektronen- und Lochtransportschichten – und den emittierenden Schichten (in Abbildung 1 rot, grün, blau). Löcher und Elektronen werden an der transparenten Indium-Zinn-Oxid-Anode bzw. an der Silber-Kathode injiziert. Mithilfe der Ladungstransportschichten werden die Ladungsträger dann zur emittierenden Schicht geleitet, in der sich Löcher und Elektronen treffen und ein sogenanntes Elektronen-Loch-Paar oder Exziton bilden. Ein Exziton ist ein angeregter Zustand eines einzelnen Moleküls, der unter Aussendung von Licht in seinen Grundzustand relaxieren kann. Um zu verhindern, dass Elektronen oder Löcher durch die emittierende Schicht wandern, ohne ein Exziton zu bilden, werden blockierende Schichten an den Rändern der Emissionsschicht eingebaut, die alle Ladungsträger in der emittierenden Schicht einsperren.

Abbildung 2: In einer OLED werden dreimal so viele Triplets wie Singulets gebildet. In fluoreszenten Emittern können nur die Singulets Licht erzeugen, sodass 75 Prozent aller Exzitonen verloren gehen. Im phosphoreszenten Emitter können hingegen die Triplets strahlend rekombinieren, sodass alle Exzitonen Licht erzeugen.



Quelle: Eigene Darstellung.

In einer OLED werden zwei unterschiedliche Arten von Exzitonen gebildet: Singulets und Triplets. Wegen der Spin-Multiplizität ist das Verhältnis der erzeugten Triplett- und

Singulettzustände drei zu eins (vgl. Abbildung 2). Normalerweise kann nur aus Singulett Licht emittiert werden. Diese Rekombination eines Singulett unter Abstrahlung von Licht nennt man „Fluoreszenz“ und die entsprechenden Moleküle „fluoreszente Emittter“. Im Gegensatz dazu ist für Triplettzustände die strahlende Rekombination quantenmechanisch verboten, sodass drei von vier Exzitonen in einer einfachen OLED verloren gehen. Auf solchen fluoreszenten Emitttern basierten auch die ersten weißen OLEDs, die nur ein Viertel der elektrischen Energie zur Lichtemission nutzen können.

Eine Lösung bieten sogenannte „phosphoreszente Emittter“. Durch eine besondere Eigenschaft dieser Moleküle können sowohl Singulett als auch Triplett strahlend rekombinieren. Damit können alle Exzitonen in Licht umgewandelt werden und man erreicht mithilfe der phosphoreszenten Emittter eine nahezu perfekte Umwandlung von elektrischer in optische Energie.

4.2 WEISSE OLEDS FÜR BELEUCHTUNGSZWECKE

Weißes Licht deckt den gesamten sichtbaren Bereich des Spektrums ab. Eine OLED muss also Licht verschiedener Wellenlängen erzeugen. Normalerweise sind organische Halbleiter jedoch farbig, emittieren also nur in einem begrenzten Teil des sichtbaren Spektrums. Daher kann weißes Licht nur durch die Kombination von verschiedenen Emitttern erzeugt werden. Dazu werden üblicherweise rote, grüne und blaue Emittter kombiniert. Die Basis der ersten weißen OLEDs war eine Kombination von fluoreszenten blauen und phosphoreszenten roten und grünen Emitttern. Da in einer solchen OLED die Energie der Triplett, die auf dem fluoreszenten blauen Emittter gebildet wurden, verloren geht, ergibt sich eine Lichtausbeute von nur 14 lm/W (siehe Abbildung 3, gestrichelte Linie)².

Zwei Konzepte zur Erhöhung der Effizienz weißer OLEDs wurden am Institut für Angewandte Photophysik (IAPP) der TU Dresden entscheidend weiterentwickelt: der voll-phosphoreszente Ansatz und der sogenannte Triplett-Harvesting-Ansatz.

Damit für das menschliche Auge ein weißer Farbeindruck entsteht, wird in einer voll-phosphoreszenten OLED die Emission von einem blauen, einem grünen und einem roten phosphoreszenten Emittter gemischt.³ In unserer Anordnung ist die emittierende Schicht in drei einzelne Lagen unterteilt, die jeweils in einer anderen Farbe emittieren (siehe Abbildung 1).

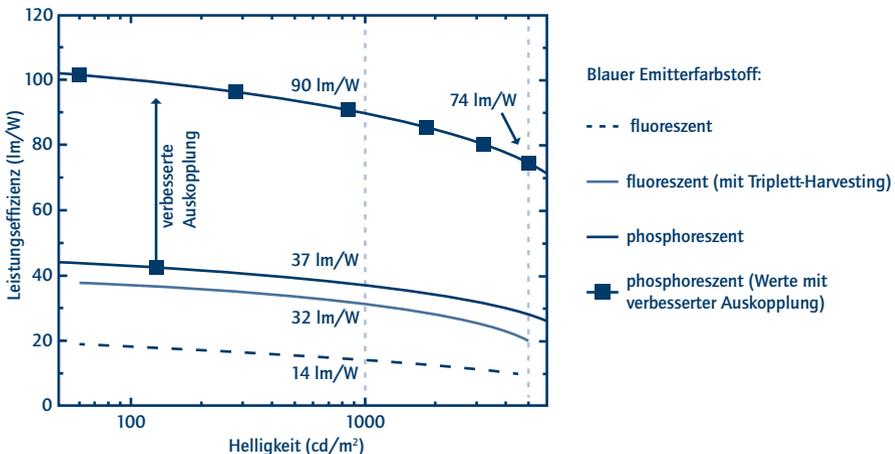
Abbildung 3 (durchgezogene Linie) verdeutlicht, dass diese Schichtanordnung äußerst effiziente OLEDs ergibt. Bei einer Helligkeit von 1.000 cd/m², das heißt einer Helligkeit von ungefähr eintausend haushaltsüblichen Kerzen auf einer Fläche von einem Quadratmeter, wird eine Lichtausbeute von 37 lm/W erreicht. Allerdings gibt es zwei Aspekte, die der weiteren Verbesserung bedürfen. Der Farbeindruck der OLED ist zu grün und die Lebensdauer der Dioden ist mit 1–2 Stunden noch sehr

² Schwartz et al. 2006.

³ Reineke et al. 2009.

kurz. Das liegt an dem blauen, phosphoreszenten Emitter. Im Vergleich zu dem roten und grünen Emitter, die beide äußerst stabil sind und Lebensdauern von ungefähr 100.000 Stunden erreichen, altert der blaue Emitter äußerst schnell. Dieses Problem könnte mit einem stabilen phosphoreszenten blauen Emitter beseitigt werden, der jedoch zurzeit nicht verfügbar ist. Eine Alternative bietet ein weiteres neues Konzept: weiße OLEDs, basierend auf der Triplet-Harvesting-Methode⁴. Bei dieser speziellen Art von OLEDs kann der instabile blaue phosphoreszente Emitter durch einen stabilen fluoreszenten Emitter ersetzt werden, ohne dass man Effizienzeinbußen erleidet. Um zu verhindern, dass die auf dem fluoreszenten blauen Emitter gebildeten Triplets verloren gehen, kann ein blauer Farbstoff mit einem hohen Triplet-Niveau eingesetzt werden. Wenn das Triplet-Niveau des blauen Emitters über dem Niveau des roten Emitters liegt, werden die im blauen Emitter erzeugten Triplets auf den phosphoreszenten roten Emitter übertragen, wo sie unter Lichtausendung rekombinieren können (siehe Abbildung 4). Der weiße Farbeindruck kann dabei durch eine gute Wahl der Konzentrationsverhältnisse erzielt werden.

Abbildung 3: Lichtausbeuten der verschiedenen Ansätze zur Erzeugung von weißem Licht im Vergleich. Die niedrigste Lichtausbeute haben Konzepte, die einen fluoreszenten Emitter nutzen (gestrichelte Kurve). Mithilfe der Triplet-Harvesting-Methode kann die Effizienz deutlich gesteigert werden (Stich-Punkt-Linie). Höchste Effizienzen liefert der voll-phosphoreszente Ansatz, vor allem, wenn er mit Methoden zur Erhöhung der Lichtauskopplung kombiniert wird (durchgezogene Kurven).



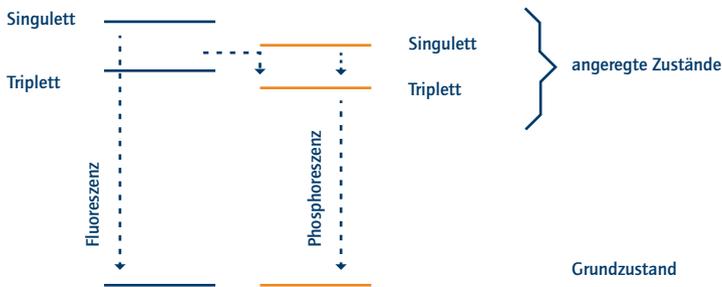
Quelle: S. Reinecke/IAPP.

Mit dieser Methode können alle Exzitonen genutzt werden und Licht emittieren – eine interne Effizienz von nahezu 100 Prozent ist auch auf diesem Wege erreicht. Es ergibt

⁴ Schwartz et al. 2008.

sich eine Lichtausbeute von 32 lm/W (siehe Abbildung 3, Strich-Punkt-Linie). Die Werte zeigen, dass man mit dem Triplett-Harvesting-Konzept durchaus in der Lage ist, an Effizienzen des vollphosphoreszenten Ansatzes heranzureichen. Jedoch werden trotz dieser nahezu perfekten Umwandlung von Strom in Licht keine Gesamteffizienzen von 100 Prozent erreicht – ungefähr 80 Prozent des erzeugten Lichtes bleiben in der OLED gefangen und werden nicht ausgekoppelt. An dieser Stelle kommt nun ein zweiter Aspekt zum Tragen, der für die Gesamteffizienz einer OLED von Bedeutung ist: Neben der internen Effizienz (diese beschreibt, wie gut die gebildeten Exzitonen in Licht umgewandelt werden können) geht die sogenannte „Auskopplungs-Effizienz“ als weiterer Faktor in die Gesamteffizienz ein; um mehr Licht abzustrahlen, muss diese erhöht werden. Auch hier haben Dresdner Forscher einen neuen Ansatz angewandt.

Abbildung 4: Das Triplett-Harvesting-Konzept. Es sind die Energieniveaus eines blauen fluoreszenten Emitters und eines roten phosphoreszenten Emitters gezeigt. Triplets, die auf dem blauen Emitter gebildet werden, würden normalerweise nicht-strahlend rekombinieren. Da jedoch das Triplett-Niveau des roten Emitters unterhalb des Triplett-Niveaus des blauen Emitters liegt, können die Triplets auf den roten Emitter übertragen werden und dort Licht emittieren.



Quelle: Eigene Darstellung.

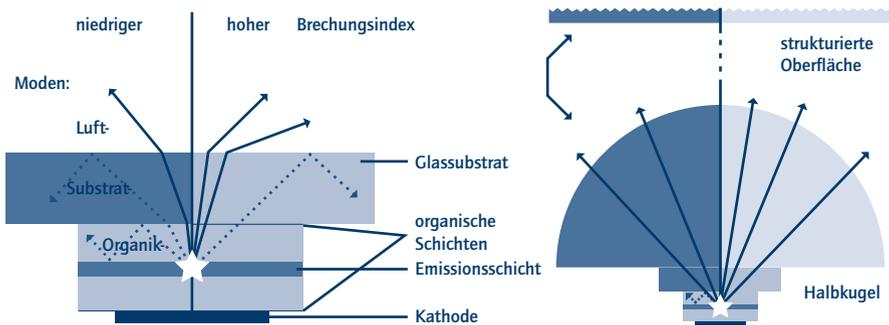
4.3 HÖHERE EFFIZIENZ DURCH BESSERE AUSKOPPLUNG DER PHOTONEN

Die optischen Eigenschaften der OLED sind für das Gefangenhalten des Lichts in der OLED verantwortlich: Aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes der organischen Schichten und des Substratglases treten an den Grenzflächen zwischen organischen Schichten und Glas sowie zwischen Glas und Luft Totalreflexionen auf. Licht wird dabei hin- und herreflektiert und bleibt effektiv in der OLED gefangen (siehe Abbildung 5).

Bei neueren Experimenten konnten Totalreflexionen an der Grenzfläche zwischen den organischen Schichten und dem Substratglas verhindert werden, indem ein Glas verwendet wurde, das denselben Brechungsindex wie die organischen Schichten besitzt. Außerdem konnte mithilfe einer dünnen Struktur aus kleinen Pyramiden, die auf das OLED-Glas gelegt wird, die Totalreflexion an der Grenzfläche zwischen Glas und Luft verringert und

somit die Lichtausbeute erhöht werden (siehe Abbildung 5)⁵. Diese Auskopplungsverstärkung ermöglicht es theoretisch, die Lichtauskopplung um den Faktor 2,5 auf 50 Prozent zu steigern. Aus diesem Grunde trägt dieser Ansatz entscheidend zu einer deutlichen Effizienzsteigerung von OLEDs bei. Kombiniert man den vollphosphoreszenten Ansatz mit der oben beschriebenen Auskopplungs-Verstärkung, wird insgesamt eine Lichtausbeute von 90 lm/W erreicht (siehe Abbildung 3, Linie mit Stern). Dieser Wert übertrifft die Effizienz von Energiesparlampen und lässt das Potenzial der OLEDs erahnen.

Abbildung 5: Auskopplung des Lichts aus OLEDs: Durch die unterschiedlichen Brechungsindizes wird Licht an den Grenzflächen zwischen Organik/Substrat und Substrat/Luft reflektiert und bleibt in der OLED gefangen (linkes Bild linke Hälfte). Mithilfe von Substraten aus hochbrechendem Glas (linkes Bild rechte Hälfte), durch eine Halbkugel oder durch eine dünne Struktur aus kleinen Pyramiden kann dieses Licht aus der OLED ausgekoppelt werden.



Quelle: S. Reinecke/IAPP.

5 SONNIGE AUSSICHTEN – ORGANISCHE SOLARZELLEN

Organische Solarzellen sind die zweite Gruppe organischer Bauelemente, für die der breite Markteintritt in naher Zukunft geplant ist; erste Nischenanwendungen wie zum Beispiel Taschen mit integrierten organischen Solarzellen existieren bereits.

Auch hier ist die Effizienz neben der Lebensdauer Thema der Forschung, wobei das IAPP dabei gemeinsam mit der Heliatek GmbH mit Weltrekorden aufwarten kann. Momentan treten organische Solarzellen aber noch nicht in Konkurrenz zu ihren bereits etablierten anorganischen Verwandten, da sie derzeit noch nicht in der Lage sind, Sonnenlicht ähnlich effizient in Strom umzuwandeln wie zum Beispiel Siliziumsolarzellen, die etwa 90 Prozent des Weltmarkts ausmachen. Während Letztere einen Wirkungsgrad um die 18 Prozent in der Produktion schaffen, kommen organische Solarzellen im Labor

⁵ Reinecke et al. 2009.

erst seit Kurzem auf etwas mehr als 10 Prozent. Ihre Stärken liegen daher neben dem Kostenpotenzial in der Dünnschichttechnologie, die flexible Substrate und damit neue Anwendungen ermöglicht.

Neben dem Einstieg in den mobilen Bereich sehen Experten auch in der Gebäudeintegration einen Zukunftsmarkt. Große Fensterflächen oder Jalousien könnten dann genutzt werden, um mit farbigen und halbtransparenten Solarzellen Strom aus der Sonne zu erzeugen. Die anspruchsvollste Anwendung wird jedoch der Einsatz in stationären Fotovoltaik-Anlagen zur Stromerzeugung sein, als Ergänzung oder Ersatz von anorganischen Solarzellen.

Wie eine OLED besteht auch eine organische Solarzelle aus dünnen organischen Schichten. Zwischen einer transparenten und einer meist nicht-transparenten Elektrode befindet sich die lichtabsorbierende Schicht, die je nach Konzept noch von Ladungsträgertransporterschichten umgeben ist. Die ganze Struktur inklusive der Elektroden misst deutlich weniger als ein tausendstel Millimeter und ist somit ungefähr 500-mal dünner als ein menschliches Haar.

5.1 AUFBAU UND WIRKUNGSWEISE EINER ORGANISCHEN SOLARZELLE

Fällt Licht auf die organische Solarzelle, entstehen Exzitonen, die uns von den OLEDs bekannten schwach gebundenen Elektronen-Loch-Paare. Damit ein Strom fließen kann, müssen diese noch getrennt und zu den Elektroden abgeleitet werden. Dies ist auch der wesentliche Unterschied zu den anorganischen Solarzellen, wo direkt freie Ladungsträger entstehen.

Zur Trennung der Ladungsträger wird ein sogenannter Heteroübergang an der Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit unterschiedlicher Elektronenaffinität genutzt. Sobald ein Exziton eine solche Grenzfläche erreicht, wirkt diese als Trennfläche und die Elektronen fließen durch das Akzeptormaterial zur Metallelektrode, während die positiv geladenen Löcher durch das Donormaterial zur transparenten Anode fließen.

Auch wenn das einfach klingt, gibt es im Detail noch viele Fragen zu den grundlegenden Prozessen. Der Dreh- und Angelpunkt ist zunächst die chemische Synthese. Im Gegensatz zu den anorganischen Halbleitern, bei denen man es im Prinzip mit einem einzigen Element, dem Silizium, zu tun hat, bietet die organische Chemie eine unglaublich große Vielfalt. Die Materialien für die verschiedenen Schichten müssen in vielen Aspekten gut zusammenpassen, damit Elektronen und Löcher tatsächlich getrennt und abgeleitet werden können.

So sollen Absorbermaterialien möglichst viel Licht absorbieren und die Materialien in den Transportschichten dagegen möglichst wenig. Für eine effektive Trennung und einen verlustfreien Transport der Ladungsträger zu den Elektroden müssen die Materialien (der Absorberschicht) mit ihren Energieniveaus gut zueinander passen – eine

anspruchsvolle Aufgabe für Chemiker und Physiker gleichermaßen, man spricht in diesem Zusammenhang auch von Bandgap-Engineering.

Auch an den Herstellungsprozess gibt es eine Reihe von Anforderungen. In der photoaktiven Schicht ist eine perfekte innige „Mischung“ der Materialien notwendig. Wegen der geringen Diffusionslänge der Exzitonen und der Rekombinationsgefahr ist ein geringer Abstand zwischen dem Ort, an dem das Exziton erzeugt wird, und der Grenzfläche wichtig. Allerdings sichern nur durchgehende Pfade in der Mischung den ungehinderten Abtransport der Ladungsträger.

5.2 NEUE KONZEPTE AUS DRESDEN

Theoretische Betrachtungen sagen für eine einfache organische Solarzelle Effizienzen von deutlich über zehn Prozent voraus, wenn man zwei Solarzellen stapelt, annähernd 20 Prozent. Der neueste Effizienz-Weltrekord aus Dresden liegt bei 12 Prozent und stößt dabei unter Laborbedingungen erstmals in Regionen vor, die kommerzielle Solarzellen aus amorphem Silizium erreichen.

Grundlage des Erfolges ist die sogenannte „p-i-n Tandemzell-Technologie“, die vom IAPP und der Heliatek GmbH gemeinsam entwickelt und patentiert wurde. Diese Technologie kombiniert das Konzept der molekularen Dotierung, die p-i-n Technologie, mit dem Tandemkonzept.⁶

Obwohl Dotierung aus dem Bereich der anorganischen Halbleiter bekannt ist und dort auch für den Durchbruch gesorgt hat, war die Übertragung dieser Idee auf die organischen Halbleiter nicht trivial. In einer Dünnschichtsolarzelle sollten die Schichtdicken der Transportschichten so gewählt werden, dass sich die Absorberschicht im Maximum des Interferenzmusters befindet, um möglichst viel Licht absorbieren zu können. Mit der Stärke der Transportschichten wächst jedoch auch deren Widerstand, das heißt die Effizienz sinkt. Diesem Effekt kann durch die Verwendung von Molekülen, die als p- bzw. n-Dotanden wirken, entgegengewirkt werden. Hierzu wird ein Set von kleinen Molekülen im Vakuum gemeinsam verdampft, wobei sowohl die Mengenanteile als auch die Mischung auf molekularer Ebene genau gesteuert werden. Diese p-i-n Technologie setzt man nun in gestapelten Solarzellen ein. Hintergrund ist, dass die eingesetzten Materialien jeweils nur in einem engen Spektralbereich absorbieren, also farbig sind. Um einen größeren Teil des Sonnenspektrums nutzen zu können, kombiniert man deshalb eine Zelle mit einem kurzwelliges Licht (blau und grün) absorbierenden Material mit einer Zelle, die einen Absorber für langwelliges Licht enthält. Die in den Tandemzellen genutzten Materialien wurden unter anderem durch die Novalad AG entwickelt, welche ebenso wie die Heliatek GmbH eine Ausgründung des IAPP ist und sich auf Materialien für OLEDs spezialisiert hat.

In Zukunft möchten die Forscher noch einem Schritt weiter gehen und auch Solarzellen mit Infrarot-Absorbern bauen, die beim Einsatz auf Fenstern im Sommer neben

⁶ Drechsel et al. 2005; Schueppel et al. 2010.

der Stromproduktion unter anderem auch zum Schutz gegen Überhitzung dienen könnten. Die beschriebene Technologie lässt trotz der Komplexität der zugrunde liegenden Prozesse gute Wirkungsgrade erwarten.

Für die praktische Anwendung bedarf die Frage nach der Lebensdauer der Solarzelle, genau wie bei den OLEDs, besonderer Beachtung. Die Kraft des Sonnenlichts ist nämlich nicht nur in der Lage, Elektronen anzuregen, sondern kann die Moleküle auch zerstören, ganz ähnlich einem Sonnenbrand. Die Folge ist eine abnehmende Leistungsfähigkeit der Solarzelle, wobei in letzter Zeit von ermutigenden Ergebnissen mit Lebensdauern von über zehn Jahren berichtet wurde. Auch hier forschen Dresdner Wissenschaftler intensiv.

6 GEMEINSAM STARK – DER SÄCHSISCHE ORGANIK-CLUSTER OES

Um das Institut für Angewandte Photophysik, die Fraunhofer-Einrichtung für Organik, Materialien und Elektronische Bauelemente (COMEDD) und andere Institute hat sich durch einige Ausgründungen wie Novalad AG, Heliatek GmbH, Creaphys GmbH und zusätzliche Ansiedlungen wie die der Plastic Logic GmbH der europaweit größte Cluster der organischen Elektronik gebildet, der die gesamte Wertschöpfungskette von der Synthese neuer Materialien bis zur Herstellung der oben beschriebenen Bauelemente umfasst. Die Forschungseinrichtungen und Firmen bündeln ihre Kräfte im neu geschaffenen Netzwerk „Organic Electronics Saxony“ (OES) und sind ein bedeutender Teil des Mikroelektronikstandortes Dresden geworden, der auch international große Beachtung findet.

7 LITERATUR

Drechsel et al. 2005

Drechsel, J./Männig, B./Kozlowski, F./Pfeiffer, M./Leo, K./Hoppe, H.: *Applied Physics, Letters*/86, 2005, 244102.

Lüssem et al. 2010

Lüssem, B./Reinecke, S./Rosenow, T. et al.: „Novel Concepts for OLED Lighting“. In: *Proceedings of SPIE*, 7617, 2010, 761712.

Reinecke et al. 2009

Reinecke, S. et al.: *Nature*, 459, 2009, S. 234–238.

Schueppel et al. 2010

Schueppel, R./Timmreck, R./Allinger, N./Mueller, T./Furno, M./Uhrich, C./Leo, K./Riede, M.: *Journal of Applied Physics*, 107, 2010, 044503.

Schwartz et al. 2006

Schwartz, G. et. al.: *Applied Physics*, 89, 2006, 083509.

Schwartz et al. 2008

Schwartz, G. et al.: *Applied Physics*, Letters 92, 2008, 053311.

> NOVALED: VON DER IDEE ZUM PRODUKT

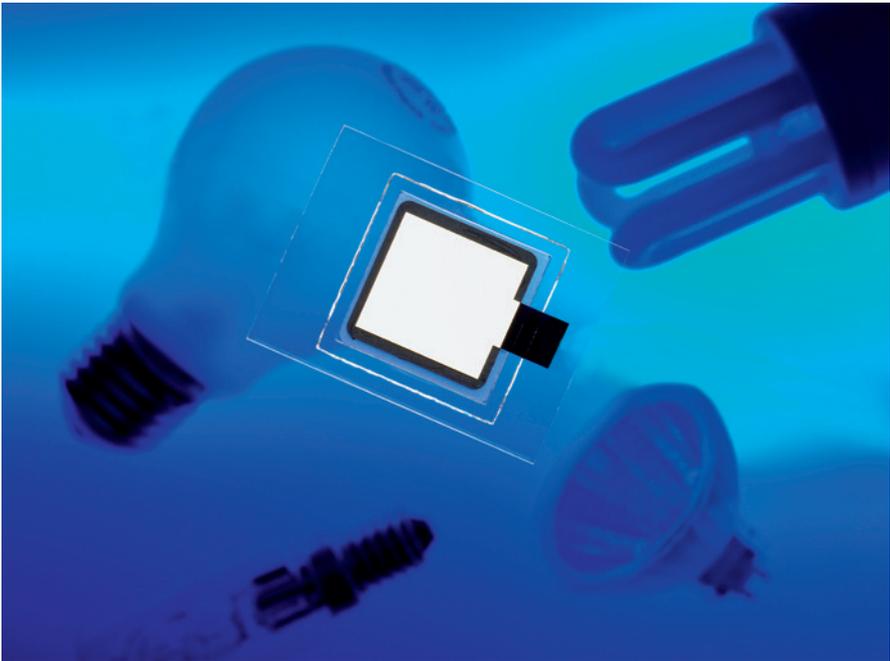
JAN BLOCHWITZ-NIMOTH

Dieser Text basiert auf einem Beitrag als Case Study zum Deutschen Ingenieurtag in Aachen am 14. 7.2008

1 WAS MACHT EINE ERFOLGREICHE AUSGRÜNDUNG?

In diesem Beitrag wird dargestellt, wie eine Ausgründung zu einem technisch-wissenschaftlichen Thema in Deutschland aussehen kann und wie Ingenieurwissen und -denken bei jungen Technologien die Basis für weltweiten Erfolg legten.

Abbildung 1: Eine OLED (organische Licht emittierende Dioden) sind flächenförmige Lichtquellen.



Quelle: Novaled AG.

Keine Ausgründungsgeschichte gleicht einer anderen, da die Randbedingungen, die Menschen und Organisationen, das zeitliche und geschäftliche Umfeld und der Umfang des beteiligten Glücks (dieser spannende Unsicherheitsfaktor zieht sich durch diesen Artikel) zu unterschiedlich sind. Sicher lassen sich aber allgemeine Etappen feststellen, als da wären:

- die Zeit vor der Gründung, quasi die Ideenfindung,
- die Finanzierung,
- die ersten Schritte vom universitären Forschungsumfeld zur Business-orientierten Firma,
- die Wachstumsphase,
- der Aufbau eines eigenen Netzwerkes und Kundenstamms.

2 WO KOMMT NOVALED HER?

Noval led geht auf eine Forschungsarbeit von Martin Pfeiffer (Physiker) am Institut für Angewandte Photophysik (IAPP) an der TU Dresden zwischen 1992 und 1995 zurück. Pfeiffer kam aus Stuttgart nach Dresden, um dort an organischen Halbleitern zu arbeiten. Zurückgreifen konnte er auf Vorarbeiten zu aufdampfbaren Farbstoffen für CCD-Farbfiler, ein in Dresden angesiedeltes Prestigejekt der ehemaligen DDR. Außerdem war durch weitere Mitarbeiter des IAPP, wie zum Beispiel Torsten Fritz, das Thema der organischen Transportmaterialien bereits angerissen worden. Dresden blickt auf eine lange photographische Forschungstradition mit dem IAPP zurück. Das Institut war als wissenschaftlich-photographische Lehranstalt und Industrie-Stiftungsprofessur ins Leben gerufen worden und feierte 2008 sein 100jähriges Jubiläum.

Martin Pfeiffer musste sich mit veralteten Vakuumanlagen in nicht wirklich vorzeigbaren Räumen begnügen. Aber es war eines der Themen, die der 1993 neu berufene C4-Professor Karl Leo am IAPP förderte. Die organische Elektronik sollte Zugpferd des IAPP werden.

1996 war es soweit, dass erste Ergebnisse zum gezielten Einsatz von größeren organischen Molekülen als p-Dotanden für organische Halbleiter vorlagen: Das Modellsystem Phthalocyanin, dotiert mit TCNQ Derivaten, lag vor und zeigte stabile Erhöhungen der Löcherleitfähigkeit. Durch die Beimischung von starken Akzeptoren konnte also die Leitfähigkeit für Löcher stabil erhöht werden, wenn diese Beimischungen („Dotanden“) groß genug sind. Existierende Vorarbeiten von Dritten hatten bisher auf Dotierung mit Gasen und Metallen fokussiert; die höhere Leitfähigkeit war relativ schnell wieder verschwunden.

Dann kam ich zum Team hinzu und untersuchte Dotierungseffekte in OLEDs (organischen lichtemittierenden Dioden, siehe Abbildung 1). Nun begann die Zeit, in der ich zu der Ansicht gelangte, dass experimentelle Physiker unbedingt als Ingenieure bezeichnet werden können: viel Aufbauarbeit, viel Bastelei, viel Methoden- und Geräteentwicklung.

Aber immer mit dem Ziel, bessere OLEDs zu bauen als wir es zuvor vermochten. Schnell wurden wesentliche Ergebnisse erzielt: niedrigere Onset-Spannung und steilere Kennlinien. Wie spekuliert, wurde diese Verbesserung dank der Dotierung durch die verbesserte Ladungsträgerinjektion und den verbesserten Ladungsträgertransport erreicht. Die technische Ausrüstung am IAPP war immer noch sehr unbefriedigend, aber Transfer- und EU-Mittel standen zur Verfügung, das zu ändern. Und mit besserer Ausstattung wurden auch Ergebnisse und Möglichkeiten besser.

Im Jahr 2001 wurden die OLED-Ergebnisse in meiner Promotion erstmals zusammengefasst und konsolidiert. Die Grundlagen waren gelegt: OLEDs mit deutlich niedrigeren Betriebsspannungen und wettbewerbsfähigen Effizienzen waren durch Dotierung möglich.

3 WIE IST NOVALED ENTSTANDEN?

Das Gründungsteam (Karl Leo, Martin Pfeiffer, Jan Blochwitz-Nimoth; später kam noch Jörg Amelung vom Fraunhofer IPMS Dresden dazu) hatte folgende Meinung: Es wäre schade, nun aufzuhören bzw. weiter ‚nur‘ Grundlagenforschung zu betreiben und dann mit ansehen zu müssen, wie ‚unsere‘ Dotierungstechnologie aus anderen Erdteilen ihren Weg in OLED-Produkte findet. Von letzterem waren wir überzeugt, das war quasi ein Dogma. Parallel dazu war das Thema in der weltweiten Industrie angekommen und Firmen, zum Beispiel aus dem Bereich Public Advertisement, äußerten dem IAPP gegenüber den dringenden Willen, OLED-Produktentwicklung zu finanzieren. Heute wissen wir, dass noch sehr viel Technologieentwicklung zu leisten war. Anfang bis Mitte 2001 war auch die Börsenblase noch nicht geplatzt und die Finanzierung schien kein Problem zu sein.

Daher haben wir gleich eine GmbH mit Namen „Novaled“ – also ‚die neue LED‘ – gegründet. Wie sich herausstellte, war das ca. 1 Monat vor dem Terroranschlag 9/11 keine gute Idee. Nachdem sich die angedachten Finanzierungen allesamt in Rauch aufgelöst hatten, änderten wir die Strategie und fingen an, einen eigenen Businessplan zu schreiben. Es dauerte dann noch bis März 2003, um eine 5 Millionen Euro Venture-Capital-Finanzierungsrunde (deutsches und französisches Geld) abzuschließen. Hier muss man fünf glückliche Umstände erwähnen:

- a) Die Forschungsarbeit am IAPP konnte dank einiger DFG- und anderer Projekte nahtlos weiter gehen,
- b) die lokale Sparkasse hat gut beim Schreiben und Verteilen von Businessplänen geholfen,
- c) mit Technostart haben wir einen Venture Capitalist gefunden, dessen Technologiebegeisterung andere mitgerissen hat, und
- d) es lagen (mündliche) Zusagen von sächsischen Fördergeldgebern vor, unser Projekt finanziell zu unterstützen.

- e) Wichtig war natürlich ebenso, dass bereits vor der Finanzierung ein Lizenzabkommen zwischen Novalad und der TU Dresden unterzeichnet wurde, das die Patentfrage für Novalad auf unkomplizierte Weise löste: Patente zu Novalad, Beteiligung der TUDAG (Partner der TU Dresden) an Novalad. Dieses ‚amerikanische‘ Modell kann nur allen deutschen Unis wärmstens empfohlen werden, wenn diese ein Interesse daran haben, dass Grundlagenforschung aus dem eigenen Haus heraus verwertet wird. Allerdings setzt dies ein motiviertes Ausgründungsteam und eine innovative Universität voraus.

All das zusammen hat dazu geführt, dass Novalad ab März 2003 am Markt starten konnte.

Ich bin dann als Geschäftsführer in die Novalad GmbH gewechselt; die anderen Gründer haben ihre Funktionen an der TU Dresden und dem Fraunhofer-Institut weiter ausgeübt: Martin Pfeiffer als ‚the brain‘, Karl Leo als Integrator, Jörg Amelung als Vertreter der Produktionsentwicklung bei Fraunhofer.

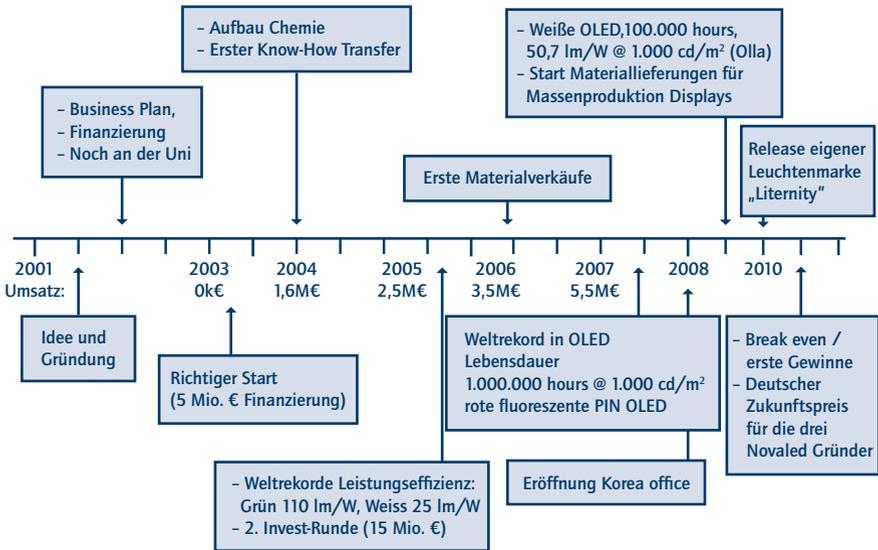
Die wesentlichen Schritte zum Aufbau der Firma waren dann:

- Umzug der Büros in ein gemietetes, Uni-nahes Gebäude (anfänglich wurden Anlagen der TU Dresden mitbenutzt),
- Aufbau einer Materialsynthesegruppe (Chemiker, Chemieingenieure, Laboranten),
- Gewinnung eines erfahrenen Managers; für Novalad war und ist dies Gildas Sorin mit Erfahrungen aus dem Displaybereich bei Thomson und Philips. Gildas wurde CEO, ich CTO.
- Erste Verkäufe von Technologieprogrammen und Know-how-Paketen nach Asien. Im Wesentlichen handelte es sich dabei um „Contracted R&D“.
- Aufbau eines eigenen Netzwerkes. Das äußerte sich unter anderem in ersten gemeinsamen und geförderten F&E-Programmen in größeren deutschen sowie europäischen Konsortien.
- Arbeit an der Bekanntheit von Novalad: Messebeteiligung, Mitarbeit in Organisationen, Pressearbeit (unter anderem zu Weltrekorden), etc.

4 WELCHE MENSCHEN ARBEITEN BEI NOVALED?

Bei Novalad arbeiten 3 Mitarbeiter (Stand 2012) in den Bereichen Materialentwicklung (Synthesechemie-Know-how ist da gefragt), OLED-Entwicklung (Physik und Optik-Know-how), Fertigung von OLEDs und anderen Demonstratoren, sowie im Bereich Materialprüfung und Qualitätssicherung. In all diesen Bereichen ist Ingenieurwissen und -geschick notwendig. Der Großteil der Mitarbeiter bei Novalad verfügt über eine wissenschaftlich-ingenieurtechnische Ausbildung, vom promovierten Physiker und Chemiker bis zum Physik- und Chemielaboranten.

Abbildung 2: Zeitstrahl der Historie der Novalied AG



Quelle: Novalied AG.

Das Ganze spiegelt sich in einem jungen Umfeld; der Altersdurchschnitt der Mitarbeiter ist 37 Jahre. Die Kollegen haben eine große Begeisterung für Technik, Innovationen, neue Ideen im Allgemeinen und identifizieren sich stark mit dem Unternehmen und seinen Zielen. Ein Vorteil einer jungen Firma ist sicherlich auch das offene Arbeitsklima. Dieses fördert ein direktes Einbringen und Umsetzen von neuen Ideen aus allen Firmenteilen.

5 WAS MACHT NOVALED GENAU?

Novalied ist ein Anbieter von Materialien, Technologien und Know-how auf dem Gebiet der organischen Elektronik, mit klarem Schwerpunkt auf OLEDs für Display- und Beleuchtungsanwendungen.

OLEDs sind im Displaybereich die bessere LCD-Technologie der Zukunft. Sie basieren für Video-taugliche Displays auf einer Aktiv-Matrix-TFT-Backplane (wie eben TFT-LCD auch) und kombinieren diese Backplane mit einer aktiven Pixeltechnologie. Das bedeutet, dass die einzelnen OLED-Pixel gezielt in ihrer jeweiligen Helligkeit gesteuert werden und das Licht selbst erzeugen. LCD ist im Gegensatz dazu eine optisch inaktive Technologie. Hier wird eine konstante Helligkeit einer Hintergrundbeleuchtung nur geschaltet. OLEDs stehen daher hinsichtlich der Lichterzeugung einem Plasmabildschirm näher. Kurz gesagt, vereinen OLED-Displays alle positiven Eigenschaften von LCD-Displays

(hohe Auflösung, hohe Konstant-Helligkeit) mit denen von Plasmabildschirmen (Unabhängigkeit des Kontrastes vom Winkel, Farbkontrast überhaupt, Schaltschnelligkeit, hohe Farbbrillanz). Außerdem ist OLED die flachste Bildschirmtechnologie, da keine Hintergrundbeleuchtung benötigt wird. Es gibt bereits OLED-Displays bis 11 Zoll Größe am Markt. Der Fokus liegt dabei derzeit noch auf Mobiltelefon-Displays bzw. Displays für mobile Anwendungen im Bereich 2-5 Zoll-Diagonale. Ein erstes TV-Display-Produkt wurde von Sony verkauft, ist 11 Zoll groß und nur 3 mm dünn.

OLEDs werden aber auch im Beleuchtungsmarkt der Zukunft eine erhebliche Rolle spielen. Die klassischen Lampentechnologien basieren auf thermischer Lichtstrahlung oder Gasentladung. Die Lampentechnologie der Zukunft wird den sogenannten „Solid State Lighting (SSL)“ gehören. Dazu gehören anorganische LEDs, die man bereits heute in mehr und mehr Lichtenwendungen sehen und kaufen kann, und die OLED-Technologie.

Für eine perfekte und natürliche Beleuchtung benötigt man zwei Arten von Lampen: den Punktstrahler (das Sonnenäquivalent) und den Flächenstrahler (das Himmelsäquivalent). Hier ergänzen sich LED und OLED sehr gut: die LED ist stark darin, viel Licht auf kleiner Fläche zu erzeugen, was sie als Spot-light (Punktstrahler) prädestiniert. Die OLED ist stark darin, viel Licht auf großen Flächen zu erzeugen, die perfekte Lichtquelle für diffuses, also flächiges Licht.

Mit OLEDs lassen sich reflektierende Lampen (Spiegel), transparente Lampen, Lampen auf biegbaren Flächen (Abbildung 3), aber auch klassische Büro-Deckenbeleuchtung realisieren. In fernerer Zukunft kann man sicher auch Fenster, die mit transparenten OLEDs beschichtet sind, als Abend-Leuchte nutzen.

Die Mitarbeiter bei Novaled arbeiten daher im Wesentlichen an zwei Themen:

- Wie bekommt man die maximal mögliche Leistungseffizienz aus einer OLED?
- Welche Produkte und Produkttechnologien lassen sich daraus speziell im Beleuchtungssektor generieren?

Für die Steigerung der Leistungseffizienz setzen wir die Novaled-Dotierungstechnologie ein. Dies bedeutet die Beimischung von kleinen Mengen Fremdmolekülen (den Dotanden) zu den organischen Halbleitern der Schichten, welche für den Ladungstransport verantwortlich sind. Dann muss man ‚nur‘ noch die OLED-Schichtstruktur optimieren und erhält OLEDs mit minimaler Betriebsspannung (ca. 2,5 bis 4 Volt) sowie, wenn man die richtigen Emissionsmaterialien einsetzt, auch hohe Stromeffizienz und lange Lebensdauer.

Damit sind heute bereits Leistungseffizienzen bis zu 50 lm/W (weißes Licht) bzw. 130 lm/W (grün) und Lebensdauern zwischen 10.000 und 1 Million h (1–100 Jahre) möglich. Ziel ist es, für weißes Licht die Leistungseffizienz auf über 100 lm/W zu steigern mit einer Lebensdauer von mindestens 100.000 h.

Abbildung 3: Leuchte Victory der Novalied-Marke Literrity



Quelle: Novalied AG.

Diese Arbeit involviert im Wesentlichen Chemiker, Physiker und Fertigungs-Know-how bezüglich kleiner Test-OLEDs (diese sind nur einige Quadratmillimeter groß).

Hinsichtlich Produkttechnologien arbeitet Novalied an der Integration von OLED-Stacks und -Materialien in eine für Beleuchtung relevante Umgebung, sei es auf großflächige Glassubstrate oder auf Stahlfoliensubstrate. Diese Entwicklung beinhaltet viel Know-how im Bereich des klassischen Engineering (Reinigungsprozesse, Vakuumabscheidungsprozesse, Verkapselungsprozesse), aber auch die Entwicklung neuer innovativer Ansätze zur Verteilung von großen Strömen auf große Flächen und hinsichtlich Ausbeuteerhöhung.

6 WELCHE RÜCKWIRKUNGEN GIBT ES VON NOVALED ZUR AUSGRÜNDUNGS-UNI?

Novalled hat in seiner Gründungsphase naturgemäß in vielen Bereichen sehr eng mit dem Ausgründungsinstitut der TU Dresden zusammen gearbeitet. Heute hat sich die Art der Zusammenarbeit gewandelt. Es gibt im Wesentlichen zwei Arten der Novalled-Rückwirkung auf die TU Dresden:

Zum einen hat Novalled industrietaugliche Prozesse der OLED-Präparation und OLED-Charakterisierung entwickelt, die heute der Uni wieder zugutekommen. So wird zum Beispiel von Novalled entwickelte Hardware und Software benutzt.

Zum anderen finanziert Novalled (teilweise über Förderprogramme) langfristige oder sehr forschungslastige Projekte an der TU Dresden. Es gibt noch eine erhebliche Vielzahl von unverständenen Problemen und Effekten in der OLED-Technologie, für welche die Universität die Antworten finden muss (und wegen ihrer Struktur auch besser finden kann). Das so generierte Wissen könnte auch für Novalled-interne Projekte langfristig nützlich sein.

Darüber hinaus laufen auch bei Novalled Promotionsprojekte, deren wissenschaftliche Betreuer an der TU Dresden arbeiten.

7 SCHLUSSBETRACHTUNG

Ich kann sagen, dass die Ausgründung Novalleds eine gute Entscheidung war. So einer Firma beim Wachsen zusehen zu dürfen, ihre Mitarbeiter sich weiter entwickeln zu sehen und angewandte Technologie betreiben zu können, ist eine große Freude und ein großes Abenteuer.

Novalled hat sich weiter ausgezeichnet entwickelt. Novalled-Materialien werden mittlerweile in OLED-Displays eingesetzt – ein sehr wichtiger Meilenstein auf dem Weg von einer Ausgründung zu einer profitablen und etablierten Firma. In diesem Zusammenhang standen die Eröffnungen von Büros in Tokyo und Seoul.

Als CSO (Chief Scientific Officer) kümmert sich der Autor mittlerweile um die langfristigen F&E-Projekte – hier stehen die Themen organische Photovoltaik und Elektronik mit organischen Materialien im Vordergrund.

OLEDs sind heute aus Smartphones nicht mehr wegzudenken. Ihre Lebensdauer und Leistungseffizienz reicht dafür sehr gut aus. In Asien wird außerdem intensiv an Fertigungslösungen und den notwendigen OLED-Stacks für TV-Anwendungen gearbeitet.

Im Lichtbereich sind OLED-Panels mit Leistungsdaten zwischen 15 und 40 lm/W auf dem Markt verfügbar; im Labor wurden zwischen 60 und 100 lm/W für weißes Licht erreicht. Fertigungskapazitäten werden weltweit aufgebaut.

> GEDANKEN ZUR ZUKUNFT DER ELEKTRONIK IN EUROPA

ALEX DOMMANN

Dieser Beitrag basiert auf einem Referat, das auf dem acatech Akademietag am 18. April 2011 in Dresden gehalten wurde.

Europa habe den Anschluss an die Elektronik verpasst, die Elektronik habe nur eine Zukunft in Asien und allenfalls noch im Silicon Valley in den USA. Entsprechen diese oft geäußerten pessimistischen Aussagen der Realität? Doch zunächst wollen wir der Frage nachgehen, was unter „Elektronik“ verstanden wird.

Für die meisten Bürger wird „Elektronik“ gleichgesetzt mit dem Inhalt eines Computers. Bereits dieses Beispiel zeigt jedoch, wie vielfältig Elektronik ist. Die wichtigsten Baugruppen sind sicherlich der Hauptprozessor, der Speicher, die Energieversorgung und die Ein- und Ausgabekomponenten. Hinzu kommen die vielen verschiedenen Kommunikationskomponenten und ganz unterschiedliche Software, damit der Benutzer überhaupt arbeiten kann.

Hier wird bereits klar, dass wir von „komplexen Systemen“ sprechen müssen, sobald wir von einem Produkt wie einem Computer, oder auch einem MP3-Player sprechen. Wir sind heute umgeben von Produkten mit elektronischen Komponenten: Digitalkameras, Flachbildschirmfernseher, GPS, Smartphones usw. Ebenso wichtig ist auch die Elektronik, die wir häufig gar nicht bewusst wahrnehmen, wie die Komponenten für die Telekommunikation, die Elektronik, die den Bahnverkehr sichert, den Automotor überwacht, den Aufzug steuert, die Heizzentrale regelt, die Waschmaschine steuert usw. In der Medizin werden in Zukunft immer mehr elektronische Komponenten direkt in den Körper implantiert, sei es für einen Herzschrittmacher, eine Insulinpumpe, ein Cochlea-implant, Drucksensoren für ein Magenband oder ganz allgemein zur Überwachung unseres Gesundheitszustandes im hohen Alter.

Unser Jahrhundert spricht von der „mechanischen Revolution“. Mikrosysteme und sogar Nanosysteme, sogenannte NEMS sollen unser Leben revolutionieren. Bei genauerer Betrachtung stellt man jedoch fest, dass a) die MEMS- und NEMS-Komponenten sehr stark auf Technologien basieren, die für die Elektronik entwickelt wurden, und dass b) alle diese Komponenten immer auf Elektronik und Software angewiesen sind. Das heißt also, auch die mechanische Revolution wird von der Elektronik und deren Software bestimmt.

1 DIE RELEVANZ VON MIKRO-/NANOELEKTRONIK AM BEISPIEL DES AUTOMOBILBAUS

Entwicklungen im Bereich der Elektronik sind zu einem entscheidenden Innovationstreiber in vielen Bereichen geworden. Dies betrifft vor allem auch die Industrieelektronik mit Anwendungen wie der Automobilwirtschaft, dem Anlagen- und Maschinenbau, der Medizintechnik und der Energiewirtschaft. Im Automotive-Bereich sind Elektronik und Elektrik Treiber von fast allen Innovationen. Ohne sie geht nichts mehr in einem modernen Fahrzeug – vom Komfort über die Sicherheit bis hin zu den immer wichtiger werdenden, umweltverträglicheren und alternativen Antrieben. Nun kann argumentiert werden, dass die heutigen elektronischen Komponenten kostengünstig und mit großer Leistungsfähigkeit auf dem Weltmarkt eingekauft werden können und demzufolge nicht notwendigerweise selber produziert werden müssten. Doch gerade das Beispiel des Automobilbaus widerlegt diese Annahme. Im Automobilbau sind zwei Tendenzen zu beobachten: Auf der einen Seite wird durch die alternativen Antriebstechniken die Elektronik und Elektrik immer anspruchsvoller. Elektronik und Elektrik sind deshalb zu einem entscheidenden Wettbewerbsvorteil geworden im weltweiten Kampf um Marktanteile. Aber auch im „konventionellen“ Automobilbau wird die Fahrzeugelektronik immer wichtiger und nimmt einen immer größeren Anteil an der Wertschöpfungskette ein. Assistenzsysteme, Sicherheitselektronik, Komfort und Verbrauch werden über die Elektronik gesteuert. Da immer mehr Elektronik in ein Fahrzeug gepackt werden muss, ist man gezwungen, immer näher an den Motorblock zu bauen. Dies bedeutet aber, dass die Temperaturen immer größer werden und dass keine Standardkomponenten mehr verwendet werden können. Um schnell reagieren zu können, genügt es nicht, nur Zugang zu Standardkomponenten zu haben. Je besser der Zugang zu Technologien der Elektronik, umso schneller kann man reagieren.

Es muss festgestellt werden, dass es die „Mikroelektronik/Nanoelektronik“ als einheitliche Technologie nicht gibt. Mit der stetigen Durchdringung nahezu aller Anwendungsfelder mit elektronischen Produkten wächst auch die Diversifizierung der Technologien. Diese Tendenz wird laut Aussagen von Experten weiterhin zunehmen. Elektronik wird auch in Zukunft immer mehr Bereiche durchdringen. Es bedarf deshalb der Forschung auf Gebieten wie: Materialien, Fertigungsprozesse, Bauelemente, Schaltungstechnik, Produktionstechnik und Packaging, um stabile Grundlagen zu erarbeiten für weitere Entwicklungen. Es soll an dieser Stelle auf die Publikation der acatech-Arbeitsgruppe „Nanoelektronik als zukünftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland“ hingewiesen werden.¹

Die für den Automobilbau entwickelten Technologien können auch für den Komplex der regenerativen Energien verwendet werden. Die in diesem Rahmen entwickelten Packaging-Konzepte unter schwierigen Bedingungen mit gleichzeitigen Anforderungen an die Zuverlässigkeit sind eine gute Basis auch für die Bioelektronik. Unsere Gesellschaft

¹ acatech (Hrsg.): *Nanoelektronik als zukünftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland* (acatech BEZIEHT POSITION – Nr. 8), Heidelberg: Springer Verlag 2011.

ist immer stärker darauf angewiesen, die Kosten für die medizinische Versorgung unter Kontrolle zu halten. Hier kann Technologie, und im Speziellen die Mikroelektronik wichtige Beiträge zur Kostenreduktion leisten. Ein weiterer, ganz wichtiger Themenkomplex sind die Folgen einer alternden Gesellschaft. Diese erfordert Assistenzsysteme, damit alte Menschen möglichst lange ein eigenständiges Leben führen können. Neben der Lebensqualität steht hier auch der Kostenaspekt der notwendigen Pflege im Vordergrund.

2 HERAUSFORDERUNGEN: NEUE ZIELMÄRKTE FÜR NEUE TECHNOLOGIEN

Packaging und insbesondere 3D-Packaging hat aber auch das Potenzial, in Nischenmärkten mit kleinen Stückzahlen den Wettbewerb zu revolutionieren. Gerade für den Präzisionsmaschinenbau mit den beschränkten Stückzahlen macht es wenig Sinn, komplexe ASIC's Abkürzung ausschreiben? zu entwickeln. Dank neuen Packaging-Technologien können nun kostengünstig verschiedene kommerzielle Prozessoren mit spezifischen Sensoren kombiniert werden, sodass selbst in kleinen Nischen hochwertige und leistungsfähige Elektronik zur Verfügung gestellt werden kann – wie immer natürlich vorausgesetzt, dass auch die dazugehörige Software mitentwickelt wird. Die oben genannten Beispiele verdeutlichen klar, dass wir von unterschiedlichen Technologien sprechen. Hinsichtlich der Kategorisierung ist es zielführend, diese an entstehenden neuen Zielmärkten auszurichten und nicht an Technologien.

Wie bereits diskutiert, ist die Geschichte der Mikroelektronik geprägt von der Erschließung und Etablierung neuer Märkte. Hieraus entstehen das Wachstum der gesamten Industrie und auch die Verbesserung der Kostenstrukturen. Danach müssen sich die Technologien ausrichten und danach müssen diese erforscht bzw. entwickelt werden. Eine Diskussion, die sich also an neuen Anwendungen und Märkten orientiert, wird zu besseren Resultaten führen. *Es werden auch völlig neue Anwendungen entstehen wie die Betreuung einer alternden Gesellschaft mit ihren neuen Bedürfnissen.*

Der Industriestandort Europa und damit auch derjenige Deutschlands hängt in entscheidendem Maße davon ab, wie es gelingt, leistungsfähige, energieeffiziente und zuverlässige Elektroniksysteme zu entwickeln als Grundlage für innovative, international wettbewerbsfähige Produkte. Die Frage, wie neue Innovationen geschaffen werden können, ist für ein Hochlohnland wie Deutschland, das auf freien Märkten nur mit Produkten höchster Qualität und Leistung dauerhaft wettbewerbsfähig bleiben kann von höchster Wichtigkeit.

3 RESSOURCEN IN EUROPA UND DEUTSCHLAND

Kommen wir auf die eingangs gestellte Frage zurück: Ist es wirklich zu spät für die Elektronik in Europa und damit für Deutschland und insbesondere den Standort Dresden?

Zuerst ein paar Fakten und Zahlen: Von den Top 20-Mikroelektronikunternehmen der Welt sind drei immer noch in Europa beheimatet: ST Microelectronics mit

53.000 Mitarbeitern, Infineon mit 26.500 Mitarbeitern und NXP mit 28.000 Mitarbeitern. Neben den drei Großunternehmen sind in Europa noch eine Reihe weiterer Unternehmen aktiv wie: Semikron, ARM, X-Fab, Dialog, Mikronas, EL MOS, Robert Bosch, Thales, L-Foundry, AMS, NovaLed, Plastic Logic und andere. Produktionsseitig sind Foundry-Kapazitäten in Europa vorhanden, jedoch mit Globalfoundries nur noch ein 300 mm-Hochvolumenstandort, zusätzlich X-Fab in Dresden und L-Foundry in Landshut.

In Europa gibt es drei Cluster: Crolles/Grenoble, IMEC/Leuven und das Cluster in Dresden. Das Cluster in Sachsen ist in Bezug auf Forschung breit aufgestellt, verfügt aber im Vergleich über deutlich weniger F&E-Reinraumfläche und ist eher national ausgerichtet. Sachsen ist auch einer von zehn international agierenden Mikro-/Nanoelektronik-Standorten und nimmt die führende Rolle in Europa ein. Europa hat es schwer, ist aber nicht in einer aussichtslosen Situation – besonders, wenn man auch die Forschungseinrichtungen wie Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik, LETI, IMEC, IBM, CSEM, VTT und andere berücksichtigt.

Die Universitäten in Europa zählen zu den führenden Universitäten weltweit. An unseren Universitäten und Technischen Hochschulen werden nach wie vor wertvolle neue Resultate generiert und es wird eine große Anzahl hoch motivierter Technologen und Wissenschaftler ausgebildet. Es wäre ein Jammer, wenn diese top ausgebildeten Fachkräfte in Europa keine Zukunft mehr finden könnten!

Kommen wir von der globalen Sicht auf die regionale Ebene des Freistaats Sachsen: Diese Region beschäftigt 100.000 Menschen auf hoch qualifizierten Arbeitsplätzen, die die Mikro-/Nanoelektronik auch im öffentlichen Bewusstsein repräsentieren. In Sachsen sind rund 280 Unternehmen im Branchenverband „Silicon Saxony“ organisiert. Die exzellenten Hochschulen in Sachsen und die mit ihnen verbundenen außeruniversitären Forschungseinrichtungen haben einen entscheidenden Fokus auf die Mikro-/Nanoelektronik gesetzt. Sachsen konzentriert sich auf die Verbreiterung der mikro-/nanoelektronischen Anwendungsbereiche und der speziell benötigten Technologien. Dadurch können weitaus komplexere und vielseitigere „Smart Systems“ angeboten werden, die verschiedene Funktionalitäten in einer Einheit zusammenfassen. Dresden wird sich in allen Bereichen der Wertschöpfungskette der Mikro-/Nanoelektronik von der Materialforschung über die Systementwicklung bis zur Produktion weiterentwickeln.

4 AUSBLICK

Auch in Zeiten zunehmender Globalisierung und Standortverlagerungen, auch unter den gegenwärtigen weltwirtschaftlichen Bedingungen, hat Deutschland alle Voraussetzungen dafür, erfolgreich zu bleiben. In Asien wird die Stärkung der Halbleiterindustrie gerade wegen der Hebelwirkung auf alle anderen Industriezweige als nationale Herausforderung und Aufgabe verstanden. Nehmen wir die Chancen wahr und sagen wir „Ja“ zu Elektronik in Europa, in Deutschland und in Sachsen.

> FERNZIELE DER NANOELEKTRONIK

PETER RUSSER/PAOLO LUGLI/KARL HESS/JOHANNES RUSSER/GIUSEPPE SCARPA

1 EINLEITUNG

Während der vergangenen vierzig Jahre folgte die Entwicklung der Mikroelektronik dem Moore'schen Gesetz, einem empirischen Gesetz, welches vorhersagt, dass sich die Bauelementedichte und die Leistungsfähigkeit monolithisch integrierter Siliziumschaltkreise in zeitlichen Abständen von 18 Monaten jeweils verdoppeln.¹ Während dieser vierzig Jahre verringerten sich die Strukturgrößen von Transistoren von 10 Mikrometer auf etwa 30 Nanometer. In den letzten 25 Jahren entwickelte sich die siliziumbasierte komplementäre Metalloxid-Halbleitertechnologie (CMOS) zur Mainstreamtechnologie für digitale, analoge und Mixed-Signal-Anwendungen.

Fernziele einer Technologie sind durch Überlegungen über die Entwicklung der Anforderungen an die Technologie sowie den Wunsch, neue Horizonte zu öffnen, bestimmt. Es ist erforderlich, dass Ideen existieren, die den Weg zur Erreichung der Fernziele weisen. Ein gutes Beispiel dafür ist die Erfindung der Transistoren und Integrierten Schaltungen, die zur heutigen Chip-Technologie geführt haben. Die Grundidee war, Vakuum-Röhren durch Festkörperbauelemente zu ersetzen. Die im Vergleich zur Vakuumelektronik höhere Ladungsträgerdichte im Festkörper ermöglichte die Miniaturisierung.² So erfolgreich dieses Fernziel des letzten Jahrhunderts auch erreicht wurde, so sind doch die heutigen Bauelemente der Mikroelektronik nicht in der Lage, die Elektronendichte 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 liegen 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 Feststellung „there's plenty of room at the bottom“ des großen Physikers Richard Feynman und der damit verbundenen Einladung, die Nanowelt zu erforschen und dreidimensionale Systeme höchster Leistungsfähigkeit auf Basis kleinster Strukturen zu realisieren.³

¹ Thompson/Parthasarathy 2006.

² Hess 2000.

³ Feynman 1959.

Der Trend zu immer größeren Systemen mit immer kleineren Bauelementen führt zu Anforderungen, die sich nur mit neuartigen Bauelementen, verbunden mit neuen Systemarchitekturen, bewältigen lassen werden. Als Beispiele dafür können Quantencomputer und Zellulare Automaten sowie Architekturen der Biologie angesehen werden. Diese Architekturen versprechen, entweder die hohen Elektronendichten zu ermöglichen oder sogar mit kleineren Dichten auszukommen. Im Folgenden versuchen wir, einen Überblick über diese Möglichkeiten zu geben. Darüber hinaus werden mögliche künftige Entwicklungen diskutiert, welche auf einer Kombination der Nanoelektronik mit anderen Gebieten beruhen. Der Einfluss nanostrukturierter Elektronik erstreckt sich auf viele Disziplinen, welche von Optoelektronik und Nanomechanik bis zur Biologie und Umwelttechnologie reichen. Die Bedeutung künftiger nanoelektronischer Technologien für die Technologieentwicklung im größeren Zusammenhang, wie zum Beispiel in der Informations- und Kommunikationstechnologie, der Biologie sowie der „grünen“ Energieerzeugung und Speicherung, werden diskutiert. In der neueren Literatur haben Kohlenstoff-basierte Materialien wie Kohlenstoff-Nanoröhren sowie ein- und mehrschichtiges Graphen große Beachtung gefunden. Die enorme Beweglichkeit der Elektronen in diesen Materialien sowie der interessante Umstand einer gänzlich verschwindenden effektiven Masse der Elektronen in Graphen haben Hoffnungen geweckt, diesen Werkstoff im großen Umfang in vorteilhafter Weise anzuwenden.

Die Realisierung von Elektronik auf der molekularen oder extrem nanostrukturierten Ebene stellt sehr hohe Anforderungen an Forschung und Technologie. Dabei gibt es zahlreiche Hindernisse, wie zum Beispiel Probleme elektrischer Verbindungen zu Bauelementen hoher Ladungsträgerdichte, den hohen Quantenwiderstand jedes Punktkontaktes (13 Kiloohm), Schwierigkeiten bei der elektrischen Isolation der einzelnen Schaltelemente (zum Beispiel Auftreten des Tunneleffekts bei Isolatorschichtdicken im Nanometerbereich), Probleme aufgrund des Verhältnisses des Widerstandes zwischen Ein- und Aus-Zustand 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 Wärmeabfuhr dichter Systeme, verlangt vollkommen neue Konzepte und Architekturen, wie zum Beispiel die bereits erwähnten zellularen Automaten oder Quantencomputer-Architekturen.

2 SILIZIUM NANOELEKTRONIK

Herstellungstechnologie und Entwurfstechniken von Halbleiterbauelementen haben sich innerhalb der weltweiten Halbleiterindustrie in Reaktion auf wirtschaftliche Einflussfaktoren entwickelt. Seit 1999 gibt ein industrielles Konsortium die "International Technology Roadmap for Semiconductors" (ITRS) heraus.⁴ Die Herunterskalierung von CMOS-Transistoren folgt dem Moore'schen Gesetz und verbessert in erster Linie die

⁴ ITR 2007; ITR 2008; Thielmann 2009.

Signalverarbeitung und Datenspeicherung in den sogenannten Systems-on-Chip. Dazu kommen andere funktionelle Anforderungen, wie zum Beispiel der Leistungsverbrauch. Für Anwendungen in der drahtlosen Kommunikation und Sensorik spielt das Moore'sche Gesetz keine Rolle. Es ist zu berücksichtigen, dass die Kanallängen in Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFETs) bereits unterhalb von 10 Nanometer liegen. Insofern ist es schwierig, sich vorzustellen, dass die Entwicklung der Nanoelektronik dem Moore'schen Gesetz für weitere 20 Jahre folgen wird. Seit 2005 berücksichtigt die ITRS auch Erweiterungen der CMOS-Technologien und radikal neue Lösungsansätze, welche auch neue Produktionskonzepte zur weiteren Reduktion der Kosten pro Funktion enthalten.⁵ In diesem Dokument wurden die hauptsächlichlichen Entwicklungstendenzen wie folgt kategorisiert:

- **More Moore:** Diese Entwicklungen haben die weitere Miniaturisierung von Schaltelementen mit Strukturgrößen von unterhalb 100 Nanometer bis hinunter zu den physikalischen Grenzen der CMOS-Technologie sowie die komplette Systemintegration auf dem Chip zum Ziel.
- **More than Moore:** Dieser Zweig überschreitet die Grenzen konventioneller Halbleitertechnologie und Halbleiteranwendungen und integriert verschiedene nicht-digitale Funktionalitäten unter Kombination verschiedener Typen von Chips in miniaturisierte *Systems in Package*.⁶ Diese Entwicklungen sind interdisziplinär und verbinden Nanoelektronik mit Nano-Thermomechanik und Nanobiologie.
- **Beyond CMOS:** Dieses Gebiet konzentriert sich auf innovative Bauelemente, welche auf neuartigen Prinzipien, neuartigen Materialien und neuartigen Technologien basieren.

Diese Miniaturisierungs- und Diversifizierungstendenzen sind in Abbildung 1 dargestellt. Unter der Berücksichtigung der von Seiten des Materials sowie der Bauelemente- und Systemeigenschaften gegebenen Grenzen der Siliziumtechnologie wird vermutet, dass die Siliziumtechnologie das Potenzial zur Erzielung einer *Terascale* Integration mit mehr als 10^{12} Transistoren pro Chip hat.⁷ Diese Voraussage basiert auf einem Konzept mit der Anwendung von MOSFETs mit einer Gate-Oxid-Dicke von etwa einem Nanometer, Kanaldicken von etwa drei Nanometer und einer Kanallänge von etwa 10 Nanometer.

Fazit: Obwohl die Siliziumtechnologie noch nicht an ihre physikalischen und technologischen Grenzen gestoßen ist und sie in den nächsten Jahren noch die Mainstream-technologie bleiben wird, ist ein Abflachen und eine Sättigung der Entwicklungskurve innerhalb der nächsten beiden Jahrzehnte absehbar. Wegen der mit der weiteren

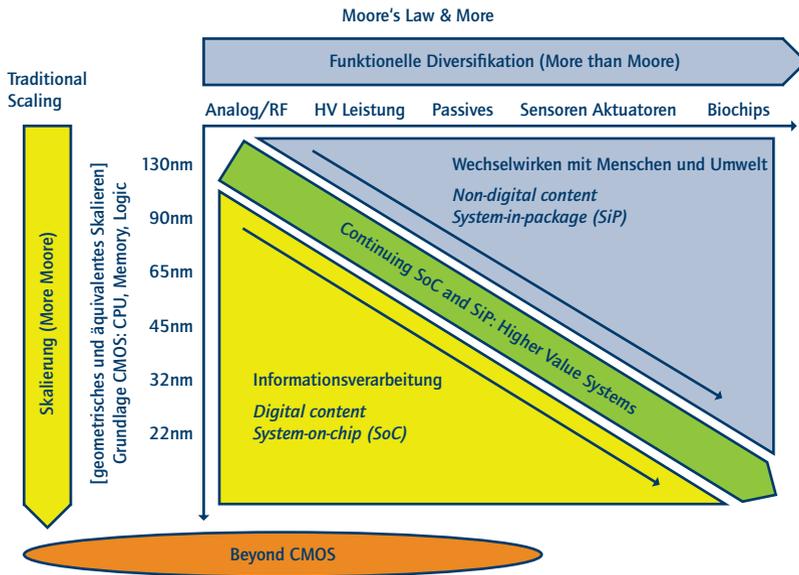
⁵ ITR 2005.

⁶ Zhang/van Roosmalen 2009.

⁷ Meindl et al. 2001.

Herunterskalierung der Bauelemente stark ansteigenden Kosten wird diese Sättigung schon vor Erreichen der physikalischen Grenzen eintreten. Die Erforschung alternativer Konzepte und die Entwicklung darauf aufbauender Technologien hat daher große Bedeutung.

Abbildung 1: Moore's Gesetze „More Moore“ und „More than Moore“⁸ veranschaulichen die hauptsächlich Entwicklungstrends bei der für verschiedene Anwendungen in der Elektronik geforderten Miniaturisierung.



Quelle: <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/2011Chapters/2011ExecSum.pdf>, S. 10, Fig. 5.

3 SiGe UND III-V-HALBLEITER

Interessante Möglichkeiten zur Überwindung der durch Silizium gesetzten Grenzen bieten diverse andere Halbleitermaterialien, wie zum Beispiel Germanium (Ge) und Halbleiter-Mischkristalle aus Elementen der dritten und der fünften Gruppe des periodischen Systems, die sogenannten III-V-Halbleiter wie unter anderem Galliumarsenid (GaAs).

Der SiGe-Heterobipolartransistor (HBT) weist gegenüber reinen Silizium-Bauelementen wesentlich verbesserte Hochfrequenzeigenschaften auf.⁹ Der SiGe-HBT basiert auf einer Doppelheterostruktur, bei welcher auf ein Si-Substrat zunächst eine etwa 100 Nanometer dicke Ge-Schicht epitaktisch aufgetragen wird und auf diese wieder eine dickere Si-Schicht. Da sich die Gitterkonstanten von Ge und Si um vier Prozent

⁸ ITR 2005.

⁹ Kasper et al. 2009.

unterscheiden, lassen sich nur dünne SiGe-Schichten zwischen den Si-Schichten einbetten, ohne dass dabei eine Störung des Kristallgitters auftritt. Abbildung 2 zeigt die Bandstruktur eines SiGe-HBTs. Durch den geringeren Bandabstand von Ge lässt sich auch bei höherer Dotierung der Basis ein guter Emitterwirkungsgrad erreichen. Das führt im Vergleich zu reinen Siliziumbauelementen zu insgesamt wesentlich verbesserten Hochfrequenzeigenschaften des SiGe-HBTs.

Abbildung 2: Bandstruktur eines SiGe-Heterostruktur-Bipolartransistors¹⁰

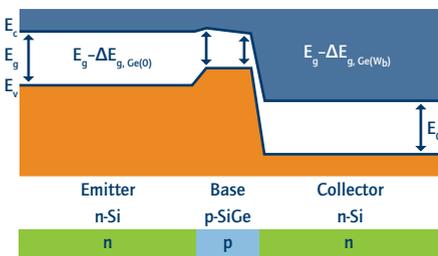


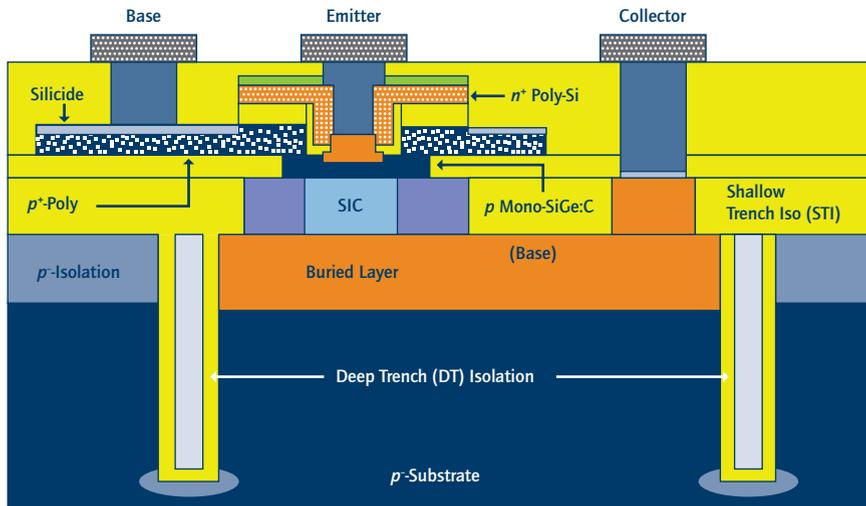
Abbildung 3 zeigt die Querschnittszeichnung eines SiGe-npn-HBTs mit selbstjustiertem (self-aligned) Kollektor und Isolation durch tiefe Gräben (Deep-Trench-Isolation).

Es ist bekannt, dass III-V-Halbleiter aufgrund ihrer großen Beweglichkeiten von Elektronen (zum Beispiel $33.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ für InAs und $80.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ für InSb) und Löchern ($1.250 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ für InSb und $850 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ für GaSb) ideale Materialien für Höchstfrequenzbauelemente sind. Die Integration von GaAs und InP auf Siliziumsubstrat wurde lange angestrebt, aber leider nie erreicht. Neue Erkenntnisse und Fortschritte im Wachstum epitaktischer Schichten bieten nun aber neue Perspektiven für diese Herausforderung. Insbesondere Sb-basierte Verbundhalbleiter haben das Potenzial, aufgrund ihrer hohen Elektronen- und Löcherbeweglichkeit als Ersatz für Silizium im CMOS-Kanal Anwendung zu finden.¹¹ Ein weiteres, sehr attraktives Material ist InAs, welches in exzellenter Materialqualität in Form von Nanodrähten direkt auf Si-Substraten gewachsen werden kann.¹² Die Hauptherausforderungen liegen dabei in der Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger High-k Gate-Dielektrika (falls MOSFETs benutzt werden) und der Realisierung defektfreier niederohmiger Kontakte sowie einer Hetero-Integration auf einem VLSI-kompatiblen Siliziumsubstrat.

¹⁰ Bild aus Kasper et al. 2009, S. 30.

¹¹ Ashley et al. 2009; Xia et al. 2011.

¹² Hertenberger et al. 2010.

Abbildung 3: Querschnittszeichnung eines SiGe-npn-Heterobipolartransistors¹³

Ähnlich wie III-V-Halbleiter bietet Germanium aufgrund seiner exzellenten Elektronen-Volumenbeweglichkeit von $3.900 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ das Potenzial, Silizium im Kanal zu ersetzen. Die Beweglichkeit von Germanium ist theoretisch fast dreimal höher als die von Silizium. Leider hat sich in realisierten Bauelementen jedoch gezeigt, dass die Güte der Germanium/Dielektrikum-Grenzschicht sehr niedrig ist und somit nur wesentlich geringere Beweglichkeiten erreicht werden können.¹⁴ Als leistungssteigernde Technik ist die Verspannungs-Technologie in Ge-basierten n-Kanal-MOSFET-Architekturen ebenfalls untersucht worden. Ihre Vorteile konnten im kleinen Maßstab unter der Verwendung von kleiner Verspannung (Strain) gezeigt werden. Problematisch ist hier jedoch, dass die geringe Sättigungs-Elektronengeschwindigkeit in Germanium die Leistungsfähigkeit von germaniumbasierten Kurzkanal-n-MOSFETs verglichen mit siliziumbasierten n-MOSFETs beschränkt.

Ein wesentlicher Parameter bei der Kontrolle der Leistungsaufnahme von CMOS-Bauelementen ist der Unterschwellspannungsleckstrom (Subthreshold Leakage). In CMOS-Bauelementen mit Gatelängen oberhalb von 0,25 Mikrometer tritt keine nennenswerte Subthreshold Leakage auf. Bei geringen Gatelängen steigt die Subthreshold Leakage hingegen mit abnehmender Gatelänge exponentiell an.¹⁵ In konventionellen MOSFETs ist die thermische Injektion von Ladungsträgern aus der Source-Wanne in den Kanal bei Raumtemperatur auf den Wert von 60 mV/dec begrenzt. Tunnel-FETs auf der Basis einer über die Gate-Elektrode gesteuerten p-i-n-Struktur sollen einen abrupten EIN/AUS-Übergang

¹³ Bild aus Kasper et al. 2009, S. 30.

¹⁴ Kuzum et al. 2011.

¹⁵ Weste/Harris 2005.

aufweisen und somit die Unterschwellensteigung unter das intrinsische Limit von MOS-FETs drücken.¹⁶ Diese Verbesserung ist mit dem quantenmechanischen Interband-Tunnel-Prozess verknüpft,¹⁷ welcher durch die Gatespannung präzise kontrolliert werden kann. Hochleistungs-Tunnel-FETs auf der Basis von Materialien mit kleinem Bandabstand wie Ge¹⁸, SiGe¹⁹ oder auf der Basis von Silizium-Nanodrähten²⁰ und Kohlenstoff-Nanoröhrchen²¹ wurden untersucht. Die Herausforderung liegt in der Integration von solchen Materialien und Strukturen auf einer State-of-the-Art Siliziumtechnologie-Plattform.²²

Einen ganz anderen Typ von Schalter kann man erhalten, wenn man die elektrostatisch kontrollierte mechanische Bewegung eines festen Leiters zwischen zwei Elektroden benutzt, um einen leitenden Pfad herzustellen.²³ Solch ein Mikro/Nano-elektromechanischer (M/NEM) Schalter hat im Vergleich zu MOSFETs zwei wesentliche Vorteile: vernachlässigbaren Leckstrom sowie vernachlässigbare Subthreshold Leakage. Dies führt zu einer wesentlichen Reduktion von statischer sowie dynamischer Leistungsaufnahme. Neueste Entwicklungen legen den Schluss nahe, dass M/NEM Schalter attraktiv für Ultra-Low Power Digital-Logik-Anwendungen sein könnten. Zusätzlich ist zu beachten, dass durch die fortgesetzte Miniaturisierung die Leistungsaufnahme verringert und naturgemäß die Integrationsdichte erhöht werden.

M/NEM Schalter können unter Verwendung von Top-Down-Designmethoden auf der Basis konventioneller Lithographietechniken auf Silizium gefertigt werden und erreichen dabei Aktuator-Zwischenräume von bis zu 15 Nanometer.²⁴ Alternativ dazu kann auch der Bottom-Up-Ansatz mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen²⁵ oder Silizium-Nanodrähten²⁶ verfolgt werden. In jedem Fall wird der Leckstrom nahezu Null werden. Der größte Schwachpunkt ist die Schaltgeschwindigkeit, da der Hebel etwa eine Nanosekunde benötigt, um sich vom AUS-Zustand in den EIN-Zustand zu bewegen. Weitere Herausforderungen stellen die Kontrolle der Oberflächenkräfte und die Zuverlässigkeit der Kontakte dar.

Fazit: Zusammenfassend lässt sich sagen, dass III-V-Halbleiter, SiGe-HBTs und Germanium-FETs als mögliche Kandidaten herangezogen werden können, um CMOS an das Ende seiner Roadmap zu führen. Ob Nanostrukturen wie Nanodrähte (siehe unten) oder ganz andere Typen von Schaltern sich als Nachfolgekandidaten entlang dieser Roadmap (oder nur in einigen Anwendungsbereichen davon) durchsetzen werden, ist noch offen.

¹⁶ Zhang et al. 2006.

¹⁷ Koswatta et al. 2009.

¹⁸ Nayfeh et al. 2008.

¹⁹ Bhuwarka et al. 2004.

²⁰ Boucart et al. 2009.

²¹ Appenzeller et al. 2004.

²² Seabaugh/Zhang 2010.

²³ Akarvardar et al. 2007.

²⁴ Jang et al. 2008.

²⁵ Fujita et al. 2007.

²⁶ Li et al. 2007.

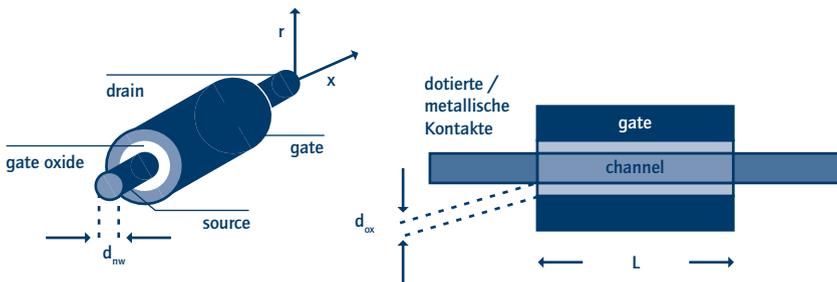
4 NANODRÄHTE

Halbleiter-Nanodrähte weisen herausragende elektrische, optische und mechanische Eigenschaften auf und sind von großem Interesse als Basismaterial für künftige nanoelektronische Bauelemente und Schaltkreise.²⁷

Feldeffekttransistoren auf der Basis von Nanodrähten sind Strukturen, in denen der MOSFET-Kanal durch einen halbleitenden Draht ersetzt wird. Es konnten Nanodrähte mit einem Durchmesser von einem halben Nanometer realisiert werden. Solche Nanodrähte können aus einer Vielzahl von Materialien hergestellt werden, wie Silizium, Germanium, verschiedenen III-V-Halbleitern (GaN, AlN, InN, GaP, InP, GaAs, InAs) sowie II-VI-Halbleitern (CdSe, ZnSe, CdS, ZnS) und auch halbleitenden Oxiden (In_2O_3 , ZnO, TiO_2).²⁸

In Abbildung 4 ist der sogenannte Nanodraht-Feldeffekttransistor (NW-FET-Nanowire Field Effect Transistor) schematisch dargestellt.²⁹ Bei dieser neuartigen MOS-(Metal Oxide Semiconductor)-Feldeffekttransistor-Struktur bildet ein Silizium-Nanodraht den Kanal, und die von dem Nanodraht durch eine Oxidschicht getrennte Gate-Elektrode umschließt den Nanodraht röhrenförmig.

Abbildung 4: Nanodraht-Feldeffekttransistor³⁰



Appenzeller beschreibt vier verschiedene Arten des NW-FETs, die sich hauptsächlich durch den Durchmesser des Nanodrahts unterscheiden.³¹ Durch Herunterskalierung des Durchmessers des Nanodrahtes wird die Steuerung des Kanals durch das Gate verbessert. Eine erheblich verbesserte Ladungsträgerinjektion vom Source-Kontakt in den Nanodraht führt im Vergleich zu planaren Feldeffekttransistoren zu einer Versteilerung der Kennlinie und höheren Strömen im EIN-Zustand. Darüber hinaus findet in hinreichend dünnen Nanodrähten eindimensionaler Ladungstransport statt. Im

²⁷ Colombo et al. 2008; Fontcuberta et al. 2008.

²⁸ Yan/Yang 2004.

²⁹ Appenzeller et al. 2008.

³⁰ Abbildung aus Appenzeller et al. 2008, S. 2829.

³¹ Appenzeller et al. 2008.

NW-FET kann sowohl streuungsbegrenzter als auch ballistischer Ladungstransport auftreten. Beim Tunnel-NW-FET erfolgt das Schalten durch ein feldgesteuertes Band-zu-Band-Tunneln. Der dabei ausgenutzte quantenmechanische Tunneleffekt führt zu sehr schnellem Schalten.

Nanodrähte können Quanteneffekte wie Quantum Confinement zeigen, zum Beispiel eindimensionalen Ladungstransport, welcher wiederum zu einer Reduktion von Kurzkanaleffekten und anderen Begrenzungen der Skalierbarkeit planarer MOSFET-Technologie führen könnte. Mit Wachstumsmechanismen auf der Basis von Vapor-Liquid-Solid-(VLS-) Abscheidungen konnte gezeigt werden, dass eine große Vielzahl von verschiedenen Nanodrähten, wie Core-Shell- und Core-Multishell-Heterostrukturen, herstellbar sind.³² Hetero-Nanodrähte aus mehreren Komponenten wurden unter der Verwendung von Elementarhalbleitern und Verbundhalbleitern sowohl in Core-Shell- wie auch in longitudinal segmentierter Konfiguration hergestellt. Die longitudinal segmentierten Nanodrähte werden epitaktisch gewachsen, sodass die Materialgrenzflächen senkrecht zur Achse des Drahtes liegen. Dies erlaubt Gitterfehlanspassungen ohne wesentliche Defekte. Vertikale Bauelemente mit befriedigenden Leistungsmerkmalen wurden so unter der Verwendung von Si, InAs und ZnO gefertigt.³³ Der geringe laterale Durchmesser der Nanodrähte erlaubt das direkte Wachstum auf nicht gitterangepassten Substraten ohne die typischen Probleme von Fehlstellen und Defekten, wie man sie vom Wachstum von Filmen kennt. So wurde zum Beispiel das System InAs in sehr guter morphologischer Qualität direkt auf Silizium gewachsen. Schaltungs- und Systemfunktionalität von Bauelementen auf der Basis von Nanodrähten, einschließlich einzelner CMOS-Logikgrundschaltungen und anderer Prototypen, wurde gezeigt.³⁴ Es muss jedoch noch viel Aufwand betrieben werden, um parasitäre Komponenten zu reduzieren und die vorhergesagten Geschwindigkeiten zu erreichen.

Auch in der Optoelektronik können Nanodrähte Einsatz finden. Mit epitaktisch gewachsenen GaAs-Nanodrähten wurden Photodetektoren realisiert.³⁵ Dabei wurden die Nanodrähte metallisch kontaktiert. Die metallischen Kontakte bildeten Schottky-Dioden. Es wurde dabei sowohl ein photoelektrischer Effekt in den Schottkykontakten als auch ein photokonduktiver Effekt im Nanodraht beobachtet. Das weist auf vielfältige Möglichkeiten zur Realisierung von Photodetektoren mit Nanodrähten hin.

Fazit: Insgesamt wird der NW-FET als aussichtsreicher Kandidat für künftige nanoelektronische Anwendungen angesehen. Er ermöglicht eine Fortsetzung der Skalierung und bietet Eigenschaften, die mit konventionellen planaren FET-Strukturen nicht erreichbar sind. Auch in anderen Gebieten (wie zum Beispiel in der Optoelektronik) wird der Einsatz von Nanodrähten als vielversprechend angesehen.

³² Xiang et al. 2006; Lu/Lieber 2007.

³³ Weber et al. 2006; Wernersson et al. 2010; NG et al. 2004.

³⁴ Lu et al. 2008; Sheriff et al. 2008.

³⁵ Thunich et al. 2009.

5 KOHLENSTOFF-BASIERTE NEUARTIGE MATERIALIEN DER NANOELEKTRONIK

Vergangenes Jahrhundert war das Jahrhundert des Siliziums. Die Verbreitung elektronischer und optoelektronischer Geräte innerhalb weiter Teile der Gesellschaft wurde maßgeblich durch den Erfolg der CMOS-Technologie ermöglicht (und folgte dabei den Vorhersagen des Moore'schen Gesetzes). Das neue Jahrhundert könnte sich als das Jahrhundert des Kohlenstoffes herausstellen. Diamant hat sehr interessante halbleitende Eigenschaften: Er ist ein hervorragender Wärmeleiter und besitzt gleichzeitig eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Leider ist es sehr schwierig, Diamant in seiner kristallinen Form als Wafer zu gewinnen. Vor zwanzig Jahren wurden Kohlenstoff-Nanoröhren bzw. Carbon Nanotubes (CNT) entdeckt. Des Weiteren gilt als eines der aussichtsreichsten Materialien für künftige nanoelektronische Bauelemente das von Andre Geim und Konstantin Novoselov 2004 erstmalig hergestellte Graphen.³⁶

5.1 CARBON NANOTUBES

Carbon Nanotubes sind zylindrische Strukturen von in einem Wabenmuster angeordneten Kohlenstoffatomen. Abbildung 5 zeigt die Strukturen einer einwandigen Carbon Nanotube. Man kann sich eine Carbon Nanotube als eine in Form eines Zylinders aufgerollte, nahtlose Graphenschicht vorstellen. Der Durchmesser einer Carbon Nanotube variiert zwischen ein und zehn Nanometer. Bisher wurden Carbon Nanotubes mit Längen von einigen Millimetern realisiert. Die quasi-eindimensionale Struktur von Carbon Nanotubes führt zu ganz besonderen Elektronentransport-Eigenschaften.³⁷ Zum Beispiel tritt in Carbon Nanotubes ein ballistischer Ladungsträgertransport bei Raumtemperatur auf, bei dem die mittleren freien Weglängen der Ladungsträger etwa 0,7 Mikrometer sein können und eine Ladungsträgerbeweglichkeit von 10.000 Quadratzentimeter pro Voltsekunde oder größer auftritt.³⁸ Neben einwandigen Carbon Nanotubes, welche aus einer einfachen Graphenschicht aufgewickelt sind, existieren auch mehrwandige Carbon Nanotubes, welche aus mehreren ineinander verschachtelten Nanoröhren bestehen.³⁹

Carbon Nanotubes sind interessante Komponenten für die weitere Miniaturisierung elektrischer Schaltungen und haben das Potenzial für zahlreiche Anwendungen in nanoelektronischen, nanoelektrischen und nanoelektromechanischen Bauelementen wie zum Beispiel Sensoren, Antennen, Feldemissionsquellen, Energie- und Datenspeicherelementen, Nanotube-Feldeffekttransistoren und vielen weiteren. Sie verfügen über ein extrem großes Elastizitätsmodul und eine sehr hohe thermische Leitfähigkeit.⁴⁰

³⁶ Novoselov et al. 2004; Geim/Novoselov 2007; Geim 2009.

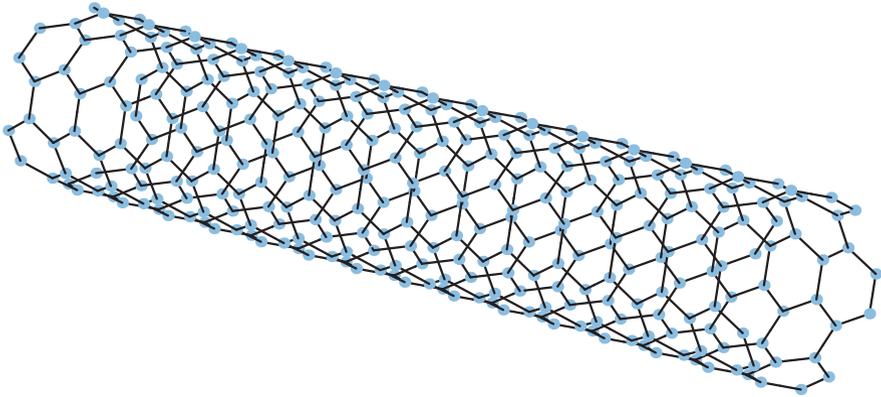
³⁷ Dekker 1999.

³⁸ Dragoman et al. 2008.

³⁹ Iijima 1991.

⁴⁰ Saito et al. 1998.

Abbildung 5: Struktur einer Carbon Nanotube



Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Synthese von Carbon Nanotubes wurden verschiedene Techniken, wie zum Beispiel die Abscheidung aus einem Entladungsbogen sowie Laserabscheidung, entwickelt.⁴¹ Die erste und immer noch am häufigsten verwendete Technik basiert auf der Abscheidung aus einer Bogenentladung, bei der hohe Ströme durch Graphitelektroden geleitet werden.⁴² Eine bessere Ausbeute bei der Herstellung und eine höhere Reinheit erzielt man durch Laserabscheidungsprozesse. Dabei wird Graphit durch einen gepulsten Laserstrahl verdampft. Der so verdampfte Kohlenstoff kondensiert auf einer gekühlten Fläche und formt Nanoröhren.⁴³ Chemische Gasphasenabscheidung (Chemical Vapor Deposition-CVD) ist eine verbreitete Methode zur Herstellung von Carbon Nanotubes und insbesondere zur Erzielung einer regelmäßigen räumlichen Anordnung von Carbon Nanotubes.⁴⁴ Bei der CVD werden die Nanotubes aus einem Prozessgas auf Katalysator-Teilchen abgeschieden. Dabei kann die Konfiguration der Carbon Nanotube-Anordnungen durch die Anordnung der Katalysatoren gesteuert werden. Die chemischen Reaktionen, die zum Aufbau der Carbon Nanotubes führen, sind bisher nicht in all ihren Details verstanden und die Herstellung von Carbon Nanotubes ist nach wie vor ein aktives Forschungsfeld.⁴⁵

Trotz intensiver Forschung haben CNTs bislang jedoch keine echte Anwendung in der Nano- und Optoelektronik gefunden. Grund dafür ist die Schwierigkeit, die Morphologie (und damit die elektrischen Eigenschaften der CNTs) verlässlich und reproduzierbar zu kontrollieren. In letzter Zeit haben sich CNT-Netzwerke als Möglichkeit herausgestellt, um CNT-basierte Systeme wettbewerbsfähig mit polymeren Halbleiterbauelementen

⁴¹ Saito et al. 1998.

⁴² Iijima 1991; Ebbesen/Ajayan 1992.

⁴³ Guo et al. 1995a; Guo et al. 1995b.

⁴⁴ Ren et al. 1998; Ishigami et al. 2008.

⁴⁵ Saito et al. 1998.

zu machen, welche großflächige kostengünstige elektronische und optoelektronische Anwendungen ermöglichen. Zudem ist ein weiteres kohlenstoffbasiertes Material auf der Bildfläche erschienen und hat viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen: Graphen, ein zweidimensionales, hexagonales Gitter aus Kohlenstoff-Atomen, welches einzigartige elektronische, optoelektronische und mechanische Eigenschaften besitzt. Es stellt daher einen sehr reizvollen Kandidaten für eine Vielzahl von Anwendungen dar, zum Beispiel in Transistoren, Sensoren, Elektroden oder Laser. Obwohl es noch zu früh ist, den Marktwert von Graphen vorherzusagen, setzen sowohl akademische und industrielle Gruppen als auch Drittmittelgeber auf einen Erfolg dieses neuartigen Nanomaterials.

Im Folgenden werden wir einige der wichtigsten Eigenschaften kohlenstoffbasierter Bauelemente diskutieren und die verbleibenden Herausforderungen kurz umreißen. Carbon Nanotube-FETs sind aufgrund ihrer hohen Ladungsträgerbeweglichkeit, der intrinsisch kleinen Strukturgrößen sowie der Möglichkeit, Kurzkanaleffekte durch eine umschließende Gate-Geometrie zu verhindern, besonders interessant. Innerhalb der letzten zwei Jahre wurden erhebliche Fortschritte bei der Herstellung und Charakterisierung von CNT-FETs gemacht.⁴⁶ Zum Beispiel konnten Transistoren realisiert werden, die bei einer Kanallänge von 15 Nanometer keine Kurzkanaleffekte zeigten und eine Steilheit von 40 Siemens für einen einzelnen Kanal besaßen. Betriebsfrequenzen von bis zu 80 GHz wurden erreicht.⁴⁷ Trotzdem verbleiben große Herausforderungen insbesondere in Bezug auf die Fähigkeiten,

- die Bandlücke und die Chiralität der Nanotubes mit einer Genauigkeit zu kontrollieren, die industriellen Ansprüchen gerecht wird,
- die Nanotubes an den gewünschten Stellen und in gewünschter Ausrichtung zu positionieren,
- das Gate Dielektrikum aufzubringen und
- elektrische Kontakte mit niedrigem Widerstand herzustellen.

5.2 ELEKTROMAGNETISCHE ANWENDUNGEN VON CARBON NANOTUBES

Carbon Nanotubes weisen interessante elektrische und elektromagnetische Eigenschaften auf. Die Leitfähigkeit einer Carbon Nanotube ist zehnfach größer als die von Kupfer. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass Carbon Nanotubes aufgrund ihres extrem kleinen Querschnitts trotz der großen Leitfähigkeit einen hohen Widerstand aufweisen. Der Elektronentransport in Carbon Nanotubes ist ballistisch, das bedeutet, die Ladungsträger können sich in den Carbon Nanotubes über relativ große Distanzen ungehindert von Streuung bewegen. Normalerweise wird die Driftbewegung der Elektronen im Halbleiter oder Metall durch Streuprozesse gebremst. Diese Streuprozesse führen zum elektrischen Widerstand des Materials. Sind die Streuprozesse sehr schwach, so tritt

⁴⁶ Ding et al. 2009; Wang et al. 2010; Franklin/Chen 2010.

⁴⁷ Nougaret et al. 2009.

ballistischer Transport auf. Die kinetische Energie der Ladungsträger nimmt nur langsam ab. Diese kinetische Leitfähigkeit drückt sich in einem zusätzlichen Induktivitätsbelag der Carbon Nanotubes aus. Ebenso tritt eine Quantenkapazität der Carbon Nanotubes auf. Diese erheblichen zusätzlichen induktiven und kapazitiven Effekte, die den geometrischen Induktivitäts- und Kapazitätsbelag wesentlich überschreiten, führen zu einer Verlangsamung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen auf den Carbon Nanotubes.⁴⁸ Dadurch kann die Wellenlänge einer sich entlang einer Carbon Nanotube ausbreitenden elektromagnetischen Welle erheblich reduziert werden. Damit ist es möglich, mit Carbon Nanotubes resonanzfähige Antennenstrukturen zu realisieren, deren Abmessungen wesentlich kleiner als die Wellenlänge sind.⁴⁹ Derartige auf Carbon Nanotubes basierende Antennen können für höchste Frequenzen vom Millimeterbereich über den fernen Infrarot-Bereich bis hinein in den optischen Bereich realisiert werden. Die Nutzenanwendung besteht darin, Antennen mit sehr geringen Abmessungen, sogenannte Nanoantennen zu realisieren und sie in nanoelektronische Schaltkreise zu integrieren. Anwendungen bestehen hier im Bereich der Interchip-Kommunikation, der Intrachip-Kommunikation, der Sensorik und im Energy-Harvesting (Energie-Ernten).⁵⁰

Drahtlose Inter-Chip-Kommunikation zwischen integrierten Schaltkreisen sowie die drahtlose Intrachip-Kommunikation auf einem integrierten Schaltkreis ist deshalb von Interesse, weil die immer größer werdenden Datenströme, welche auf integrierten Schaltkreisen fließen bzw. zwischen integrierten Schaltkreisen ausgetauscht werden, durch die Leitungsstrukturen auf integrierten Schaltkreisen immer schwieriger zu bewältigen sind. Die Integration von Antennen ist für Anwendungen in der Sensorik sowie in der Verkehrstechnik von großem Interesse, da auf diese Weise Schaltkreise direkt drahtlos senden und empfangen können und Kosten für Antennen sowie für die Verbindungstechnik zwischen Schaltkreis und Antennen eingespart werden können.⁵¹

Im Infrarotbereich, wo Sperrschichtdetektoren nicht mehr anwendbar sind, können Nanoantennen in Verbindung mit MIM-Dioden als effiziente Detektoren für Energy Harvesting-Anwendungen genutzt werden. Carbon Nanotube-Dipolantennen mit wenigen Mikrometer Länge können bereits im unteren Terahertz-Bereich verwendet werden und sind dort in Resonanz mit einfallenden elektromagnetischen Wellen, deren Wellenlänge 50- bis 100 Mal so groß wie die Länge der Dipolantennen ist.

5.3 CARBON NANOTUBE-KONDENSATOREN ZUR ENERGIESPEICHERUNG

Carbon Nanotubes können außerordentlich interessante Anwendungen in sogenannten Superkondensatoren finden, welche hohe Energiedichten speichern können.⁵² Die erzielbare Energiedichte in Superkondensatoren ist mit der Energiedichte pro Masse

⁴⁸ Burke 2002; Burke, 2003.

⁴⁹ Burke 2002; Burke 2003; Fichtner/Russer 2006; Russer/Fichtner 2010.

⁵⁰ Russer et al. 2010.

⁵¹ Russer et al. 2010; Yordanov/Russer 2010.

⁵² Becker 1957; Conway et al. 1997.

bzw. pro Volumen in Batterien vergleichbar. Superkondensatoren aus mehrwandigen Carbon Nanotubes wurden bereits realisiert.⁵³ Damit ließen sich spezifische Kapazitäten von vier bis 135 Farad pro Gramm erreichen. Das führt zu einer Energiespeicherkapazität, die um eine Größenordnung höher liegt als die der besten Batterien. Superkondensatoren können in Zukunft eine interessante Alternative zu Batterien darstellen.

5.4 CARBON NANOTUBE-TRANSISTOREN FÜR HOCHFREQUENZANWENDUNGEN

Die Möglichkeit skalierbarer Integration von Carbon Nanotubes und Carbon Nanotube-basierter Bauelemente ist ein hochaktuelles und interessantes Forschungsgebiet im Hinblick auf die Anwendung von Carbon Nanotubes. In dem Maße, in dem siliziumbasierte CMOS-Technologie ihre Grenzen erreichen wird,⁵⁴ wird die Bedeutung Carbon Nanotube-basierter logischer Schaltkreise zunehmen. Die Erzielung einer hohen Integrationsdichte von Schaltkreisen mit Carbon Nanotube-Transistoren ist gegenwärtig noch eine große Herausforderung für die Forschung, da die Probleme bei der Positionierung einzelner Carbon Nanotubes sowie größerer Anordnungen von Carbon Nanotubes noch nicht zufriedenstellend gelöst sind.⁵⁵

Erste Erfolge bei der Realisierung logischer Schaltkreise mit einzelnen Carbon Nanotubes wurden bereits erzielt.⁵⁶ Dabei wurden Feldeffekttransistoren mit einwandigen Carbon Nanotubes realisiert. Die Kanalstrecke des Feldeffekttransistors wird dabei von einer Carbon Nanotube gebildet, auf welcher eine Gate-Elektrode aus Aluminium angebracht ist.⁵⁷ Dabei wurden mit den Einzeltransistoren bereits bemerkenswerte Ergebnisse erzielt. Das für Logikanwendungen geforderte große Verhältnis des Kanalwiderstandes im ein- und ausgeschalteten Zustand war größer als 10^5 . Für Analoganwendungen ist die Linearität von Bauelementen entscheidend.⁵⁸ Es hat sich gezeigt, dass Feldeffekttransistoren, basierend auf einwandigen Carbon Nanotubes, bessere Linearitätseigenschaften haben als Transistoren auf Basis von Silizium oder der III-V Materialien Galliumarsenid und Indiumphosphid.⁵⁹ In einigen Arbeiten wurden auch elektronische Bauelemente auf der Basis von unregelmäßig verteilten Carbon Nanotubes untersucht.⁶⁰ Bei Hochfrequenzanwendungen von Carbon Nanotube-Transistoren bereiten die hohe Impedanz sowie der niedrige im eingeschalteten Zustand fließende Strom noch Schwierigkeiten.⁶¹ Durch spezielle Mehrfingeranordnungen der Gate-, Source- und Drainkontakte wurden hier bereits Grenzfrequenzen oberhalb von sieben GHz erzielt.⁶²

⁵³ Frackowiak et al. 2000.

⁵⁴ Meindl et al. 2001.

⁵⁵ Kocabas et al. 2008.

⁵⁶ Bachtold et al. 2001.

⁵⁷ Bachtold et al. 2001.

⁵⁸ Kocabas et al. 2008.

⁵⁹ Baumgartner et al. 2007.

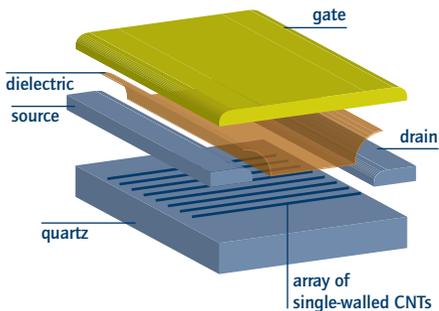
⁶⁰ Kang et al. 2007; Kocabas et al. 2007; Zhou et al. 2008; Cao/Rogers 2008; Cao et al. 2008.

⁶¹ Li et al. 2004.

⁶² Wang et al. 2007.

Hochfrequenztransistoren auf Basis regelmäßiger Anordnungen einwandiger Carbon Nanotubes, wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt, weisen geringe parasitäre Gate-Kapazitäten und eine hohe Steilheit auf.

Abbildung 6: Hochfrequenztransistor mit regelmäßig angeordneten einwandigen Carbon Nanotubes⁶³



Für künftige Anwendungen im Niedrigpreisbereich der Konsumelektronik sind auf flexible Substrate aufgebrachte Filme aus einwandigen Carbon Nanotubes von Interesse. Auf diese Weise lassen sich durch Drucktechniken Dünnschichttransistoren auf unterschiedlichen Trägern kostengünstig herstellen. Dabei können sogar heterogene dreidimensionale integrierte Systeme realisiert werden. Integrierte Medium-Scale-Schaltkreise auf CNT-Dünnschichtbasis verwenden ein unregelmäßiges Netzwerk einwandiger Carbon Nanotubes. Es lassen sich damit flexible integrierte Schaltkreise für Anwendungen in der Konsumelektronik realisieren.

5.5 CARBON NANOTUBES IN FELDEMISSIONSBAUELEMENTEN

Elektronen emittierende Bauelemente haben vielfältige Anwendungen in Flachbildschirmen, Lampen, Röntgenquellen, aber auch im Bereich der Elektronenmikroskopie. Derartige Bauelemente der Vakuumelektronik verwenden heute noch Wolfram-Glühkathoden und benötigen Ultrahochvakuumbedingungen und hohe Spannungen. Eine Alternative dazu können Elektronenquellen auf der Basis feldemittierender nanostrukturierter Spitzen bilden.⁶⁴ Carbon Nanotubes ermöglichen die Realisierung nanostrukturierter Feldemissionsbauelemente. Eine Hochintensitäts-Elektronenkanone auf Basis der Feldemission aus einem Film mit regelmäßig angeordneten Carbon Nanotubes wurde in der Literatur bereits beschrieben. Eine Elektronenkanone, bestehend aus einem Carbon Nanotube-Film und einem in 20 Mikrometer darüber angeordneten

⁶³ Kocabas et al. 2008, S. 1406.

⁶⁴ Heer et al. 1995.

Gitter von einem Millimeter Durchmesser erreichte Feldemissionsstärken von 0,1 Milliampère pro Quadratcentimeter bei angelegten Spannungen von nur 200 Volt. Eine solche Elektronenkanone auf der Basis von Carbon Nanotubes hat eine Dicke von nur 0,2 Millimeter, ist leicht und mit geringen Kosten herzustellen sowie über lange Zeit zuverlässig. Stromdichten von vier Ampère pro Quadratcentimeter sind nach Stand der Literatur erreichbar.⁶⁵ Daraus lässt sich auf die Realisierbarkeit von Kathoden mit sehr hoher Emissionsstromdichte für Wanderwellenröhren zur Leistungsverstärkung von Mikrowellen schließen.⁶⁶

5.6 GRAPHEN

Graphen besteht aus einer einzigen Lage von Kohlenstoffatomen. Dabei sind die Kohlenstoffatome, wie Abbildung 7 zeigt, in einer wabenförmigen monoatomaren Schicht angeordnet. Graphen ist das dünnste und festeste bekannte Material und weist eine hervorragende Kristallqualität und herausragende elektronische Eigenschaften auf.⁶⁷ Die Elektron-Phonon-Streuung in Graphen ist so schwach, dass bei Zimmertemperatur Elektronenbeweglichkeiten von bis zu $200.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ auftreten können.⁶⁸ Wenn Gitterstörungen vermieden werden, treten diese hohen Elektronenbeweglichkeiten über den technologisch relevanten Bereich von Ladungsträgerkonzentrationen auf.

Die für das Hochfrequenzverhalten entscheidende Sättigungs-Driftgeschwindigkeit ist sechs- bis siebenmal so groß wie die in Silizium-MOSFETs.⁶⁹ Diese Eigenschaften machen Graphenschichten zu einem interessanten Basismaterial für Feldeffekttransistoren mit Betriebsfrequenzen bis in den Millimeterwellenbereich und darüber hinaus. Bei der Herstellung von Graphenschichten sind in letzter Zeit wesentliche Fortschritte erzielt worden. Graphen wurde bereits auf zwei-Zoll Siliziumkarbid-Substraten aufgewachsen. Graphenschichten großer Ausdehnung wurden mit Techniken der chemischen Gasphasenabscheidung (Chemical Vapour Deposition, CVD) auf Kupfersubstraten aufgewachsen. Großflächige Graphenstrukturen werden interessante Anwendungen im Hochfrequenzbereich bis hin zu optischen Frequenzbereichen finden.

Dank seiner extrem hohen Elektronenbeweglichkeit ist Graphen ein ideales Basismaterial für Hochfrequenz-Transistoren.⁷⁰ Eine Grenzfrequenz von bis zu 200 GHz wurde erreicht.⁷¹ Um noch höhere Leistung zu erreichen, muss die Qualität der Source- und Drain-Kontakte verbessert werden, was vor allem die Top-Gate-Architektur betrifft. Erste Graphen-FETs basierten auf einzelnen, abgeschälten Graphen-Folien, die als Transistor-Kanal dienten. Solche Bauelemente bieten zwar die höchste Ladungsträgerbeweglichkeit, sind jedoch

⁶⁵ Baughman et al. 2002.

⁶⁶ Han et al. 2004.

⁶⁷ Novoselov et al. 2005.

⁶⁸ Morozov et al. 2008.

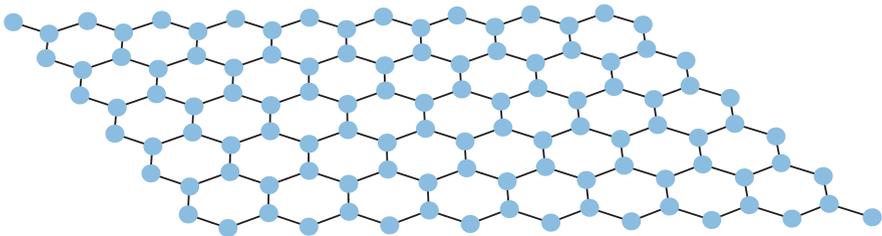
⁶⁹ Perebeinos et al. 2005; Moon et al. 2009; Moon et al. 2010.

⁷⁰ Liao et al. 2010; Waldmann et al. 2011; Meric et al. 2008.

⁷¹ Li et al. 2009.

nur sehr mühsam herzustellen.⁷² Neuerdings gelang die Herstellung von Graphen sowohl durch epitaktisches Aufwachsen auf SiC-Substraten als auch durch CVD-Abscheidung auf Kupfer-Folien.⁷³ Back-gated Graphen-Transistoren mit SiO₂ als Gate-Dielektrikum haben typischerweise Raumtemperatur-Feld-Effekt-Beweglichkeiten von ungefähr 10.000 cm²/Vs.⁷⁴ Frei hängendes Graphen oder Graphenschichten auf chemisch inerten Substraten, wie zum Beispiel Bornitrid, können Beweglichkeiten von bis zu 100.000 cm²/Vs bei Raumtemperatur erreichen.⁷⁵ Top-Gate-Bauelemente besitzen nur geringere Beweglichkeiten, wahrscheinlich aufgrund von Verschlechterungen der Kanaleigenschaften durch die Aufbringung des Gate-Dielektrikums.⁷⁶ Aufgrund der ungewöhnlichen Bandstruktur von Graphen besitzen Löcher und Elektronen ähnliche Beweglichkeiten. Zusätzlich zeigen zumindest größere Graphenschichten keine Bandlücke. Hieraus ergibt sich ein bipolares Transportverhalten, was sehr geringe EIN/AUS -Verhältnisse zur Folge hat. Dies stellt selbstverständlich eine schwer wiegende Einschränkung für digitale Anwendungen dar. Verschiedene Methoden, um eine Bandlücke zu öffnen, wurden vorgeschlagen, zum Beispiel durch die Verwendung von Graphen-Nanobändern (Nanoribbons).⁷⁷

Abbildung 7: Struktur des Graphens



5.7 GRAPHEN-TRANSISTOREN

Ein Dual Gate-Feldeffekttransistor mit 350 Nanometer Gatelänge und einer Grenzfrequenz von 50 GHz wurde in der Literatur beschrieben.⁷⁸ Abbildung 8 zeigt die Bauelementstruktur. Die Grenzfrequenz übertrifft die von Silizium MOSFETs mit der gleichen Gatelänge. Die monoatomare Graphenschicht mit einer Ladungsträgerbeweglichkeit von 2.700 Quadratzentimeter pro Voltsekunde wurde in diesem Fall durch

⁷² Lemme et al. 2007.

⁷³ Kedzierski et al. 2008; Bae et al. 2010.

⁷⁴ Novoselov et al. 2004.

⁷⁵ Du et al. 2008; Dean et al. 2010.

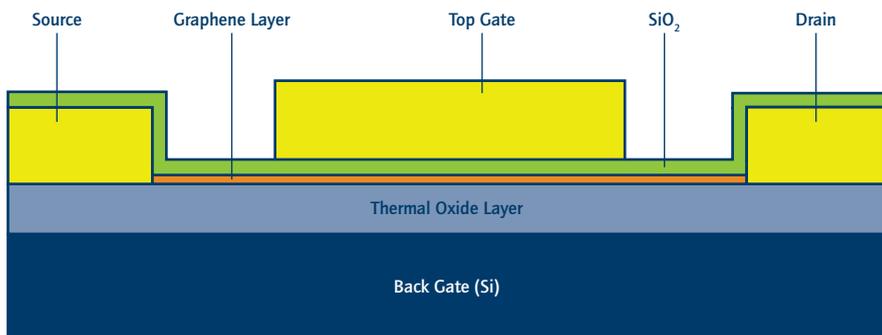
⁷⁶ Li et al. 2010.

⁷⁷ Li et al. 2008.

⁷⁸ Lin et al. 2009.

mechanische Abschieferung auf hochohmigem Siliziumsubstrat realisiert. Das Siliziumsubstrat war mit einer thermisch aufgewachsenen Oxidschicht von 300 Nanometer Dicke beschichtet. Durch Atomic Layer Deposition (ALD) wurde eine Aluminiumoxid-Silizium-Diode auf das obere Gate-Dielektrikum abgeschieden. Source- und Drain-Elektroden wurden aus Palladium und Gold hergestellt, wobei Elektronenstrahl-Lithographie und ein Lift-Off-Prozess verwendet wurden.

Abbildung 8: Schematische Darstellung eines Dual-Gate Graphen-Feldeffekttransistors mit 350 Nanometer Gatelänge und einer Grenzfrequenz $f_T=50$ GHz⁷⁹



Des Weiteren wurde ein epitaktischer Graphen-Hochfrequenz-Feldeffekttransistor auf semiisolierendem Siliziumkarbid-Substrat realisiert.⁸⁰ Dieser Feldeffekttransistor weist eine Gatelänge von zwei Mikrometer und eine Steilheit pro Gatelängeneinheit von 148 Millisiemens pro Millimeter auf. Die gemessene Grenzfrequenz für die Stromverstärkung beträgt 4,4 GHz.

Eine Graphen-Feldeffekttransistor-Technologie im Wafer-Maßstab wurde ebenfalls in der Literatur beschrieben.⁸¹ Abbildung 10 zeigt die gemessene Common Source Strom-Spannungs-Charakteristik eines zwei mal zwölf Mikrometer-Graphen-Feldeffekttransistors. Das experimentell bestimmte Produkt der Transitfrequenz und der Gatelänge ist zehn Gigahertz mal Mikrometer.

Erwähnenswert ist auch die Möglichkeit, Graphen als transparente, extrem dünne Elektrode in optoelektronischen Bauelementen wie zum Beispiel Solarzellen einzusetzen. Das im Januar 2013 startende europäische Forschungsvorhaben "GO-NEXT" („Graphene doping and texturing in efficient electrodes for organic solar cells“) untersucht diese Möglichkeit in Kombination mit sogenannten organischen Solarzellen. Die Effizienz und

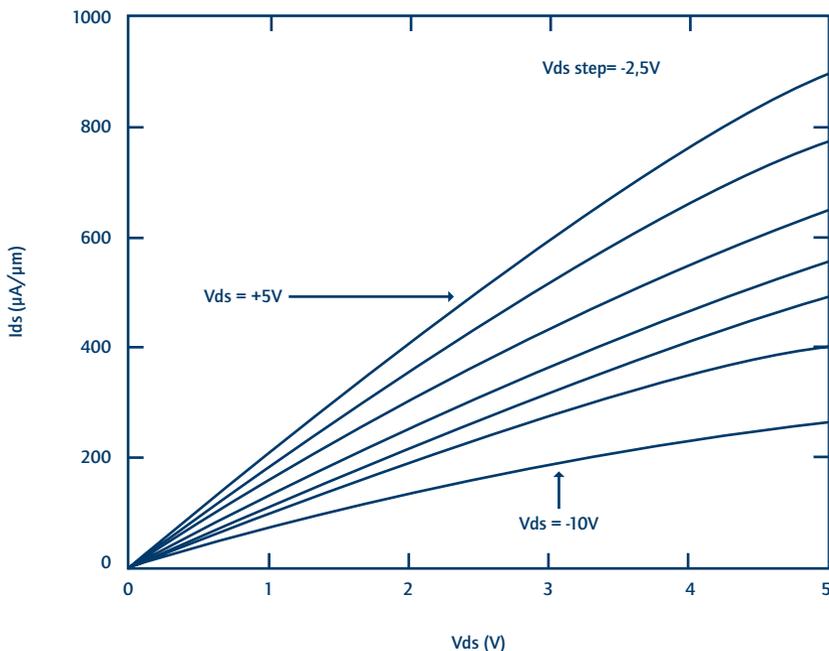
⁷⁹ Moon et al. 2010.

⁸⁰ Moon et al. 2009.

⁸¹ Moon et al. 2010.

Leistung von organischen Solarzellen („bulk-heterojunction-solar cells“, BHJ-SC) kann durch Dotierung und Strukturierung einer Graphen-Elektrode erhöht werden. Die Kombination von zwei verschiedenen Fertigungsverfahren, und zwar i) der Dotierung von Graphen, um semi-transparente Elektroden zu erhalten, und ii) der dreidimensionalen Strukturierung der Elektroden, stellt hier einen neuen Ansatz dar, der, falls realisierbar, ein großes Potenzial bietet: Im Erfolgsfall könnten Solarzellen mit einem Wirkungsgrad größer als 14 Prozent, also weit über dem, welcher mit den State-of-the-Art BHJ-SCs erzielt wird, realisiert werden. Dafür sollen Technologien zum Einsatz kommen, die für großflächige Realisierung geeignet sind und so eine skalierbare, wirtschaftliche Fertigungstechnologie auf kostengünstigen flexiblen Substraten ermöglichen. Dabei sind die Herstellung von strukturierten Graphen-Kontakten sowie von Gitterstrukturen durch Nanoimprint (siehe unten) und ihre Integration in die Bauelemente von Bedeutung.

Abbildung 10: Gemessene Strom-Spannungs-Kennlinien des Graphen-Feldeffekttransistors⁸²



Fazit: Kohlenstoffbasierte Nanomaterialien wie CNTs und Graphen werden mittelfristig eine große Rolle in der Zukunft der Nanoelektronik spielen. Die hohe Beweglichkeit der Materialien ermöglicht die Realisierung von Bauelementen für sehr hohe Frequenzen.

⁸² Moon et al. 2010, S. 2.

Inwieweit das Schaltverhalten die Realisierung leistungsfähiger digitaler Schaltkreise ermöglicht und inwieweit die kohlenstoffbasierte Technologie zu einer Alternative für die Si-CMOS-Technologie werden kann, muss sich noch herausstellen.

6 ORGANISCHE ELEKTRONIK

Auch bei der organischen Elektronik handelt es sich um kohlenstoffbasierte Materialien wie zum Beispiel Polymeren, die durch Kohlenstoff-Doppelbindungen leitfähige elektronische Strukturen aufweisen, oder sogenannten Small Molecules, die durch quasi-kristalline Anordnungen halbleitende Eigenschaften zeigen. Der Einsatz erfolgt hier auf zweierlei Art. Einerseits sollen halbleitende Polymere oder organische Moleküle als kostengünstiger Ersatz für herkömmliche Halbleiter in Anwendungen mit niedrigen Anforderungen dienen oder in unkonventionellen Anwendungsgebieten (zum Beispiel flexible Elektronik) eingesetzt werden. Andererseits können auf molekularer Ebene völlig neue Nanobau-elemente (wie molekulare Speicher) konzipiert werden. Unter den ersten Aspekt fallen Bauelemente wie zum Beispiel organische Transistoren, organische Leuchtdioden oder organische Solarzellen, während unter den zweiten funktionale Strukturen (Speicher, Schalter etc.) auf Basis einzelner strukturierter leitfähiger Moleküle fallen. Als Beispiel für den ersten Aspekt werden hier die organischen Transistoren und für den zweiten das noch weitgehend unerforschte Gebiet der molekularen Elektronik kurz skizziert.

6.1 ORGANISCHE TRANSISTOREN

Organische Dünnschicht-Transistoren (Thin Film Transistors – TFTs) sind Feldeffekttransistoren auf Basis von Polymeren mit konjugierten Doppelbindungen.⁸³ Durch die konjugierten Doppelbindungen wird die Leitfähigkeit des Polymers erreicht. TFTs können bei niedrigen Temperaturen (unterhalb 100 °C) hergestellt werden. Sie haben kritische Abmessungen im Bereich von zehn Mikrometern, können allerdings nur bis zu Frequenzen im Bereich von 100 kHz betrieben werden. Durch Verringerung der Strukturgrößen können in Zukunft möglicherweise Betriebsfrequenzen bis zehn MHz erzielt werden.

6.2 MOLEKULARE ELEKTRONIK

Ein weiterer Ansatz zur Überwindung der durch die CMOS-Technologie gegebenen Grenzen ist die Verwendung von einzelnen leitfähigen Molekülen.⁸⁴ Infolge ihrer von Natur aus geringen Größe und der Möglichkeit zur Verwendung von Selbstorganisation im Bereich der Herstellung können gezielt strukturierte leitfähige Moleküle eine Alternative zu Silizium-Nanostrukturen in nicht-flüchtigen Speichern, Dioden oder Schaltern sein.⁸⁵ Tatsächlich können einzelne Moleküle bei richtiger Funktionalisierung nichtlineare elektrische

⁸³ Klauk 2010.

⁸⁴ Song et al. 2010; Song et al. 2011.

⁸⁵ James et al. 2003; Lau et al. 2004.

Eigenschaften und in manchen Fällen ein Hystereseverhalten zeigen.⁸⁶ In einem molekularen Speicher werden durch das Anlegen einer äußeren Spannung Daten gespeichert, die das Molekül in einen von zwei möglichen leitenden Zuständen versetzen. Ausgelesen werden die Daten durch das Messen der Widerstandsänderung in der molekularen Zelle. Das Konzept bietet die Möglichkeit extremer Skalierung. Im Prinzip kann ein Bit auf der Fläche eines einzelnen Moleküls gespeichert werden. Die Speicherzelle kann also Abmessungen von nur wenigen Nanometern aufweisen. Rechnen mit Molekülen als Schaltkreiskomponenten ist ein aufregendes Konzept mit mehreren Vorteilen gegenüber Konzepten auf Basis konventioneller Schaltkreiselemente. Durch die geringe Größe molekularer Speicherzellen ist die Herstellung von Schaltkreisen mit sehr hoher Speicherdichte möglich. Dabei könnte Bottom-Up-Selbstorganisation von komplexen Molekülen angewendet werden. Allerdings bestehen noch große Herausforderungen zur Erreichung dieses Ziels. Zuerst sind die Grundlagen molekularer Leitung und molekularer Schaltungsmechanismen noch nicht vollständig verstanden. Zum anderen müssen geeignete Konzepte für eine Verbindungstechnik entwickelt werden. Außerdem können parasitäre Effekte durch Umgebungseinflüsse auftreten, welche die Transporteigenschaften eines molekularen Bauelements beeinflussen würden. Trotz aller Schwierigkeiten wurden bereits Prototypen von molekularen Speichern mit erstaunlicher Beständigkeit und Reproduzierbarkeit hergestellt.⁸⁷ Auf der Architekturebene wurden molekulare Quantenzellen-Automaten (Molecular Quantum Cellular Automata – QCA) und Crossbar-Strukturen untersucht.⁸⁸

Ein europäisches Forschungsvorhaben, das in den oben genannten Fachgebieten angesiedelt ist, ist das Projekt „CONTEST“ (Collaborative Network for Training in Electronic Skin Technology), das im Januar 2013 beginnt. Das Vorhaben lässt sich so zusammenfassen: Künftige elektronische Systeme werden biegsam und anpassungsfähig sein. Sie werden tragbar sein, oft zur einmaligen Benutzung, und allgegenwärtig. Ein Aspekt der flexiblen Elektronik ist deren Anwendung als elektronisch erweiterte intelligente Haut (Electronically-Enhanced Smart Skin). Lösungsansätze basierend auf Silizium- und organischen Materialien sollen untersucht werden und die Vorteile beider Systeme vereinen. Das Forschungsinteresse gilt hier insbesondere i) multifunktionaler Elektronik, ii) biegsamer und dehnbarer elektronischer Systeme, die sich über große Flächen erstrecken, und iii) der Integration von Komponenten basierend auf organischen und anorganischen Materialien auf dem gleichen Substrat. Elektronische Haut ermöglicht es, „Kontaktinformationen“ auf großen Flächen gleichzeitig zu sammeln und die kognitiven Fähigkeiten von Robotern zu erweitern. Komplementäre Kompetenzen in flexibler Elektronik, Sensorik, Systemintegration und Robotik sind hierbei gefragt, etwa im Zusammenhang mit Bauelementmodellierung, elektronischen Bauelementen basierend organischen Halbleitern, sowie bezüglich Sensoren und Schaltungen.

⁸⁶ Green et al. 2007.

⁸⁷ Pro et al. 2009; Lortscher et al. 2006.

⁸⁸ Csaba/Lugli 2009; Lent et al. 2003.

Fazit: Organische Materialien auch in Kombination mit herkömmlichen Halbleitern sind schon auf dem Markt vertreten (zum Beispiel OLED-Displays) und werden sicherlich in der Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen, insbesondere dort, wo Aspekte wie Multifunktionalität und Kosten eine zentrale Rolle spielen. Das faszinierende Gebiet der Elektronik mit einzelnen Molekülen ist noch in einem frühen Stadium der Forschung.

7 MEMRISTIVE BAUELEMENTE

Der „Memristor“ (Abkürzung für „Memory Resistor“) ist das vierte elementare elektrische Schaltelement neben dem Widerstand, der Induktivität und der Kapazität. Der Memristor wurde bereits 1971 von Leon Chua aus Gründen der formalen Vollständigkeit der Schaltungstheorie vorgeschlagen.⁸⁹ Der Memristor verknüpft die elektrische Ladung direkt mit dem magnetischen Fluss und weist insofern bezüglich der Relation von Strom und Spannung hysteretische Eigenschaften auf. Erst viel später wurden Memristor-Bauelemente realisiert, die in einer Cross Bar-Architektur eingebettet sind.⁹⁰

In jüngster Zeit ist das Interesse an Bauteilen mit hysteretischen Eigenschaften im Kontext von nicht-volatilen Datenspeichern aufgekommen. Eine mögliche Memristor-Struktur kann durch einen Polymerfilm, der zwischen zwei Metallelektroden eingebettet ist, realisiert werden.⁹¹ Eine derartige Materialkombination wäre für die kostengünstige Herstellung von Memristor-Strukturen besonders geeignet. Obwohl Polymer-basierte memresistive Speicheranordnungen, inklusive eines dreidimensionalen Stapels mit drei aktiven Schichten, bereits demonstriert wurden, ist der Speichermechanismus weiterhin unklar.⁹² Einige Forscher vermuten, dass die Widerstandsänderungen in diesen Memristor-Zellen durch intrinsische molekulare Mechanismen, Ladungseinfang oder Redox/ionische Mechanismen verursacht werden.⁹³

Der Memristor ist im Wesentlichen ein nichtlinearer Widerstand, dessen Widerstandswert von der Vorgeschichte des Stroms, der durch den Memristor geflossen ist, abhängt. Der Memristor wird sowohl durch den Strom als auch durch die Zeitdauer des angelegten Stromes gesteuert. Dabei tritt ein nicht-flüchtiger Speichereffekt auf. Das macht den Memristor für die Anwendung in Speicherelementen außerordentlich attraktiv.

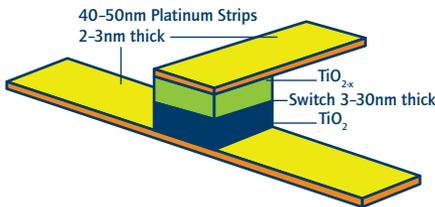
⁸⁹ Chua 1971.

⁹⁰ Strukov et al. 2008.

⁹¹ Scott/Bozano 2007; Heremans et al. 2011.

⁹² Song et al. 2010.

⁹³ Lee et al. 2010.

Abbildung 12: Memristor-Schalter⁹⁴

Im Jahr 2008 demonstrierte eine Forschungsgruppe bei HP Labs in Palo Alto die Realisierung eines Memristors.⁹⁵ Auf Basis eines einfachen analytischen Modells wurde gezeigt, dass der Memristor-Effekt in nanostrukturierten Bauelementen auftreten kann, wenn in Halbleitermaterialien elektronischer und ionischer Ladungstransport gekoppelt werden. Abbildung 12 zeigt die schematische Darstellung des von Dmitri B. Strukov et al. entwickelten Memristor-Schalters. Der Memristor besteht aus zwei Lagen von Titan-Dioxid unterschiedlichen spezifischen Widerstands, welche mit Elektroden kontaktiert sind. Eine der beiden Titan-Dioxid-Schichten weist das ideale atomare Mischungsverhältnis von 2:1 auf und ist daher ein Isolator. Die obere Titan-Dioxid-Schicht weist einen Defekt von 0,5 Prozent des Sauerstoffgehalts auf und ist deshalb metallisch und leitfähig. Wenn ein elektrischer Strom durch das Bauelement fließt, verschiebt sich die Grenze zwischen den beiden Lagen und der Nettowiderstand verändert sich. Ein derartiger Memristor-Schalter wurde bereits in einer Kreuzschienenarchitektur realisiert.⁹⁶ Moleküle mit einer Hysterese in der Stromspannungscharakteristik verhalten sich auch wie Memristor-Bauelemente und können grundsätzlich in nicht-flüchtigen Speichern angewendet werden. Speicher auf molekularer Basis mit Kreuzschienenarchitektur wurden von Csaba und Lugli⁹⁷ untersucht.

Eine andere Art von Speicherelementen ist der sogenannte Atomic Switch, der im Prinzip einen elektrochemischen Schalter darstellt, dessen Funktion auf der Diffusion von Metall-Kationen und der dadurch erfolgten Schaltung eines metallischen Pfades durch Reduktions- bzw. Oxidationsprozesse beruht.⁹⁸ Die Metallatome werden dabei von einer Elektrode in reversibler Weise in das ionische, leitfähige Material abgegeben bzw. dem Material wieder entzogen. Der Atomic Switch wurde ursprünglich als ein Zweipol-Element entwickelt, wobei Sulfidmaterialien in eine Cross Bar-Architektur eingebettet wurden.⁹⁹ Die Speicherzellen konnten bis zu 20 Nanometer herunterskaliert werden. Ein Atomic Switch wurde unter Benützung von CMOS-kompatiblen Materialien entwickelt,

⁹⁴ Strukov et al. 2008.

⁹⁵ Strukov et al. 2008.

⁹⁶ Williams 2008.

⁹⁷ Csaba/Lugli 2009.

⁹⁸ Waser/Aono 2007.

⁹⁹ Sakamoto et al. 2003.

um die Einbettung solcher Bauteile in Metallschichten von CMOS-Bauteilen zu ermöglichen. Diese Konfiguration ermöglichte die Entwicklung einer neuen Art von programmierbaren Logik-Bauteilen.¹⁰⁰

Dreipol-Bauelemente des Atomic Switch, die sich durch ihr hohes EIN/AUS-Verhältnis, ihren niedrigen EIN-Widerstand, ihre Nichtvolatilität und ihren niedrigen Leistungsverbrauch auszeichneten, wurden ebenfalls bereits demonstriert.¹⁰¹ Einige Operationsmechanismen wurden vorgeschlagen, bei welchen eine gategesteuerte Formation und Annihilation eines Metall-Filaments und gategesteuerte Nukleation von Metallclustern auftreten. Allerdings wurde bis jetzt kein befriedigendes Verständnis der experimentell untersuchten Prozesse erzielt. Die Schaltzeit, die Zuverlässigkeit und die Bauelementetoleranz sind noch verbesserungsbedürftig, bevor an technische Anwendungen gedacht werden kann.¹⁰²

In einer Vielzahl von Materialien kann Ionen-Migration in Kombination mit Redox-Prozessen eine Veränderung im Widerstand von Metall-Isolator-Metall-Strukturen verursachen.¹⁰³ Insbesondere bei Silberelektroden können Ag^+ -Kationen in Gegenwart einer angelegten Spannung durch den Isolator driften, wodurch ein hochleitfähiges Filament gebildet wird, welches mit der Metallelektrode in dem EIN-Zustand der Zelle verbunden ist. Wenn die angelegte Spannung umgepolt wird, findet eine elektrochemische Dissolution von diesen Filamenten statt, wodurch das System in den hochresistiven AUS-Zustand übergeht.¹⁰⁴ Im Fall von Übergangsmetallen wie beispielsweise TiO_2 ist die Bewegung von Sauerstoffleerstellen für die Änderung des Zellenwiderstandes verantwortlich.

In einer dritten Klasse von Materialien führt eine vom Strom hervorgerufene Temperaturerhöhung über einen unipolaren thermochemischen Mechanismus zu einer stöchiometrischen Veränderung. In einigen Fällen ist ein Formationsprozess erforderlich, bevor die bistabile Schaltung gestartet werden kann. Da die Leitfähigkeit oftmals auf die Faserstruktur des Materials zurückzuführen ist, können Speicher, die auf diesem bistabilen Schaltungsprozess basieren, auf sehr kleine Dimensionen herunterskaliert werden. Die Schaltgeschwindigkeit ist durch den eher langsamen Ionentransport begrenzt. Deshalb muss der Abstand der Elektroden auf wenige Nanometer begrenzt werden. Obwohl die mikroskopischen Effekte des Schaltungsprozesses im Detail noch verstanden werden müssen, sind derzeitige experimentelle Demonstrationen bezüglich Skalierbarkeit, Aufrechterhaltung und Laufzeit angeregt.¹⁰⁵ Vom Standpunkt des Aufbaus könnten memresistive Bauteile mit Zweipol-Auswahlelementen gekoppelt werden, um passive Speichermatrizen (Cross Bars) zu bilden.¹⁰⁶ Die allgemeinen Anforderungen für solche

¹⁰⁰ Kaeriyama et al. 2005.

¹⁰¹ Sakamoto et al. 2010.

¹⁰² Valov et al. 2011.

¹⁰³ Wasser et al. 2009.

¹⁰⁴ Akinaga/Shima 2010.

¹⁰⁵ Lee et al. 2011.

¹⁰⁶ Rosezin et al. 2011.

Zweipol-Schalter sind die Erzielung von für die Lese- und Schreiboperationen ausreichend hohen Strömen, sowie ein für die Speicherauswahl ausreichendes EIN/AUS-Verhältnis. Diese Spezifikationen sind herausfordernd und limitieren stark die maximale Größe einer Cross Bar-Anordnung.¹⁰⁷

Derzeit werden zwei Ansätze zu einem Zweipol-Auswahl-Schaltelement mit einem Speicherknoten verfolgt. Der erste Ansatz integriert das externe Auswahl-Bauteil in Serie mit dem Speicherelement in einer Mehrlagenstruktur. Der zweite Ansatz benutzt ein Speicherelement mit inhärent nichtlinearen Eigenschaften. Die einfachste Realisierung eines Zweipol-Auswahl-Schaltelements benutzt halbleitende Diodenstrukturen in einer Back-to-Back-Konfiguration für bipolare Speicherzellen. Alternativ könnte ein auswahl-resistives Schaltverhalten benutzt werden. Das heißt, dass das Auswahl-element auf die gleiche Art funktioniert wie das Wiederherstellungselement, wobei der Hauptunterschied darin liegt, dass es volatil sein kann. Ein mögliches Bauteil basiert auf einem Metall-Isolator-Übergang und zeichnet sich durch einen hohen Widerstand für Spannungen unter einem bestimmten Schwellwert aus. Als Beispiel wurde ein VO_2 -basiertes Bauteil als ein Auswahlbauteil für ein NiO_x RRAM-Element realisiert.¹⁰⁸ Die größte Herausforderung für ein Schaltertyp-Auswahl-Bauelement ist das Identifizieren des geeigneten Materials und des Schaltungsmechanismus, um die geforderte Zuverlässigkeit zu erreichen, die Betriebsstromdichte und das EIN/AUS-Verhältnis.

Zusätzlich zu Speichern wurde vorgeschlagen, dass Logik-Gates auch unter Benutzung von Memristoren gebaut werden können.¹⁰⁹ Außerdem wurden auf memristiven Cross-Bars basierende neuromorphische Architekturen untersucht.¹¹⁰

Fazit: Nanostrukturierte Bauelemente, in denen der elektronische mit dem ionischen Ladungstransport gekoppelt ist sowie Moleküle mit einer Hysterese in der Strom-Spannungs-Charakteristik verhalten sich memresistiv und können grundsätzlich in nichtflüchtigen Speichern angewendet werden. Erste Realisierungen sind demonstriert worden. Aber große theoretische und experimentelle Anstrengungen werden noch benötigt, um diese neuartige Technologie zu nutzen.

8 SUPRALEITENDE BAUELEMENTE

Nach der Theorie von Bardeen, Cooper und Schrieffer (BCS) wird die Supraleitung durch gepaarte Elektronen, sogenannte Cooper-Paare, hervorgerufen.¹¹¹ Dabei bilden jeweils zwei Elektronen mit entgegengesetztem Impuls und entgegengesetztem Spin ein Paar. Im Unterschied zu Einzelelektronen, welche Fermionen sind, haben die Elektronenpaare ein bosonenartiges Verhalten, welches unter anderem dazu führt, dass eine große Anzahl von Elektronenpaaren in einem gemeinsamen Grundzustand mit minimaler Energie

¹⁰⁷ Lee et al. 2007.

¹⁰⁸ Zhirnov et al. 2011.

¹⁰⁹ Xia et al. 2009.

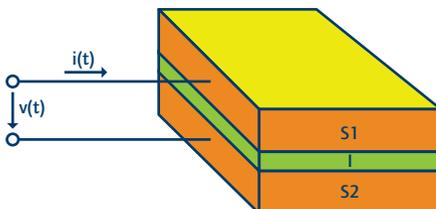
¹¹⁰ Kuzum et al. 2012; Jo et al. 2010.

¹¹¹ Bardeen et al. 1957a; Bardeen et al. 1957b.

und mit verschwindendem Gesamtimpuls kondensiert. Dieser supraleitende Grundzustand kann in einem vereinfachten Modell durch eine kohärente makroskopische Materiewellenfunktion beschrieben werden, was dazu führt, dass bestimmte Welleneigenschaften der Materie makroskopisch beobachtbar sind. Das führt zu einer Anzahl interessanter physikalischer Effekte, wovon der verschwindende Gleichstromwiderstand der bekannteste ist.¹¹² Darüber hinaus führt die Kondensation der Elektronen in einen quasi-kohärenten Zustand zu besonderen Hochfrequenzeigenschaften und zu geringem elektronischem Rauschen. Das macht Supraleiter zu interessanten Basismaterialien für elektronische Bauelemente.

Ein Josephson-Element ist eine Anordnung von zwei schwach gekoppelten Supraleitern. Abbildung 13 zeigt eine schematische Darstellung eines Josephson-Elements. Die schwache Kopplung der Supraleiter 1 und 2 wird entweder durch eine dünne Isolatorschicht von wenigen Nanometern Dicke (Abbildung 14a) oder über eine schmale leitende Brücke (Abbildung 14b) verursacht. Im Fall einer extrem dünnen Isolatorschicht können Ladungsträger aufgrund des quantenmechanischen Tunneleffektes die Isolatorschicht durchdringen. Der Josephson-Effekt beruht darauf, dass nicht nur Einzelelektronen, sondern gepaarte Elektronen, die sogenannten Cooper-Paare, tunneln können. Es kann somit über den Josephson-Übergang ein supraleitender Strom fließen. Dabei wird die Quantenkohärenz der supraleitenden Elektronenphase über den Kontakt hinweg aufrechterhalten. Der supraleitende Josephson-Strom fließt auch im Fall einer angelegten Gleichspannung. Josephson-Tunnelemente können in Dünnschichttechnik durch Aufputtern dünner metallischer Schichten auf Glas oder Halbleitersubstrate hergestellt werden.¹¹³ Die dünne Tunnelschicht wird zum Beispiel durch Oxidation aufgewachsen. Bei Brückenelementen besteht die Kopplung durch eine dünne leitende Brücke, welche eine Breite von einigen zehn Nanometern hat.

Abbildung 13: Schematische Darstellung eines Josephson-Elements

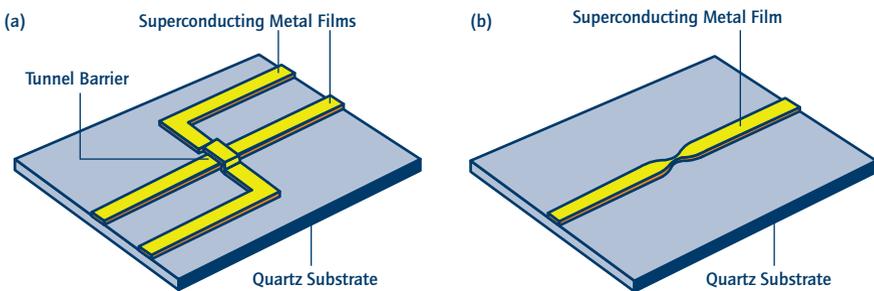


¹¹² Annett 2004; Tinkham 2004.

¹¹³ Solymar 1984.

Wird an ein Josephson-Element eine Spannung angelegt, so bewirkt diese Spannung eine zeitliche Änderung der Quantenphasendifferenz zwischen den beiden Supraleitern. Der Strom zwischen beiden Supraleitern ist proportional zum Sinus der Quantenphasendifferenz, und die zeitliche Änderungsrate der Quantenphasendifferenz ist proportional zur angelegten Spannung. Im Falle einer angelegten Gleichspannung führt das zu einem zeitproportionalen Anwachsen der Quantenphasendifferenz und dadurch zu einem über den Tunnelkontakt fließenden zeitharmonischen Wechselstrom, wobei die Frequenz gleich dem Produkt der zweifachen Elektronenladung und der angelegten Spannung, geteilt durch das Plancksche Wirkungsquantum, ist. Daraus ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor zwischen Frequenz und angelegter Spannung von 483,6 GHz pro Millivolt. Liegt an dem Josephson-Element eine zeitabhängige Spannung, so ist der Strom, welcher über das Josephson-Element fließt, eine eindeutige Funktion des Integrals der Spannung über die Zeit. Das Josephson-Element verhält sich wie eine nichtlineare verlustfreie Induktivität. Da jedoch der Strom eine periodische Funktion des Integrals der Spannung über die Zeit ist, kann bei einem Josephson-Element auch eine Gleichspannung angelegt werden, wobei Gleichstromleistung in Wechselstromleistung umgewandelt wird. Diese Eigenschaft von Josephson-Elementen führt dazu, dass Oszillatoren, Mischer, parametrische Verstärker und Detektoren bis in den Terahertz-Bereich realisiert werden können.¹¹⁴ Mischer und parametrische Verstärker können auch mit Gleichstrom gepumpt werden, das heißt das Josephson-Element wirkt bei Mischer- und parametrischen Verstärker-Anwendungen auch als lokaler Oszillator.

Abbildung 14: Josephson-Elemente: (a) Tunnелеlement, (b) leitende Brücke¹¹⁵



¹¹⁴ Russer 1972; Solymar 1984; Wang et al. 1991; Huber et al. 1995; Sato et al. 2002; Lacquaniti et al. 2005; Russer/Russer 2011.

¹¹⁵ Abbildung aus Russer/Russer 2011.

Fazit: Die Elektronen in der supraleitenden Phase im Supraleiter können in um Größenordnungen höherer Dichte als die Elektronen im Halbleiter auftreten und darüber hinaus können die Elektronen in der supraleitenden Phase auch durch eine kohärente Materiewelle beschrieben werden. Das macht den Supraleiter zu einem für künftige Entwicklungen der Elektronik außerordentlich interessanten Material. Nachteilig sind das Fehlen eines elektronisch steuerbaren Bauelements sowie die erforderlichen niedrigen Betriebstemperaturen. Für künftige Höchstleistungscomputer mit einer extremen Bauelementedichte im Rechnerkern würden jedoch niedrige Betriebstemperaturen unter Umständen ohnehin erforderlich sein.

9 NEUE KONZEPTE FÜR DIE INFORMATIONSVERARBEITUNG UND NEUARTIGE SCHALTUNGSARCHITEKTUREN

Die Herunterskalierung von CMOS-Bauelementen war während der vergangenen 40 Jahre die Grundlage für die Entwicklung der Halbleitertechnologie.¹¹⁶ Durch die Herunterskalierung der komplementären CMOS-Transistoren werden gegenwärtig Strukturgrößen unterhalb 30 Nanometer erreicht. Dabei ist es unvermeidlich, dass quantenmechanische Effekte auftreten. Effekte wie der Tunneleffekt führen zu einer grundlegenden Grenze für eine weitere Herunterskalierung traditioneller MOSFET-Architekturen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, nach neuartigen Bauelementen und neuen Architekturen Ausschau zu halten, die auch bei kleinen Abmessungen funktionieren und welche quantenmechanische Effekte ausnutzen.¹¹⁷ Dabei gehören einzelne Elektronenbauelemente zu den aussichtsreichen Bauelementen, welche bis zu atomaren Dimensionen hinunter skalierbar sind. Die Vorteile dieser Bauelemente sind insbesondere extrem niedriger Leistungsverbrauch und äußerst hohe erzielbare Integrationsdichte.

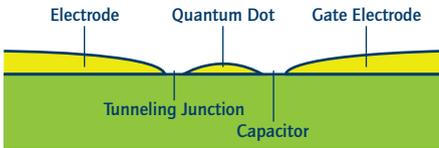
Die Kontrolle des Spins von einzelnen Elektronen sowie Atomen hat sich ebenfalls als vielversprechender neuer Weg zum Erreichen neuer elektronischer Funktionsweisen erwiesen und Logikschaltungen mittels magnetischer Materialien wurden auch realisiert. Ein noch immer schwieriges und ungewisses Forschungsfeld, aber mit hohem Potenzial, ist das Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung.

9.1 EINZELELEKTRONENBAUELEMENTE

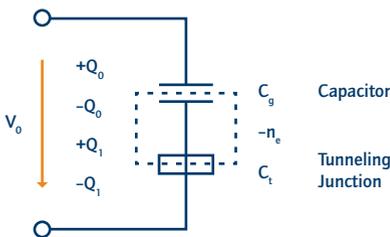
Das einfachste Einzelelektronenbauelement ist die in Abbildung 15 dargestellte sogenannte Einzelelektronen-Box, welche aus einem mit zwei Elektroden verbundenen Quantenpunkt besteht. Eine dieser beiden Elektroden ist mit dem Quantenpunkt über einen Tunnelkontakt verbunden. Die andere Elektrode ist über einen Isolator kapazitiv an den Quantenpunkt gekoppelt. Abbildung 16 zeigt das Ersatzschaltbild der Einzelelektronen-Box.

¹¹⁶ Waser 2012.

¹¹⁷ Likharev 1999.

Abbildung 15: Schematische Darstellung der Einzelelektronen-Box¹¹⁸


Wenn der Quantenpunkt hinreichend klein ist, dann ist die Ladungsenergie, welche durch den Kondensator influenziert wird, wesentlich größer als die thermische Schwankungsenergie. Daher wird kein thermisch angeregtes Elektron von und zu dem Quantenpunkt tunneln. In diesem Fall nimmt die Zahl der Elektronen auf dem Quantenpunkt einen festen Wert an. Der sogenannte Coulomb-Blockade-Effekt hindert die Elektronen am Tunneln vom oder zum Quantenpunkt. Wird nun an die Gate-Elektrode eine positive Vorspannung angelegt, so werden Elektronen zum Quantenpunkt hin angezogen. Dabei bewirkt die Coulomb-Blockade, dass das Tunneln der Elektronen nur stufenweise erfolgen kann. Das bedeutet, dass die Anzahl der Elektronen in dem Quantenpunkt sich stufenweise jeweils um 1 ändert. Die Gate-Spannung, welche für eine Änderung der Elektronenzahl benötigt wird, ist gleich dem Produkt von Gate-Kapazität und Gate-Spannung, geteilt durch die Elektronenladung.

 Abbildung 16: Äquivalente Schaltung der Einzelelektronen-Box¹¹⁹


Zur Erzielung gut lokalisierter Ladungen auf dem Quantenpunkt müssen die Quantenfluktuationen unterdrückt werden. Das wird erreicht, wenn der Quantenwiderstand des Tunnelkontaktes groß gegenüber dem Widerstand ist, welcher durch das Verhältnis des Wirkungsquantums und des Quadrats der Elektronenladung gegeben ist. Die Einzelelektronen-Box nach Abbildung 22 kann zu einem Einzelelektronentransistor erweitert werden, indem eine dritte Elektrode hinzugefügt wird, die ebenfalls einen Tunnelübergang zum Quantenpunkt aufweist. Die Hauptvorteile des

¹¹⁸ Waser 2012.

¹¹⁹ Waser 2012.

Einzelelektronentransistors liegen in der niedrigen Leistungsaufnahme und der hervorragenden Skalierbarkeit. Nachteilig ist jedoch, dass der Einzelelektronentransistor niedrige Betriebstemperaturen erfordert. Um einen Einzelelektronentransistor bei Zimmertemperatur zu betreiben, müssen die Abmessungen des Quantenpunkts unterhalb von zehn Nanometer liegen. Das ist technologisch schwierig zu realisieren, insbesondere wenn bei hochintegrierten Schaltungen viele Quantenpunkte mit großer Genauigkeit hergestellt werden sollen. Darüber hinaus begrenzt die hohe Impedanz dieser Bauelemente die Betriebsfrequenz. Die Zeitkonstante für die Ladung einer Verbindungsleitung von 100 Mikrometer Länge durch einen 100 kW-Widerstand liegt in der Größenordnung einer Nanosekunde. Es dürfte daher schwierig sein, für Schaltkreisarchitekturen auf der Basis von Einzelelektronentransistoren hohe Taktraten zu erreichen.¹²⁰

Auch wenn man davon ausgehen kann, dass Einzelelektronentransistoren in Zukunft nicht in der Lage sein werden, CMOS-Transistoren vollständig zu ersetzen, wird es einige interessante Anwendungsfelder für Einzelelektronentransistoren geben; zum Beispiel könnten sich Detektoren für elektromagnetische Strahlung auf Basis des Photonenunterstützten Tunneleffektes realisieren lassen.¹²¹ Einzelelektronentransistoren könnten interessante Bauelemente zur Auslesung von Quantenbits für Anwendungen im Bereich von Quantum Information Processing und Quantum Computing werden.¹²²

9.2 MAGNETISCHE KOMPONENTEN

Elektronische Systeme, die das Speichern und Verarbeiten von Daten kombinieren, können auf Basis von magnetischen Strukturen realisiert werden. Magnetische Speicher mit direktem Zugriff (Random Access Memories - RAMs)¹²³ sind eine ausgereifte Technologie, auf deren Basis schon einige Produkte auf dem Markt sind. Dass es möglich ist, Logikschaltungen mittels magnetischer Nanostrukturen herzustellen, wurde bereits auf Prototyp-Niveau bewiesen. Dabei wurde eine neuartige, auf Feldkopplung basierende Architektur (auch „Magnetic Quantum Cellular Automata“, MQCA genannt) verwendet,¹²⁴ in der eine räumliche Ausrichtung der Nanomagnete zur Herstellung von logischen Blöcken und kompletten Schaltungen verwendet werden kann. Nachfolgend werden kurz einige der vorgeschlagenen magnetischen Komponenten beschrieben.

In nanomagnetischen Bauteilen können binäre Informationen durch den Magnetisierungszustand gespeichert werden. Feldwechselwirkungen zwischen angrenzenden benachbarten Nanomagneten können verwendet werden, um Boolesche Operationen auszuführen.¹²⁵ Dass eine solche voll funktionale Logikschaltung basierend auf

¹²⁰ Likharev 1999.

¹²¹ Likharev 1999.

¹²² Aassime et al. 2001.

¹²³ Sugahara/Nitta 2010.

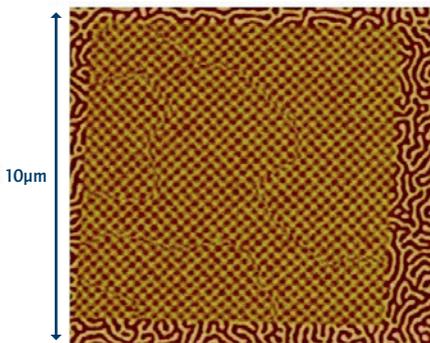
¹²⁴ Orlov et al. 2008.

¹²⁵ Imre et al. 2006.

Nanomagneten möglich ist, wurde demonstriert.¹²⁶ Zusätzlich haben nanomagnetische Bauteile ein nichtlineares Antwortverhalten; die Ausgabe eines Bauteils kann ein weiteres antreiben, Leistungsverstärkung tritt auf und es kann ein gerichteter Datenfluss erreicht werden. Nanomagnetische Logik (NML) hat aus diesem Grund ein großes Potenzial für Anwendungen im Niedrigenergie-Bereich. Ein Taktgeber moduliert die Energiebarrieren zwischen den Magnetisierungszuständen in einem solchen NML-Schaltkreis. Kürzlich wurden experimentelle Beispiele von einzelnen Inseln mit wechselnder Magnetisierung sowie der Re-Initialisierung von NML-Linien als auch von Gates mit CMOS-kompatiblen Taktgeberstrukturen präsentiert.¹²⁷ Zudem scheint NML bis zur ultimativen Grenze der einzelnen Spins der Atome herunterskalierbar zu sein. Ob ein solcher Schaltkreis verlässliches und bestimmbares Schaltverhalten zeigt oder nicht, ist von der Art der Taktgebung abhängig und benötigt weitere Untersuchungen.

Als mögliche Nachfolger von CMOS-Speicherbausteinen werden gegenwärtig auch in Kreuzschienenstrukturen angeordnete hysteretische Materialien untersucht. Durch ihre regelmäßige Geometrie und die Möglichkeit der Erzielung hoher Bauelementedichten bieten nanoskalierte Kreuzschienenstrukturen die Möglichkeit, die Begrenzungen der CMOS-Roadmap zu überwinden.¹²⁸

Abbildung 18: Bild Schachbrettmuster des hoch geordneten demagnetisierten Zustandes¹²⁹



Ferromagnetische Punkte können zur Datenspeicherung verwendet werden. Darüber hinaus kann die dipolare Kopplung zwischen ferromagnetischen Eindomänen-Punkten zur Ausführung logischer Operationen ausgenutzt werden. Die Herstellung von Ionenstrahl-strukturierten Kobalt-Platin-Mehrschichtstrukturen wurde so durchgeführt, dass

¹²⁶ Varga et al. 2010.

¹²⁷ Alam et al. 2010.

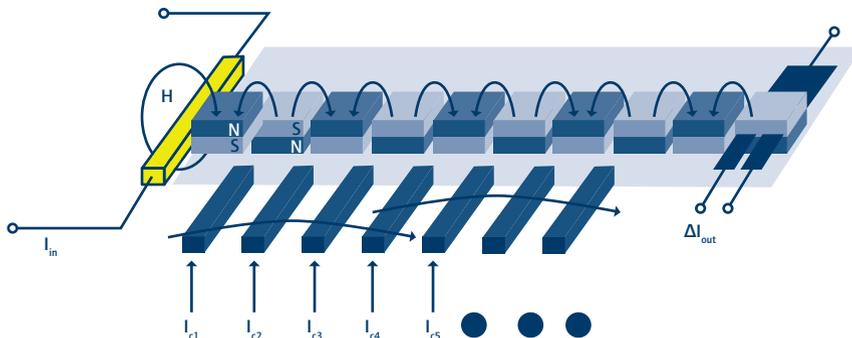
¹²⁸ Flocke/Noll 2007.

¹²⁹ Abbildung aus Becherer et al. 2008, S. 317.

ferromagnetische Punkte mit einer einzelnen Domäne realisiert wurden.¹³⁰ Abbildung 18 zeigt das mit einem Rasterkraftmikroskop (Atomic Force Microscope) aufgenommene Bild des auf der $\text{Si}/\text{Pt}_{5,0/40\text{x}}[\text{Co}_{0,3}+\text{Pt}_{0,8}]/\text{Pt}_{4,5}$ -Mehrschichtstruktur erzeugten Schachbrettmusters aus Dipolen alternierender Polarisation. Die Ergebnisse von Experimenten und Rechnersimulationen deuten darauf hin, dass solche Mehrlagenstrukturen vielversprechende Kandidaten für die Realisierung feldgekoppelter Logikbausteine sind.

Ein sehr interessantes Konzept stellen Magnetische Quantenzellulare Automaten (Magnetic Quantum Cellular Automata, M-QCA) dar.¹³¹ Hier werden in der Kreuzschienenarchitektur magnetische Quantenpunkte verwendet. Die Information breitet sich in einem strukturierten Netzwerk von magnetischen Quantenpunkten aus. Die Quantenpunkte sind in räumlichen Mustern angeordnet, die die logischen Funktionen bestimmen. Die Quantenpunkte treten dabei nur mit ihren unmittelbaren Nachbarn in Wechselwirkung.¹³² Das Hauptproblem dieser Magnetischen Quantenzellularen Automaten ist gegenwärtig ihre niedrige Geschwindigkeit. Zur Lösung dieses Problems wird ein schnell alternierendes magnetisches Taktfeld benötigt, welches, wie in Abbildung 19 dargestellt, durch ein Taktleitersystem eingepreßt wird. Die Schaltzustände breiten sich synchron zu der durch die Taktleitung hervorgerufenen „Schaltwelle“ aus, wie in Abbildung 20 dargestellt.

Abbildung 19: Feldgekoppelte Inverterstruktur mit darunter liegendem Multiphasen-Taktleiter¹³³



Das Schaltverhalten und die Magnetisierungszustände von Supermalloy (79% Ni, 16% Fe und 5% Mo)-Nanomagnet-Schalteranordnungen mit 10^7 Schaltern wurde untersucht.¹³⁴ Die Nanomagnetten hatten dabei Abmessungen von 200 Nanometern.

¹³⁰ Becherer et al. 2008.

¹³¹ Bernstein et al. 2005.

¹³² Becherer et al. 2007; Schmitt-Landsiedel/Werner 2009.

¹³³ Becherer et al. 2007; Abbildung aus Schmitt-Landsiedel/Werner 2009, S. 417.

¹³⁴ Li et al. 2012.

Nanomagnetische Logik entwickelt sich zu einem neuen Gebiet der Spintronik.¹³⁵ Die Wechselwirkung zwischen sich in Permalloy-Nanodrähten ausbreitenden Domänen und nanomagnetischen Punkten aus Kobalt-Platin-Mehrschichtstrukturen kann für Schaltanwendungen ausgenutzt werden, wobei das Feld der sich ausbreitenden magnetischen Domäne die Schaltfunktion der Taktwelle übernehmen kann.¹³⁶

Abbildung 20: Magnetisierungsverteilung des ferromagnetischen zellularen Quanteninverters¹³⁷

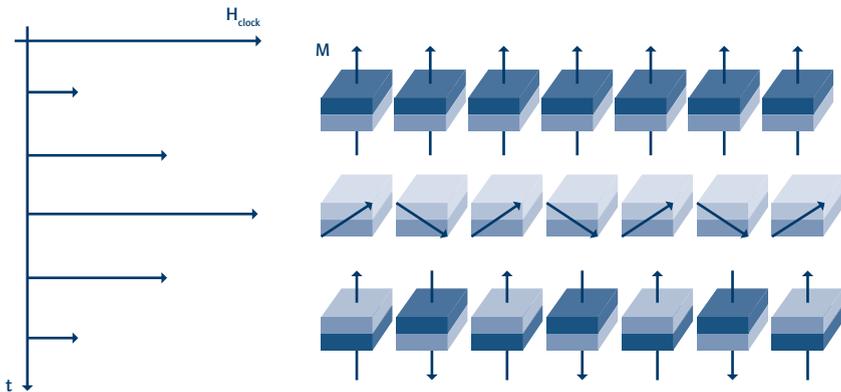


Abbildung 21 zeigt ein XOR-Gatter aus Kobalt-Platin-Nanomagneten. Bei der Herstellung der Schaltkreise wurde der Ionenstrahl inhomogen fokussiert.¹³⁸ Dadurch war es möglich, ein gezielt asymmetrisches Verhalten der Zellen zu erreichen und auch die Kopplung benachbarter Nanomagnete gezielt zu beeinflussen.

Eine QCA-Architektur hat einige interessante Eigenschaften: Ihre regelmäßige Struktur ermöglicht die kostengünstige Herstellung von Schaltungen mit einer großen Anzahl von Zellen. Es können sowohl Top-Down- als auch Bottom-Up-Herstellungsverfahren verwendet werden. Zudem kann die Struktur der Schaltkreise im Vergleich zur Struktur von herkömmlichen Mikroprozessoren relativ einfach sein, was das Design deutlich vereinfacht. Leiterbahnen sind überflüssig, da die einzelnen Zellen direkt mit den benachbarten Zellen wechselwirken. Auf diese Weise werden Zeitverzögerungen und Energieverluste vermieden, wie sie bei einer konventionellen Verbindungstechnik mit langen Leitungen in integrierten Schaltkreisen auftreten. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Datenaustausch mit Zellen, deren Dimensionen im Nanometerbereich liegen, schwierig sein wird. Des Weiteren kann auf Signalleitungen nicht völlig verzichtet werden. Das Takten der Zellen zum Beispiel erfordert nach wie vor Verbindungsleitungen

¹³⁵ Ju et al. 2012.

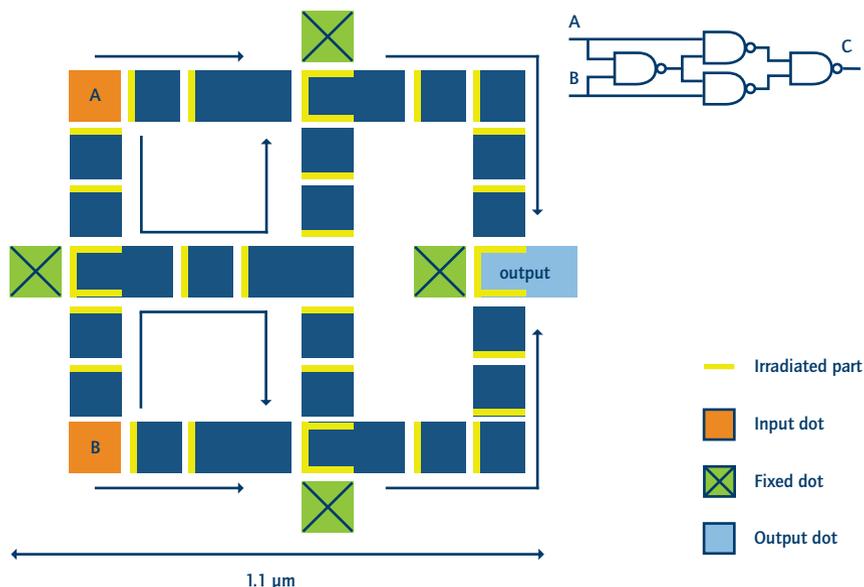
¹³⁶ Csaba et al. 2012.

¹³⁷ Becherer et al. 2007; Abbildung aus Schmitt-Landsiedel/Werner 2009, S. 417.

¹³⁸ Ju et al. 2012.

oder externe Eingänge. Die Geschwindigkeit kann auch ein limitierender Faktor sein. Betrieb bei Raumtemperatur ist für die meisten technischen Anwendungen ebenfalls erforderlich. Bis jetzt wurde dies nur für magnetische QCAs demonstriert.

Abbildung 21: XOR-Gatter aus Kobalt-Platin-Nanomagneten¹³⁹



9.3 SPINTRONIK

In der Elektronik wird üblicherweise die Ladung der Elektronen zur Speicherung, zum Transport und zur Manipulation von Information ausgenutzt. Elektronen haben jedoch neben der Ladung noch eine weitere Eigenschaft, nämlich den Spin. In der Vergangenheit wurde die Möglichkeit, einen elektronischen Spin in elektronischen Systemen auszunutzen, nicht berücksichtigt. Unter „Spintronik“, auch als „Spin-Transport-Elektronik“ oder „Spin-basierte Elektronik“ bezeichnet, versteht man eine neue Technologie, in der der Elektronenspin und nicht die Elektronenladung die Information trägt.¹⁴⁰ Die Spintronik hat ein erhebliches Potenzial zur Realisierung neuartiger Bauelemente, bei welcher Standardmikroelektronik mit spinabhängigen Effekten kombiniert wird, welche von der Wechselwirkung zwischen Elektronenspin und dem Material abhängen. Viele informationsspeichernde Bauelemente beruhen auf der Anwendung von magnetischen Mehrschichten-Materialien und Isolatoren, wobei die Information in orientierten

¹³⁹ Abbildung aus Ju et al. 2012a, S. 101.

¹⁴⁰ Wolf et al. 2001.

magnetischen Domänen gespeichert wird. Die Spintronik eröffnet Möglichkeiten für die Entwicklung hybrider Bauelemente, welche ladungsbasierte Informationsverarbeitung mit spinbasierter Speicherung kombinieren.¹⁴¹ R. Landauer hat 1961 gezeigt, dass für einen mit einer adiabatischen Zustandsänderung verbundenen Schaltvorgang eine minimale Energie von $E_{bit} = k_B T \ln 2 \approx 23$ Millielektronenvolt aufgebracht werden muss, wobei k_B die Boltzmannkonstante und T die absolute Temperatur, auf der sich das Schaltelement befindet, symbolisieren.¹⁴² Bei ladungsbasierten elektronischen Speicherelementen werden die logischen Zustände „0“ und „1“ durch eine bestimmte Ladungsmenge an einem bestimmten Ort dargestellt. Zur Speicherung der Ladung ist es erforderlich, die Ladung in einer Potentialbarriere einzuschließen. Die Ladung kann nur von einem Ort zum anderen bewegt werden, wenn diese Potentialbarriere abgesenkt wird. Daraus folgt, dass für jeden Schaltvorgang eine bestimmte Schaltenergie benötigt wird. Die gegenwärtige Schaltenergie von CMOS-Transistoren liegt allerdings noch wesentlich oberhalb des theoretischen Limits. Die Schaltenergie eines komplementären Metall-Oxid-Halbleiter-(CMOS)-Bauelementes liegt bei 14 Elektronenvolt und damit 600-fach über diesem Limit.¹⁴³ In spinbasierten Bauelementen wird der Übergang zwischen den logischen Zuständen „0“ und „1“ durch Anlegen eines kleinen magnetischen Feldes erreicht. Dieses erfordert wesentlich geringere Energie als die Steuerung von Ladungen. Die Schaltenergie spinbasierter Bauelemente liegt deshalb viel näher am theoretischen Limit. Die Schaltgeschwindigkeit ladungsbasierter Bauelemente ist durch die Kapazität der Bauelemente und den Steuerstrom begrenzt. Die Begrenzungen der Schaltgeschwindigkeit in spintronischen Bauelementen sind durch die Rezessionsfrequenzen des Elektronenspins begrenzt und rangieren von Gigahertz- bis zu Terahertz-Frequenzen.¹⁴⁴ Die Rotation des Spins um 180° bei Terahertz-Frequenzen benötigt nur eine Energie in der Größenordnung von drei Millielektronenvolt. Das ist weit unterhalb der thermischen Energie, erfordert allerdings besondere Maßnahmen, um zu verhindern, dass die thermische Energie die im Bauelement gespeicherte Information zerstört.

Besonders interessant sind spinbasierte Feldeffekttransistoren, welche anstelle von Potentialbarrieren spinselektive Barrieren verwenden.¹⁴⁵ Spinbasierte Feldeffekttransistoren können bei Zimmertemperatur wesentlich kleinere Schwellspannungen, Gate-Kapazitäten und Schaltenergien sowie Source-Drain-Leck-Ströme erreichen als ladungsbasierte Feldeffekttransistoren.¹⁴⁶ Spinabhängige Barrieren können durch halbmetallische ferromagnetische Kontakte realisiert werden.

In Spin-Transistoren wird der Strom durch die Magnetisierungskonfiguration der ferromagnetischen Elektroden oder durch die Spin-Ausrichtung der Ladungsträger

¹⁴¹ Awschalom/Flatté 2007.

¹⁴² Landauer 2000.

¹⁴³ Awschalom/Flatté 2007.

¹⁴⁴ Awschalom/Flatté 2007.

¹⁴⁵ Hall/Flatté 2006; Coey/Sanvito 2004.

¹⁴⁶ Hall/Flatté 2006.

kontrolliert.¹⁴⁷ Diese Eigenschaft kann zu Low-Power-Schaltungsarchitekturen führen, die für gewöhnliche CMOS-Schaltungen unerreichbar sind. Kürzlich wurde über eine experimentelle Demonstration eines solchen Spin-FETs berichtet.¹⁴⁸ Hierbei wurden durch eine Gate-Spannung kontrollierte oszillierende Spin-Signale beobachtet, welche eine Spinpräzession von spinpolarisierten Ladungsträgern im Kanal implizieren. Trotzdem ist der Ursprung dieser beobachteten Signale nicht abschließend geklärt. Spin-MOSFETs mit ferromagnetischen Elektroden wurden ebenfalls vorgeschlagen, jedoch bis jetzt noch nicht demonstriert.¹⁴⁹

Spin Wave Devices (SWD) sind eine Art magnetischer Logik-Bauelemente, die die kollektive Spinoszillation (Spinwellen oder Spin Waves) zur Informationsübermittlung und Signalverarbeitung ausnutzen.¹⁵⁰ Die Spinwellen werden in einer magneto-elektrischen Zelle erzeugt, die durch externe Spannungspulse angetrieben wird. Solch eine Zelle fungiert als Detektor und Speicherelement. Die Information ist in der anfänglichen Phase der Spinwelle kodiert. Die Spinwellen propagieren durch Spinwellen Busse – das sind Spin-Kanäle aus ferromagnetischen Filmen – und interferieren an deren Berührungspunkten abhängig vom Phasenunterschied konstruktiv oder destruktiv. Das Ergebnis der Berechnung kann durch die magneto-elektrischen Ausgabezellen in der Magnetisierung gespeichert oder in einen Spannungspuls umgewandelt werden. Die wesentlichen erwarteten Vorteile von SWDs sind

- 1) die Möglichkeit, sich außer der Amplitude auch die Phase zum Bau von logischen Vorrichtungen zunutze zu machen, die weniger Elemente benötigen als es bei einem Transistor-basierten Ansatz der Fall wäre,
- 2) nichtflüchtige magnetische Logikschaltungen und
- 3) parallele Datenverarbeitung bei verschiedenen Frequenzen auf derselben Struktur durch Verwendung einer eigenen Frequenz für jeden Datenkanal; Prototypen, die bei Raumtemperatur und mit Frequenzen im GHz Bereich arbeiten, wurden bereits demonstriert.

In Abbildung 22 sind die Struktur eines spinbasierten Feldeffekttransistors sowie, anhand des Bänderschemas, seine Funktion dargestellt. Im AUS-Zustand können sich die Ladungsträger über die erste, nicht jedoch über die zweite Barriere bewegen. Im EIN-Zustand haben die Ladungsträger im Kanal unterschiedlichen Spin, und die Ladungsträger mit abwärtsgerichtetem Spin können sich aus dem Kanal in die Drain-Zone bewegen. Das Schalten erfolgt über das Gate-Feld durch Änderung der Spins vom voll polarisierten in den unpolarisierten Zustand. Für Gate-Längen von zehn Nanometer und Gatebreiten von einem Mikrometer beträgt die Gatekapazität $C_g = 5 \times 10^{-17}$ Farad. Das

¹⁴⁷ Sugahara/Nitta 2010.

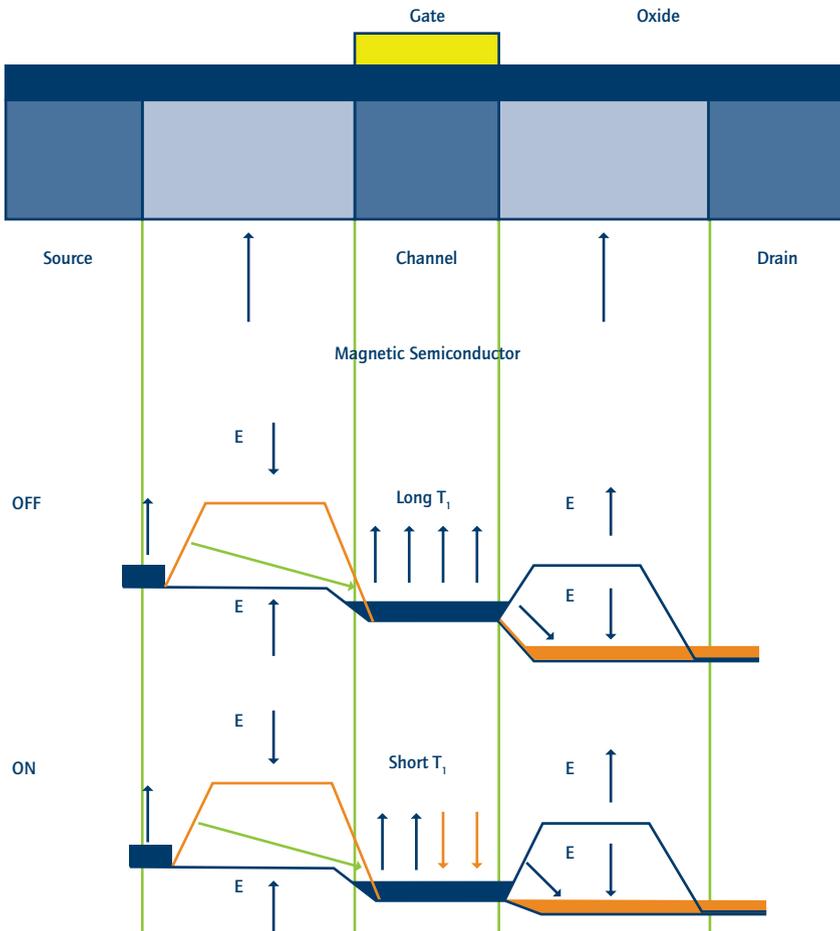
¹⁴⁸ Dash et al. 2009; Li et al. 2011.

¹⁴⁹ Koo et al. 2009.

¹⁵⁰ Khitun et al. 2009.

liegt um einen Faktor fünf unterhalb des Wertes, den nach der ITRS-Studie für 2018 projizierte Low-Standby Power-(LSTP-)CMOS-Transistoren aufweisen sollen.¹⁵¹

Abbildung 22: Spinbasierter Feldeffekttransistor¹⁵²



Kürzlich wurde ein Konzept vorgeschlagen, „All Spin Logic“ (ASL) genannt, das Spin-kontrollierte Bauteile mit nanomagnetischen Logikschaltungen kombiniert.¹⁵³ Hierbei breiten sich die in den Nanomagnetten gespeicherten Informationen als Spinstrom in

¹⁵¹ ITR 2007.

¹⁵² Awschalom/Flatté 2007; Hall/Flatté 2006.

¹⁵³ Behin-Aein et al. 2010.

Spin-kohärenten Kanälen aus. Die neuesten Ergebnisse zeigen, dass eine Kombination aus Spintronics und Nanomagnetten eine Low-Power-Alternative zur ladungsbasierten Informationsverarbeitung darstellen könnte. Die Kernelemente der ASL sind die Injektion von Spins in Metalle und Halbleiter aus magnetischen Kontakten und das Ändern der Magnetisierung durch die injizierten Spins. Die größten Probleme, die noch überwunden werden müssen, sind der Betrieb bei Raumtemperatur und eine Verbesserung des Verhältnisses zwischen aufgewendeter Energie und Schaltgeschwindigkeit. Es soll auch noch erwähnt werden, dass ASL eine Möglichkeit darstellt, sogenannte biomimetische Systeme zu implementieren, welche biologische Systeme nachahmen und eine Architektur besitzen, die radikal von der sonst in informationsverarbeitenden Systemen üblichen von Neumann-Architektur abweicht.

9.4 QUANTENINFORMATIONSVERRARBEITUNG

Quantum Computing wurde theoretisch in einem so beträchtlichen Umfang untersucht, dass Quantum Computer Science bereits als Forschungsdisziplin etabliert ist.¹⁵⁴ Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass auf diesem Gebiet noch wesentliche Unzulänglichkeiten bestehen, welche Quantum Computing gewiss zu einem noch in weiter Ferne liegenden Ziel machen. Quantum Computing beruht im Wesen auf der Ausnutzung der Eigenschaften sogenannter verschränkter quantenmechanischer Zustände (Entangled Quantum States). Viele Physiker vermuten, dass verschränkte Zustände auf instantanen Fernwirkungen beruhen, also im Prinzip Einsteins Forderung nach Lokalität widersprechen. Die experimentelle Verifizierung der Verschränkung und daraus folgender Resultate ist nun in fast allen bekannten Methoden mit großen Fehlern behaftet, die, zum Beispiel in der Quantenoptik, bis zu 15 Prozent ausmachen. Solange die Natur der Verschränkung unbekannt ist, kann man auf eine Verbesserung der experimentellen Fehlergrenzen durch Engineering nicht hoffen. Weitere Probleme bereiten die große Störung der Quantenphase durch unelastische Wechselwirkungen und die korrespondierende Notwendigkeit sehr tiefer Temperaturen. Ein entsprechend eindrucksvoller Quantencomputer wurde deshalb noch nicht realisiert und scheint in absehbarer Zukunft nicht realisierbar.

Quanteninformationsverarbeitung und Quantum Computing basieren auf der Darstellung von Information durch Quantenzustände. Die Besonderheit der Darstellung von Information durch die Zustände eines Quantensystems ist, dass im Gegensatz zu einem klassischen binären System, welches nur die Zustände 0 oder 1 annehmen kann, ein quantenmechanisches binäres System nicht nur die Zustände 0 und 1, sondern beliebige Superpositionen dieser Zustände annehmen kann. Richard P. Feynman hat in seiner Arbeit „Simulating Physics with Computers“ die Frage gestellt, welche Art von Computern optimal geeignet wäre, physikalische Vorgänge

¹⁵⁴ Gruska 1999; Nielssen/Chuang 2000; Hirvensalo 2004.

zu simulieren.¹⁵⁵ Er hat in dieser Arbeit festgestellt, dass ein quantenmechanisches System mit vielen Freiheitsgraden durch eine entsprechend hochdimensionale Wellenfunktion dargestellt werden muss. Da ein derartiges System sehr viele Variablen hat, kann es nicht mit einem normalen klassischen Computer simuliert werden. Berücksichtigt man, dass die reale Welt den Gesetzen der Quantenmechanik folgt, dann, so schloss Feynman, kann eine reale Simulation der physikalischen Welt nur mit Computern erfolgen, die den gleichen Gesetzen folgen, denen die Natur folgt. Nach Feynman sollte ein solcher Computer die Gesetze der physikalischen Welt abbilden. Er sollte reversibel sein und mit quantenmechanischen Elementen aufgebaut sein. Im Jahr 1985 hat David Deutsch erstmalig ein vollständiges quantenmechanisches Modell für die Theorie des Quantum Computing gegeben. Darauf folgte eine Vielzahl theoretischer Arbeiten, welche Quantum Computing-Algorithmen für verschiedene Probleme behandelten. Die quantentheoretische Simulation von komplexen klassischen Systemen wird Quantencomputer erfordern, welche über eine große Anzahl von Speicherzellen für Quantenzustände verfügen, vergleichbar der Größe klassischer Computer. Das wird zu Problemen mit der sogenannten Dekohärenz führen.¹⁵⁶

Dekohärenz tritt auf, wenn ein Quantensystem in Wechselwirkung mit einem klassischen Vielteilchensystem tritt. Dabei wird der Quantenzustand gemessen und kann beobachtet werden. Er wird jedoch dabei auch zerstört. Abrams und Lloyd haben die Vermutung geäußert, dass die Probleme, die den gegenwärtigen Konzepten des Quantum Computing inhärent sind, durch Anwendung nichtlinearer Quantenmechanik bewältigt werden können.¹⁵⁷ Nach dem Vorschlag von Abrams und Lloyd können nichtlineare quantenmechanische Operationen dazu benutzt werden, die Zustände, welche die gewünschten Problemlösungen repräsentieren, in der Quantensuperposition der Ergebnisse anzureichern. Problematisch könnte hier allerdings sein, dass eine nichtlineare Erweiterung der Quantenmechanik vermutlich in Konflikt zum Prinzip der Kausalität steht.¹⁵⁸ Eines der Hauptprobleme der gegenwärtigen Forschung im Bereich des Quantum Computing ist, wie man ein Koeffizientenanreicherungsmodul auf Basis nichtlinearer Quantenmechanik realisiert. Josephson-Elemente sind vielversprechende Kandidaten für die Realisierung von Schaltungen zur nichtlinearen Quanteninformationsverarbeitung. Quantum Computing hat das Potenzial für komplexe Entwurfs- und Analyseprobleme, vollständige Lösungen zu liefern, da Quantum Computing mithilfe des Quantenparallelismus eine große Anzahl von Strukturen parallel analysieren kann.¹⁵⁹

Die technischen Möglichkeiten von Superconducting Quantum Interference Devices, die bereits tief gehend und mit großer Präzision erforscht sind, geben

¹⁵⁵ Feynman 1982.

¹⁵⁶ Gruska 1999; Nielsen/Chuang 2000; Hirvensalo 2004; Tian et al. 2002.

¹⁵⁷ Abrams/Lloyd 1997.

¹⁵⁸ Werner 2012.

¹⁵⁹ Sinha/Russer 2009.

jedoch nicht unberechtigte Hoffnung. Es gibt auch viele Berichte, dass das Quantum Computing-Konzept möglicherweise die Forderung hoher Dichten umgeht und man mit viel kleineren Dichten auskommt. Letzten Endes werden jedoch wahrscheinlich auch hohe Quantenbit-Dichten nötig sein.

9.4.1 Quantum Computing mit Josephson-Elementen

In der Literatur wurden zahlreiche Beispiele für die Realisierung von Quanteninformationsverarbeitenden Systemen gegeben. Einige der vielversprechendsten Vorschläge basieren auf der Anwendung von Josephson-Elementen.¹⁶⁰ Dabei können gleichstromgepumpte degenerierte parametrische Josephson-Oszillatoren zur Generation verschränkter Mikrowellenzustände benutzt werden.¹⁶¹

Quantencomputer auf Basis von Josephson-Elementen, welche im Millikelvin-Bereich betrieben werden, könnten Dekohärenzzeiten im Millisekunden-Bereich aufweisen.¹⁶² Das wäre mit Quantencomputern auf der Basis atomarer Systeme vergleichbar und würde für 10^{10} Rechenoperationen ausreichen, bevor Dekohärenz eintritt. Die erforderlichen niedrigen Betriebstemperaturen erscheinen prohibitiv, könnten jedoch, unabhängig vom eingeschlagenen Lösungsweg, der Preis dafür sein, dass man sich mit der Leistungsfähigkeit von Supercomputern den Grenzen des physikalisch Möglichen annähert. Mit Josephson-Elementen lassen sich Quantenzustandsspeicher realisieren, welche Quantenzustände vorbereiten, manipulieren und messen können.¹⁶³ Dabei ist die Quantencomputer-Architektur skalierbar.

Ein interessanter Realisierungsvorschlag ist eine Ein-Cooper-Paar-Box, welche an ein Einzelelektronentransistor-Elektrometer gekoppelt ist.¹⁶⁴ Derartige Schaltungen wurden bereits durch Elektronenstrahlolithographie und Schattenaufdampfung realisiert, wobei Aluminium-Dünnschichten auf Siliziumsubstrat aufgedampft wurden. Bei der Ein-Cooper-Paar-Box handelt es sich um eine kleine metallische Insel, welche an ein Cooper-Paar-Reservoir über ein Josephson-Element gekoppelt ist. Abbildung 24 zeigt das Schaltbild des Josephson-Ladungs-Qubits. Der Zustand kann durch die Gate-Elektrode kontrolliert werden. Die Quantenkohärenz kann innerhalb der Schaltung aufrechterhalten werden und Quanteninformationsverarbeitung kann in dieser Schaltung durchgeführt werden.

Ein weiterer interessanter Lösungsvorschlag basiert auf periodischen Anordnungen von Josephson-Elementen.¹⁶⁵ Das System besteht aus einer kleinen Anzahl von Atomen mit drei internen Zuständen, welche in ein optisches Gitter eingebaut sind. Quanteninformationsverarbeitung mit supraleitenden Bauelementen wird im Mikrowellen- und

¹⁶⁰ Makhlin et al. 2000; Makhlin et al. 2001.

¹⁶¹ Kaertner/Russer 1990; Kärtner/Schenzle 1993; Paternostro et al. 2004.

¹⁶² Bocko et al. 1997.

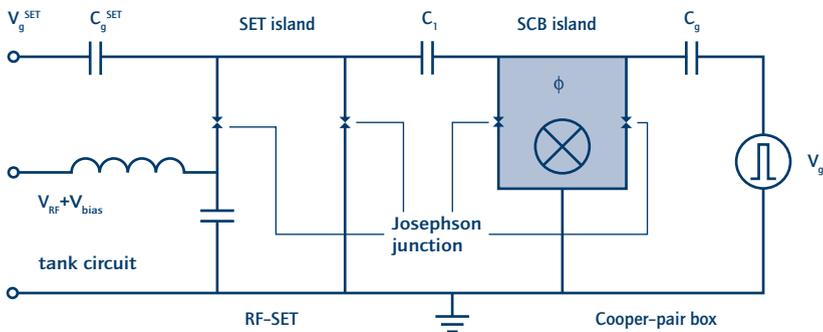
¹⁶³ Bocko et al. 1997.

¹⁶⁴ Duty et al. 2004.

¹⁶⁵ Tian/Zoller 2003.

Millimeterwellen-Frequenzbereich erfolgen und auf Hochfrequenz-Nanoelektronik basiert sein. Verglichen mit optischen quanteninformationsverarbeitenden Systemen haben supraleitende Systeme einen um Größenordnungen geringeren Leistungsbedarf. Das ist eine wesentliche Voraussetzung für die künftige Realisierung von hochintegrierten quanteninformationsverarbeitenden Systemen.

Abbildung 24: Schaltbild des Josephson Ladungs-Qubit.¹⁶⁶



9.4.2 Zellulare Automaten

Zellulare Automaten sind ausführlich in dem Buch von Toffoli¹⁶⁷ behandelt. Diese Architekturen basieren auf einfachen Gesetzen der direkten nachbarlichen Wechselwirkung zwischen sehr kleinen Bauelementen. Man kann sich ihre Funktion leicht vorstellen, wenn man an komplizierte Strukturen von Dominos denkt, die nach einfachen mechanischen Regeln mit ihren Nachbarn wechselwirken und dadurch komplizierte Algorithmen ausführen können. Es gibt jedoch auch hier ein großes Problem. Die Energie der Wechselwirkung zwischen den nächsten Nachbarn muss die Energie $k_B T$, die der Temperatur T entspricht, wesentlich überschreiten. Für den Betrieb bei Raumtemperatur muss diese Wechselwirkungsenergie daher ungefähr ein eV betragen. Dies ist jedoch sehr schwer zu erreichen, wenn die Distanz zwischen den Nanostrukturen auch nur etwa ein Nanometer ist. Alle vorgestellten Prototypen haben deshalb nur bei extrem tiefer Temperatur funktioniert.

„Quantenmechanische zellulare Automaten“ oder „Quantum Cellular Automata“ (QCA) bezeichnen ein Modell für Quantum Computation, welches Quantenzellen benutzt, um logische Operationen durchzuführen. Quantenmechanische zellulare Automaten basieren auf magnetisch gekoppelten Nanomagneten¹⁶⁸ oder

¹⁶⁶ Duty et al. 2004.

¹⁶⁷ Toffoli 1987.

¹⁶⁸ Imre et al. 2003; Csaba et al. 2005.

auf kapazitiv gekoppelten Quantenpunkten, wobei elektrische Ladung von einem Quantenpunkt zum nächsten tunneln kann.¹⁶⁹ Die Vierpunkt-Basiszelle besteht aus vier Quantenpunkten, welche über Tunnelkontakte kapazitiv gekoppelt sind. Abbildung 25 zeigt die zwei möglichen Polarisationszustände der QCA-Einheitszelle. Die Position der Quantenpunkte ist durch Kreise markiert, wobei der gefüllte Kreis einen Quantenpunkt mit einer Ladung bezeichnet. Wegen der elektrischen Abstoßung der Ladungen sind die beiden Konfigurationen, welche in Abbildung 25a gezeigt sind, Zustände niedriger Energie, die daher bevorzugt eingenommen werden. Mithilfe der QCA-Einheitszelle kann das in Abbildung 25b dargestellte Majoritätsgatter realisiert werden. Der Eingang A dient als Kontroll-Bit und kann die Einheitszelle sowohl in ein logisches Und-Gatter als auch in ein Oder-Gatter schalten, wie die Wahrheitstabelle auf der rechten Seite der Abbildung zeigt. Mit der gleichen Struktur kann auch eine Inverter-Operation realisiert werden.¹⁷⁰ Auf diese Weise ist es möglich, alle logischen Grundoperationen mit dem Majoritätsgatter und dem Inverter zu realisieren. Werden Nanomagneten oder magnetisierte Domänen verwendet, kann eine QCA-Einheitszelle realisiert werden, welche magnetische Felder verwendet, um QCA-Zustände zu schalten und weiterzukoppeln.¹⁷¹ Magnetische zellulare Automaten können sogar bei Raumtemperatur betrieben werden.¹⁷²

Fazit: Es dürfte schwierig sein, für Schaltkreisarchitekturen auf der Basis von Einzelelektronentransistoren hohe Taktraten zu erreichen. Einzelelektronentransistoren könnten interessante Bauelemente zur Auslesung von Quantenbits für Anwendungen im Bereich von Quantum Information Processing und Quantum Computing werden. Die Kontrolle des Spins von einzelnen Elektronen sowie Atomen hat sich als vielversprechender neuer Weg zum Erreichen neuer elektronischer Funktionsweisen erwiesen. Bezüglich Schaltungskonzepten mit zum Beispiel Nanomagneten kann die Geschwindigkeit ein limitierender Faktor sein. Betrieb bei Raumtemperatur ist für die meisten technischen Anwendungen ebenfalls erforderlich. Quantum Computing hat das Potenzial für komplexe Entwurfs- und Analyseprobleme, vollständige Lösungen zu liefern, da im Quantum Computing durch die Superposition von Quantenzuständen (Quantenparallelismus) eine große Anzahl von Fällen simultan analysiert werden kann.

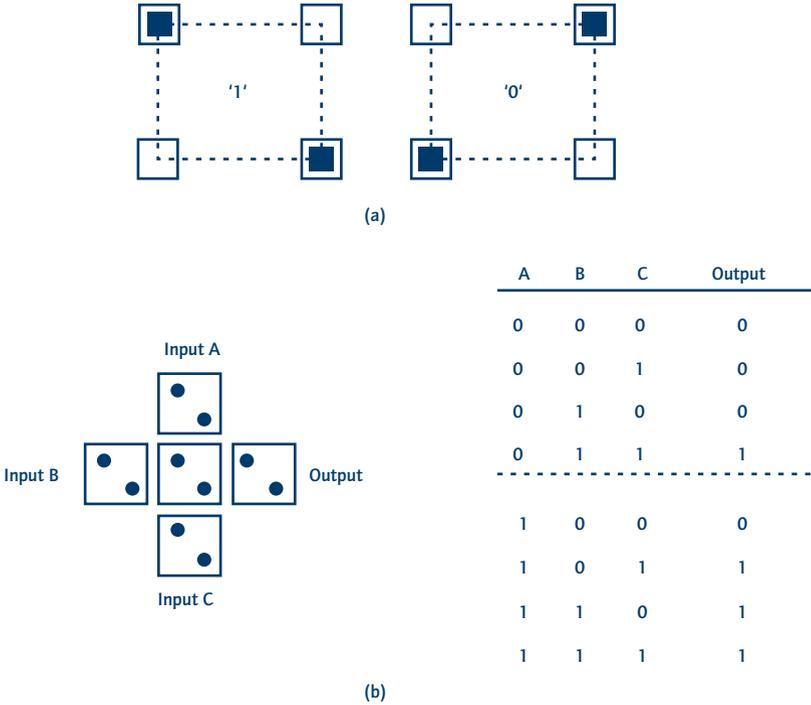
¹⁶⁹ Snider et al. 1999a.

¹⁷⁰ Porod 1997.

¹⁷¹ Imre et al. 2003; Csaba et al. 2005.

¹⁷² Cowburn/Welland 2000.

Abbildung 25: (a) Einheitszelle eines Quantum Cellular Automata (QCA) mit den beiden möglichen Polarisierungen. (b) Universelles Majoritätsgatter eines QCA und die zugehörige Wahrheitstabelle.¹⁷³



10 OPTOELEKTRONIK UND NANOELEKTRONIK

Die Nano-Optoelektronik enthält viele Möglichkeiten, welche bereits für die nähere Zukunft vielversprechend sind. Materialwissenschaften und Kristallzucht haben einen Stand erreicht, der es erlaubt, mithilfe von Quantum Wells, Quantum Lines und Quantum Dots Licht emittierende Dioden und Laserdioden in einem weiteren spektralen Bereich zu realisieren. Die vollständige Beherrschung des sichtbaren Spektrums und die Möglichkeit der Massenproduktion der Dioden würden es ermöglichen, in naher Zukunft Glühlampen vollständig zu ersetzen. Für die etwas fernere Zukunft wurden zahlreiche Anwendungen wie etwa photonische Supergitter von Yablonovich vorgeschlagen.¹⁷⁴ Die Möglichkeiten reichen hier von einfachen Anwendungen künstlicher Opaleszenz für Schmuckstücke bis zu fantastischen Effekten von „Cloaking“, der Unsichtbarmachung von Objekten.¹⁷⁵

¹⁷³ Toffoli 1987.

¹⁷⁴ Scherer et al. 1995.

¹⁷⁵ Tricarico et al. 2009.

10.1 PLASMONISCHE BAUELEMENTE

Mit steigender Integrationsdichte elektronischer Schaltkreise werden die Verbindungsleitungen aufgrund der immer höher werdenden Taktraten sowie der Signalverzögerungszeiten und thermischer Probleme immer mehr zum Problem.¹⁷⁶ Hier bietet sich die optische Verbindungstechnik wegen ihrer extrem großen Bandbreite als Lösung an. Obwohl die Miniaturisierung optischer Verbindungselemente durch Beugungseffekte begrenzt ist, haben optische Wellenleiter bereits transversale Dimensionen in der Größenordnung der halben Wellenlänge erreicht.¹⁷⁷ „Plasmonik“ ist ein neuer interessanter Forschungsgegenstand, welcher die elektromagnetischen Eigenschaften von Metallen zum Thema hat und sich mit der Möglichkeit von Metallen, Lichtsignale im Nanostruktur-Bereich zu verarbeiten, befasst.¹⁷⁸

10.2 LICHTAUSBREITUNG IN NANOGITTERN

Ein lokales elektrisches Feld im optischen Frequenzbereich, welches parallel zu einer Carbon Nanotube oder einem metallischen Nanodraht von wenigen Nanometern Durchmesser gerichtet ist, verursacht eine lokale Ladungstrennung, die sich entlang des Nanodrahts bzw. der Nanoröhre in Form eines nichtlokalen Oberflächenplasmons ausbreitet.¹⁷⁹ Abbildung 26 veranschaulicht die plasmonische Oberflächenwelle, welche sich auf die Nahumgebung der Elektronen konzentriert. Die Phasengeschwindigkeit eines Oberflächenplasmons liegt typischerweise zwischen 50 Prozent und 90 Prozent der Freiraumlichtgeschwindigkeit. Transversal zum Nanodraht nimmt die Intensität des elektromagnetischen Feldes exponentiell ab, sowohl im freien Raum als auch innerhalb des Nanodrahts. Die typische räumliche Halbwertsbreite der Abnahme liegt im freien Raum im Bereich von 100 nm. Experimente haben gezeigt, dass praktisch kein Übersprechen zwischen parallelen Nanodrähten auftritt, wenn der Abstand der Nanodrähte wenigstens 300 nm beträgt.

Die Technik der Anregung von Oberflächenplasmonen stellt ein Problem dar. Zur Erzielung hoher Kopplungseffizienz ist Phasen Anpassung zwischen der anregenden Welle und dem Oberflächenplasmon erforderlich. Das kann zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass der Nanodraht auf die Oberfläche eines Dielektrikums mit hohem Brechungsindex aufgebracht wird. Durch Wahl des Einfallswinkels des anregenden Laserstrahls kann die optimale Einkoppelbedingung erfüllt werden. Diese Art der Anregung ist nicht perfekt und kann sicher verbessert werden, wenn nanostrukturierte Lichtquellen extrem kleiner Dimension verwendet werden.¹⁸⁰

Bis jetzt wurde plasmonische Lichtausbreitung experimentell nur über sehr kleine Distanzen von wenigen Mikrometern realisiert. Das ist auf die Dämpfung der

¹⁷⁶ Zia et al. 2006.

¹⁷⁷ Ditlbacher et al. 2005.

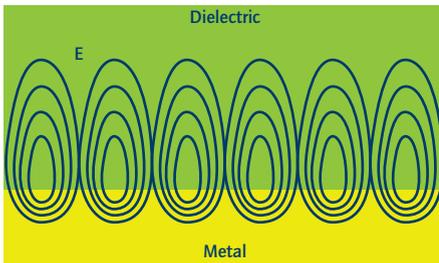
¹⁷⁸ Barnes et al. 2003.

¹⁷⁹ Ditlbacher et al. 2005.

¹⁸⁰ Ditlbacher et al. 2005.

Elektronenoszillationen und auf Strukturdefekte innerhalb der Nanodrähte sowie auf deren Oberfläche zurückzuführen. Künftige Verbesserungen der Herstellungstechnologien werden eine Verbesserung bewirken. Es ist auch zu berücksichtigen, dass Nanodrähte als optische Wellenleiter innerhalb integrierter Schaltkreise nur sehr kurze Distanzen zu überbrücken haben, sodass extrem geringe Dämpfungswerte nicht erforderlich sind.

Abbildung 26: Oberflächenplasmon entlang einer Grenzfläche zwischen Metall und Dielektrikum¹⁸¹



Für bestimmte Anwendungen kann die Wellenausbreitung entlang von Anordnungen von Nanopunkten anstelle entlang von Nanodrähten relevant werden. Beispiele dafür sind optische Verzweigungen, wie zum Beispiel Leistungsteiler, welche auf der Basis von Nanodrähten schwierig zu realisieren sind. Elektromagnetische Wellen können dabei entlang von Anordnungen von Nanopunkten weitergeleitet werden. Der Abstand zwischen den Nanopunkten ist ein zusätzlicher Freiheitsgrad für den Entwurf plasmonischer Bauelemente. Mithilfe numerischer Simulation wurde die Ausbreitung plasmonischer Wellen in komplexen Nanopunkt-Strukturen wie zum Beispiel Front-Ends von Terahertz-Empfängern untersucht.¹⁸² Dabei wurden verschiedene planare optische Nanopunkt-Schaltelemente wie Kondensator, Kollektor, Wellenleiter und Wellenleiter-Verzweigungen untersucht.

Fazit: Plasmonische Strukturen eröffnen interessante Möglichkeiten zur extremen Miniaturisierung von passiven Strukturen im optischen Frequenzbereich. Ihre künftigen Anwendungen sind insbesondere im Zusammenwirken mit schnellen elektronischen und optoelektronischen Komponenten in hochintegrierten Schaltkreisen zu sehen.

11 NANOELEKTRONIK IN DER ENERGIETECHNIK

Auch Anwendungsmöglichkeiten der Nanoelektronik zur Energiespeicherung und Energieerzeugung sind von großem Interesse. Hier können Fortschritte in der Realisierung besserer Batterien und anderer Bausteine zur Energiespeicherung realisiert werden. Nanostrukturierte Materialien sowie Membranen mit Nanoporen können Vorteile bieten,

¹⁸¹ Zia et al. 2006.

¹⁸² Ahmed et al. 2007; Ahmed et al. 2009.

wenn sie in Lithiumionenbatterien oder anderen Batterietypen eingeschlossen werden. Alle bekannten Batterietypen basieren auf Effekten, die nur mit ausgedehnten Modellen der Vielteilchen-Quantentheorie verstanden werden können. Mit Hilfe heutiger Hochleistungsrechner können komplexe quantenmechanische Vielteilchensysteme wesentlich besser modelliert werden, sodass in naher Zukunft Fortschritte auf diesem Gebiet zu erwarten sind.

Die kapazitive Speicherung elektrischer Ladungen wird durch Nanostrukturierung erheblich beeinflusst, da sie von der Vergrößerung der Oberfläche und der Verkürzung der Distanzen doppelt profitiert. Die Materialwissenschaften, unterstützt von Nanoelektronik, haben hier bereits vielversprechende Fortschritte gemacht. Energieerzeugung und Ersparnis sind ebenfalls Themen, bei denen Nanoelektronik bereits Anwendungen gefunden hat und sicherlich weiter finden wird.

Die Effizienz von Solarzellen kann durch Nanostrukturen sehr beeinflusst werden, die Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser mithilfe von Sonnenlicht braucht billige Katalysatoren, die durch eine Kontrolle und das Verständnis der Vielteilchen-Effekte auf der Nanoskala verbessert werden können. Zusätzlich gibt es viele Möglichkeiten zur Erzeugung sehr kleiner elektrischer Energiemengen für medizinische Anwendungen, die zum Beispiel piezoelektrische Nanostrukturen benutzen.

12 NANOIMPRINT-TECHNOLOGIE

Die Nanoimprint-Lithographie (NIL) ist eine neue Produktionstechnologie, welche die Herstellung von Strukturen mit einer Auflösung unterhalb zehn Nanometer bei hohem Fertigungsdurchsatz ermöglicht.¹⁸³

In einem Zeitschriftenbeitrag von Harrer¹⁸⁴ wird ein Nanoimprint Lithographie-System für einen einstufigen NIL-Prozess bei Zimmertemperatur beschrieben. Dabei wird als Imprintpolymer eine auf ein Siliziumsubstrat aufgebrachte Polystyrenschicht verwendet. Die Versuche wurden mit Formstempeln aus GaAs/AlGaAs-Sandwichstrukturen durchgeführt, in welchen durch selektive Ätzung Gitterstrukturen mit unterschiedlichen Abständen und Linienbreiten zwischen neun und 300 Nanometer erzeugt wurden.

Abbildung 28 zeigt zwei Typen von mehrlinigen MBE-Formstempeln.

¹⁸³ Chou 1995; Torres et al. 2003; Harrer et al. 2008.

¹⁸⁴ Harrer et al. 2008.

Abbildung 28: Zwei Typen von mehrlinigen MBE-Formstempeln. a) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme des dreidimensionalen Oberflächenprofils eines MBE-Formstempels und darunter das mit einem Rasterkraftmikroskop (Atomic Force Microscope) erzeugte Bild des dreidimensionalen Oberflächenprofils, b) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme des dreidimensionalen Oberflächenprofils einer Form für fünf Stege und zwei Gräben unterschiedlicher Breite.¹⁸⁵

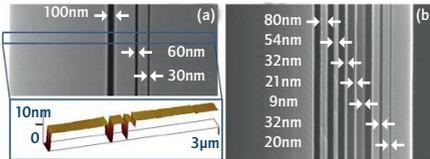
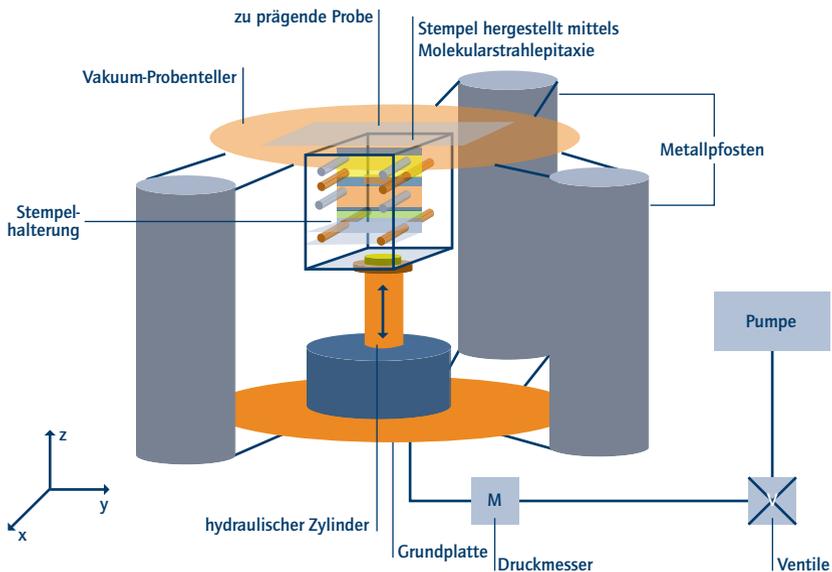


Abbildung 29 zeigt ein speziell angefertigtes NIL-System für die Durchführung eines einstufigen Nanoimprint-Prozesses unter Verwendung von MBE-Formstempeln.¹⁸⁶ Der MBE-Formstempel wird von einer an einem hydraulischen Zylinder befestigten Vorrichtung gehalten. Der Imprintvorgang auf der Polymer-Probe erfolgt durch hydraulischen Druck.

Abbildung 29: NIL-System¹⁸⁷



¹⁸⁵ Abbildung aus Harrer et al. 2008, S. 364.

¹⁸⁶ Harrer et al. 2008.

¹⁸⁷ Abbildung aus Harrer et al. 2008, S. 366.

Fazit: Die Nanoimprint-Technologie kann als Beispiel gelten für ein im Bereich der Nanoelektronik entstandenes Herstellungsverfahren, das aber in vielen anderen Gebieten (zum Beispiel Optoelektronik, Mechanik, Biologie) auch Einsatz finden wird.

13 NANOELEKTRONIK KOMBINIERT MIT ANDEREN DISZIPLINEN

13.1 NANOELEKTRONIK, MECHANIK UND BIOLOGIE, LAB-ON-A-CHIP

Die Kombinationen von Nano-Engineering und Biologie lassen vielversprechende Gebiete im Bereich medizinischer Anwendungen entstehen, welche von sehr einfachen zu sehr komplexen Anwendungen reichen. Auf der relativ einfachen Seite kann man sich zum Beispiel Nanostrukturen als Kontrastmittel für die verschiedensten Imaging-Technologien einschließlich MRI, CAT-Scan oder optischer Methoden vorstellen. Auf der mehr fernen Seite gibt es zahlreiche Anwendungen, die man unter dem Schlagwort „Elektrostatik der Biomoleküle“ zusammenfassen kann. Damit ist das Folgende gemeint: Die Methoden der „Single Electronics“ erlauben es, Bruchteile einer Elementarladung zu registrieren. Es könnte daher zum Beispiel möglich sein, die Basenpaare der DNS elektronisch zu charakterisieren, anstelle der biochemischen Methoden also Elektrostatik zu verwenden. Erste Versuche in dieser Richtung haben bereits Erfolg gezeigt.

Hier muss betont werden, dass ein sehr großes Gebiet, das mit dem Schlagwort „Lab-on-a-Chip“ umschrieben werden kann, in seiner vollen Ausnützung stark davon abhängen wird, ob chemische Charakterisierung durch elektrische ergänzt werden kann. Natürlich gibt es auch viele andere vielversprechende Kombinationen von Nanoelektronik und Biologie, besonders wenn man auch elektrischen Transport mit Ionen zusätzlich zu den Elektronen erlaubt. Die Ionenkanäle (Ion Channels) aller Lebewesen, zum Beispiel, kann man auch die „Transistoren der Biologie“ nennen. Hierbei schließt ein atomares Gerüst einen Kanal ein, der für Ionen, wie zum Beispiel Natriumionen, durch chemische oder elektrische Mechanismen geöffnet oder geschlossen werden kann. Solche Ionenkanäle kontrollieren in unserem Körper nicht nur den Herzschlag und die Bauteile unseres Gehirns, sondern auch die Vernichtung von Krebszellen. Engineering solcher Ionenkanäle ist daher ein Zukunftstraum. Eine solche kleine Öffnung (Nano-Tor) kann man zum Beispiel künstlich mit einer Silizium-Siliziumdioxid-Struktur schaffen, welche dadurch einen Single Electron-(Charge-)Kondensator bilden. Wenn DNS-Moleküle durch diese Nanotore schlüpfen, dann können Single Elektron-Transistoren die Änderung der Kapazität des Tores detektieren. Damit ist es zumindest im Prinzip, wie oben erwähnt, möglich, die Sequenz von DNS-Basis-Paaren (Adenin, Guanin, Cytosin und Thymin) zu lesen und damit den genetischen Code elektronisch anstatt chemisch aufzuzeichnen. Dieses Konzept ermöglicht eine Verallgemeinerung und ist im Hinblick auf „Lab on a Chip“-Entwürfe vielversprechend. Die

Ausnutzung nanoelektronischer Phänomene in Verbindung mit nanomechanischen Anordnungen ist ein weiteres zukunftsweisendes Gebiet. Sensoren, Resonatoren und Schalter können bis zu molekularer Größe herunterskaliert werden. Hier eröffnet sich ein interessantes Gebiet für die Verbindung von Mechanik und Elektronik, da in diesem Bereich die wenig untersuchten Casimir-Kräfte sehr wichtig sind, wie die Arbeiten von Capasso in Harvard eindrucksvoll beweisen.¹⁸⁸

Zukunftsaktivitäten in Europa im Rahmen der obengenannten Kombination (zum Beispiel Elektronik und Biologie) könnten am Beispiel der Forschungsverbünde „OLIMPIA“ („Optoelectronics integrated with living systems for neuroscience investigations and applications“) und „OrgBIO“ („Organic Bioelectronics“) illustriert werden. Diese im Oktober 2012 bzw. im Oktober 2013 startenden Forschungsprojekte befassen sich mit der „organischen Bioelektronik“. Das weite Gebiet der Bioelektronik vereint die Welten der elektronischen Materialien und Bauelemente mit der Biologie/Physiologie, um biologische Ereignisse zu erfassen und zu manipulieren und um dadurch neue Werkzeuge für die biomedizinische Forschung und neuroregenerative Medizin zu erschaffen. Trotz großer Bemühungen von Ärzten und Forschern weltweit hindert unsere begrenzte Einsicht in neuro-pathophysiologische Vorgänge und Krankheiten (Beispiele sind ischämischer Schlaganfall, Epilepsie oder Parkinson sowie periphere Nervenverletzungen) die Suche nach Heilmittel und ist somit ein gewichtiger Grund für eine Vielzahl von Todesfällen oder Behinderung weltweit. Neue organische lichtempfindliche Bauelemente werden zur Erfassung der neuronalen bioelektrischen Aktivität entwickelt, welche spektrale Änderungen von Farbstoffen (spannungsempfindlichen oder Ionen Chromophore) in den Zellen erfassen. Im Rahmen dieser Entwicklung wird auch die Nanotransfer-Strukturierungstechnik (siehe Nanoimprint-Lithographie) verwendet, um die organische Schnittstelle mit dem neuronalen Zellsystem zu funktionalisieren. Flexibles PDMS-Substrat wird verwendet, um Bauelemente mit einem mikrofluidischen System, in welchem das Zellwachstum stattfindet, zu verbinden. Darüber hinaus werden innovative Fertigungstechnologie wie Sprüh-Beschichtung angewandt und Protokolle dazu entwickelt.

13.2 DER DNA-TRANSISTOR

Die Desoxyribonukleinsäure (DNS, englisch DNA) ist ein in allen Lebewesen vorkommendes Biomolekül, welches Träger der Erbinformation ist. Die biologische Replikation erfolgt durch Auftrennung der DNA-Doppelhelix in zwei Einzelstränge. Die beiden Einzelstränge dienen anschließend als Matrizen für den zu synthetisierenden Gegenstrang.

Eine interessante Anwendungsmöglichkeit finden Festkörper-Nanoporen in der Bio-Nanoelektronik. Festkörper-Nanoporen sind Löcher mit Nanometer-Dimensionen in Festkörpern wie Silizium oder Graphen. Festkörper-Nanoporen können zur Sequenzierung ganzer DNA-Moleküle verwendet werden. Eine Methode beruht darauf, die von einem durch die Nanopore wandernden DNA-Einzelstrang in beiderseits der Nanopore

¹⁸⁸ Capasso et al. 2007; Munday et al. 2008; Munday et al. 2009.

angeordneten Elektroden induzierte Ladung zum Auslesen der Nukleotid-Sequenzen zu benutzen. Dadurch wird eine DNA-Detektion mit einer Auflösung von mindestens zehn bis fünfzehn Nukleotiden erreicht.¹⁸⁹

Fazit: Die Kombination von Elektronik, Mechanik und Optik der Nanostrukturen ergibt eine Vielzahl von vielversprechenden Anwendungen, besonders in der Medizin.

14 LITERATUR

Aassime et al. 2001

Aassime, A./Johansson, G./Wendin, G./Schoelkopf, R./Delsing, P.: "Radio-Frequency Single-Electron Transistor as Readout Device for Qubits: Charge Sensitivity and Back-action". In: *Physical Review Letters*, 86: 15, 2001, S. 3376 – 3379.

Abdellah et al. 2010

Abdellah, A./Fabel, B./Lugli, P./Scarpa, G.: "Spray Deposition of Organic Semiconducting Thin-Films: Towards the Fabrication of Arbitrary Shaped Organic Electronic Devices". In: *Organic Electronics*, 11, Issue 6, Juni 2010, S. 1031 – 1038.

Abrams/Lloyd 1997

Abrams, D. S./Lloyd, S.: "Simulation of Many-Body Fermi Systems on a Universal Quantum Computer". In: *Physical Review Letters*, 79: 13, 1997, S. 2586 – 2589.

Ahmed et al. 2007

Ahmed, I./Er Ping Li/Lee, H.: "Electromagnetic Waveguiding in Metallic Plasmonic Structures Using FDTD". In: *IEEE: Nanotechnology, 2007 (IEEE-NANO 2007. 7th IEEE Conference on, 2007)*, S. 494 – 497.

Ahmed et al. 2009

Ahmed, I./Er Ping Li/Vahldieck, R.: "Electromagnetic Wave Propagation in a Ag Nanoparticle-Based Plasmonic Power Divider". In: *Optics Express*, 17: 1, 2009, S. 337 – 345.

Akarvardar et al. 2007

Akarvardar, K./Elata, D./Parsa, R./Wan, G. C./Yoo, K./Provine, J./Peumans, P./Howe, R. T./Wong, H. S.: "Design Considerations for Complementary Nanoelectromechanical Logic Gates". In: *IEEE International: Electron Devices Meeting, 2007 (IEDM 2007)*, 2007, S. 299 – 302.

Akinaga/Shima 2010

Akinaga, H./Shima, H.: "Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides". In: *Proceedings of the IEEE*, 98: 12, 2010, S. 2237 – 2251.

¹⁸⁹ Harrer et al. 2010.

Alam et al. 2010

Alam, M. T./Siddiq, M. J./Bernstein, G. H./Niemier, M./Porod, W./Hu, X. S.: "On-Chip Clocking for Nanomagnet Logic Devices". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 9: 3, 2010, S. 348 – 351.

Annett 2004

Annett, J. F.: *Superconductivity, Superfluids, and Condensates*, Oxford: Oxford University Press, USA, 2004.

Appenzeller et al. 2004

Appenzeller, J./Lin, Y./Knoch, J./Avouris, P.: "Band-to-band Tunneling in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors". In: *Physical Review Letters*, 93: 19, 2004, S. 196805.

Appenzeller et al. 2008

Appenzeller, J./Knoch, J./Bjork, M. T./Riel, H./Schmid, H./Riess, W.: "Toward Nanowire Electronics". In: *Electron Devices*, IEEE Transactions on, 55: 11, November 2008, S. 2827 – 2845.

Ashley et al. 2009

Ashley, T./Emeny, M. T./Hayes, D. G./Hilton, K. P./Jefferies, R./Maclean, J. O./Smith, S. J./Tang, A. W./Wallis, D. J./Webber, P. J.: "High-Performance InSb Based Quantum Well Field Effect Transistors for Low-Power Dissipation Applications". In: *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2009, Baltimore, U.S.A., S. 1 – 4. (Tagungsband)

Awschalom/Flatté 2007

Awschalom, D. D./Flatté, M. E.: "Challenges for Semiconductor Spintronics". In: *Nature Physics*, 3: 3, 2007, S. 153 – 159.

Bachtold et al. 2001

Bachtold, A./Hadley, P./Nakanishi, T./Dekker, C.: "Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors". In: *Science*, 294, 2001, S. 1317 – 1320.

Bae et al. 2010

Bae, S./Kim, H./Lee, Y./Xu, X./Park, J./Zheng, Y./Balakrishnan, J./Lei, T./Kim, H. R./Song, Y. I./Kim, Y./Kim, K. S./Ozyilmaz, B./Ahn, J./Hong, B. H./Iijima, S.: "Roll-to-Roll Production of 30-inch Graphene Films for Transparent Electrodes". In: *Nature Nanotechnology*, 5: 8, 2010, S. 574 – 578.

Baierl et al. 2011

Baierl, D./Fabel, B./Lugli, P./Scarpa, G.: "Efficient Indium-Tin-Oxide (ITO) Free Top-Absorbing Organic Photodetector with Highly Transparent Polymer Top Electrode". In: *Organic Electronics*, 12, Issue 10, Oktober 2011, S. 1669–1673.

Bardeen et al. 1957a

Bardeen, J./Cooper, L. N./Schrieffer, J. R.: "Microscopic Theory of Superconductivity". In: *Physical Review*, 106: 1, 1957, S. 162–164.

Bardeen et al. 1957b

Bardeen, J./Cooper, L. N./Schrieffer, J. R.: "Theory of Superconductivity". In: *Physical Review*, 108: 5, 1957, S. 1175–1204.

BareiB et al. 2011

BareiB, M./Imtaar, M. A./Fabel, B./Scarpa, G./Lugli, P.: "Temperature Enhanced Large Area Nano Transfer Printing on Si/SiO₂ Substrates Using Si Wafer Stamps". In: *Journal of Adhesion*, 87, Issue 9, 2011, S. 893–901.

Barnes et al. 2003

Barnes, W./Dereux, A./Ebbesen, T.: "Surface Plasmon Subwavelength Optics". In: *Nature*, 424, 2003, S. 824–830.

Baughman et al. 2002

Baughman, R./Zakhidov, A./de Heer, W.: "Carbon Nanotubes – the Route Toward Applications". In: *Science*, 297, 2002, S. 787–792.

Baumgardner et al. 2007

Baumgardner, J./Petsetski, A./Murduck, J./Przybysz, J./Adam, J./Zhang, H.: "Inherent Linearity in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors". In: *Applied Physics Letters*, 91, 2007, S. 1–3.

Becherer et al. 2007

Becherer, M./Csaba, G./Emling, R./Ji, L./Porod, W./Lugli, P. et al.: "Ordering Phenomena in Focused Ion Beam Structured Co/Pt Multilayers". In: *Proceedings of the 71st Annual Meeting of the German Physical Society*, Verhandl, DPG (VI), 2007, S. 42.

Becherer et al. 2008

Becherer, M./Csaba, G./Porod, W./Emling, R./Lugli, P./Schmitt-Landsiedel, D.: "Magnetic Ordering of Focused-Ion-Beam Structured Cobalt-Platinum Dots for Field-Coupled". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 7: 3, Mai 2008, S. 316–320.

Becker 1957

Becker, H. J.: "Low voltage electrolytic capacitor". In: *US Patent 2,800,616*, 1957.

Behin-Aein et al. 2010

Behin-Aein, B./Datta, D./Salahuddin, S./Datta, S.: "Proposal for an All-Spin Logic Device with Built-in Memory". In: *Nature Nanotechnology*, 5: 4, 2010, S. 266–270.

Bernstein et al. 2005

Bernstein, G. H./Imrea, A./Metlushko, V./Orlov, A./Zhou, L./Ji, L./Csaba, G./Porod, W.: "Magnetic QCA Systems". In: *Microelectronics Journal*, 36, 2005, S. 619–624.

Bhuwarka et al. 2004

Bhuwarka, K. K./Schulze, J./Eisele, I.: "Performance Enhancement of Vertical Tunnel Field-Effect Transistor with SiGe in the p+ Layer". In: *Japanese Journal of Applied Physics*, 43, 2004, S. 4073–4078.

Bocko et al. 1997

Bocko, M. F./Herr, A. M./Feldman, M. J.: "Prospects for Quantum Coherent Computation Using Superconducting Electronics". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7: 2, 1997, S. 3638–3641.

Boucart et al. 2009

Boucart, K./Riess, W./Ionescu, A. M.: "Lateral Strain Profile as Key Technology Booster for All-Silicon Tunnel FETs". In: *IEEE Electron Device Letters*, 30: 6, 2009, S. 656–658.

Burke 2002

Burke, P.: "An RF Circuit Model for Carbon Nanotubes". In: *Nanotechnology*, 2002 (IEEE-NANO 2002. Proceedings of the 2002 2nd IEEE Conference on Nanotechnology), Washington D.C., U.S.A., S. 393–396.

Burke 2003

Burke, P.: "An RF Circuit Model for Carbon Nanotubes". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2: 1, 2003, S. 55–58.

Cao et al. 2008

Cao, Q./Kim, H./Pimparkar, N./Kulkarni, J. P./Wang, C./Shim, M./Roy, K./Alam, M. A./Rogers, J. A.: "Medium-Scale Carbon Nanotube Thin-Film Integrated Circuits on Flexible Plastic Substrates". In: *Nature*, 454, 2008, S. 495–500.

Cao/Rogers 2008

Cao, Q./Rogers, J. A.: "Random Networks and Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes for Electronic Device Applications". In: *Nano Research*, 1: 4, 2008, S. 259–272.

Capasso et al. 2007

Capasso, F./Munday, J./Iannuzzi, D./Chan, H.: "Casimir Forces and Quantum Electrodynamical Torques: Physics and Nanomechanics". In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 13: 2, 2007, S. 400–414.

Chou 1995

Chou, S. Y.: "Imprint of Sub-25 nm Vias and Trenches in Polymers". In: *Applied Physics Letters*, 67, 1995, S. 3114–3116.

Chua 1971

Chua, L.: "Memristor – The Missing Circuit Element". In: *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18: 5, 1971, S. 507–519.

Coey/Sanvito 2004

Coey, J./Sanvito, S.: "Magnetic Semiconductors and Half-Metals". In: *J. of Physics D: Applied Physics*, 37, 2004, S. 988–993.

Colombo et al. 2008

Colombo, C./Spirkoska, D./Frimmer, M./Abstreiter, G./Fontcuberta i Morral, A.: "Ga-Assisted Aatalyst-Free Growth Mechanism of GaAs Nanowires by Molecular Beam Epitaxy". In: *Physical Review B*, 77, 2008.

Conway et al. 1997

Conway, B./Birss, V./Wojtowicz, J.: "The Role and Utilization of Pseudocapacitance for Energy Storage by Supercapacitors". In: *Journal of Power Sources*, 66: 1–2, 1997, S. 1–14.

Cowburn/Welland 2000

Cowburn, R./Welland, M.: "Room Temperature Magnetic Quantum Cellular Automata". In: *Science*, 287, 2000, S. 1466–1468.

Csaba et al. 2005

Csaba, G./Lugli, P./Csurgay, A./Porod, W.: "Simulation of Power Gain and Dissipation in Field-Coupled Nanomagnets". In: *Journal of Computational Electronics*, 4, 2005, S. 105–110.

Csaba et al. 2012

Csaba, G./Kiermaier, J./Becherer, M./Breitkreutz, S./Ju, X./Lugli, P./Schmitt-Landsiedel, D./Porod, W.: "Clocking Magnetic Field-Coupled Devices by Domain Walls". In: *Journal of Applied Physics*, 111: 7, April 2012, S. 07E337-07E337-3.

Csaba/Lugli 2009

Csaba, G./Lugli, P.: "Read-Out Design Rules for Molecular Crossbar Architectures". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 8: 3, 2009, S. 369–374.

Cui/Lieber 2001

Cui, Y./Lieber, C. M.: "Functional Nanoscale Electronic Devices Assembled Using Silicon Nanowire Building Blocks". In: *Science*, 291, 2. Februar 2001, S. 851–853.

Dash et al. 2009

Dash, S./Sharma, S./Patel, R./De Jong, M./Jansen, R.: "Electrical Creation of Spin Polarization in Silicon at Room Temperature". In: *Nature*, 462, 2009, S. 491–494.

Dean et al. 2010

Dean, C. R./Young, A. F./Merici, I./Lee, C./Wang, L./Sorgenfrei, S./Watanabe, K./Taniguchi, T./Kim, P./Shepard, K. L./Hone, J.: "Boron Nitride Substrates for High-Quality Graphene Electronics". In: *Nature Nanotechnology*, 5: 10, 2010, S. 722–726.

Dekker 1999

Dekker, C.: "Carbon Nanotubes as Molecular Quantum Wires". In: *Physics Today*, 52, 1999, S. 22–28.

Ding et al. 2009

Ding, L./Tselev, A./Wang, J./Yuan, D./Chu, H./McNicholas, T. P./Li, Y./Liu, J.: "Selective Growth of Well-Aligned Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes". In: *Nano Letters*, 9: 2, 2009, S. 800–805.

Ditlbacher et al. 2005

Ditlbacher, H./Hohenau, A./Wagner, D./Kreibig, U./Rogers, M./Hofer, F./Aussenegg, F. R./Krenn, J. R.: "Silver Nanowires as Surface Plasmon Resonators". In: *Physical Review Letters*, 95, 2005, S. 1–4.

Dragoman et al. 2008

Dragoman, M./Konstantinidis, G./Kostopoulos, A./Dragoman, D./Neculoiu, D./Buiculescu, R./Plana, R./Cocchetti, F./Hartnagel, H.: "Multiple Negative Resistances in Trenched Structures Bridged with Carbon Nanotubes". In: *Applied Physics Letters*, 93: 4, 2008, S. 043117-043117-3.

Du et al. 2008

Du, X./Skachko, I./Barker, A./Andrei, E.: "Approaching Ballistic Transport in Suspended Graphene". In: *Nature Nanotechnology*, 3: 8, 2008, S. 491–495.

Duty et al. 2004

Duty, T./Gunnarsson, D./Bladh, K./Delsing, P.: "Coherent Dynamics of a Josephson Charge Qubit". In: *Physical Review B*, 69, 2004, S. 1–4.

Ebbesen/Ajayan 1992

Ebbesen, T./Ajayan, P.: "Large-Scale Synthesis of Carbon Nanotubes". In: *Nature*, 358, 1992, S. 220–222.

Erlen/Lugli 2009

Erlen, C./Lugli, P.: *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED56, 2009, S. 546–455.

Feynman 1959

Feynman, R. P.: "There's Plenty of Room at the Bottom" (Vortrag, American Physical Society in Pasadena, 29. Dezember 1959), Pasadena, 1959. In: *Engineering and Science (Caltech)*, Februar 1960, S. 20 ff.

Feynman 1982

Feynman, R. P.: "Simulating Physics with Computers". In: *International Journal of Theoretical Physics*, 21: 6/7, 1982, S. 467–488.

Fichtner/Russer 2006

Fichtner, N./Russer, P.: "On the Possibility of Nanowire Antennas" (36th European Microwave Conference, 2006), Manchester, U.K., S. 870–873 (Tagungsband).

Flocke/Noll 2007

Flocke, A./Noll T. G.: "Fundamental Analysis of Resistive Nano-Crossbars for the Use in Hybrid Nano/CMOS-Memory" (33rd European Solid State Circuits Conference, September 2007), Proc. ESSCIRC, Munich, Germany, 2007, S. 328–331 (Tagungsband).

Fontcuberta et al. 2008

Fontcuberta i Morral, A./Colombo, C./Abstreiter, G./Arbiol, J./Morante, J. R.: "Nucleation Mechanism of Gallium-Assisted Molecular Beam Epitaxy Growth of Gallium Arsenide Nanowires". In: *Applied Physics Letters*, 92, 063112, 2008.

Frackowiak et al. 2000

Frackowiak, E./Metenier, K./Bertagna, V./Beguin, F.: "Supercapacitor Electrodes from Multiwalled Carbon Nanotubes". In: *Applied Physics Letters*, 77: 15, 2000, S. 2421–2423.

Franklin/Chen 2010

Franklin, A. D./Chen, Z.: "Length Scaling of Carbon Nanotube Transistors". In: *Nature Nanotechnology*, 5: 12, 2010, S. 858–862.

Frischeisen et al. 2011

Frischeisen, J. et al.: "Light Extraction from Surface Plasmons and Waveguide Modes in an Organic Light-Emitting Layer by Nanoimprinted Gratings". In: *Optics Express*, 19, Issue S1, 2011, S. A7–A19.

Fujita et al. 2007

Fujita, S./Nomura, K./Abe, K./Lee, T. H.: "3-D Nanoarchitectures with Carbon Nanotube Mechanical Switches for Future On-Chip Network Beyond CMOS Architecture". In: *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 54: 11, 2007, S. 2472–2479.

Geim 2009

Geim, A. K.: "Graphene: Status and Prospects". In: *Science*, 324, 2009, S. 1530–1534.

Geim/Novoselov 2007

Geim, A. K./Novoselov, K. S.: "The Rise of Graphene". In: *Arxiv preprint cond-mat/0702595*, 2007.

Green et al. 2007

Green, J. E./Choi, J. W./Boukai, A./Bunimovich, Y./Johnston-Halperin, E./Delonno, E./Luo, Y./Sheriff, B. A./Xu, K./Shin, Y. S./Tseng, H./Stoddart, J. F./Heath, J. R.: "A 160-kilobit Molecular Electronic Memory Patterned at 1011 Bits Per Square Centimetre". In: *Nature*, 445, 2007, S. 414 – 417.

Gruska 1999

Gruska, J.: *Quantum Computing*, New York: McGraw-Hill, 1999.

Guo et al. 1995a

Guo, T./Nikolaev, P./Rinzler, A./Tomanek, D./Colbert, D./Smalley, R.: "Self-Assembly of Tubular Fullerenes". In: *Journal of Physical Chemistry*, 99, 1995, S. 10694 – 10697.

Guo et al. 1995b

Guo, T./Nikolaev, P./Thess, A./Colbert, D./Smalley, R.: "Catalytic Growth of Single-Walled Nanotubes by Laser Vaporization". In: *Chemical Physics Letters*, 243, 1995, S. 49 – 54.

Hall/Flatté 2006

Hall, K. C./Flatté M. E.: "Performance of a Spin-Based Insulated Gate Field Effect Transistor". In: *Applied Physics Letters*, 88, 2006, S. 162503-1 – 162503-3.

Han et al. 2004

Han, J.-H./Lee, T./Kim, D./Yoo, J.-B./Park, C.-Y./Choi, J./Jung, T./Hand, I./Kim, J.: "Field-Emission Properties of Carbon Nanotubes Grown on Co/TiN Coated Ta Substrate for Cathode in Microwave Power Amplifier". In: *Diamond and Related Materials*, 13, 2004, S. 987 – 993.

Harrer et al. 2008

Harrer, S./Strobel, S./Scarpa, G./Abstreiter, G./Tornow, M./Lugli, P.: "Room Temperature Nanoimprint Lithography Using Molds Fabricated by Molecular Beam Epitaxy". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 7: 3, 2008, S. 363 – 379.

Harrer et al. 2010

Harrer, S./Ahmed, S./Afzali-Ardakani, A./Luan, B./Waggoner, P. S./Shao, S./Peng, H./Goldfarb, D. L./Martyna, G. J./Rosnagel, S. M./Deligianni, L./Stolovitzky, G. A.: "Electrochemical Characterization of Thin Film Electrodes Toward Developing a DNA Transistor". In: *Langmuir*, 26: 24, 2010, S. 19191 – 19198.

Heer et al. 1995

Heer, W. A. D./Chatelain, A./Ugarte, D.: "A Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source". In: *Science*, 270, 1995, S. 1179–1180.

Heremans et al. 2011

Heremans, P./Gelinck, G./Müller, R./Baeg, K./Kim, D./Noh, Y.: "Polymer and Organic Nonvolatile Memory Devices". In: *Chemistry of Materials*, 23 (3), 2011, S. 341–358.

Hertenberger et al. 2010

Hertenberger, S./Rudolph, D./Bichler, M./Finley, J./Abstreiter, G./Koblmüller, G.: "Growth Kinetics in Position-Controlled and Catalyst-Free InAs Nanowire Arrays on Si (111) Grown by Selective Area Molecular Beam Epitaxy". In: *Journal of Applied Physics*, 108: 11, 2010, S. 114316–114316.

Hess 2000

Hess, K.: *Advanced Theory of Semiconductor Devices*, New York: Wiley-Interscience 2000.

Hirvensalo 2004

Hirvensalo, M.: *Quantum Computing*, Berlin: Springer Verlag 2004.

Huber et al. 1995

Huber, W. M./Arendt, B./Huggard, P. G./Prettl, W.: "Square-Law Josephson Detection of Far-Infrared Radiation with Current-Biased Granular Tl₂Ba₂CaCu₂O₈ Thin Films". In: *Superconductor Science and Technology*, 8: 10, 1995, S. 769–773.

Iijima 1991

Iijima, S.: "Helical Microtubules of Graphitic Carbon". In: *Nature*, 354, 1991, S. 56–58.

Imre et al. 2003

Imre, A./Csaba, G./Bernstein, G./Porod, W./Metlushko, V.: "Investigation on Shape-Dependent Switching of Coupled Nanomagnets". In: *Superlattices and Microstructures*, 34, 2003, S. 513–518.

Imre et al. 2006

Imre, A./Csaba, G./Ji, L./Orlov, A./Bernstein, G./Porod, W.: "Majority Logic Gate for Magnetic Quantum-Dot Cellular Automata". In: *Science*, 311, 2006, S. 205–208.

Ishigami et al. 2008

Ishigami, N./Ago, H./Imamoto, K./Tsuji, M./Iakoubovskii, K./Minami, N.: "Crystal Plane Dependent Growth of Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes on Sapphire". In: *Journal of the American Chemical Society*, 130: 30, 2008, S. 9918–9924.

ITR 2005

Semiconductor Industry Association. The International Technology Roadmap for Semiconductors, 2005 edition. International SEMATECH: Albany, NY, 2005.

ITR 2007

Semiconductor Industry Association. The International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007 edition. International SEMATECH: Albany, NY, 2007.

ITR 2008

Semiconductor Industry Association. The International Technology Roadmap for Semiconductors, 2008 update. International SEMATECH: Albany, NY, 2008.

James et al. 2003

James, M./Cheng, L./Nackashi, D./Yao, Y./Flatt, A./Angelo, S./Mallouk, T./Franzon, P.: "Nanocell Electronic Memories". In: *Journal of the American Chemical Society*, 125: 43, 2003, S. 13279–13283.

Jang et al. 2008

Jang, W. W./Lee, J. O./Yoon, J./Kim, M./Lee, J./Kim, S./Cho, K./Kim, D./Park, D./Lee, W.: "Fabrication and Characterization of a Nanoelectromechanical Switch with 15-nm-Thick Suspension Air Gap". In: *Applied Physics Letters*, 92: 10, 2008, S. 103110-103110-3.

Jo et al. 2010

Jo, S. H./Chang, T./Ebong, I./Bhadviya, B. B./Mazumder, P./Lu, W.: "Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems". In: *Nano Letters*, 10: 4, 2010, S. 1297–1301.

Ju et al. 2012

Ju, X./Savo, A./Lugli, P./Kiermaier, J./Becherer, M./Breitkreutz, S./Schmitt-Landsiedel, D./Porod, W./Csaba, G.: "Computational Study of Domain-Wall-Induced Switching of Co/Pt Multilayer" (15th International Workshop on Computational Electronics, IWCE, Mai 2012), Madison, Wisconsin, U.S.A., 2012, S. 1–3 (Tagungsband).

Ju et al. 2012a

Ju, X./Wartenburg, S./Rezgani, J./Becherer, M./Kiermaier, J./Breitkreutz, S./Schmitt-Landsiedel, D./Porod, W./Lugli, P./Csaba, G.: "Nanomagnet Logic from Partially Irradiated Co/Pt Nanomagnets". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 11: 1, Januar 2012, S. 97–104.

Kaeriyama et al. 2005

Kaeriyama, S./Sakamoto, T./Sunamura, H./Mizuno, M./Kawaura, H./Hasegawa, T./Terabe, K./Nakayama, T./Aono, M.: "A Nonvolatile Programmable solid-Electrolyte Nanometer Switch". In: *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 40: 1, 2005, S. 168–176.

Kaertner/Russer 1990

Kaertner, F. X./Russer, P.: "Generation of Squeezed Microwave States by a Dc-Pumped Degenerate Parametric Josephson Junction Oscillator". In: *Physical Review A*, 42: 9, 1990, S. 5601–5612.

Kang et al. 2007

Kang, S. J./Kocabas, C./Ozel, T./Shim, M./Pimparkar, N./Alam, M. A./Rotkin, S. V./Rogers, J. A.: "High-Performance Electronics Using Dense, Perfectly Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes". In: *Nature Nanotechnology*, 2: 4, 2007, S. 230–236.

Kärtner/Schenzle 1993

Kärtner, F. X./Schenzle, A.: "Analytic Solution for the Dissipative Anharmonic Quantum Oscillator and Semiclassical Analysis". In: *Physical Review A*, 48: 2, 1993, S. 1009–1019.

Kasper et al. 2009

Kasper, E./Kissinger, D./Russer, P./Weigel, R.: „High Speeds in a Single Chip". In: *IEEE Microwave Magazine*, 10: 7, 2009, S. 28–33.

Kedzierski et al. 2008

Kedzierski, J./Hsu, P./Healey, P./Wyatt, P. W./Keast, C. L./Sprinkle, M./Berger, C./de Heer, W. A.: "Epitaxial Graphene Transistors on SiC Substrates". In: *IEEE Transactions on Electron Devices*, 55: 8, 2008, S. 2078–2085.

Khitun et al. 2009

Khitun, A./Nikonov, D./Wang, K.: "Magnetolectric Spin Wave Amplifier for Spin Wave Logic Circuits". In: *Journal of Applied Physics*, 106, 2009, S. 123909.

Klauk 2010

Klauk, H.: "Organic Thin-Film Transistors". In: *Chemical Society Reviews*, 39, 2010, S. 2643–2666.

Kocabas et al. 2007

Kocabas, C./Kang, S. J./Ozel, T./Shim, M./Rogers, J. A.: "Improved Synthesis of Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes and Their Implementation in Thin Film Type Transistors". In: *Journal of Physical Chemistry C*, 111, 2007, S. 17879–17886.

Kocabas et al. 2008

Kocabas, C./Kim, H./Banks, T./Rogers, J. A./Pesetski, A. A./Baumgardner, J. E./Krishnaswamy, S. V./Zhang, H.: "Radio Frequency Analog Electronics Based on Carbon Nanotube Transistors". In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105: 5, 2008, S. 1405–1409.

Kocabas et al. 2009

Kocabas, C./Dunham, S./Cao, Q./Cimino, K./Ho, X./Kim, H. S./Dawson, D./Payne, J./Stuenkel, M./Zhang, H. et al.: "High-Frequency Performance of Submicrometer Transistors That Use Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes". In: *Nano Letters*, 9: 5, 2009, S. 1937–1943.

Koo et al. 2009

Koo, H. C./Kwon, J. H./Eom, J./Chang, J./Han, S. H./Johnson, M.: "Control of Spin Precession in a Spin-Injected Field Effect Transistor". In: *Science*, 325, 2009, S. 1515–1518.

Koswatta et al. 2009

Koswatta, S. O./Lundstrom, M. S./Nikonov, D. E.: "Performance Comparison Between p-i-n Tunneling Transistors and Conventional MOS-FETs", In: *IEEE Transactions on Electron Devices*, 56: 3, 2009, S. 456–465.

Kuzum et al. 2011

Kuzum, D./Krishnamohan, T./Nainani, A./Sun, Y./Pianetta, P. A./Wong, H. S./Saraswat, K. C.: "High-Mobility Ge N-MOSFETs and Mobility Degradation Mechanisms". In: *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58: 1, 2011, S. 59–66.

Kuzum et al. 2012

Kuzum, D./Jeyasingh, R./Lee, B./Wong, H.: "Nanoelectronic Programmable Synapses Based on Phase Change Materials for Brain-Inspired Computing". In: *Nano Letters*, 12 (5), 2012, S. 2179–2186.

Lacquaniti et al. 2005

Lacquaniti, V./Cagliero, C./Maggi, S./Steni, R./Andreone, D./Sosso, A.: "RF Properties of Overdamped SIS Junctions". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15: 2, 2005, S. 114–116.

Landauer 2000

Landauer, R.: "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process". In: *IBM Journal of Research and Development*, 44: 1, 2000, S. 261–269.

Lau et al. 2004

Lau, C./Stewart, D./Williams, R./Bockrath, M.: "Direct Observation of Nanoscale switching Centers in Metal/Molecule/Metal Structures". In: *Nano Letters*, 4: 4, 2004, S. 569–572.

Lee et al. 2007

Lee, M./Park, Y./Suh, D./Lee, E./Seo, S./Kim, D./Jung, R./Kang, B./Ahn, S./Lee, C. B./Seo, D. H./Cha, Y./Yoo, I./Kim, J./Park, B. H.: "Two Series Oxide Resistors Applicable to High Speed and High Density Nonvolatile Memory". In: *Advanced Materials*, 19: 22, 2007, S. 3919–3923.

Lee et al. 2010

Lee, C./Yu, L./Chen, H.: "Memory Bistable Mechanisms of Organic Memory Devices". In: *Applied Physics Letters*, 97: 4, 2010, S. 043301-043301-3.

Lee et al. 2011

Lee, M./Lee, C. B./Lee, D./Lee, S. R./Chang, M./Hur, J. H./Kim, Y./Kim, C./Seo, D. H./Seo, S./Chung, U./Yoo, I./Kim, K.: "A Fast, High-Endurance and Scalable Non-Volatile Memory Device Made from Asymmetric Ta₂O_{5x}/TaO_{2x} Bilayer Structures". In: *Nature Materials*, 10: 8, 2011, S. 625–630.

Lemme et al. 2007

Lemme, M./Echtermeyer, T./Baus, M./Kurz, H.: "A Graphene Field-Effect Device". In: *IEEE Electron Device Letters*, 28: 4, 2007, S. 282–284.

Lent et al. 2003

Lent, C./Isaksen, B./Lieberman, M.: "Molecular Quantum-Dot Cellular Automata". In: *Journal of the American Chemical Society*, 125: 4, 2003, S. 1056–1063.

Li et al. 2004

Li, S./Yu, Z./Yen, S. F./Tang, W. C./Burke, P. J.: "Carbon Nanotube Transistor Operation at 2.6 GHz". In: *Nano Letters*, 4: 4, 2004, S. 753 – 756.

Li et al. 2007

Li, Q./Koo, S./Edelstein, M. D./Suehle, J. S./Richter, C. A.: "Silicon Nanowire Electro-mechanical Switch for Logic Device Application". In: *MRS Online Proceedings Library*, 1018, 2007, S. 1018-EE09-07.

Li et al. 2008

Li, X./Wang, X./Zhang, L./Lee, S./Dai, H.: "Chemically Derived, Ultrasoother Graphene Nanoribbon Semiconductors". In: *Science*, 319, 2008, S. 1229 – 1232.

Li et al. 2009

Li, X./Cai, W./An, J./Kim, S./Nah, J./Yang, D./Piner, R./Velamakanni, A./Jung, I./Tutuc, E./Banerjee, S. K./Colombo, L./Ruoff, R. S.: "Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils". In: *Science*, 324, 2009, S. 1312 – 1314.

Li et al. 2010

Li, X./Magnuson, C./Venugopal, A./An, J./Suk, J./Han, B./Borysiak, M./Cai, W./Velamakanni, A./Zhu, Y. et al.: "Graphene Films with Large Domain Size by a Two-Step Chemical Vapor Deposition Process". In: *Nano letters*, 10 (11), 2010.

Li et al. 2011

Li, C./Erve, O. van't./Jonker, B.: "Electrical injection and detection of Spin Accumulation in Silicon at 500 K with Magnetic Metal/Silicon Dioxide Contacts". In: *Nature Communications*, 2, 2011, S. 245.

Li et al. 2012

Li, P./Csaba, G./Sankar, V. K./Ju, X./Lugli, P./Hu, X. S./Niemier, M./Porod, W./Bernstein, G. H.: "Switching Behavior of Lithographically Fabricated Nanomagnets for Logic Applications", in: *Journal of Applied Physics*, 111: 7, März 2012, S. 07B911-07B911-3.

Liao et al. 2010

Liao, L./Lin, Y./Bao, M./Cheng, R./Bai, J./Liu, Y./Qu, Y./Wang, K. L./Huang, Y./Duan, X.: "High Speed Graphene Transistors with a Self-Aligned Nanowire Gate". In: *Nature*, 467, 2010, S. 305 – 308.

Likharev 1999

Likharev, K. K.: "Single-Electron Devices and Their Applications". In: *Proceedings of the IEEE*, 87: 4, 1999, S. 606–632.

Lin et al. 2009

Lin, Y./Chiu, H./Jenkins, K. A./Farmer, D. B./Avouris, P./Valdes-Garcia, A.: "Dual-Gate Graphene FETs with fT of 50 GHz". In: *IEEE Electron Devices Letters*, 99, 2009, S. 1–3.

Lortscher et al. 2006

Lortscher, E./Ciszek, J./Tour, J./Riel, H.: "Reversible and Controllable Switching of a Single-Molecule Junction". In: *Small*, 2: 8-9, 2006, S. 973–977.

Lu et al. 2008

Lu, W./Xie, P./Lieber, C. M.: "Nanowire Transistor Performance Limits and Applications". In: *IEEE Transactions on Electron Devices*, 55: 11, 2008, S. 2859–2876.

Lu/Lieber 2007

Lu, W./Lieber, C.: "Nanoelectronics From the Bottom Up". In: *Nature Materials*, 6: 11, 2007, S. 841–850.

Makhlin et al. 2000

Makhlin, Y./Schon, G./Shnirman, A.: "Nano-Electronic Circuits as Quantum Bits". In: *Proceedings of The 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (SCAS 2000 Geneva, Volume 2)*, 2000, S. 241–244.

Makhlin et al. 2001

Makhlin, Y./Schon, G./Shnirman, A.: "Quantum-State Engineering with Josephson-Junction Devices". In: *Reviews of Modern Physics*, 73, 2001, S. 357–400.

Meindl et al. 2001

Meindl, J. D./Chen, Q./Davis, J. A.: "Limits on Silicon Nanoelectronics for Terascale Integration". In: *Science*, 293, 2001, S. 2044–2049.

Meric et al. 2008

Meric, I./Han, M. Y./Young, A. F./Ozyilmaz, B./Kim, P./Shepard, K. L.: "Current Saturation in Zero-Bandgap, Top-Gated Graphene Field-Effect Transistors". In: *Nature Nanotechnology*, 3: 11, 2008, S. 654–659.

Moon et al. 2009

Moon, J./Curtis, D./Hu, M./Wong, D./McGuire, C./Campbell, P./Jernigan, G./Tedesco, J./VanMil, B./Myers-Ward, R./Eddy, C./Gaskill, D.: "Epitaxial-Graphene RF Field-Effect Transistors on Si-Face 6H-SiC Substrates". In: *IEEE Electron Devices Letters*, 30: 6, 2009, S. 650–652.

Moon et al. 2010

Moon, J./Curtis, D./Hu, M./Wong, D./Campbell, P./Jernigan, G./Tedesco, J. L./VanMil, B./Myers-Ward, R. L./Eddy, C. et al.: "Development Toward Wafer-Scale Graphene RF Electronics" (IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 11.–13. Januar 2010), New Orleans, LA, U.S.A., 2010, S. 1–3 (Tagungsband).

Morozov et al. 2008

Morozov, S. V./Novoselov, K. S./Katsnelson, M. I./Schedin, F./Elias, D. C./Jaszczak, J. A./Geim, A. K.: "Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer". In: *Physical Review Letters*, 100: 1, 2008, S. 16602–16605.

Munday et al. 2008

Munday, J. N./Capasso, F./Parsegian, V. A./Bezrukov, S. M.: "Measurements of the Casimir-Lifshitz Force in Fluids: The Effect of Electrostatic Forces and Debye Screening". In: *Physical Review A*, 78: 3, 2008, S. 32109.

Munday et al. 2009

Munday, J. N./Capasso, F./Parsegian, V. A.: "Measured Long-Range Repulsive Casimir-Lifshitz Forces". In: *Nature*, 457: 170, 2009, S. 170–173.

Nayfeh et al. 2008

Nayfeh, O. M./Chleirigh, C. N./Hennessy, J./Gomez, L./Hoyt, J. L./Antoniadis, D. A.: "Design of Tunneling Field-Effect Transistors Using Strained-Silicon/Strained-Germanium Type-II Staggered Heterojunctions". In: *IEEE Electron Device Letters*, 29: 9, 2008, S. 1074–1077.

Ng et al. 2004

Ng, H. T./Han, J./Yamada, T./Nguyen, P./Chen, Y. P./Meyyappan, M.: "Single Crystal Nanowire Vertical Surround-Gate Field-Effect Transistor". In: *Nano Letters*, 4: 7, 2004, S. 1247–1252.

Nielssen/Chuang 2000

Nielssen, M. A./Chuang, I. L.: *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge: Cambridge University Press 2000.

Nougaret et al. 2009

Nougaret, L./Happy, H./Dambrine, G./Derycke, V./Bourgoin, J. P./Green, A. A./Hersam, M. C.: "80 GHz Field-Effect Transistors Produced Using High Purity Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes". In: *Applied Physics Letters*, 94: 24, 2009, S. 243505-243505-3.

Novoselov et al. 2004

Novoselov, K. S./Geim, A. K./Morozov, S. V./Jiang, D./Zhang, Y./Dubonos, S. V./Grigorieva, I. V./Firsov, A. A.: "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films". In: *Science*, 306, 2004, S. 666 – 669.

Novoselov et al. 2005

Novoselov, K. S./Geim, A. K./Morozov, S. V./Jiang, D./Grigorieva, M. I./Dubonos, S. V./Firsov, A. A.: "Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene". In: *Arxiv preprint cond-mat/0509330*, 2005.

Orlov et al. 2008

Orlov, A./Imre, A./Csaba, G./Ji, L./Porod, W./Bernstein, G.: "Magnetic Quantum-dot Cellular Automata: Recent Developments and Prospects". In: *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 3: 1, 2008, S. 55 – 68.

Paternostro et al. 2004

Paternostro, M./Falci, G./Kim, M./Palma, G. M.: "Entanglement Between Two Superconducting QUBITs via Interaction with Nonclassical Radiation". In: *Physical Review B*, 69, 2004, S. 214502.

Perebeinos et al. 2005

Perebeinos, V./Tersoff, J./Avouris, P.: "Electron-Phonon Interaction and Transport in Semiconducting Carbon Nanotubes". In: *Physical Review Letters*, 94: 8, 2005, S. 86802 – 86805.

Porod 1997

Porod, W.: "Quantum-dot Devices and Quantum-dot Cellular Automata". In: *Journal of the Franklin Institute*, 334B: 5/6, 1997, S. 1147 – 1175.

Pro et al. 2009

Pro, T./Buckley, J./Huang, K./Calborean, A./Gely, M./Delapierre, G./Ghibaud, G./Duclair, F./Marchon, J. C./Jalaguier, E./Maldivi, P./De Salvo, B./Deleonibus, S.: "Investigation of Hybrid Molecular/Silicon Memories with Redox-Active Molecules Acting as Storage Media". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 8: 2, 2009, S. 204–213.

Ren et al. 1998

Ren, Z. F./Huang, Z. P./Xu, J. W./Wang, J. H./Bush, P./Siegal, M. P./Provencio, P. N.: "Synthesis of Large Arrays of Well-Aligned Carbon Nanotubes on Glass". In: *Science*, 282, 1998, S. 1105–1107.

Rosezin et al. 2011

Rosezin, R./Linn, E./Nielen, L./Kügeler, C./Bruchhaus, R./Waser, R.: "Integrated Complementary Resistive Switches for Passive High-Density Nanocrossbar Arrays". In: *IEEE Electron Device Letters*, 32: 2, 2011, S. 191–193.

Rothberg et al. 2011

Rothberg, J. M./Hinz, W./Rearick, T. M./Schultz, J./Mileski, W./Davey, M./Leamon, J. H./Johnson, K./Milgrew, M. J./Edwards, M./Hoon, J./Simons, J. F./Marran, D./Myers, J. W./Davidson, J. F./Branting, A./Nobile, J. R./Puc, B. P./Light, D./Clark, T. A./Huber, M./Branciforte, J. T./Stoner, I. B./Cawley, S. E./Lyons, M./Fu, Y./Homer, N./Sedova, M./Miao, X./Reed, B./Sabina, J./Feierstein, E./Schorn, M./Alanjary, M./Dimalanta, E./Dressman, D./Kasinskas, R./Sokolsky, T./Fidanza, J. A./Namsaraev, E./McKernan, K. J./Williams, A./Roth, G. T./Bustillo, J.: "An Integrated Semiconductor Device Enabling Non-Optical Genome Sequencing". In: *Nature*, 475, 20. Juli 2011, S. 348-52.

Russer 1972

Russer, P.: "Influence of Microwave Radiation on Current-Voltage Characteristic of Superconducting Weak Links". In: *Journal of Applied Physics*, 43, 1972, S. 2008–2010.

Russer et al. 2010

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: 7, 2010, S. 58–71.

Russer/Fichtner 2010

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

Russer/Russer 2011

Russer, P./Russer, J. A.: "Nanoelectronic RF Josephson Devices". In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59: 10, 2011, S. 2685–2701.

Saito et al. 1998

Saito, R./Dresselhaus, G./Dresselhaus, M. S.: *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, London: Imperial College Press 1998.

Sakamoto et al. 2003

Sakamoto, T./Sunamura, H./Kawaura, H./Hasegawa, T./Nakayama, T./Aono, M.: "Nanometer-Scale Switches Using Copper Sulfide". In: *Applied Physics Letters*, 82, 2003, S. 3032.

Sakamoto et al. 2010

Sakamoto, T./Iguchi, N./Aono, M.: "Nonvolatile Triode Switch Using Electrochemical Reaction in Copper Sulfide". In: *Applied Physics Letters*, 96, 2010, S. 252104.

Sato et al. 2002

Sato, M./Alvarez, G. A./Utagawa, T./Tanabe, K./Morishita, T.: "Characteristics of NdBa₂Cu₃O_{7- δ} /PrBa₂Cu₃O_{7- δ} /NdBa₂Cu₃O_{7- δ} Planar Josephson Junctions". In: *Japanese Journal of Applied Physics*, 41, 2002, S. 5572–5577.

Scarpa et al. 2009

Scarpa G. et al.: "Pattern Generation by Using High-Resolution Nanoimprinting and Nanotransfer Printing Techniques". In: *Proceedings IEEE-NANO 2009*, Genoa, Italy, 2009, S. 432–438.

Scarpa et al. 2010

Scarpa, G./Idzko, S. G./Thalhammer, S.: "Biocompatibility Studies of Functionalized Regioregular Poly(3-hexylthiophene) Layers for Sensing Applications". In: *Macromolecular Bioscience*, 10: 4, 2010, S. 378–383.

Scarpa et al. 2011

Scarpa, G. et al.: "Patterning Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) in the Sub-50-nm Region by Nanoimprint Lithography". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 10: 3, Mai 2011, S. 482–488.

Scherer et al. 1995

Scherer, A./Cheng, C. C./Yablonovich, E./Arbet-Engels, V.: "Photonic Bandgap Crystals at Optical Wavelengths" (*Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 1995. Technical Digest. CLEO/Pacific Rim'95.*), Chiba, Japan 1995, S. 29.

Schmitt-Landsiedel/Werner 2009

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

Scott/Bozano 2007

Scott, J./Bozano, L.: "Nonvolatile memory elements Based on Organic Materials". In: *Advanced Materials*, 19: 11, 2007, S. 1452–1463.

Seabaugh/Zhang 2010

Seabaugh, A. C./Zhang, Q.: "Low-Voltage Tunnel Transistors for Beyond CMOS Logic". In: *Proceedings of the IEEE*, 98: 12, 2010, S. 2095–2110.

Sheriff et al. 2008

Sheriff, B. A./Wang, D./Heath, J. R./Kurtin, J. N.: "Complementary Symmetry Nanowire Logic Circuits: Experimental Demonstrations and in Silico Optimizations". In: *ACS Nano*, 2: 9, 2008, S. 1789–1798.

Sinha/Russer 2009

Sinha, S./Russer, P.: "Quantum Computing Algorithm for Electromagnetic Field Simulation". In: *J. Quantum Information Processing*, 9: 3, 2009, S. 385–404.

Snider et al. 1999a

Snider, G./Amlani, A. O. I./Zuo, X./Bernstein, G./Lent, C./Merz, J./Porod, W.: "Quantum-dot Cellular Automata". In: *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 17: 4, 1999, S. 1394–1398.

Snider et al. 1999b

Snider, G. L./Orlov, A. O./Amlani, I./Zuo, X./Bernstein, G. H./Lent, C. S./Merz, J. L./Porod, W.: "Quantum-dot Cellular Automata: Review and Recent Experiments". In: *Journal of Applied Physics*, 85: 8, 1999, S. 4283–4285.

Solymar 1984

Solymar, L.: *Lectures on Electromagnetic Theory*, Oxford: Oxford University Press 1984.

Song et al. 2010

Song, S./Cho, B./Kim, T./Ji, Y./Jo, M./Wang, G./Choe, M./Kahng, Y./Hwang, H./Lee, T.: "Three-Dimensional Integration of Organic Resistive Memory Devices". In: *Advanced Materials*, 22: 44, 2010, S. 5048–5052.

Song et al. 2011

Song, H./Reed, M./Lee, T.: "Single Molecule Electronic Devices". In: *Advanced Materials*, 23: 14, 2011, S. 1583–1608.

Strukov et al. 2008

Strukov, D. B./Snider, G. S./Stewart, D. R./Williams, R. S.: "The Missing Memristor Found". In: *Nature*, 453, 2008, S. 80–83.

Sugahara/Nitta 2010

Sugahara, S./Nitta, J.: "Spin-Transistor Electronics: An Overview and Outlook". In: *Proceedings of the IEEE*, 98: 12, 2010, S. 2124–2154.

Tedde et al. 2009

Tedde, S. F./Kern, J./Sterzl, T./Furst, J./Lugli, P./Hayden, O.: "Fully Spray Coated Organic Photodiodes". In: *Nano Letters*, 9, 2009, S. 980–983.

Thielmann 2009

Thielmann, A.: "Blockaden bei der Etablierung der Nanoelektronik". In: *TAB Brief*, 35 (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag), 2009, S. 36–39.

Thompson/Parthasarathy 2006

Thompson, S. E./Parthasarathy, S.: "Moore's Law: The Future of Si Microelectronics". In: *Materials Today*, 9: 6, 2006, S. 20–25.

Thunich et al. 2009

Thunich, S./Prechtel, L./Spirkoska, D./Abstreiter, G./Fontcuberta i Morral, A./Holleitner, A. W.: "Photocurrent and Photoconductance Properties of a GaAs Nanowire". In: *Applied Physics Letters*, 95, 2009, S. 083111.

Tian et al. 2002

Tian, L./Lloyd, S./Orlando, T. P.: "Decoherence and Relaxation of a Superconducting Quantum Bit During Measurement". In: *Physical Review B*, 65: 14, 2002, S. 144516.

Tian/Zoller 2003

Tian, L./Zoller, P.: "Quantum Computing with Atomic Josephson Junction Arrays". In: *Physical Review A*, 68, 2003, S. 042321.

Tinkham 2004

Tinkham, M.: *Introduction to Superconductivity: Second Edition* (Dover Books on Physics), Dover: Dover Publications, 2004 (2. Aufl.).

Toffoli 1987

Toffoli, T.: *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*, MIT Press, 1987.

Torres et al. 2003

Torres, C. M. S./Zankovych, S./Seekamp, J./Kam, A. P./Cedeno, C. C./Hoffmann, T./Ahopelto, J./Reuther, F./Pfeiffer, K./Bleidiessel, G./Gruetzner, G./Maximov, M. V./Heidari, B.: "Nanoimprint Lithography: An Alternative Nanofabrication Approach". In: *Material Science and Engineering: C*, 23, 2003, S. 23–31.

Tricarico et al. 2009

Tricarico, S./Bilotti, F./Vegni, L.: "Optical Cloaking with Cylindrical Plasmonic Implants" (International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA'09, 2009), *Torino, Italy*, 2009, S. 351–354 (Tagungsband).

Valovetal et al. 2011

Valov, I./Waser, R./Jameson, J./Kozicki, M.: "Electrochemical Metallization Memories – Fundamentals, Applications, Prospects". In: *Nanotechnology*, 22, 2011, S. 254003.

Varga et al. 2010

Varga, E./Orlov, A./Niemi, M. T./Hu, X. S./Bernstein, G. H./Porod, W.: "Experimental Demonstration of Fanout for Nanomagnetic Logic". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 9: 6, 2010, S. 668–670.

Waldmann et al. 2011

Waldmann, D./Jobst, J./Speck, F./Seyller, T./Krieger, M./Weber, H. B.: "Bottom-Gated Epitaxial Graphene". In: *Nature Materials*, 10: 5, 2011, S. 357–360.

Wang et al. 1991

Wang, Z./Hamasaki, K./Kinoshita, M./Yamashita, T./Matsui, T./Komiya, B.: "Millimeter-Wave Response in NbN(g)/Al Nanobridges". In: *IEEE Transactions on Magnetics*, 27: 2, 1991, S. 2720–2723.

Wang et al. 2007

Wang, D./Yu, Z./McKernan, S./Burke, P.: "Ultrahigh Frequency Carbon Nanotube Transistor Based on a Single Nanotube". In: *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 6: 4, 2007, S. 400–403.

Wang et al. 2010

Wang, Z./Xu, H./Zhang, Z./Wang, S./Ding, L./Zeng, Q./Yang, L./Pei, T./Liang, X./Gao, M./Peng, L.: "Growth and Performance of Yttrium Oxide as an Ideal High-Gate Dielectric for Carbon-Based Electronics". In: *Nano Letters*, 10: 6, 2010, S. 2024–2030.

Waser 2012

Waser, R.: *Nanoelectronics and Information Technology: Advanced Electronic Materials and Novel Devices*, Weinheim, Wiley-VCH, 2012.

Waser/Aono 2007

Waser, R./Aono, M.: "Nanoionics-Based Resistive Switching Memories". In: *Nature Materials*, 6: 11, 2007, S. 833–840.

Waser et al. 2009

Waser, R./Dittmann, R./Staikov, G./Szot, K.: "Redox-Based Resistive Switching Memories – Nanoionic Mechanisms, Prospects, and Challenges". In: *Advanced Materials*, 21: 25–26, 2009, S. 2632–2663.

Weber et al. 2006

Weber, W. M./Geelhaar, L./Graham, A. P./Unger, E./Duesberg, G. S./Liebau, M./Pamler, W./Chèze, C./Riechert, H./Lugli, P./Kreupl, F.: "Silicon-Nanowire Transistors with Intruded Nickel-Silicide Contacts". In: *Nano Letters*, 6: 12, 2006, S. 2660–2666.

Werner 2012

Werner, R. F.: "Aspects of Nonlinearity in Quantum Mechanics" (Proc. Conference on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES 2012, Wolfenbüttel), Wolfenbüttel, 2012 (Manuskript).

Wernersson et al. 2010

Wernersson, L. E./Thelander, C./Lind, E./Samuelson, L.: "III-V Nanowires – Extending a Narrowing Road". In: *Proceedings of the IEEE*, 98: 12, 2010, S. 2047 – 2060.

Weste/Harris 2005

Weste, N./Harris, D.: *CMOS VLSI Design – A Circuits and Systems Perspective*, Boston: Addison Wesley, 2005 (3. Aufl.).

Wiedemann et al. 2010

Wiedemann, W. et al.: "Nanostructured Interfaces in Polymer Solar Cells". In: *Applied Physics Letters*, 96: 26, 2010, S. 263109-1-263109-3.

Williams 2008

Williams, R.: "How We Found The Missing Memristor". In: *Spectrum, IEEE*, 45: 12, 2008, S. 28 – 35.

Wolf et al. 2001

Wolf, S. A./Awschalom, D. D./Buhrman, R. A./Daughton, J. M./Molnar, S. V./Roukes, M. L./Chtchelkanova, A. Y./Treger, D. M.: "Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future". In: *Science*, 294, 2001, S. 1488 – 1495.

Xia et al. 2009

Xia, Q./Robinett, W./Cumbie, M./Banerjee, N./Cardinali, T./Yang, J./Wu, W./Li, X./Tong, W./Strukov, D. et al.: "Memristor – CMOS Hybrid Integrated Circuits for Reconfigurable Logic". In: *Nano Letters*, 9: 10, 2009, S. 3640 – 3645.

Xia et al. 2011

Xia, L./Boos, J./Bennett, B./Ancona, M./Del Alamo, J.: "Hole Mobility Enhancement in In_{0.41}Ga_{0.59}Sb Quantum-Well Field-Effect Transistors". In: *Applied Physics Letters*, 98: 5, 2011, S. 053505-053505-3.

Xiang et al. 2006

Xiang, J./Lu, W./Hu, Y./Wu, Y./Yan, H./Lieber, C.: "Ge/Si Nanowire Heterostructures as High-Performance Field-Effect Transistors". In: *Nature*, 441, 2006, S. 489 – 493.

Yan/Yang 2004

Yan, H./Yang, P.: "Semiconductor Nanowires: Functional Building Blocks for Nanotechnology". In: *The Chemistry of Nanostructured Materials*, River Edge, NJ: World Scientific, 2004.

Yordanov/Russer 2010

Yordanov, H./Russer, P.: *Area-Efficient Integrated Antennas for Inter-Chip Communication* (Proceedings of the 40th European Microwave Conference, Paris), Paris, 2010 (Manuskript).

Zhang et al. 2006

Zhang, Q./Zhao, W./Seabaugh, A.: "Low-Subthreshold-Swing Tunnel Transistors". In: *IEEE Electron Device Letters*, 27: 4, 2006, S. 297 – 300.

Zhang/van Roosmalen 2009

Zhang, G./van Roosmalen, A. (Hrsg.): *More than Moore*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 2009.

Zhirnov et al. 2008

Zhirnov, V./Cavin, R./Leeming, G./Galatsis, K.: "An Assessment of Integrated Digital Cellular Automata Architectures". In: *Computer*, 41: 1, 2008, S. 38 – 44.

Zhirnov et al. 2011

Zhirnov, V. V./Meade, R./Cavin, R. K./Sandhu, G.: "Scaling Limits of Resistive Memories". In: *Nanotechnology*, 22: 25, 2011, S. 254027.

Zhou et al. 2008

Zhou, W./Rutherglen, C./Burke, P. J.: "Wafer Scale Synthesis of Dense Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes". In: *Nano Research*, 1: 2, 2008, S. 158 – 165.

Zia et al. 2006

Zia, R./Schuller, J./Chandran, A./Brongersma, M.: "Plasmonics: The Next Chip-Scale Technology". In: *Materials Today*, 9: 7-8, 2006, S. 20 – 27.

> FRONTIERS OF THE NANOELECTRONICS PANEL DISCUSSION

MANFRED GLESNER/JOHANNES RUSSE

Am 8. und 9. September 2010 wurde am Campus der Technischen Universität München als Kooperation der Projektgruppe mit dem Fh-EMFT ein internationaler Workshop zu den Herausforderungen der Nanoelektronik abgehalten. Im Anschluss an diesen Workshop ‚Frontiers of the Nanoelectronics‘ kamen die Teilnehmer des Workshops zu einer Podiumsdiskussion zusammen, um Chancen und Herausforderungen für Nanoelektronik speziell in Deutschland und Europa zu erörtern. Diese Diskussion ist im Folgenden als Niederschrift im englischen Original wiedergegeben.

Moderator:

Prof. Dr. Manfred Glesner, Technische Universität Darmstadt

Members of the Panel:

Prof. Dr. Simon Deleonibus, CEA-LETI Grenoble

Dr. Christoph Kutter, Infineon Technologies AG, München

Prof. Dr. Wolfgang Mathis, Leibniz Universität Hannover

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

Further contributors to the discussion:

Dr. Jasmin Aghassi, Infineon Technologies AG, München

Prof. Dr. Karlheinz Bock, Fraunhofer EMFT

Dr. Diego Feijoo, Siltronic AG, München

Dr. Stefan Harrer, IBM Research in Yorktown

Prof. Dr. Paolo Lugli, Technische Universität München

Prof. Dr. Wolfgang Porod, University of Notre Dame

Prof. Dr. Peter Russer, Technische Universität München

MANFRED GLESNER:

Welcome to the final part of this conference on Frontiers of Nanoelectronics. I want to introduce myself: my name is Manfred Glesner. I am a Professor Emeritus from Darmstadt University, Technische Universität Darmstadt, where I had a professorship in Microelectronic System Design. I am still active in research conducted primarily on that topic and my interests are specifically in future developments of micro- and nanoelectronics. I thank Paolo Lugli very much for the invitation to lead this panel discussion.

The title is "Quo vadis Electronics?". I was googling the term "quo vadis" and found out that it is a historical term: When the Apostel Petrus was escaping from Rome he met Jesus Christ and asked him: "Quo vadis, Domine?". Christ answered that he was about to go back to Rome again to get crucified. After giving some thought on what he had heard Petrus went back to Rome and was crucified himself.

We could also ask "Unde venis electronics?": where do electronics come from? Several transparencies shown here gave us some insight into the genesis of electronics and how this area has been a major impetus for scientific and economic progress over the last fifty years. Despite the ups and downs of sales volume, the world market is estimated to have a value of two hundred and sixty billion US-Dollars. 8 billion Euros is the share of Germany alone.

When we look at overall figures such as the cumulative annual growth rate, we see a value of 8 % in the last thirty years. That's quite a healthy figure in the area of electronics compared to other more classical industry sections. As we begin to map out the future of electronics, we have to focus on larger issues than the progress that the usage of electronic gadgets has brought to our societies.

Beyond that, without discussing each point individually, we have to admit that humanity is facing at least ten major problems. Energy, water and food supply are certainly foremost among them. Recently, for example, the IEEE spectrum devoted a special issue in June 2010 on the topic of how our thirst for water competes with our hunger for energy. Besides that, daily news on terrorism, poverty and other issues demonstrate the importance of solving the top ten problems of humanity.

Growth rates of global traffic on the Internet and the high performance within the computing segment (for example in image processing, medicine, mobile phones) are among the driving forces behind electronics. The small and high computing segments are important research areas nowadays. In his talk this morning, Dr. Kutter explained to us that more and more functions will move into this segment, and therefore, the need for further progress will remain constant.

I want to suggest discussing the question "quo vadis electronics?" by looking into three orthogonal areas that, as far as I can see, will be the most relevant areas of research in the future.

The Term "Quo vadis electronics?" can be understood in different ways. I propose that we look in the following three directions:

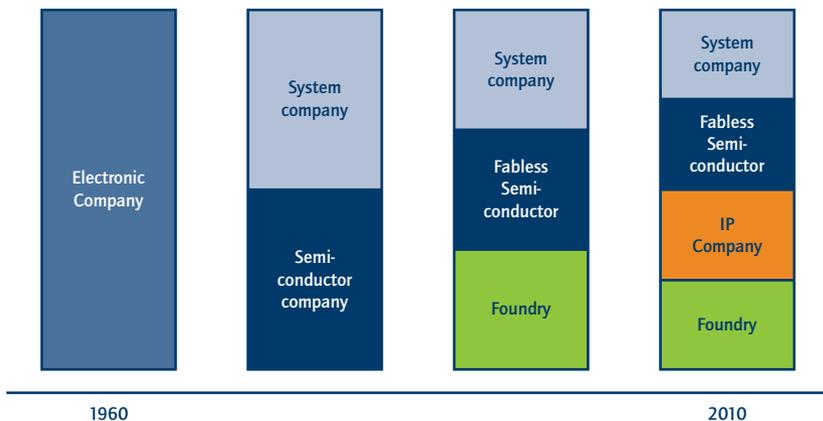
- 1) What will be our most relevant areas of research in the future and will the progress slow down eventually?
- 2) How will the global electronics industry further develop?
- 3) What are the political and strategic aspects of electronics research, development and production?

Let me shortly explain these three directions:

First let's point out future research areas. First, we have the material level with graphene, nanotubes and organic compounds. We see new emerging devices. Will they have the chance to be introduced in the next generation of practical systems? Will they even become a new standard? We can see that we move to new fabrication and manufacturing methods with 3D-integration, system-in-a-package and printed electronics. Even if it hasn't been the topic of this forum, we have seen many changes on the architectural level: new types of architecture such as massive multi-core and many-core chips are coming; and in these any form of software programming is missing today.

Please, remember our discussion on heterogenic SOCs (system-on-a-chip) and how we tackle the platform integration. Will electronics research always be as dynamic as it has been in the past? Will the progress slow down when the field matures or will it accelerate?

Semiconductor Industry: Vertical Disintegration



Quelle: Eigene Darstellung.

The integration of all the new materials, devices and architectures will result in a future SoC as we see it on the next transparency. So this is a picture I got from LETI in Grenoble and it shows how they see a future SoC with all the new functions.

Second axis of future concern is the development of semiconductor business characteristics. The term 'vertical disintegration' describes a profound change in the development of the industrial production process:

Starting points are the big system companies like Siemens and General Electric. These companies did everything themselves within their premises. Hewlett-Packard is a good example: Hewlett Packard wanted to have computers to sell better computer-controlled measurement equipment which was otherwise complicated to handle by hand. They created their own semiconductor company and this disintegration went further and further as we see it on the next transparency. Examining the value chain nowadays shows us an extremely complex picture. The value chain is always transforming itself and changing in a way that the industry involved in the semiconductor business is getting a maximum profit from that part of the value chain. These manufacturers require huge investments. When you see how the companies are merging nowadays to create their manufacturing processes here: who will own these fabs in the future? Perhaps everything is developing into one single fab forming an oligopoly structure.

As we approach the limits of semiconductor integration, we will no longer have the clear interface between the technological implementation and the design via design rules. In the future everything is quite heavily interconnected, so the successful foundry concept will change, for example when we require special lithographic processes to develop new circuits.

The question is how the value chain will change. Who will ultimately make the most money? The processes are very complex. Will the design team make the money or the companies offering the processes? Certainly, one hundred dollar laptops are a realistic offer as Nicholas Negroponte from MIT has been pushing for since many years now. I estimate that in ten years electronics will be available to low income countries and households which are not yet benefiting from these developments. This includes lucrative jobs for engineers and scientists as well. Here, Germany is facing a serious problem already. Leading newspapers like the Frankfurter Allgemeine Zeitung discuss the lack of qualified engineers intensively.

As a third point of future concern, we should take a look at the political and strategic aspects of electronics research, development and production. I remember it was in the year 1982. Here, in Munich, the so called "Almauftrieb deutscher Professoren" took place. It was Professor Schwärzel who gathered some - I don't know how many - fifty to one hundred professors convincing them how beautiful VLSI design is and how beautiful microelectronics is. These professors went home and created new chairs at their universities. I myself was a young guy at that time and got such

a chair in Darmstadt. Maybe we need a similar initiative facing the developments in nanoelectronics? Will it be sufficient in the future to concentrate education in selected places such as Munich or Dresden? How important is electronic industry for us? Is it a vitally strategic topic? When we have only offshore production in Taiwan and China, for example, can we really rely as a nation on offshore fabrication in terms of our intellectual property, and in terms of trustworthiness? Who will guarantee the supply of chips for our industry?

Let's look at Fairchild semiconductor company, one of the oldest US-based semiconductor suppliers: This company will never be sold to companies from foreign countries because it is a classic US company. The US government certainly needs the company to guarantee their military product development. Can we as a nation prosper without a domestic electronic industry? Remember Dr. Nixdorf many years ago, he believed that he could live without technology; the company was going down some years later. This is an important question that comes up now and again and is it really wise to concentrate the production geographically in one location? Remember the earthquakes in Taiwan and Japan: There were a lot of problems with the fabrication facilities in those places. Natural disasters and political instabilities might upset the world market. As we cannot discuss globalization and its effects in detail, I want to recommend two books by Thomas Friedman¹ who has thoroughly discussed this topic. I just want to point out that we have indeed internationalized our education; yet, it is still not on the level it is, for example in the US. We still cannot ask our students for tuition fees.

After sharing some of my thoughts on the future of electronics with you, I am happy to introduce you to the members of the podium, though you may know them already: First, please welcome Frau Professor Schmitt-Landsiedel from the Technische Universität München, welcome also to Mr. Deleonibus from CEA-LETI, Grenoble, and Professor Mathis (Leibniz Universität Hannover) who is always fighting for circuits, e.g. nonlinear circuits and nonlinear systems and is very active within the VDE-ITG-Organisation, and, last but not least, Dr. Kutter from Infineon. I will propose, as usual: ladies first. We start with Frau Schmitt-Landsiedel and perhaps all of us can also give a small statement. After that, we will go to the podium for general discussion.

INTRODUCTION OF THE PANELISTS:

DORIS SCHMITT-LANDSIEDEL:

I will shortly introduce our mission at the Department for Technical Electronics. We are "between all the chairs" as we say in Germany. We work on various things from technology to devices and circuits. As an example, one field is novel devices and circuits with

¹ Thomas L. Friedman: *The World Is Flat: A Brief History of the Twenty-first Century*. 2005 (deutsch: *Die Welt ist flach: Eine kurze Geschichte des 21. Jahrhunderts*. 2006)
 Thomas L. Friedman: *Hot, Flat and Crowded*. 2008 (deutsch: *Was zu tun ist. Eine Agenda für das 21. Jahrhundert*. 2009).

those novel devices. So we developed circuits with tunneling field effect transistors, and we – the first to do so, as far as I know – demonstrated complementary tunneling FETs. Why did we do that? Because the circuit designers said: We need complementary tunneling FETs for our circuits. Otherwise, the technologists wouldn't have thought of that. So this is an example for a creative interaction. As you may have heard yesterday, we are also active in nanomagnetic devices and circuits.

Another field is circuits in scaled CMOS, which I think will still stay for a while, and this will be a long while, with us. Here again, what we do is related to device physics. We work on variation tolerant and reliable circuits. Because today we have more and more what are called "unreliable fabrics", transistors tend to degrade and change parameters during the lifetime of a circuit. We look especially at analog circuits, where every transistor degrades in a different way. Thus you just don't know what happens, and if you do accelerated aging straightaway, completely different things may happen than in the ordinary operation. So we see it is good to have a few people that know both about devices and about circuits. And this demand will increase in the future.

So my main statement is: For the future of nanoelectronics, we will need ever-stronger interaction between technology, devices, circuits and systems – and also economists. The first important decision is to choose into which new devices we invest our R&D resources. As criterion, it should have the potential to be manufactured in an industrial style and to be integrated into high value products, so that at some point our national economy will earn money from it. In Europe we see that the production of commodity products mostly goes to other parts of the world. But still I don't see why we should not keep a foundry business in Europe. We have it already, why should it not stay? I am not so pessimistic about that. I think the strength of Europe is in the system integration, e.g. using the so-called "More than Moore" technologies. This has to be in strong cooperation with application, and we have the application industry also here in Europe. There are also security-related issues, where sometimes one doesn't want to give trade secrets or production away, out of the country. Another important field which at first glance does not seem to be related to nanoelectronics, is power electronics. But there some of the same technologies are used as in nanoelectronics, and there will be more and more smart power devices where you have a nanoelectronic part and a power part maybe on one chip, at least in one system. And I think this is one very important field also for solving the future problems of the humanity mentioned by Prof. Glesner.

SIMON DELEONIBUS:

I'm with LETI, Grenoble, I started with LETI in 1986 and before that I was in the microelectronics industry, Thomson Semiconductors, and actually I learnt my "métier" – my first skills – in the industry and I enjoyed at that time the fact that I used to, let's say, have coffee with the process engineers when I arrived in the factory in the morning.

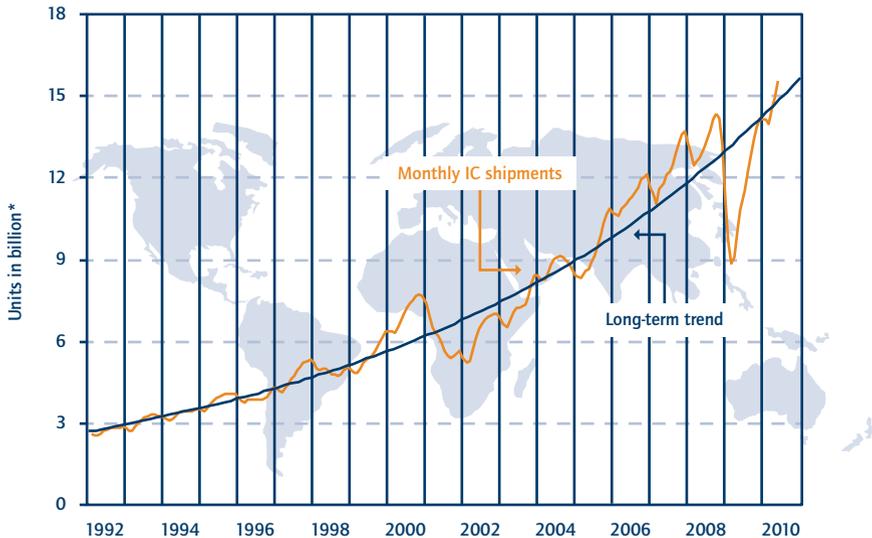
Probably half an hour later I could speak with the test engineer and then during the day I would interact with the designer and then the product engineer. So it is very important I think, especially in the development phase, to really interact with I would call the whole value chain and I'm afraid, I'm sorry to say that, again but I'm afraid that going fabless is only a financial advantage in the short term and if you don't look at things in the medium or long term then you are losing lots of feedback you can get from the technology. And this is why most of my colleagues and I will talk a little bit about our national mission: LETI is a part of a national institute to support French and also European industry in keeping at least the major assets we need to envisage the future. I think microelectronics and nanotechnologies are among the sectors that we need to master in order to envisage all the systems we will need in the future. You said that we are good at integrating systems but we must keep this link with the skills and knowledge regarding technology because you need the feedback in order to go one step further. All right. I didn't talk much about myself. That's not a big problem. To answer more specific questions, I wish to remind you of the example of the integrated tooth which in fact is an embedded system in a tooth. One of the main challenges is in the energy consumption: we need low power components in order to fulfill the needs of an autonomous system. And I think the market is really evolving that way. That's what is really driving today, the economy in the microelectronics and nanoelectronics sector and further in the future, the nanosystem. If we talk about nanosystems, the breakthroughs will come from energetically autonomously-supplied systems and probably massively and remotely communicating that allows us to make the link with RF linked systems, remote control and this has certainly to do with water! So it will have to be in a humid medium also. We really have to take care of packaging and low energy consumption if you need to have high speed computing in a tooth also. If something tells you that you appreciate the food or whatever ... you can add pressure sensors, chemical sensors, etc. You can see a lot of – Well I'm serious! – lots of opportunities to introduce new systems interfacing microelectronics. We need fast computing in order to process mixed signals and then get some output from it that really gives you a very important information on your health state etc. etc. other benefits for humanity. Thank you.

CHRISTOPH KUTTER:

Let me introduce myself to you very briefly. My background is process engineering. I started at Siemens Semiconductors at that time and developed three embedded flash processes. Later in my career, I was responsible for design teams, and I often saw that the designers did not understand the process people and that the process people did not understand the designers. So, I completely agree with Frau Schmitt-Landsiedel: It is absolutely key that the designers understand the process engineers and vice versa.

I want to show one slide and I want to do two statements.

Monthly IC unit shipments
Slightly above trend line since April 2010



* Total Monolithic Integrated Circuits; 3-Month-Moving-Average

Source: World Semiconductor trade Statistics (WSTS) – S2, August 1st 2010; years are calendar years

Copyright © Infineon Technologies 2010. All rights reserved.

On the slide, you see the worldwide monthly IC unit shipments. In early 2009 you remark the dip due to the economic crisis and you also note the very quick recovery in the following months. Today we have a monthly shipment of roughly 15 billion ICs, which makes roughly 180 billion chips per year. If you divide this number by the number of the inhabitants on earth, you realize that every human being consumes in average already 30 chips per year. And this curve is not saturating but is still growing strongly. This is particularly good news for everybody here in this room and especially for the young people, because microelectronics is not going to reach a plateau, but will grow strongly in the future.

Now my two statements:

My first statement is: Silicon technology will remain the backbone of the microelectronic industry. Of course, there are new materials entering our Silicon-based technology, like high and low k dielectrics, new metals, new barriers and even new semiconductors for the transistor functions, but the base of microelectronics will stay silicon.

My second statement is, I am now repeating what Frau Schmitt-Landsiedel said,

power semiconductors or smart power semiconductors gain more and more importance. Electric energy will play a much more important role in future than today and for electrical energy you need many power semiconductors. Perhaps not so many in a nuclear power plant, but if you look at a solar power plant or an electric windmill you will find many high power transistors. For all the voltage conversion power semiconductors are needed. Think of the electric cars, which in future will play an important role in transportation. In a current state-of-the-art car the semiconductor content is roughly 300 dollars, in an electric car the semiconductor content is three times higher. Power semiconductors and the control circuits with power, we call this smart power, will play an important role in the future of microelectronics.

WOLFGANG MATHIS:

Currently, I am with the Institut für Theoretische Elektrotechnik at the Leibniz Universität Hannover but my original background is physics and especially theoretical physics. Before my studies in physics I was educated as a television service man and studied electrical engineering at the Fachhochschule Hannover. I have worked in the area of nanoelectronics for many years but another research area is modelling and systematic design methods of nonlinear analog and mixed signal circuits. At the Leibniz Universität Hannover I started to work on electromagnetic fields in nanostructures and quantum computing. Based on my experience in these research areas which are related to this workshop it is my belief that modelling and systematic design is not possible without cooperation with industrial companies. I was always interested in working together with industrial companies in order to get input from them in order to consider useful research aspects and not only academic problems. In the past we had a comfortable situation at universities in Germany such that at least a few groups can work near state of the art microelectronics and building chips. But these times are gone at universities since the mid-eighties of the last century. Today we were able to consider only certain aspects of microelectronics from a theoretical as well as an experimental point of view but we collaborate with industrial companies if we would like to study entire chips. However in the meantime we have really big problems finding industrial partners in microelectronics and especially in nanoelectronics in Germany and even in all of Europe.

One of the other problems is that the education at the universities has changed; Professor Glesner mentioned it before. I have been engaged in the VDE-ITG, Verband Deutscher Elektroingenieure, for many years and I emphasize frequently that we need a good basic education not only in circuit theory, system theory and control theory but also in related areas. I agree with my colleagues from the physical side that it becomes more and more a big problem that we have a separation between disciplines in Germany which has begun already at universities. Therefore we have problems managing programs from the research side where differing knowledge from physics, control theory,

system theory, and circuit theory is needed. I hope we are able to manage this problem in the future but at first we have to learn that such problems exist.

DISCUSSION

MANFRED GLESNER:

As we have now made the round here, let us now open the discussion for the audience. I kindly ask you to introduce yourself with your name and your affiliation. We can discuss the three dimensions I mentioned earlier, but we can follow any other direction of the discussion.

STEFAN HARRER:

I just wanted to briefly comment on two points that you brought up and that I mostly agree with. I think interaction between the designers and the ones who actually implement processes is crucial. I was working as a level owner at IBM Albany Nanotech and the concept there strikes me as extremely efficient. I'm sure a lot of you are familiar with it, I just want to describe it really briefly. There is a huge industry impact on what happens up there. It's officially a university setup that's there, but what happens is that the University of Albany and major business partners, mostly IBM but everyone who has something important to say in the field is literally up there. They share a huge clean room environment and there is a very fruitful connection of research at the university and industrial feedback. Is what you're looking into really worthwhile or is it maybe something that is going in the wrong direction? And then industry has the means to implement ideas so there is everyone sitting literally at one location having the clean room facilities that industry has. The struggle between immersion and EUV lithography literally goes on right there in the cafeteria. I have the feeling that that's a win-win-situation for every party involved up there. And I am not saying that because I was sent here to promote that but it's really a firsthand experience. I want to conclude with the hope that a facility like that at some point might be built in Europe and maybe in Germany. I think that would help the location Germany and Europe as far as the semiconductor industry is concerned tremendously. There are a lot of guys from Dresden in Albany so this interaction is happening already. The concept, however, is a very interesting one, one that will be permanently fruitful, I think, so that would be the ideal future concept. Speaking of fab-less industry, I think the trend should go more toward strengthening the interaction within the company between the guys who implement what designers are working out and not towards separating them from each other. Because the skills that we hone in the fab are essential to what the designers are actually designing meaning we do have a lot of impact and feedback for the designers that they necessarily wouldn't have by themselves. That's true for IBM and also a lot of other companies on site.

However, I see that IBM, as the highest impact company up there, does get the most out of it because there is such a close connection between the fab work that we are doing and the designers that are sitting on site.

MANFRED GLESNER:

That was a very interesting contribution, thank you very much. It reminds me of the old days of communication in the fifties and sixties with the Bell Labs in the United States. That was also a unique place where the research in communication area had been done and was very fruitful. I think we have such a possibility here in Europe perhaps with IMEC and the Catholic University in Leuven. We have here at our side somebody who knows in detail the new MINATEC-Center with its link to the INPG Grande École, both in Grenoble, and perhaps you can comment from your side how a fruitful cooperation might be.

SIMON DELEONIBUS:

That was the idea, to have both integrated on one campus, that's what I showed this morning: education and several technological platforms including design and high level system integration. We achieved the MINATEC Campus concentrated on less than one square kilometre. That's very important: just to be able to talk to people face to face, gives you a lot of leverage, well, a lot of ideas can come out. New applications might be envisaged, new insights into what you are doing and it's very important for innovation because innovation, especially in our domain, comes from the frontier – we were talking about the frontiers – from the frontiers of several "Know Hows", several expertises. That's very important to keep that in order to have a certain level of innovation in the future.

CHRISTOPH KUTTER:

Just a small comment. I think in both cases Albany and also LETI, there is a big political will behind and there is also a big political commitment in terms of funding. I forgot the numbers for Albany, but it is in the billions. And this is similar for LETI. There is a big political commitment from the French government.

SIMON DELEONIBUS:

Well it was as you say it was, yes. Actually we live on contracts mainly. Actually we are a national institute, however, we have about 80 % of income that comes from contracts. It comes mainly from the industry, we also have some financial resources coming from different national or European institutions and ministries. Anyway, we have to apply for that. We are in competition with people in other sectors: so the funding is not guaranteed. Still, the government has a strong will to support this activity.

STEFAN HARRER:

Actually it was probably a little too strong a term saying it would be "nice to have something in Europe". I was aware of the Grenoble site, and actually ST micron, I think, is a big player and has interaction with Albany going on. Which is interesting, because it's a network that I think has a great future at both locations.

SIMON DELEONIBUS:

Yes, that's another aspect. Of course that has to do with globalization.

MANFRED GLESNER:

May I ask one question connected to you: we have the new MINATEC Research Center in Grenoble, and a lot of money is invested there. My question: Can we really afford two places in Europe doing such deep research like MINATEC and IMEC at the same time?

SIMON DELEONIBUS:

If you direct the question to me I would say, well, there are different ways of expressing things and we have different models. I am sorry that nobody from IMEC is here, they would comment better on this than I do: The way we are envisaging, our policy is somewhat different. We have a few main partners. In microelectronics, in microsystems and also in bio- and health technologies we have one or two main partners. It doesn't mean that we don't collaborate with others. We collaborate with others but our main mission, as I said, is national and European and our priority is to support the French and the European industry, and also to make the best link we can with education and fundamental research. So, this gives you a sort of framework of what our policy is and how we see the future. So IMEC sees things differently. They have many partners around a core that they propose. Well, we have more interactive relationships with our main partners. Our main European partner in microelectronics is ST and this partner has some strategy, and its strategy is a common development with the IBM consortium and we are part of the agreement also. We share the fundamental research but we share some activities and there is a good optimization and synergy with IBM.

PAOLO LUGLI:

I have two comments, one to the chart that Christoph Kutter showed that projects quite optimistic news. On the other side, it seems to me that often, especially in Germany, somebody completely misses the trend either at the management or at the political level. The only real nanoelectronics company in Germany, Qimonda, went bankrupt. Before that, other catastrophic events happened, for instance, the closure of Daimler Benz and Infineon research centers. There is a market, there are huge opportunities and yet companies or centers have to close, in particular in Germany. This trend is really worrying

for the future. My second comment is concerning what Doris and Christoph mentioned about the necessity that process engineers and circuit designer understand each other, talk to each other. I think there we have a huge responsibility as university professors. One reason why when people get into industry they don't talk to each other is because we don't talk to each other in the first place. It's very hard to do things together even in academia. But we are trying: it takes time, it takes energy, it takes involvement. I think that this is an exception- what Doris, myself and a few others are trying to do. I think we have a big problem. We need to operate at the educational level to get the interaction going from the very beginning. This is especially true in nanoelectronics, which is intrinsically a highly interdisciplinary field. Engineers alone would not be able to make it, they need to understand and work together with technologists, physicists, material scientists. I think we have an extreme disadvantage with respect to the Americans, in that we have extremely high and impenetrable walls between the disciplines. Physicists do not talk to engineers. We had, for instance, several examples of DFG-coordinated projects where the physicists have led them and then engineers are automatically out. On the other side when engineers lead, then the physicists are out. Without talking about chemistry, without talking about biology, without talking about material sciences, in nanoelectronics either all those people are able to collaborate or nothing goes on successfully. There are attempts to solve this communication problem, good examples come from the "Spitzencluster" or from initiatives like the one started around Darmstadt on organic electronics. There the know-how of electrical engineers is put to work in joint projects involving chemical industry, chemistry departments and physics. I have great hope and great respect for such attempts.

MANFRED GLESNER:

... including mechanical engineering for the printing machines ...

PAOLO LUGLI:

... and mechanical engineers. This is a great example, I wish we could do something like this in Munich.

WOLFGANG MATHIS:

I would like to support this statement. I was a reviewer within a main program of the DFG of organic field-effect transistor. In the first part, only Wolfgang Kowalsky from Braunschweig came from engineering – he was the only one. In the second part Paolo Lugli joined it but all others came from chemistry and physics. Therefore I strongly support the statement that much stronger interactions are needed between our areas within electrical engineering as well as with the other disciplines. Electronic circuits are built in the devices such that we need collaboration with physics, chemistry and others.

Another rather difficult aspect of microelectronics is the interconnection problem of devices. Devices and their interactions are essential and by the way in nanoelectronics the situation is much more difficult than in microelectronics. At the beginning of microelectronics in the late sixties of the last century we had electronic devices that needed to be improved and we had ideas for interconnections such that all the creativity of designers could be concentrated on the construction of microelectronics circuits. But in nanoelectronics we have a totally different situation and until now it is really difficult to say what nanoelectronics are. But if we have a look at the very interesting presentations at this workshop, a lot of improvements of mainstream technologies in silicon and also in III-V semiconductors were presented in which circuits are based on classical functionality principles. On the other hand we have very interesting suggestions and improvements of so-called quantum devices but the interconnection problem for these devices is a completely new thing. It is not only the replacement of copper by other materials. It has to be a completely new kind of interaction and precisely this problem needs a solution in order to proceed to nanoelectronics.

DORIS SCHMITT-LANDSIEDEL:

A few comments: First on what Prof. Lugli just said, that the last nanoelectronic company has disappeared from Germany. I don't think you are really correct, depending on how you define nanoelectronics. We have for example X-Fab – they are not in the newest technology node but they are fast followers, and they are among the big foundries in the world. We have Infineon. They want to invest in extending their fabrication, as you can just now read in the newspapers. We have Global Foundries who have development and production in Dresden. I mean this is not so bad at all. And then I want to comment on what we said about the European Research Centres. Maybe it is not my task to say this, but we have the Fraunhofer Gesellschaft and for me this is another model. There is a lot of expertise, which is distributed among various institutes. But if you would put all this together into one pot it would be also a big research institution, and you can debate if it is a special strength that they have this diverse expertise in different fields. They can work towards many applications, towards many industry products. But maybe one could also prefer to have another single large institution. We all say in one way or another: Now we must intensify cooperation in Europe. If we act in a European strategy, it will save resources and make us more competitive, because there is a big pool of expertise that we have all together.

For the universities well, what should I say? I think there is a bit of truth in what you say: It is a special culture here. When I came from industry, I first was a bit astonished about the diversity in what happens here at the universities. I think that also the industry here doesn't have the same attitude towards academia as for example in the US. In US they draw much more from their partners in academia and use them in a more

strategic way. I of course don't want to be controlled in any way by the industry, but a stronger strategic interaction would be welcome.

[Doris Schmitt-Landsiedel had to leave after this statement.]

SIMON DELEONIBUS:

I can make a comment following also your comment. I think we must keep in mind that we have huge challenges ahead of us. Huge, huge challenges still. And that's good news. I'm not sure it's a good idea to say "Well, who should be killed in order to save money?". I think there are different approaches, different models in Europe and I think we will need everybody. As you say we need to probably strengthen the cooperations in a respectful manner because I think we will need to avoid Europe becoming a technological desert. Personally, I wouldn't like that. So it's very important to really enhance the collaborations between European Institutes. I would like to make another comment about the MINATEC model in which you have education, fundamental research, very strong technological research and also an incubation area for start up companies. It's very important in this unique place to have permanent feedback from the different partners in the frame of collaborations and common developments. The start up companies have thus the possibility to access to collaborative research with their initial incubator. The relationship with the start up is not only financial, or limited to licensing a technology and getting royalties back from patent exploitation. We set up a durable, long term collaboration that helps further development of the start up. So, we make it a positive virtuous device which allows these companies to grow and then just leave us afterwards and be autonomous as a company. It is very important for a start up company to be supported in its initial development. That is the way we started SOITEC in 1990 and the initial kernel of ST Microelectronics in 1971. We also apply the collaborative model in the frame of common laboratories focused on dedicated and specific research topics which are updated on a yearly basis. That's the model we applied in the past, and still apply today with SOITEC, we apply with ST Microelectronics and many other companies such as ESSILOR (optics sector), Bio-Mérieux (bio-health sector) ... Up to now, this model has been working pretty well.

PETER RUSSE:

What I would like to say: There is certainly no doubt that for example in the United States but also in Asia the technology transfer from science to industrial products is more efficient and I think it has to be analyzed more carefully why this is the case. Maybe the reason is in other structures of the industrial and scientific landscape and other organisations of research like here. We have here the independent large institutes and the universities. In the United States the universities are the large institutes and there is a very strong pressure on science then to transfer to products. If it is recognized that something is important there are also strong efforts to break through with it. And another issue to consider is that

the industry has less potential for medium and long time research than forty years ago. When I worked in the seventies at the AEG Telefunken Research Institute the Institute was highly independent from the business units of the company and had its own budget in connection with autonomy in decision about its application. At that time I had worked in an optical fiber technology project which already had been started in 1967 and before '77 there was no component which had been usable. At the beginning, optical fibers exhibited an attenuation of some Dezibel per meter, and the lasers had continuous lifetimes of less than one minute and so forth. The industry pushed research for 13 years before the situation changed. I think one reason is at this time industry has had more available money for doing research. The conditions, the boundary conditions for using the financial resources have been different from the conditions of today. But it is also a political task to change the situation again so that industrial research can be done again with a much wider long term horizon than it is done presently. This cannot be done by universities, because in modern high technology the universities don't have the means to play in that area.

STEFAN HARRER:

I absolutely agree, I think that's one of the strengths of Yorktown actually. I don't think there is any other industry company out there that still can afford to have a place that works as a university essentially but has all the industrial advantages at the same location. And that interdisciplinarity that came up right before, like literally having the chemist and biologist and the engineer and the physicist on the same aisle and be right there: it's like a hot spot for whatever knowledge you might need for whatever new idea you come up with and I think that's exactly going in that direction. There is still money there, IBM still can afford that "luxury" of having a place like that. And I think it pays off.

CHRISTOPH KUTTER:

IBM is an exceptional company for me. It's a company who can make money out of technology not only by using it by itself but by also by selling technologies to others.

MANFRED GLESNER:

But is IBM really a technology-oriented company? You gave a wonderful example, but as I understand, IBM is earning money with software business solutions. And when you look to Mainz where they had fabrication facilities for memory devices, they sold it to some Japanese company. In many areas they are completely out of at least what we could call hardware.

STEFAN HARRER:

I can comment on that. It actually was more or less the software part that carried us over the crisis. But Systems and Technology impact is coming back rapidly and I am

speaking now more for the technology part that comes even before the actual fabrication and systems part. Right before I was mostly referring to projects that are also playing into that area but that may be connected to biotech like our project. There is also a lot of simulation work and design work going on, and also general thinking about new ideas.

MANFRED GLESNER:

We had an excellent talk during the first afternoon by Mrs. Riel from IBM Zürich Research Labs on the ultimate scaling in semiconductor technology.

KARLHEINZ BOCK:

This discussion so far brings to my mind a podium discussion at a conference recently where they also discussed this aspect of profitability and investment in semiconductor technologies. Originally, Moore's law has not only described the fact that we have doubling of transistors per eighteen months. A second aspect Moore actually wrote down that such scaling will continue as long the companies will make more profit. And this additional aspect is often neglected referring to Moore's law. The discussion continued that at present, actually in the last ten years or so, the companies make less and less or even no profit with this technology in the market and only the companies in the countries where governments still support the technology they could actually continue with the scaling of semiconductor technologies to new generations. And this happened in Taiwan, this happened in Korea, it happened in China, it happened in Japan and partially in the United States. But countries in Europe stepwise went out of the semiconductor business. In Europe such financial support for the semiconductor companies was much less compared to other areas in the world even knowing that as a result of the Moore's law companies don't make money anymore because the silicon technology becomes more and more expensive. And so the decision in Europe to increase the strategic funding of semiconductor technologies has not been taken as compared to other areas in the world even knowing that such technologies are a very intrinsic motor of innovation and technology.

SIMON DELEONIBUS:

If I can make a comment: a few years ago we missed a unique opportunity to unify or make one big European company: If you consider the income of ST, Infineon, and NXP, you would have built the second worldwide IC manufacturer and I still didn't get the answer to the question: why did Korea, a country with a population of forty million, build the second worldwide semiconductor manufacturer and a five hundred million federation like Europe cannot afford that? I'd like to have an answer to that question.

MANFRED GLESNER:

Yes, that's an interesting question. Look at Korea: Some fifty years ago, they had no culture in natural science, physics and mathematics, but nowadays they are on the world market.

CHRISTOPH KUTTER:

I don't completely agree. I don't think that ST and NXP and Infineon should have merged. There would have been a lot of dis-synergies and consequently a lot of restructuring. If you look at Korea, there is also Hynix and Samsung and both coexist or both compete in their applications. There is also LG and Samsung who compete. Competition is not bad. Let me bring in the other aspect that Karlheinz Bock mentioned already: There is a huge governmental support in Korea for their industry. When Hynix ran out of cash in the beginning of the last decade, they received huge financial support in order to help them through until they earned money again. We do not have this kind of support for our industry in Europe.

SIMON DELEONIBUS:

We do it for the automotive industry: Opel, Renault, Peugeot, ...

KARLHEINZ BOCK:

Actually I intended to ask your opinion regarding my contribution before. I was just telling you what I heard in this other conference. I'd like to ask the podium if you agree with that opinion expressed. I understood the further comments in a way that you seem to agree, that we probably don't support the semiconductor technology appropriately?

MANFRED GLESNER:

We have the example of Airbus with its famous A-380. This unique machine was a European joint effort ultimately, as the company gets support from different European states. The hope was, as you said, that some wise people will merge the rest of the electronics industry to something similar.

SIMON DELEONIBUS:

Let's take the Korean example again. If you consider the number of people (the personnel) working in Samsung Electronics, Hynix and probably what remained from Lucky Goldstar, the number of people has increased. So it didn't decrease when restructuring was done. I would say it was a good opportunity to do that and I think we missed something in 2002 when the market was still going. This possibly could have been done in Europe. It would have partly been dependent on political decisions which are overwhelming or overcoming our responsibilities. Whether we have to support it for a while or forever, that's also a question which has to be taken into account.

WOLFGANG MATHIS:

I would like to emphasize the statement of Peter Russer. If we have in the industrial companies a little bit more freedom for the working groups it would be very helpful also for researchers in universities because we would have people on the industrial side that are not constantly under pressure. My experience is that several collaborations with industrial companies only work because some of the people in the industrial companies use their personal time in order to support this collaboration and that cannot be a good situation. Therefore this situation has to be changed as quickly as possible. I guess that in the fifties and sixties of the last century and even before, a culture of discussion existed at Siemens and other companies.

PETER RUSSER:

I would like to add something. I think the fact that there's less available money for medium- and long-term research industry is the consequence of globalisation. I'm not against this. It's good but it creates some problems and I think it requires some political imaginativeness to create regulations which provide the industry a higher margin with available money for research and development. If a company is forced to put all efforts in how to survive the next two years it cannot undertake long-term research. So I think more or less what the government has to do with the money taken away via taxes is to make an intelligent reinvestment in stronger support of medium- and long-term research. That is a task of the society to facilitate and support a high level of long-term research. European companies are in world-wide competition with companies embedded in a framework of higher support. If a company is doing long-term research on the basis of its financial resources it is not competitive with companies in other parts of the world receiving large amounts of governmental support for long-term research and there we need some regulatory framework.

MANFRED GLESNER:

Just one short comment: I saw, I think a week ago, a report on a proposal from Andy Grove (Intel) who proposed that the US government introduces a certain tax charge for every semiconductor imported from abroad. This is classical protectionism. I don't know if it could really work, but it was quite interesting that he wanted to have an additional income to finance the basic research and development.

PETER RUSSER:

May I add something? We are in the free world market but we're competing with countries which have protectionism. That's an additional problem. If in Korea and Japan the government is pushing money into development that's not really a free market.

DIEGO FEIJOO:

I have a question. I think it is known fact that the semiconductor industry in Europe is contracting. As it has been discussed before we still have good companies and a lot can be done but as a whole it is contracting. So the question to the panel is, or everybody, do we have any indications that this is due to a lack of technology background or scientific background?

CHRISTOPH KUTTER:

In fact I see it differently. If you look at the number of employees of Infineon and the companies Infineon spun off within Germany, this number was always growing, it never really went down. The only exception was when Qimonda went bankrupt. But otherwise the Infineon-based companies constantly grew from the beginning until today. Also ST is growing. NXP is also doing quite well. Looking at the numbers you cannot say that the semiconductor industry is going down. You need a much more specific look at the situation. Europe is losing in the very advanced CMOS, but there are many domains where Europe is still very strong, like for example in power semiconductors

SIMON DELEONIBUS:

The answer is not straightforward, right?

CHRISTOPH KUTTER:

Sorry, I did not reply to your question whether we have a problem of lack of technology: No, not at all. The engineers are the best engineers in the world. We don't have any problem with that.

DIEGO FEIJOO:

So even if we look at this part that is diminishing, not the whole but this part, it's still not the technology?

CHRISTOPH KUTTER:

It's not a question of technological Know How.

WOLFGANG MATHIS:

Is there much pressure for people in companies?

SIMON DELEONIBUS:

Today there is one big hurdle which is the investment you have to put on the table just to build a fab: today it's a few billions. It's not what I knew when I started, it was many orders of magnitude lower. So in the countries we have mentioned the banking system

is different: you can access credit more easily, probably with the help of lobbying. That doesn't seem to be the case in Europe or at least it's not as easy as it looks in Korea or Taiwan. Taiwan is a very good example. That's probably something we should think about: how to find a medium way between our system which is more secure than other banking systems allowing easier access to fundraising. I am sure there is a good compromise between both. I don't have the exact answer but I think this is part of the problem: how to allow any company to get the money to build fabs.

MANFRED GLESNER:

Concerning your question whether there is enough education in the area of modern technologies at the university level: Since about ten years, at least half of my PhD candidates come from abroad, from Asia to South America. We do red carpet treatment when we can get a good German student. You can observe this shift also in many other institutes. This means we invite international students to join our international programs, we educate them at no charge and provide them with the competences they need to get brilliant jobs in companies in Germany or abroad. Is that a strategy? You want to comment?

CHRISTOPH KUTTER:

Of course we should be open and we should bring in people. But I think the trick is then to retain the people and to keep them. Simply educating them and then letting them leave the company again would not be the right strategy.

MANFRED GLESNER:

I know for example that Imperial College in London is asking for around 10.000 Euros study fees when somebody from abroad wants to come. We have excellent international programs here in Munich or in Stuttgart supervised by Professor Kuehn. I also want to mention our International Master of Science Program Information and Communication engineering in Darmstadt.

We have international Master programs which are running at the Fachhochschule level, but you don't see a real value coming out of them.

In the last ten years, we have made good progress in going to the international level, and Germany has become an attractive place for students from abroad. Yet, I think, we now have to make a next quantum step to promote and further enhance the quality of education to really fulfill the international standards.

STEFAN HARRER:

I agree and I think as far as university education is concerned we can totally compete with the best schools in the U.S. The only difference is: They have more money for research. But as far as the basic education is concerned we are exactly as good as they

are. The difference then I think comes into play after you graduate. Then all of a sudden they seem to be a little more aware of the fact that they have heavily invested in human researcher capital than we are over here. From a grad student point of view at the end of the day it's a very down to earth calculation if you look at the offers over there as opposed to the ones that you get here. Of course there are a few other factors that come into play when you decide where to start your career but from a strict job perspective they seem to make much more attractive offers. They seem to realize much better who they have educated over there and then get a better return back from what they invested in their students' education in the first place.

MANFRED GLESNER:

Perhaps we can get a statement from Professor Porod from Notre Dame?

WOLFGANG POROD:

Yes, I will be happy to comment on that. It's probably true, I mean, you are an example of that, but there is really no government policy behind that, and it's just a matter of the marketplace: there is a huge marketplace, there are lots of opportunities and it's true many foreign students come to the U.S. and they stay. But I think it's a matter of size and opportunities. There is no policy behind it. As you are suggesting perhaps, that there might be a policy behind it.

STEFAN HARRER:

Yes, I don't know if I actually suggested that there is a policy behind it. There seems to be a general philosophy behind it there. I mean, we have a lot of career fairs here too and that was actually a big asset of TUM. I remember the career fair that we had in Garching every year with a big booklet and tons of companies there and everything. So that's a very good sign and I think that's very important but if it comes down to the offers that you get at the end of the day there still needs to be some adjustment. Very often one hears that there is too little money here to do good education at universities. I just totally want to oppose to that, that's absolutely not true and I think it's more a matter of keeping the asset that you created through that good education.

MANFRED GLESNER:

Would you like to comment further?

WOLFGANG POROD:

Yes, maybe just one more comment: Stefan made a comment also that there is more research money in the U.S., the grass is greener on the other side usually: from a U.S. perspective it actually looks like there is more research money here. I mean especially

in terms of longer range research. The kind of funding that we do have to compete for is usually very short term, it can be turned off very rapidly if you don't get the results and it seems, at least looking from the outside in, so to speak, with SFB projects here in Germany, we have a lifetime of ten years, there is really nothing like that in the U.S.. So I think in terms of understanding and funding research, longer term research the environment is actually quite good here in Germany.

STEFAN HARRER:

I have a quick comment on that, very briefly: I think one of the assets of funding over there though is that you seem to get a certain amount of funding pretty quickly if you have a good idea and that it seems like there are fewer hurdles before getting started with something. You are referring to long-time research but I can only comment on what I have seen so far. It seems there is an attitude towards seeing what people come up with and giving them some start up money but then of course what kicks in pretty quickly is if you don't provide the results that you promised, funding is turned off. But I do not think that's entirely a bad thing.

PETER RUSSE:

I think there is one great advantage at a German university: as a professor or as an Ordinarius you have a number of scientific coworkers paid by the state and if you have a very good idea and you are not able to convince anybody that this idea is good you can do it. You would not be able to do it elsewhere.

PAOLO LUGLI:

Unfortunately, it works also if you have a bad idea.

PETER RUSSE:

But you also can convince somebody if you have a bad idea that it is a good idea, so this argument is not true.

SIMON DELEONIBUS:

It has to do also with the incentives to attract good PhD students or good students in engineering. I was in a forum recently at one of the most famous and brilliant engineering schools in France, - the Ecole Polytechnique in Paris. Every year they organize a forum attended by students looking for either a job or internships etc. The CEA-LETI stand was just beside the BNP Paribas stand, as they offer jobs for students as well. We only had a few "customers", while the BNP Paribas had a long line of students, looking for a job. Even though these guys are engineers, good mathematicians, they look for a job in a bank rather than in engineering. We offer so many

interesting positions in engineering. This is a big problem in western countries and it starts to appear also in eastern countries: the lack of interest in engineering. I think one of the issues is how engineering is paid: the salaries are part of the problem. The attractiveness of the careers in engineering is another part of the problem. This is not well-managed today. There should be some incentives to attract good students in engineering and science. We try to bring a solution to that issue by taking initiatives at the local level: we attract some well-known professors, in the frame of "Chairs of Excellence" at our MINATEC Campus. We have a foundation supported by CEA, our local universities in Grenoble (Joseph Fourier University and Grenoble-INP), and also CNRS. We attract good professors for these multi-year (mostly 3 or 4 year) positions: that brings good students as well. The project around the Chairs of Excellence serves also as an incentive for some international collaborations: that's a good way to try to promote science and engineering.

PETER RUSSE:

I think it's not only a problem of payment. The problem is the role payment plays in the consciousness of people. This was not the case decades earlier. But those people who are our leading figures and who are thinking that they are creating the values are not offering a very good example. I think the goal to have a large income plays a much greater role than thirty years ago, and that's a problem of the shift in values.

SIMON DELEONIBUS:

Yes, I agree. Well, I was giving that example because the salary is not all of it, but there is a big disproportion, and I think that's the problem. And the young people just project their own dreams of a better career in the fact that they will have a better paid job. And the problem is, I agree completely with you, a question of the way you evaluate the value of the career. It is expressed in money, but it could be another parameter.

MANFRED GLESNER:

But I am sure the young people understand that in the old days, a 25-year-old diplom-engineer came to Siemens company and continued working there until he turned 65 and left the company – with big honors and grey hairs and so on ... But these times are gone. Nowadays, I saw one of my PhD candidates going to Qimonda, and half a year later after the shutdown of Qimonda, he was happy to get a job at Infineon, and now, after two years, he is going to become an engineer at Intel company. So in a period of three years, he changed twice his company. And that's extremely difficult, I would say, to promote the electronics area to young students as a field where they can make their careers.

PAOLO LUGLI:

I think that one additional element that is missing is venture capital. That's a crucial issue. In the United States when you have an idea, you will find some people that are willing to invest or risk their money. In Europe it is much more difficult, in Germany it's particularly so. There are organizations devoted to this but the risk is seen in a completely different way. But I agree with you: we have to train business-oriented students that also have a technological track. If we could create some link between our engineers and those economic or business-oriented students and professors, that link would bring a lot more the culture of entrepreneurship. One can look for example at the start-up "Attocube Systems". I thought it was very important that Kahled Karrai was here at the workshop. There are at least ten examples of spin-offs from the LMU and LMU not only in engineering, but also in physics and chemistry, which are very successful. And I see this as part of the future for Germany and for Europe, those small companies, heavily technological, on the cutting edge of innovation. These companies can do a great job in the marketplace. In addition they can also do a great job motivating the students to do exactly that. Setting an example helps, and we also, at the TU, have some examples. We need to talk about such positive examples, and spread the news, as the Americans do extremely well.

SIMON DELEONIBUS:

We also have an agreement with Grenoble School of Management that joins MINATEC: it goes exactly in the direction you are describing.

MANFRED GLESNER:

I think it is not the size of Germany compared with United States that is an issue. A little country like Israel has several high-level universities offering excellent education and research and at the same time you see that they have a lot of start-up companies with a lot of innovative products developed by those companies. They even have a large high tech company with Intel in Haifa building a factory for the next generation of ICs. It's not a matter of size. We can do it here in Germany as well. And probably, we also need better managers. For example, remember this famous talk about the future of the Gordon Moore curve. Gordon Moore himself was coming to the ISSEC conference in 2003. He was handled like a pope of microelectronics with a lot of honors by every one of the 3000 people sitting in the room. The first thing when Infineon went to the public stock market, the CEO of Infineon was coming with the attire of his famous namesake car race driver to the stock market in Frankfurt. Today, nobody talks about him anymore. So we need excellent managers also in that field and probably this is also a problem we have in Germany compared to other countries.

MANFRED GLESNER:

We have the Wirtschaftsingenieure in Darmstadt and they do an excellent job. The young students are excellently organized and they are very smart, clever people and we have to educate them heavily in modern technologies to later run a good business in industry. I think, perhaps, we are running out of time, I don't know, but please ...

CHRISTOPH KUTTER:

I was just thinking about this electric car project out of the Technical University. This is fantastic: It's people from the university who are beginning to build an electric car, and I am following their progress with a lot of interest and excitement. This is great. Perhaps we should talk a bit more about the positive things and should release that to the public

MANFRED GLESNER:

Now, you need only attend the VDE congress every two years and the most important event at the VDE congress in the opening ceremony is the presentation by young boys and girls of their contest entries for 'Invent a Chip'. It's quite funny to see how a dozen young people are standing there proudly explaining the idea behind their chip, and that's an excellent adventure. For me it's more or less the most important part of the VDE congress in the opening ceremony. We *can* bring enthusiasm to the young people.

Okay, how shall we proceed? We make a final round I would say.

WOLFGANG MATHIS:

Yes, I agree with the last statement. We have to communicate the discoveries of nano-electronics to young girls and boys in schools and also to our students in natural sciences and engineering such that new enthusiasm for nanoelectronics can be aroused. And maybe as a result, the nanoelectronic business can give us better news in the future.

CHRISTOPH KUTTER:

I simply say, I had a fantastic day. Thank you to the organizers, it was wonderful, it was really well-invested time, I learned a lot. What I liked very much were the interdisciplinary talks, for example people from Merck or from BASF giving their presentations. And I think that this discussion we had now here at the end was a very positive discussion.

SIMON DELEONIBUS:

Just to deliver some positive messages: I would say that globalization has very positive aspects because it forces you and at least gives you some incentive, to look at other parts of the world and try to understand different cultures. We have seen that already in Europe: we have different ways of approaching research and development in high-tech. I think that this is a strength in Europe, not a weakness. As I pointed out before, we have

huge challenges to face and we must keep that in mind in the future. We have fantastic education systems, much better than, I think, in the United States. Even though there are very good universities in the United States, excellent universities, on the average I think the European education system is much better. We must take this into account in our future thoughts. If we deliver these positive messages now, they will be very useful to encourage young people to pursue the route that we are creating. And thank you very much for kindly inviting me.

MANFRED GLESNER:

I think we have positive examples of how things can change in the university system with faculties from material science in Darmstadt. Here, the material science faculty had their 20 year anniversary last year, and it's a wonderful faculty. They have a lot of different areas they are pursuing and a lot of smart colleagues. These colleagues really understand how to cooperate with one another and they even cooperate within mechanical engineering and electrical engineering. Now part of the semiconductor research left classical faculties and is now a part of material science. And they have people from physics, from chemistry. So it's a wonderful example that we can survive in certain areas when we gather the forces. Concerning the nanoelectronics topic: What was very interesting for me is that we need not go into these areas: "More Moore", "More than Moore", and "Beyond Moore". It was interesting to see that nanoelectronic features are entering the classical microelectronics business now. So, we will have nanoelectronics in the future.

I remember in the beginning of the eighties, during the Reagan administration, they introduced in the US the so called "technology embargo" in the sense that nobody outside the United States was allowed to use their CAD-tools and their fabrication infrastructure MOSIS to get chips fabricated. Today, we find this more or less ridiculous. This embargo helped to create MultiProjectChip Services in many countries around the world.

But I think we have to bring in the political momentum here. We have to tell the people from the political area the importance of nanoelectronics. Compare nanoelectronics today to the time when Mr. Siemens invented his Elektrodynamo. We have to ask what are the Elektrodynamo devices nowadays? Will the new nanodevices play a similar role in the future? To bring them into common usage, we see a lot of research ahead of us. And having an infrastructure like the multi-project chip idea is still far away.

When we speak to young people from high schools and we tell them how beautiful microelectronics studies are, and we ask them "what do you want to study?". They are already familiar with the topic nanoelectronics and they have an interest in studying the new areas. So we truly have the possibility of creating a good climate in future high tech areas. Any comment from the audience?

JASMIN AGHASSI:

I enjoyed the day. It was very interesting for me. I have found many ideas that apply to my personal career, personal views and everyday work. I am confronted with many of the topics we have discussed today, for example the foundry business, design and modeling, as well as technical challenges of nanoelectronics. This discussion was basically a very nice summary and I congratulate all the participants and organizers of this meeting.

> ANHANG: PROGRAMMABLÄUFE DER VERANSTALTUNGEN

Im Zusammenhang mit dem acatech Projekt „Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland“ fanden Workshops und Tagungen statt, deren Programmablauf hier dokumentiert wird.

> acatech/DFG-RUNDGESPRÄCH NANOELEKTRONIK

Freitag, 17. April 2009
 TU München, Senatssaal

PROGRAMM		
9.00 Uhr	Begrüßung	Peter Russer, TU München
9.15 Uhr	Nahziele	Wolfgang Arden, Infineon Technologies AG
10.00 Uhr	Fernziele	Karl Hess (via Skype), University of Illinois, Urbana
10.45 Uhr	Pause	
11.00 Uhr	Technische Herausforderungen	Paolo Lugli, TU München
11.45 Uhr	Mittagsimbiss	
13.15 Uhr	Unternehmensgründungen	Robert Weigel, Universität Erlangen-Nürnberg
14.00 Uhr	Förderstrukturen	Michael Lentze, DFG
14.45 Uhr	Pause	
15.00 Uhr	Schlussdiskussion	Peter Russer
Moderation: Marc-Denis Weitze, acatech		

> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRONTIERS OF THE NANOELECTRONICS

CHAIRPERSONS:

K. BOCK (FRAUNHOFER EMFT), P. LUGLI (TUM) AND P. RUSSEK (TUM)

Technische Universität München

Theresianum (Room 0602), Theresienstraße 21, Munich

SEPTEMBER 8 th , 2010		
14.00 Uhr	Semiconductor nanowires	G. Abstreiter, TU München
14.30 Uhr	Towards ultimate scaling: semiconducting nanowires and molecular electronics	H. Riel, IBM Zurich
15.00 Uhr	Fabrication and characteristics of organic nanoscale transistors	H. Klauk, MPI Stuttgart
15.30 Uhr	Ultra-compact long-range inter- ferometric displacement sensing	K. Karrai, Attocube Systems
16.00 Uhr	Coffee break	
16.30 Uhr	Nanolaser on silicon substrate	C. Chang-Hasnain, Uni. Berkeley
17.00 Uhr	Quantum dot and photonic crystal for advanced light sources	Y. Arakawa, University of Tokyo
17.30 Uhr	Nanomagnetics for logic	W. Porod, Notre Dame University
18.00 Uhr	Magnetic flow cytometry	O. Hayden, Siemens Erlangen
19.00 Uhr	Dinner	
SEPTEMBER 9 th , 2010		
9.00 Uhr	System on Chip integration and System in Package integration for mobile phone applications	C. Kutter, Infineon Technologies
9.30 Uhr	Silicon nanoelectronics: challenges and opportunities	S. Deleonibus, CEA-LETI Grenoble
10.00 Uhr	Novel materials for CMOS-based nanoelectronics systems: stretching Moore's law?	M. Van Rossum, IMEC, Leuven
10.30 Uhr	Coffee break	

11.00 Uhr	Carbon electronics: The hype and hope of graphene	H. Kurz, RWTH-Aachen
11.30 Uhr	Designing graphene nano/opto-electronics	E. Molinari, University of Modena-Reggio Emilia
12.00 Uhr	Solid state nanostructures for quantum electronics	R. Gross, WMI
12.30 Uhr	Nitride epitaxy and nanodevice technologies	D. Pavlidis, TU Darmstadt
13.00 Uhr	Lunch	
14.00 Uhr	Materials for printed electronics	T. Geelhaar, Merck KGaA, Darmstadt
14.30 Uhr	Materials for high efficient organic LED	K. Hahn, BASF SE, Ludwigshafen
15.00 Uhr	The DNA-Transistor: nanotechnology for DNA-sequencing	S. Harrer, IBM Yorktown
15.30 Uhr	Fluorescent nanosensors for application in medical research and biotechnology	G. Mohr, Fraunhofer EMFT, Munich
16.00 Uhr	Coffee break	
16.30 Uhr	Podium discussion: QUO VADIS Electronics?	lead by M. Glesner, TU Darmstadt
18.00 Uhr	Concluding remarks	
19.30 Uhr	Get together at EMFT	

> acatech AKADEMIETAG ZUKUNFT DER ELEKTRONIK

Montag, 18. April 2011
Gläserne Manufaktur in Dresden

PROGRAMM AKADEMIETAG		
10.00 Uhr	Begrüßung	Reinhard Hüttl, Präsident acatech
	Impulsstatement	Stanislaw Tillich, Ministerpräsident des Freistaats Sachsen
	Grußwort	Hans Müller-Steinhagen, Rektor, TU Dresden
	Grußwort	Pirmin Stekeler-Weithofer, Präsident, Sächsische Akademie der Wissenschaften
10.30 Uhr	Einführung	Doris Schmitt-Landsiedel, Heinz Gerhäuser
10.45 Uhr	Nanoelektronik	Peter Russer, Thomas Geßner
11.00 Uhr	Organische Elektronik	Hartwig Höcker, Karl Leo
11.15 Uhr	Gedanken zur Zukunft der Elektronik in Europa	Alex Dommann
11.35 Uhr	Diskussion	
12.00 Uhr	Mittagspause	
13.00 Uhr	Nachhaltiges Wachstum und Zukunft der Elektronik	Ernst Ulrich von Weizsäcker
13.30 Uhr	Perspektiven der Elektronik	Klaus Wucherer
13.50 Uhr	Parallele Workshops > Nahziele und Hürden > Fernziele und Visionen > Nutzer-Orientierung	
15.00 Uhr	Panel inkl. Schlussdiskussion	
Moderation: Doris Schmitt-Landsiedel, Heinz Gerhäuser		

PROGRAMM acatech PRÄSENTATION		
18.00 Uhr	Grußwort	Sabine Freifrau von Schorlemer, Sächsische Staatsministerin für Wissenschaft und Kunst
18.15 Uhr	acatech Präsentation	Reinhard F. Hüttl, Präsident acatech
18.30 Uhr	Podiumsdiskussion „Zukunft der Elektronik in Sachsen“	Jan Blochwitz-Nimoth, Novald AG Elke Eckstein, Globalfoundries Gerhard Fettweis, TU Dresden Thomas Geßner, Fraunhofer ENAS und Zentrum für Mikrotechnologie, TU Chemnitz Hubert Lakner, Fraunhofer IPMS Reinhard Ploss, Infineon Technologies AG Doris Schmitt-Landsiedel, TU München Moderation: Dieter Spath, acatech
19.30 Uhr	Empfang	

> AUTORINNEN UND AUTOREN

Dr. **Wolfgang Arden** hat Halbleiter-Physik in Aachen und München studiert und in Berlin promoviert. Nach einigen Jahren Forschungsarbeit bei der Max-Planck-Gesellschaft trat er 1980 in das Forschungslabor der Firma Siemens in München ein und arbeitete dort auf dem Gebiet der Mikro-Lithographie. Nach einem 2-jährigen Aufenthalt bei IBM in East-Fishkill von 1990 bis 1992 in einem Joint Venture der Speicher-Entwicklung übernahm Hr. Arden die Entwicklungsleitung für Logik-Technologien im Bereich Halbleiter der Siemens AG. Anschließend leitete Dr. Arden diverse Funktionen mit übergreifenden Aufgaben im Siemens Halbleiterbereich und ab 2000 bei Infineon Technologies, darunter Abteilungen für Innovations-Management und Intellectual Property Management, und Technologie-Strategie und -Marketing. Von 1998 bis 2009 vertrat Hr. Arden Siemens bzw. Infineon im Committee der Internationalen Technologie-Roadmap für Halbleiter. Seit seiner Pensionierung in 2009 ist Dr. Arden als freier Unternehmensberater tätig.

Dr. **Jan Blochwitz-Nimoth** ist CSO (Chief Scientific Officer) und Mitbegründer der Firma Novalad. Er wurde 1970 in Dresden geboren und studierte Physik an der TU Dresden und an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Sein Diplom schloss er am Institut für Angewandte Photophysik (IAPP) der TU Dresden mit einer Arbeit über ultrakurze Laserspektroskopie ab. Danach arbeitete er ein Jahr lang an unorganischer Optoelektronik und Lichtprojektoren. Als Doktorand am IAPP forschte er zum Thema „Herstellung und Charakterisierung organischer Leuchtdioden mit gezielter Dotierung“. Im Juli 2001 schloss er seine Promotion erfolgreich ab. Mit seinem herausragenden Know-How auf dem Gebiet der OLED ist Jan Blochwitz-Nimoth einer der wichtigsten Erfinder der Novalad PIN OLED Technologie. 2011 wurde er mit dem Deutschen Zukunftspreis ausgezeichnet.

Prof. Dr. **Alex Dommann** studierte an der Universität Zürich Physik und Kristallographie und promovierte an der ETH Zürich in Festkörperphysik. Durch seine Tätigkeit am NTB Buchs und am CSEM, unter anderem als CTO und als Leiter der «Microsystems Technology Division», bringt er insgesamt mehr als 25 Jahre Erfahrung in der industrienahen, anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung sowie ein breites Kooperationsnetzwerk mit. Er entwickelt in seiner Forschungsgruppe hochsensitive Röntgentechniken zur Analyse von Alterungsprozessen von MEMS sowie neuartige Beschichtungstechniken

in Zusammenarbeit mit der Industrie. 2013 Ernennung zum Departementsleiter und Mitglied des Empa-Leitungsteams. Er ist Mitglied von verschiedenen Gremien im In- und Ausland.

Dr.-Ing. **Christoph Friederich** ist seit 2011 im Entwicklungsbereich Leistungshalbleiter der Robert Bosch GmbH tätig. Er studierte Nanostrukturtechnik an der Universität Würzburg und wurde 2011 mit einer Arbeit zu nichtflüchtigen Halbleiterspeichern an der Technischen Universität München promoviert. Zu seinen Forschungsschwerpunkten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für technische Elektronik (TU München) gehörten zudem Innovationsprozesse in der Halbleiterindustrie und kommerzielle Potenziale der Nanoelektronik. Zuvor war er von 2006 bis 2008 Entwickler bei der Infineon/Qimonda Flash GmbH.

Dr. Ing. **Nikolaus Fichtner** hat Elektro- und Informationstechnik studiert und wurde 2011 mit einer Arbeit in numerischer Feldtheorie an der TU München promoviert. Von 2009 bis 2010 war er u.a. als acatech Referent beschäftigt. Seit 2011 arbeitet er als Projektleiter bzw. Manager Produktentwicklung in der Telekommunikations- und Elektronikindustrie.

Dr. **Rolf Gausepohl** studierte Chemie an den Universitäten Karlsruhe, Paris und Münster. Anschließend wurde er 2006 an der RWTH Aachen in technischer Chemie promoviert. Bis 2009 arbeitete als Materialentwickler bei Continental, bevor er am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI als Zukunftsforscher beschäftigt war. Der Arbeitsschwerpunkt lag hier in der Anwendung von Methoden des Innovationsmanagements auf Materialfragestellungen, um strategische Handlungsoptionen zu identifizieren. 2011 wechselte er als Strategieberater zu The Boston Consulting Group und ist aktuell bei Evonik Industries als Foresight Manager tätig.

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. **Manfred Glesner** war von 1989 an ordentlicher Professor und Leiter des Bereiches "Mikroelektronische Systeme" an der Technischen Universität Darmstadt, an welche er bereits 1981 als außerordentlicher Professor berufen wurde. Manfred Glesner studierte an der Universität des Saarlandes in Saarbrücken und wurde dort im Jahr 1975 promoviert. Anschließend war er dort bis 1981 als wissenschaftlicher Assistent auf den Gebieten der Elektronik und des rechnergestützten Entwurfs wissenschaftlich tätig. Seine gegenwärtige Forschungsinteressen umfassen fortgeschrittene Methoden für den Entwurf und rechnergestützten Entwurf mikro- und nanoelektronischer Schaltkreise, rekonfigurierbare Rechnersysteme, Systemarchitekturen, Entwurf organischer Schaltkreise, RFID-Entwurf, Mixed Signal - Schltkreise, und in Hinblick auf Prozeßvariationen robuster Schaltkreisentwurf. Im Rahmen der EU-TEM-PUS-Initiative baute er mehrere mikroelektronische Entwurfszentren in Osteuropa auf.

Von 1990 bis 2006 war er Sprecher zweier DFG - Graduiertenkollegs. Ab 2003 war er stellvertretender Vorsitzender der Deutschen Informationstechnischen Gesellschaft (ITG) im VDE. Manfred Glesner ist IEEE Fellow und Mitglied von acatech. Für seine herausragenden Leistungen auf dem Gebiet der Lehre wurde er vom französischen Erziehungsminister mit den "Palme Académiques" ausgezeichnet.

Prof. Dr. phil. **Karl Hess** studierte an der Universität Wien Physik und wurde dort 1970 promoviert und arbeitete danach bis 1973 als Wissenschaftlicher Assistent an der Universität Wien am Ludwig-Boltzmann-Institut auf dem Gebiet der Halbleiterphysik. Von 1973 bis 1974 arbeitete er als Postdoctoral Fellow an der University of Illinois at Urbana/Champaign mit John Bardeen und Chih-Tang Sah auf dem Gebiet des Ladungsträgertransports in Transistoren zusammen. Nach drei Jahren an der Universität Wien kehrte Karl Hess 1977 wieder an die University of Illinois at Urbana/Champaign zurück, wo er seine weitere wissenschaftliche Laufbahn verbrachte. Karl Hess hat bedeutende wissenschaftliche Beiträge auf den Gebieten der Halbleitermaterialien und Halbleiterbauelemente sowie der Optoelektronik geleistet. Zu seinen herausragenden Leistungen zählen Arbeiten zur Modellierung von Quantum Well Laserdioden, zum Hochfeldtransport in Halbleitern und zu nichtlinearen Transportmechanismen in Halbleiter-Heteroübergängen. Seine zahlreichen Beiträge zur Halbleiterphysik sind von wesentlicher Bedeutung für die Entwicklung moderner nanostrukturierter Halbleiterbauelemente. In den letzten Jahren hat sich Karl Hess insbesondere mit der Quanteninformationstheorie und dem Bell'schen Theorem befasst. An der University of Illinois at Urbana/Champaign hat sich Karl Hess um die Gründung des Beckman Institute verdient gemacht und war nach dessen Eröffnung Associate Director des Instituts. Er war Faculty Member des Instituts und Center for Advanced Study Professor of Electrical and Computer Engineering. Karl Hess wurde für seine Verdienste mit zahlreichen renommierten Auszeichnungen geehrt. Ich erwähne hier den J.J. Ebers Award der IEEE Electron Devices im Jahr 1993, den D.C. Drucker Tau Beta Pi Eminent Faculty Award im Jahr 1995 und den Heinrich Welker Award in 2001. Karl Hess ist Mitglied zweier nationaler Akademien der Wissenschaften der USA, nämlich der National Academy of Engineering und der National Academy of Sciences und ist Mitglied von acatech.

MinR Dr. **Ulrich Katenkamp** studierte Physik an der Friedrich Schiller Universität in Jena. Er promovierte 1979 dort mit einer Arbeit über optische Eigenschaften von ionenimplantiertem SiO_2 . Von 1981 von 1990 beschäftigte er sich im AdW-Zentralinstitut für Mikrobiologie und Experimentelle Therapie mit der physikochemischen Untersuchung der Wechselwirkung zwischen DNA und Cancerostatika und war zuletzt als Arbeitsgruppenleiter Zellbiophysik im Bereich „genetic engineering“ durch elektrische Zellfusion tätig. Seit 1990 gehört Dr. Katenkamp dem Bundesministerium für Bildung und

Forschung an. Seine Arbeitsgebiete waren: Physikalische Grundlagenforschung im Hoch- und Mittelenergiebereich, Großforschungszentren DESY, GSI und CERN, Klima- und Atmosphärenphysik, Forschung für den Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel und UN-Klimarahmenkonvention. 2007 übernahm er die Leitung des Referats „Elektroniksystem, Elektromobilität“.

Nikolaus Lange ist Leiter des Entwicklungszentrums von Intel in Deutschland. In dieser Funktion verantwortet er die Chipentwicklung für zukünftige Generationen von Mikroprozessoren. Mit einem Team von über 100 Ingenieuren arbeitet er daran, Innovationen in den Bereichen Mikroarchitektur, CPU-Design, Validierung und technischer Implementierung voranzutreiben. Nikolaus Lange kam durch die Übernahme der GIGA Group, deren deutsche Niederlassung er gegründet und als Geschäftsführer geleitet hat, im Jahr 2000 zu Intel. Sein besonderes Engagement gilt der Nachwuchsförderung im MINT-Bereich. Hier hat Herr Lange 2007 die Intel® Leibniz Challenge ins Leben gerufen, einen IT-Wettbewerb der jährlich über 4000 Schülerinnen und Schüler aus ganz Deutschland anzieht. Bevor er zu Intel kam, hatte Herr Lange mehr als zehn Jahre lang verschiedene Positionen in den Bereichen Entwicklung, Marketing und Management in unterschiedlichen Halbleiterunternehmen inne. Nikolaus Lange hat sein Diplom-Ingenieur Studium in Elektrotechnik an der Technischen Universität Braunschweig abgeschlossen und zudem an der École nationale de l'aviation civile (ENAC) in Toulouse studiert.

Nach dem Physikstudium an der Universität Freiburg wurde Dr. **Karl Leo** 1988 an der Universität Stuttgart mit einer am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung bei Hans Queisser ausgeführten Arbeit zur Ultrakurzzeit-Spektroskopie in Halbleitern promoviert. Von 1989 bis 1991 war er Postdoc bei den Bell Laboratories in Holmdel (New Jersey, USA) und ab 1991 Oberassistent an der RWTH Aachen. Seit 1993 leitet er das Institut für Angewandte Photophysik der Technischen Universität Dresden, zusätzlich ist er Institutsleiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Organik, Materialien und Elektronische Bauelemente COMEDD, Dresden. Sein aktuelles Arbeitsgebiet sind Organische Halbleiter, von den Grundlagen bis hin zu Anwendungen, z.B. als Organische Leuchtdioden (OLED) und Organische Solarzellen. Seine Arbeiten wurden mehrfach ausgezeichnet, u.a. mit dem Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Zukunftspreis des Deutschen Bundespräsidenten. Er ist Mitbegründer einiger Firmen, u.a. Novald AG und Heliatek GmbH.

Prof. Dr. **Paolo Lugli** schloss 1979 sein Studium der Physik bei der Universität von Modena in Italien ab. 1981 wechselte er zur Colorado State University in Fort Collins, CO (USA), wo er 1982 seinen Master of Science und 1985 seinen Ph.D., jeweils auf dem Gebiet Electrical Engineering, machte. Von 1988 bis 1993 war er assoziierter Professor von „Solid State Physics“ bei der Fakultät für Ingenieurwesen an der zweiten Universität

Roms, der Universität „Tor Vergata“. 1993 wurde er an derselben Universität zum Professor berufen. 2002 wechselte er zur Technischen Universität München, bei welcher er zum Lehrstuhlinhaber des neu errichteten Lehrstuhles für Nanoelektronik berufen wurde. Seine derzeitigen Forschungsinteressen beinhalten die Modellierung, Herstellung und Charakterisierung von organischen Bauelementen für elektronische und optoelektronische Anwendungen, das Design von organischen Schaltkreisen, die numerische Simulation von Halbleitern-Bauelemente sowie das theoretische Studium von Transportprozessen in Nanostrukturen. Paolo Lugli ist Fellow IEEE und Mitglied der VDE und acatech.

Dr. **Annette Polte** studierte Chemie an der TU Dresden und der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Sie promovierte 1994 an der TU Dresden im Bereich anorganische Festkörperchemie. Nach Stationen in der Forschung und Wirtschaft ist sie derzeit an der TU Dresden in der Arbeitsgruppe von Prof. Leo im Forschungsmanagement tätig.

Prof. Dr. **Wolfgang Porod** ist gegenwärtig Frank M. Freimann Professor of Electrical Engineering an der University of Notre Dame (Indiana, USA). Sein Diplom (M.S.) und Doktorgrad hat er an der Universität Graz erworben (1979 bzw. 1981). Anschließend PostDoc an der Colorado State University und Senior Research Analyst an der Arizona State University. 1986 kam er als Associate Professor an die University of Notre Dame. Er ist Direktor des Notre Dame Center for Nano Science and Technology. Seine Forschungsinteressen liegen im Feld der Nanoelektronik (new circuit concepts for novel devices). Er ist Autor von rund 300 Publikationen und Präsentationen.

Dr. **Johannes Anton Russer** studierte Elektro- und Informationstechnik an der Universität Karlsruhe. Anschließend war er an der University of Illinois in Urbana-Champaign Wissenschaftlicher Assistent und führte dort ab 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Firma Qualcomm Inc. Forschungsarbeiten durch. Im Mai 2010 wurde Johannes Russer mit der PhD Thesis "Methodologies for electromagnetic field modeling for computer aided analysis of multi-domain physical interactions" promoviert. Seit Mai 2012 arbeitet er am Lehrstuhl für Nanoelektronik der Technischen Universität München an der Nahfeldcharakterisierung elektromagnetischer Störemissionen, an Methoden zur numerischen Berechnung stochastischer elektromagnetischer Felder, sowie an Netzwerkmethoden und Multiskalenmethoden zur Feldmodellierung.

Prof. Dr. techn. Dr. h.c. **Peter Russer** war von 1981 bis 2008 Ordinarius für Hochfrequenztechnik an der Technischen Universität München und ist nunmehr als Emeritus of Excellence der TUM am Lehrstuhl für Nanoelektronik zu Gast. Er studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Wien und war anschließend Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Physikalische Elektronik der Technischen

Universität Wien, wo er 1971 mit einer Arbeit zum Josephson-Effekt promoviert wurde. Von 1971 bis 1980 arbeitete Peter Russer am AEG-Telefunken-Forschungsinstitut Ulm auf den Gebieten der Lichtleitfaser-Kommunikationstechnik, der Lasermodulation, der breitbandigen Halbleiterschaltkreise, der Rauschanalyse von Mikrowellenschaltungen und der optischen Faser-Gyroskope. Von 1992 bis 1995 war er von der TUM beurlaubt und leitete als Gründungsdirektor das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik in Berlin-Adlershof. Von 1997 bis 1999 war er Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TUM. Im Jahr 2007 gründete Peter Russer gemeinsam mit zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern das Unternehmen Gauss Instruments GmbH, welches sich seither zu einem führenden Hersteller von Systemen zur breitbandigen Messung elektromagnetischer Störemissionen entwickelt hat. Die gegenwärtigen Forschungsaktivitäten von Peter Russer umfassen Elektrodynamik, Statistische Rauschanalyse, Elektromagnetische Verträglichkeit, Integrierte Millimeterwellenschaltungen und Quantennanoelektronik. Peter Russer ist Fellow of IEEE, Träger des goldenen VDE-Ehrenringes, sowie Träger des NTG-Preises, des IEEE Distinguished Educator Awards, des IEEE Pioneer Awards sowie des Distinguished Service Awards der European Microwave Association. Von 2008 bis 20011 leitete Peter Russer die acatech Projektgruppe "Nanoelektronik".

PD Dr.-Ing. **Giuseppe Scarpa** studierte Elektrotechnik an der Universität Rom "Tor Vergata", Italien; Promotion 2003 am Walter-Schottky-Institut der Technischen Universität München (TUM), Deutschland, mit einer Arbeit zu Entwurf und Herstellung von Quantenkaskaden-Laser (2003). Im Jahr 2008 erhielt er seine Habilitation in "Innovative Nanofabrikationsmethoden und Dünnschicht organische Bauelemente" am Institut für Nanoelektronik der TUM. Er ist derzeit Privat Dozent (PD) an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nanoelektronik der TUM. Seine Forschung konzentriert sich auf die Herstellung einer Vielzahl von Nanostrukturen (u.a. organische und Nanobaulemente) und auf die Entwicklung der verschiedenen Nanofabrikationsverfahren auf Basis der Nanoimprintlithographie sowie Biosensoren und Biochips auf Basis organischer Materialien.

Elna Schirmeister war nach ihrem Studium des Wirtschafts-Ingenieurwesens an der TU Darmstadt (Fachrichtung Maschinenbau) in der Logistikplanung eines großen Industrieunternehmens beschäftigt. Seit 1999 ist sie Projektleiterin am Fraunhofer ISI. 2007 wechselte sie vom Competence Center Industrie- und Service-Innovationen ins Competence Center Innovations- und Technologie-Management und Vorausschau und ist derzeit stellvertretende Leiterin dieses Competence Centers. Ihre Arbeitsschwerpunkte umfassen u.a. Visioning- und Szenario-Projekte, qualitative und quantitative Befragungen sowie Dialogprozesse zur Entwicklung von Zukunftsentwürfen.

Prof. Dr. **Doris Schmitt-Landsiedel** ist Inhaberin des Lehrstuhls für Technische Elektronik an der TU München. Ihre Forschungsschwerpunkte sind elektronische Bauelemente und Schaltungen in Neuen Technologien sowie Entwurf zuverlässiger, verlustleistungsarmer integrierter Schaltungen. Vor ihrer Lehrtätigkeit arbeitete sie in der Zentralen Forschung und Entwicklung von Siemens im Bereich Festkörperphysik und Mikroelektronik. Sie ist Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech).

Dr. **Marc-Denis Weitze** hat Chemie, Physik und Philosophie studiert. Er promovierte in Theoretischer Chemie an der Technischen Universität München. Nach langjähriger Tätigkeit im Bereich der Wissenschaftskommunikation am Deutschen Museum arbeitet er seit 2007 als Wissenschaftlicher Referent in der Geschäftsstelle von acatech und betreut Aktivitäten aus den Bereich Technikommunikation, Energie, Bio- und Nanotechnologie.

Dr. **Sven Wydra** hat von 1999 bis 2004 Wirtschaftswissenschaften mit Schwerpunkt Volkswirtschaft an den Universitäten Hohenheim und Göteborg studiert. Seit 2005 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung im Competence Center Neue Technologien. Im Jahr 2009 hat er seine Promotion (Universität Hohenheim) über Produktions- und Beschäftigungseffekte neuer Technologie am Beispiel der Biotechnologie abgeschlossen. Zu seinen Forschungs- und Arbeitsgebieten gehören die wirtschaftliche Bedeutung neuer Technologien und Branchen sowie Innovationssysteme und -politik (u.a. für Nanoelektronik).

**BISHER SIND IN DER REIHE acatech DISKUSSION UND IHRER VORGÄNGERIN
acatech DISKUTIERT FOLGENDE BÄNDE ERSCHIENEN:**

Weitze, M.-D./Pühler, A./Heckl, W. M./Müller-Röber, B./Renn, O./Weingart, P./Wess, G. (Hrsg.): *Biotechnologie-Kommunikation. Kontroversen, Analysen, Aktivitäten* (acatech DISKUSSION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

Anderl, R./Eigner, M./Sendler, U./Stark, R. (Hrsg.): *Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung* (acatech DISKUSSION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

Hippler, H. (Hrsg.): *Ingenieurpromotion – Stärken und Qualitätssicherung. Beiträge eines gemeinsamen Symposiums von acatech, TU9, ARGE TU/TH und 4ING* (acatech DISKUSSION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

Pühler A./Müller-Röber B./Weitze M.-D. (Hrsg.): *Synthetische Biologie – Die Geburt einer neuen Technikwissenschaft*, (acatech DISKUSSION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

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

Gausemeier J./Wiendahl H.-P. (Hrsg.): *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

Lemmer K. et al.: *Handlungsfeld Mobilität – Infrastrukturen sichern. Verkehrseffizienz verbessern. Exportchancen ergreifen.* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

Thoma K. (Ed.): *European Perspectives on Security Research* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

Hüttl R.-F./Pischetsrieder B./Spath D. (Hrsg.): *Elektromobilität. Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2010.

Broy M. (Hrsg.): *Cyber-Physical-Systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2010.

Kornwachs K. (Hrsg.): *Technologisches Wissen. Entstehung, Methoden, Strukturen* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2010.

Martina Ziefle/Eva-Maria Jakobs: *Wege zur Technikfaszination. Sozialisationsverläufe und Interventionszeitpunkte* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Winzer P./Schnieder E./Bach F.-W. (Hrsg.): *Sicherheitsforschung – Chancen und Perspektiven* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Schmitz-Rode T. (Hrsg.): *Runder Tisch Medizintechnik. Wege zur beschleunigten Zulassung und Erstattung innovativer Medizinprodukte* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

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

Bley T. (Hrsg.): *Biotechnologische Energieumwandlung: Gegenwärtige Situation, Chancen und künftiger Forschungsbedarf* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Milberg J. (Hrsg.): *Förderung des Nachwuchses in Technik und Naturwissenschaft. Beiträge zu den zentralen Handlungsfeldern* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Gronau N./Eversheim W. (Hrsg.): *Umgang mit Wissen im interkulturellen Vergleich. Beiträge aus Forschung und Unternehmenspraxis* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Grötschel M./Lucas K./Mehrmann V. (Hrsg.): *Produktionsfaktor Mathematik. Wie Mathematik Technik und Wirtschaft bewegt* (acatech DISKUTIERT), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2008. Auch in Englisch erhältlich über www.springer.com.

Schmitz-Rode T. (Hrsg.): *Hot Topics der Medizintechnik. acatech Empfehlungen in der Diskussion* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Höcker H. (Hrsg.): *Werkstoffe als Motor für Innovationen* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Mattern F. (Hrsg.): *Wie arbeiten die Suchmaschinen von morgen? Informationstechnische, politische und ökonomische Perspektiven* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Kornwachs K. (Hrsg.): *Bedingungen und Triebkräfte technologischer Innovationen* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

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

Pfingsten A./Rammig F. (Hrsg.): *Informatik bewegt! Informationstechnik in Verkehr und Logistik* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Hillemeier B. (Hrsg.): *Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. Herausforderungen und Perspektiven für eine neue deutsche Energiepolitik* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

Spur G. (Hrsg.): *Wachstum durch technologische Innovationen. Beiträge aus Wissenschaft und Wirtschaft* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

Spur G. (Hrsg.): *Auf dem Weg in die Gesundheitsgesellschaft. Ansätze für innovative Gesundheitstechnologien* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.

Pritschow G. (Hrsg.): *Projektarbeiten in der Ingenieurausbildung. Sammlung beispielgebender Projektarbeiten an Technischen Universitäten in Deutschland* (acatech DISKUTIERT), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.

acatech (Hrsg.): *Computer in der Alltagswelt – Chancen für Deutschland?*, Tagungsband, München 2005.

acatech (Hrsg.): *Wachstum durch innovative Gesundheitstechnologien*, Tagungsband, München 2005.

acatech (Hrsg.): *Innovationsfähigkeit. „Bildung, Forschung, Innovation: Wie können wir besser werden?“*, Tagungsband, München 2004.

acatech (Hrsg.): *Nachhaltiges Wachstum durch Innovation*, Tagungsband, München 2003.

> acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech vertritt die 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 unterstützen 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 den Diskurs über technischen Fortschritt in Deutschland zu fördern und das Potenzial zukunftsweisender Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft darzustellen, 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; das Präsidium, das von den Mitgliedern und Senatoren der Akademie bestimmt wird, lenkt die Arbeit; ein Senat mit namhaften Persönlichkeiten vor allem aus der Industrie, aus der Wissenschaft und aus der Politik berät acatech in Fragen der strategischen Ausrichtung und sorgt für den Austausch mit der Wirtschaft und anderen Wissenschaftsorganisationen in Deutschland. Die Geschäftsstelle von acatech befindet sich in München; zudem ist acatech mit einem Hauptstadtbüro in Berlin und einem Büro in Brüssel vertreten.

Weitere Informationen unter www.acatech.de