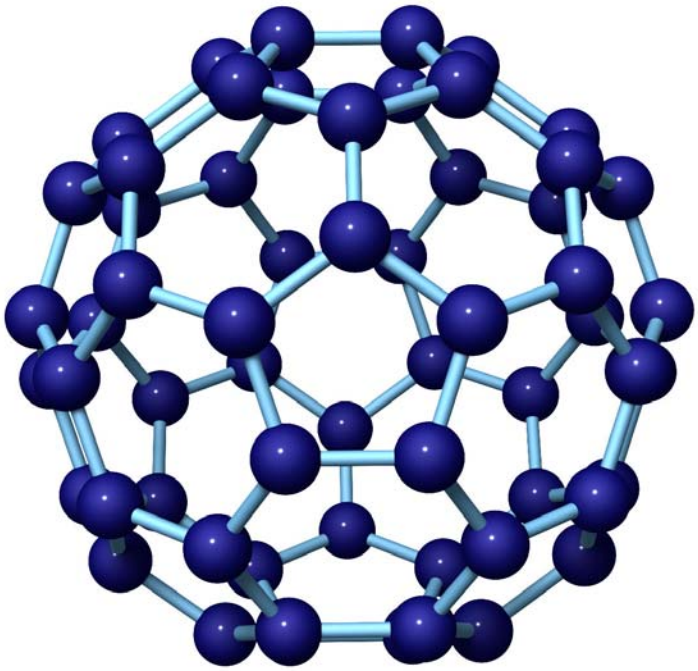
Bundesamt
für Sicherheit in der
Informationstechnik

Nanotechnologie



Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
Postfach 20 03 63
53133 Bonn
Tel.: +49 (0) 1888 9582 5284 / -5355
E-Mail: techno@bsi.bund.de
Internet: http://www.bsi.bund.de
© Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2007

Vorwort

Nanotechnologie ist derzeit in aller Munde. Es wird prognostiziert, dass sie neben der Mikro-, Medizin-, Bio- und Informationstechnik ein Innovationsmotor für die ersten Jahrzehnte des neuen Jahrtausends ist. Ihr wird eine ähnlich bedeutende Entwicklung vorhergesagt, wie sie die Informationstechnik nach der Erfindung des Transistors und der Herstellung integrierter Schaltkreise durchlaufen hat.

Kennzeichnend für die Nanotechnologie ist, dass sie weniger eine Basistechnologie im klassischen Sinne mit einer eindeutig abgrenzbaren Definition ist, sondern vielmehr eine neue interdisziplinäre Herangehensweise für weitere Fortschritte in der Physik, Chemie, Biologie, Elektronik, Optik oder bei neuen Materialien. Insgesamt zielen Erkenntnisse und Ergebnisse der Nanotechnologie in diesen Feldern nicht auf den Ersatz bereits erreichter Anwendungen, sondern befördern Produkte zu höherer Funktionalität.

Die fortschreitende Entwicklung zur Miniaturisierung von Mikrosystemkomponenten durch immer perfektere Fertigungsverfahren erfordert neue Methoden, die nur mit Hilfe der Nanowissenschaften in absehbarer Zukunft gelöst werden können.

Die Mikrosystemtechnik revolutioniert noch heute unseren Alltag; sie umfasst Methoden zum Entwerfen, Herstellen und Anwenden von Systemen mit unterschiedlichen Wirkprinzipien (elektrische, magnetische, mechanische, thermische, optische, chemische, biologische und fluidische) einschließlich der dafür notwendigen Informationsverarbeitung.

In der Automobil-, Medizin-, Umwelt- und Kommunikationstechnik, aber auch im Maschinenbau oder im privaten Bereich bieten sich für diese Technologie viele Anwendungsfelder. Ihr industrieller Nutzen zeigt sich heute in Form von Airbagsystemen über mikrooptische Systeme für DVD-Player bis hin zum Druckkopf im Tintenstrahldrucker oder Schreib-Leseköpfe für Festplattenspeicher. Sie erschloss in weniger als zehn Jahren einen Milliardenmarkt und übt eine technisch – wirtschaftliche Hebelwirkung in vielen Bereichen aus.

Bereits heute beeinflusst die Nanotechnologie eine Vielzahl von Produkten vor allem in den Bereichen Elektronik/Datenspeicherung, funktionelle Schichten und Präzisionsoptiken. Im Jahr 2010 wird mit einem Marktvolumen der Nanotechnologie von 1 Billion US-Dollar gerechnet.

Diese enorme Bedeutung der Nanotechnologie als Basisinnovation und Querschnittstechnologie mit hoher volkswirtschaftlicher Relevanz wurde vor einigen Jahren durch zahlreiche Wirtschaftsfachleute und Politiker zunehmend erkannt.

So wurden bereits im 6. EU-Forschungsrahmenprogramm für Forschung und technologische Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie 150 Millionen € pro Jahr zur Verfügung gestellt. Für das kommende 7. EU-Forschungsrahmenprogramm (2007-2013) plant die Kommission den Nanowissenschaften/ -technologien für den gesamten Zeitraum ca. 4.8 Mrd. € bereitzustellen. Auch in Deutschland wird mit dem Programm „ Neue Impulse für Innovation und Wachstum“ (2006-2009) die Wichtigkeit der Nanotechnologie weiter hervorgehoben.

Hier ergeben sich entscheidende Innovationspotentiale, die es zu nutzen gilt, um die Position der deutschen Industrie langfristig zu sichern. In Zeiten der sich verändernden Märkte und zunehmender weltweiter Konkurrenz liegt der Schlüssel zum Erfolg und damit zur Sicherung von Hightech-Arbeitsplätzen in Deutschland

mehr denn je in der Entwicklung und dem Einsatz von innovativen Technologien, wie die der Nanotechnologie.

Mit der vorliegenden Studie soll ein Überblick über den aktuellen Stand der Nanotechnologie gegeben werden, wobei ein Schwerpunkt das Gebiet der Nanoelektronik mit ihren Einflüssen auf die zukünftige Gestaltung der Informationstechnologie einnimmt.

Über die Darstellung der Technologie hinaus werden aber auch neue Anwendungen, die die Nanotechnologie erst ermöglicht, aufgezeigt und, soweit heute schon erkennbar, auf mögliche Sicherheitsrisiken hingewiesen.

Somit richtet sich die Studie insbesondere an technisch interessierte Personen, die sich sowohl einen Überblick über die Chancen und Einsatzpotentiale der Nanotechnologie als auch ihrer potentiellen Risiken verschaffen wollen.

Bonn, im Januar 2007

Dr. Udo Helmbrecht

Präsident des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 11

2 ZIEL DER TECHNOLOGIEANALYSE 13

3 NANOTECHNOLOGIE 15

3.1 DEFINITION DER NANOTECHNOLOGIE 15
3.2 HISTORIE 17
3.3 STAND DER NANOTECHNOLOGIEFORSCHUNG 25
3.3.1 Europa, International 26
3.3.1.1 Europa 27
3.3.1.2 Deutschland 29
3.3.1.3 USA 31
3.3.1.4 Japan 31
3.3.1.5 Drittländer 32

4 NANOTECHNOLOGIE – EINE NEUE QUERSCHNITTTECHNOLOGIE 35

4.1 NANOWERKZEUGE 36
4.2 NANOMECHANIK 39
4.3 NANOBIOTECHNOLOGIE 43
4.3.1 Nanobiotechnologie in der Medizin 45
4.3.2 Nanobiotechnologie in der Automobilindustrie 46
4.3.3 Nanobiotechnologie in der pharmazeutischen Industrie 50
4.3.4 Anwendungsbereiche von Biochips 53
4.3.4.1 DNA – Chip 54
4.3.4.2 Protein-Chip 55
4.3.4.3 Zell-Chips 58
4.3.4.4 Das Labor auf einem Chip 59
4.4 NANOMEDIZIN 61
4.4.1 Nanotechnologie in der Medizin 64
4.4.1.1 Diagnostik und Therapie in der Nanomedizin 66
4.4.1.2 Zukunftshoffnungen für die Diagnostik in der Krebstherapie 68
4.4.1.3 Nanowerkzeuge für die Diagnose 69
4.5 NANOELEKTRONIK 73
4.5.1 Der Übergang von der Mikro- zur Nanoelektronik 74
4.5.2 Die Erfindung des Transistors und der integrierten Schaltung 76
4.5.3 Neue Materialien, Bauelemente und Konzepte zukünftiger Computer 81
4.5.3.1 Resonanztunnel Elemente 81
4.5.3.2 Einzelelektronen Transistor 83
4.5.3.3 Triple-Gate-Transistor 85
4.5.3.4 Feldeffekttransistoren auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren 89
4.5.3.5 DNA–Feldeffekttransistor 96
4.5.3.6 Integrierte Schaltkreise 97
4.5.3.7 Drähte der Zukunft 98
4.5.4 Niederdimensionale Systeme 99
4.5.4.1 Nanostrukturen 100
4.5.5 Photonische Halbleiter 107
4.5.6 Spinelektronik – die neue Perspektive der Informationstechnik 108
4.5.6.1 Spin-Feldeffekt-Transistor 112
4.5.6.2 Spinventile 114
4.5.6.3 Nichtflüchtige Speicherbauelemente 115
4.5.6.4 Weitere Speichertechniken 131
4.5.7 Polymerelektronik 131
4.5.7.1 Organische Feldeffekt-Transistoren – OFET 132
4.5.7.2 Polymerspeicher 133
4.5.7.3 Micro Electro Mechanical Systems – MEMS 135
4.5.7.4 Organic Light-Emitting Diode - OLED 136
4.5.7.5 Radio Frequency Identification - RFID 149
4.5.8 Display – Techniken 150
4.5.8.1 Nanoröhrchendisplays mit hoher Auflösung 150
4.5.8.2 Lichtventile 150
4.5.8.3 Papier oder Display 151
4.5.8.4 Gitter-Lichtventil 152

4.5.8.5 Autofokus-Kameramodul ... 153
4.5.8.6 Display mit Kohlenstoff-Nanoröhren ... 154
4.5.9 Ausblick ... *155*

5 NANOTECHNOLOGIE – CHANCE ODER RISIKO ? ... 158

5.1 NANOTECHNOLOGIE IM DIALOG ... 158
5.2 CHANCEN DER NANOTECHNOLOGIE ... 159
5.2.1 Wirtschaftliche Potenziale - Fakten statt unrealistische Visionen ... 159
5.2.2 Ökologische Potenziale ... 163
5.3 POTENZIELLE GEFAHREN DER NANOTECHNOLOGIE ... 164
5.4 HANDLUNGSBEDARF ... 167

6 AUSBLICK UND DETAILUNTERSUCHUNGEN IM HINBLICK AUF VERWENDUNG IN ÖFFENTLICHEN PROJEKTEN ... 169

7 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ... 176

8 INDEX ... 178

9 GLOSSAR ... 184

10 LITERATURVERZEICHNIS ... 215

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Nanometerskala 11
Abbildung 3.1: Molekularmännchen 15
Abbildung 3.2: Entwicklungsstand und Marktreife einzelner Nanotechnologieanwendungen 25
Abbildung 3.3: Budgetaufteilung des 7. Forschungsrahmenprogramms 28
Abbildung 3.4: Nanotechnologie - Finanzierungsmöglichkeiten 30
Abbildung 3.5: Öffentliche Förderung von Nanotechnologie in Millionen Euro 32
Abbildung 3.6: Investitionshöhen der wichtigsten Drittländer 33
Abbildung 3.7: CAS Institute 34
Abbildung 4.1: Rubinrote Farbe im Fensterglas 37
Abbildung 4.2: EUV Mikroskop 38
Abbildung 4.3: Nanometer-Motor 40
Abbildung 4.4: Kantilever 41
Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Experiments 41
Abbildung 4.6: Millipede 42
Abbildung 4.7: Millipede Chip 42
Abbildung 4.8: Anwendungsgebiete der Nanobiotechnologie 44
Abbildung 4.9: Anwendungsfelder der Nanobiotechnologie in der Medizin 45
Abbildung 4.10: Therapiepotenziale der Nanotechnologie 46
Abbildung 4.11: Sensoren im modernen Automobil 47
Abbildung 4.12: Priorisierung nanotechnologischer Komponenten/Systeme 48
Abbildung 4.13: Nanotechnologische Komponenten im Automobil 49
Abbildung 4.14: Bevölkerung Deutschlands bis 2050 50
Abbildung 4.15: Biochip für die Massenanalyse von Erbmolekülen 51
Abbildung 4.16: Ausschnitt der Doppelhelix-Struktur der menschlichen DNA 52
Abbildung 4.17: Internationaler Umsatz an medizinischen Geräten 53
Abbildung 4.18: Testsystem für DNA, RNA und Proteine 54
Abbildung 4.19: Labor in Chipgröße 57
Abbildung 4.20: Einzelzell- und 3D-Gewebe-Mikrokapillar-Biochips für funktionelle Proteomik und 59
Abbildung 4.21: Mikrofluidische Lab-on-a-Chip-Struktur 60
Abbildung 4.22: Cochlea Implantat 63
Abbildung 4.23: Retina-Implantat 64
Abbildung 4.24: Der gläserne Mensch 64
Abbildung 4.25: Bedeutung der Nanotechnologie in der Medizin 67
Abbildung 4.26: Nanoroboter 69
Abbildung 4.27: Prinzip des Raster-Tunnelmikroskops 70
Abbildung 4.28: Computermodell eines harnstoffhaltigen Dendrimers 70
Abbildung 4.29: Eingekapselte Radionuklide 71
Abbildung 4.30: Zelle eines bösartigen Gehirntumors 72

Abbildung 4.31: Zwei verschiedene Ansätze der Nanoelektronik 73
Abbildung 4.32: Westeuropäischer ITK-Markt 74
Abbildung 4.33: Entwicklung der Mikroprozessoren 78
Abbildung 4.34: Moorsches Gesetz 78
Abbildung 4.35: Extrapolierte Kurve der moorschen Gesetzmäßigkeit 79
Abbildung 4.36: Strukturgrößen in Abhängigkeit zu den Chipkosten 80
Abbildung 4.37: Zukunft der Nanoelektronik 81
Abbildung 4.38: Schematischer Aufbau einer RTD 82
Abbildung 4.39: Strom-Spannungs-Kennlinie einer RTD 82
Abbildung 4.40: Schematischer Aufbau eines Resonanz-Tunnel-Transistors 83
Abbildung 4.41: SET-Transistor aus AL-AL2O3-AL mit Winkel-Schrägschattenbedampfung 84
Abbildung 4.42: Triple Gate Transistor 85
Abbildung 4.43: REM-Aufnahme eines Triple-Gate-Transistors 85
Abbildung 4.44: 5000-fache REM-Vergrößerung eines Triple-Gate-Transistors 86
Abbildung 4.45: Elektronenmikroskopische Querschnittsabbildung an der Kontaktfläche zweier direkt gebondeter und getemperter Saphir-Wafer 87
Abbildung 4.46: Querschnitt eines Floating-Dot- Speichertransistors aus Silizium Nanodots 89
Abbildung 4.47: Kohlenstoffnanoröhre 89
Abbildung 4.48: Hybridisierungsablauf zu 3 Bindungspartnern des Kohlenstoffs 90
Abbildung 4.49: Ein- und mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen 90
Abbildung 4.50: Modell eines "Buckyballs" mit 60 Kohlenstoffatomen 90
Abbildung 4.51: Nanoröhren als Metall und Halbleiter 92
Abbildung 4.52: Versuchsanordnung zur Trennung von Nanoröhren 93
Abbildung 4.53: Molekültransistor 93
Abbildung 4.54: Kohlenstoff-Nanotransistor 94
Abbildung 4.55: Dünnfilmtransistor aus Nanodrähten 96
Abbildung 4.56: Proteinfasern ohne Überzug („bare fiber“) und mit Metall-Überzug („labeled fiber“) 97
Abbildung 4.57: Crossbar Latch 98
Abbildung 4.58: Schematischer Aufbau eines Crossbar Latch 99
Abbildung 4.59: Einschränkung der Ladungsträgerbewegungsfreiheit durch Reduzierung der räumlichen Dimension 100
Abbildung 4.60: Indiumarsenid-Quantenpunkt 101
Abbildung 4.61: Hergestellter Quantenpunkt im selbstorganisierten Wachstum 102
Abbildung 4.62: Querschnitt eines InGaAs HEMT 103
Abbildung 4.63: Doppelheterostruktur 104
Abbildung 4.64: Das Innere eines Quantenpunkt-Lasers - die dunklen Punkte bestehen aus Indium und Arsenatomen 105
Abbildung 4.65: Dreifach durchlöchert: photonischer Kristall mit Bandlücke für Zentimeterwellen 108

Abbildung 4.66: Schematische Darstellung einer magnetischen Eisen/Chrom Heteroschichtstruktur 109
Abbildung 4.67: Spin-Feldeffekt-Transistor 113
Abbildung 4.68: Spin-Feldeffekt-Transistor ohne Gatespannung 113
Abbildung 4.69: Spin-Feldeffekt-Transistor mit angelegter Gatespannung 114
Abbildung 4.70: Spinventilheterostruktur 114
Abbildung 4.71: MRAM-Speicherzelle 117
Abbildung 4.72: Magnetischer Tunnelkontakt 118
Abbildung 4.73: TMR Element 118
Abbildung 4.74: 2*2 Array einer MTJ Speicherzelle 119
Abbildung 4.75: MRAM Architektur 120
Abbildung 4.76: MRAM Speicherzellen-Array mit zusätzlichen Dioden zur Vermeidung von Störeffekten beim Lesevorgang 121
Abbildung 4.77: Eindimensionales magnetisches Auswahlschema (Lesen und Schreiben) für magnetoresistive Speicherzellen 121
Abbildung 4.78: MRAM-Speicherzelle basierend auf Spinventilen und gekreuzten Leiterbahnen 123
Abbildung 4.79: Hybride MRAM-Zelle 124
Abbildung 4.80: Der Aufbau einer GMR-Zelle 124
Abbildung 4.81: Molekülaufbau der ferroelektrischen Polymere 125
Abbildung 4.82: Schichtaufbau eines vierfach gestapelten polymer-basierten ferroelektrischen-RAM (PFeRAM) 126
Abbildung 4.83: Die unterschiedlichen Temperaturzyklen der Chalkogenide für Kristallisation (grüne Kurve) und Amorphisierung (rote-Kurve) 126
Abbildung 4.84: Zellaufbau eines OUM unter Nutzung von Chalkogeniden 127
Abbildung 4.85: NROM-Zelle 128
Abbildung 4.86: Flash-Speicherzelle 128
Abbildung 4.87: Speicher-Zelle aus 1T1MTJ-Zellen 130
Abbildung 4.88: Elektrische Leitfähigkeit von Kunststoffen 132
Abbildung 4.89: Organischer OFET 133
Abbildung 4.90: WORM-Speicher auf Kunststoff-Silizium-Basis mit chemischer Strukturformel 134
Abbildung 4.91: Nanomechanisches Speicherkonzept Millipede 136
Abbildung 4.92: OLED Patente 138
Abbildung 4.93: Schematischer Aufbau einer OLED 139
Abbildung 4.94: Energetische Verhältnisse einer OLED 141
Abbildung 4.95: Prozesse in einer OLED 142
Abbildung 4.96: Passivmatrix Display 143
Abbildung 4.97: Aufbau und Schaltprinzip eines aktivmatrix Displays 144
Abbildung 4.98: Großflächiges 15 Zoll Display 144
Abbildung 4.99: Vergleich zwischen OLED und LCD/TFT 145
Abbildung 4.100: Lebensdauer der OLEDs 147
Abbildung 4.101: Chipkarte mit OLED Display 148

Abbildung 4.102: Marktentwicklung von OLEDs 148
Abbildung 4.103: OLED-Hersteller-Ranking nach Umsatz 149
Abbildung 4.104: Nanoröhrchen für Flachbildschirme 150
Abbildung 4.105: Fluid Focuslinse 151
Abbildung 4.106: Pinzipdarstellung der E-Paper-Technik 152
Abbildung 4.107: Gitter-Lichtventil 153
Abbildung 4.108: Autofokus-Kameramodul 154
Abbildung 4.109: Investitionen der Nanotechnologie 156
Abbildung 5.1: Bekanntheitsgrad der Nanowelt 158
Abbildung 5.2: Anwendungen der Nanotechnologie 160
Abbildung 5.3: Wirkungsgrad der Solarzellen 161
Abbildung 5.4: Jährliches Weltmarktvolumen nanotechnologischer Produkte 162
Abbildung 5.5: Büschel von Membranfasern 163

1 Einleitung

Gegenstand der Nanotechnologie ist die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von funktionalen Strukturen, deren Abmessungen im Bereich < 100 nm liegen.

Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie, die in nahezu alle Bereiche der Naturwissenschaft und Technik langfristig Einzug halten wird. Sie besitzt das Potenzial, alle Branchen und damit das persönliche Umfeld von uns allen, zukünftig nachhaltig zu verändern.

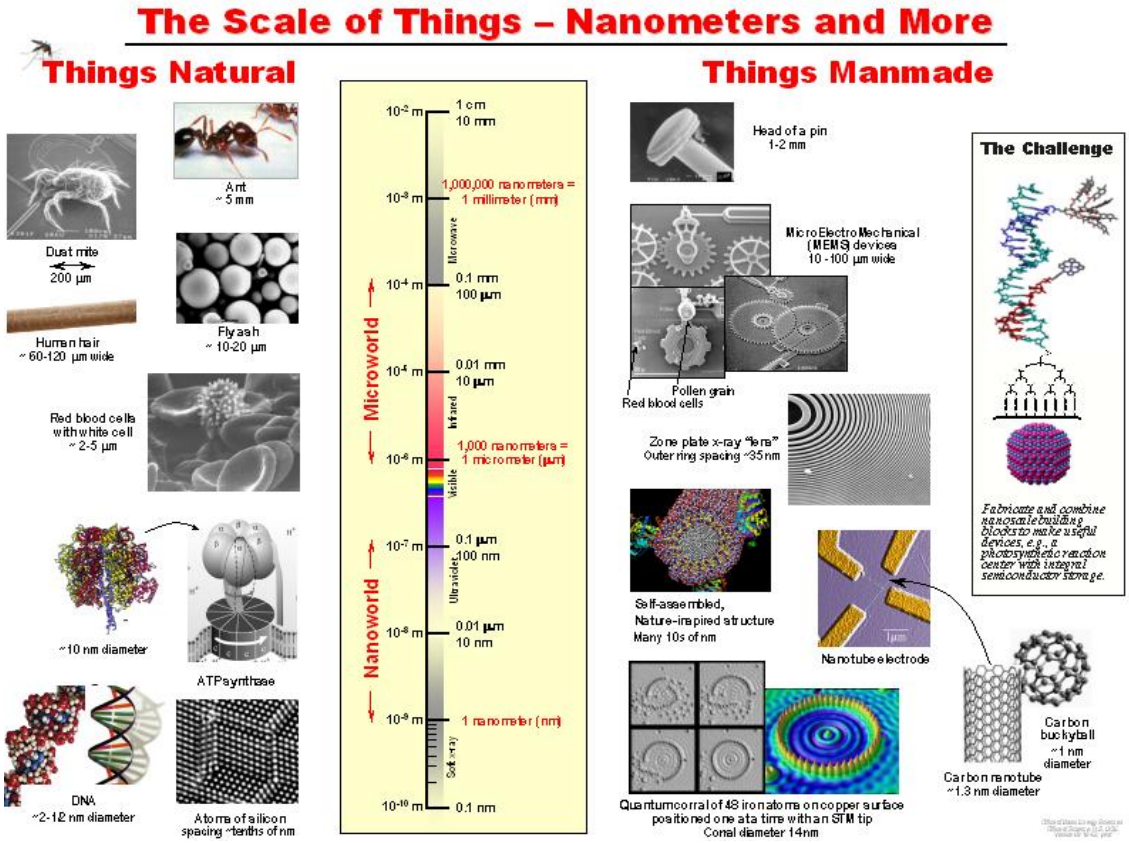


Abbildung 1.1: Nanometerskala

Die Hauptanwendungsgebiete werden in folgenden Bereichen erwartet:

- Ausrüster (Werkzeuge und Zulieferbedarf)
- Materialwissenschaften und Werkstoffbereich (z.B. Nanotubes bzw. Nanoröhrchen)
- Gesundheitssektor (Nanobiopharma, Nanomedizin und Nanobiotechnologie)
- IT/Computer-Hardware (bereits heute fließen 50 Prozent der langfristigen Forschungsgelder von IBM, HP und Dell in den Bereich der Nanotechnologie)
- Umwelt-, Lebensmittel- und Agrarsektor
- Militärwesen, Luft- und Raumfahrt

Auf der Nanometerskala verschwimmen die klassischen Grenzen zwischen den wissenschaftlichen Disziplinen. Die Forschungen an den Schnittstellen dieser einzelnen Fachgebiete lassen für Biologen, Physiker, Chemiker, Material- und Medizinforscher einen extrem hohen Erkenntnisfortschritt in den nächsten Jahrzehnten erwarten.

Die Möglichkeiten der Techniken schreiten immer weiter voran und viele Forscher beschäftigen sich mit der Frage, welche Qualität der wissenschaftliche Fortschritt künftig annehmen wird. Versteht es der Mensch, die Technik weiterzuentwickeln und sie zu beherrschen, so dass neue Technologien als Hilfe zur Kompensation seiner physischen und psychischen Unzulänglichkeiten genutzt werden können (=Synergie)? Oder überschätzt der Mensch seine Möglichkeiten, und die Maschinen stehen ihm eines Tages in ihren Fähigkeiten in nichts mehr nach und übertreffen ihn sogar, so dass es eher zu einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine kommt (=Symbiose)? Oder kommt es zu einer neuen Prägung des Gattungswesen Mensch, wenn alle Teile des Körpers und des Gehirns durch künstliche Nachbildungen ersetzt werden können (=Austausch)?
Das ist ein Teil der Fragen, mit denen sich Fachleute aus den unterschiedlichsten Wissenschaftsgebieten in Zusammenhang mit der Computertechnologie beim Übergang ins nächste Jahrtausend stellen. Synergie, Symbiose zwischen Mensch und Maschine, oder der Austausch des Menschen durch die Maschine.

Dank rascher, radikaler Fortschritte im Bereich der Molekularelektronik – in der einzelne Atome und Moleküle an die Stelle der mit Hilfe lithografischer Techniken erzeugten Transistoren treten – und dank der zugehörigen Nanotechnologie sollten wir in der Lage sein, die von Moores Gesetz vorausgesagte Entwicklungsgeschwindigkeit auch für weitere dreißig Jahre zu erreichen oder zu übertreffen. Die Verbindung dieser Computerleistung mit den manipulativen Fortschritten der Physik, der Chemie, der Biologie und dem vertieften genetischen Wissen wird gewaltige Veränderungen in unserer Welt ermöglichen.

Weitere Synergien könnten durch das Zusammenwachsen der vier Gebiete – Nanotechnologie, Informationstechnologie , Molekularbiologie einschließlich Neurowissenschaften - freigesetzt werden, die sowohl für die Wissenschaft als auch für die Wirtschaft - in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren - zu regelrechten Umwälzungen führen werden.
Es gab in der technischen Entwicklung immer wieder Höhepunkte die zu entscheidenden Innovationen für die Wirtschaft führten - so die bahnbrechenden Entwicklungen wie Dampfmaschine/Baumwolle (1793-1847), Stahl, Eisenbahn (-1893), Elektrotechnik/Chemie (-1939), Petrolchemie/Automobilbau (-1984) und die derzeitige I&K-Technik - und dadurch einen enormen wirtschaftlichen Aufschwung hervor brachten. Vielleicht werden die vier genannten Technologien weitere weltwirtschaftliche Basisinnovationen auslösen und auf lange Sicht unsere Gesellschaft konjunkturell positiv verändern. Die folgenden Worte verhelfen der heutigen Wissenschaft vielleicht zu einem neuen Höhepunkt:

> *„Der Blick des Forschers fand oft mehr, als er zu finden erhoffte!“ Diese Worte stammen keineswegs von einem Wissenschaftler, sondern von dem deutschen Schriftsteller und Philosophen Gotthold Ephraim Lessing. Er beschreibt damit kurz und knapp die Philosophie, die hinter so vielen Entdeckungen und Entwicklungen steckt: Am Anfang steht der Wunsch, etwas Neues zu finden. Forschung beginnt nicht selten mit Staunen – und dann fällt einem plötzlich mehr und mehr auf“* [Uoe 04].

2 Ziel der Technologieanalyse

Obwohl es mittlerweile bereits über ein Dutzend Nobelpreisträger gibt, die ihre Preise direkt oder indirekt auf der Basis der Nanotechnologie errungen haben, wissen Laien meist wenig mit dem Thema Nanotechnologie anzufangen. Dies hat oft einfach damit zu tun, dass eine Vielzahl der Informationen zu diesem Thema ungefiltert, ohne Interpretation und Zuordnung, eher verwirrend als zur Klärung zu einem einheitlichen Gesamtbild beitragen.

Fragen nach dem „Wann“ und „Wie“ erhalten speziell auch im Lichte neuerer Entwicklungen und Erkenntnisse eine besondere Bedeutung. Schon heute existieren viele Nanotechnologieprodukte, die fast unbemerkt Einzug in das tägliche Leben gehalten haben. Weltweite Kooperationen und Netzwerke, die die Grundlagen für eine breite Entwicklungsinitiative in der Nanotechnologie schaffen, sorgen für eine zunehmende Anzahl an Patenten. Will man in die Nanotechnologie einsteigen, ist schnelles Handeln dringend vonnöten.

Für Entscheidungsträger stellen sich einige Schlüsselfragen im Umgang mit der Nanotechnologie:

- Wird Nanotechnologie unsere Branche beeinflussen?
- Was lässt sich damit erreichen?
- Wann ist der richtige Zeitpunkt für einen Einstieg?
- Wie finden wir den optimalen Einstieg in das Thema?
- Welche Ressourcen sind notwendig?
- Wie unterscheide ich eine potenzielle technische Realität in 5-10 Jahren von bloßer „Science Fiction?“

Die vorliegende Technologieanalyse erhebt nicht den Anspruch, alle gestellten Fragen beantworten zu können. Unser Anliegen ist es vielmehr,

- den aktuellen Wissensstand der Nanotechnologie-Aktivitäten in verschiedenen Branchen aufzuzeigen
- eine Idee vom außerordentlichen Potenzial der Technologie zu vermitteln
- auf Grundlage dieser Erkenntnisse dem BSI zu ermöglichen, bei technologischen Entwicklungen in diesem komplexen Bereich der Nanotechnologie Sicherheitsrisiken, aber auch Sicherheitschancen zu erkennen und einzuschätzen und daraus strategische Entscheidungen abzuleiten und umzusetzen
- Konkrete Untersuchungsgegenstände zu benennen
- dem interessierten Leser und Entscheidungsträger die notwendigen Rahmeninformationen für eine eigene Potenzialabschätzung zu liefern
- und, nicht zuletzt, dem Leser eine der faszinierendsten Bereiche der heutigen Technologieentwicklung näher zu bringen und sein Interesse an der Nanotechnologie zu wecken.

Die vorliegende Studie kann in begleitende Aktivitäten zur Aufarbeitung der technischen, ethischen, sozialen, ökologischen und rechtlichen Folgen der Nanotechnologie eingebunden werden. Ihre Ergebnisse können hilfreich sein, mögliche Chancen und Risiken frühzeitig zu bewerten und rechtzeitig auf neue Entwicklungen wissenschaftlicher, technologischer und gesellschaftlicher Art

reagieren zu können. Damit stellt sie ein geeignetes Informationsmaterial dar, mit welchem Interesse und Verständnis für die Nanotechnologie in der Öffentlichkeit geweckt werden soll.

In einer Gesellschaft, die geprägt ist durch wissenschaftliche und technologische Innovationen sowie einem andauernden Wandel unterworfen ist, wird die Technologieanalyse zu einem wichtigen Zweig der Erfolgsstrategie eines Unternehmens, so auch dem BSI.

3 Nanotechnologie

3.1 Definition der Nanotechnologie

Nanostrukturen:

- 1 Nanometer = 10^{-9} Meter = 0,0000000001 Meter = ein Milliardstel eines Millimeters
- Vergrößern wir ein Nanometer auf die Dicke eines Fußballs, dann würde im gleichen Maßstab ein Meter so groß wie die Strecke von der Erde bis zum Mond sein.
- Zum Vergleich: die Breite des DNA-Doppelstranges misst etwa 3 Nanometer

National sowie international besteht bei der Definition noch keine einheitliche Sichtweise. Speziell die Frage der Abgrenzung zur Mikrotechnologie, zu bestehenden chemischen Prozessen oder auch die Zugehörigkeit verschiedener Verfahren und Methoden zur Nanobiotechnologie wird über Erläuterung anhand von Beispielen verdeutlicht. Eine absolut richtige und unanzweifelbare Definition für die Klassifizierung von technologischen Prozessen und Produkten in die Nanotechnologie gibt es bis heute noch nicht. Seitens der chinesischen Standardisierungsbehörde wird seit dem 01. April 2005 an 15 Regelungen für Nanomaterialien gearbeitet, die ersten sieben veröffentlichten Standards sind der erste Schritt dazu [1].

Auch die „Semiconductor Equipment and Materials International“ (SEMI) und das amerikanische "Institute of Electrical and Electronics Engineers" (IEEE) wollen gemeinsam Nanotechnologie- und *MEMS*-Standards erarbeiten.

Ein oftmals verwendeter Sammelbegriff für die Nanotechnologie ist folgender:

Nanotechnologie steht für eine breite Auswahl von Technologien; sie beschreiben die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen molekularer Materialien, innere Grenz- und Oberflächen im Größenbereich von einigen zehn Nanometern bis zu atomaren Größenordnungen (0,1 nm).

In der Regel werden hierbei aus der Nanoskaligkeit der Systemkomponenten resultierende neue Funktionalitäten und Eigenschaften zur Verbesserung bestehender oder Entwicklung neuer Produkte und Anwendungsoptionen genutzt.

Das Wort Nanotechnologie leitet sich von "nanos", dem griechischen Wort für Zwerg, ab und steht für die Technologie, die die Welt der Atome und Moleküle erschließt. Mit ihr können molekulare Bausteine zu völlig neuen Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften zusammengesetzt werden.

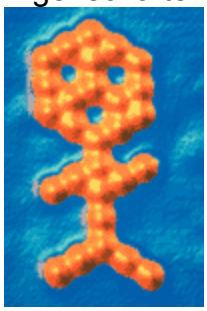


Abbildung 3.1: Molekularmännchen

Ein beliebiges Material, das auf die Größe von Nanopartikeln reduziert wird, kann sich plötzlich anders verhalten als vorher.

So zeigen zum Beispiel elektrisch isolierende Stoffe plötzlich ein leitendes Verhalten, und nicht lösliche Stoffe ändern ihren Aggregatzustand und werden auf einmallöslich. Andere ändern ihre Farbe oder werden durchsichtig – völlig neue Eigenschaften, die Tür und Tor für neue Anwendungen und Produkte öffnen.

Ziel der Nanotechnologie ist es, chemische, molekularbiologische und physikalische Verfahren so zu kombinieren, dass sie kleinste künstliche Objekte und Maschinen herstellen können. Diese sollen der Informationsspeicherung und -verarbeitung, der Sensorik und der lokalen Manipulation physikalischer, chemischer und biologischer Vorgänge dienen. Damit sind sie in der Lage, natürliche Vorgänge, wie sie beispielsweise in Körperzellen ablaufen, technologisch nutzbar zu machen. Dazu werden in der Nanotechnologie zwei verschiedene Ansätze verfolgt: die der „*Top-Down*“ und der „*Bottom-Up*“ Strategie. Die erstere Methode nähert sich der Nanogrößenordnung durch immer weitere Verkleinerung herkömmlicher Bauteile, z.B. Computerchips. Die „Bottom-Up“ Strategie zielt auf die Konstruktion von Materialien oder Gegenständen aus ihren einzelnen Atomen mithilfe von direkter physikalischer oder chemischer Manipulation der atomaren Grundbausteine oder durch *Selbstorganisation* ab.

Die Nanotechnologie befindet sich im Gegensatz zur Mikrotechnologie, d.h. der Fertigung von Strukturen im Bereich zwischen 100 und ca. 0,1 µm, noch weitgehend im Forschungsstadium. Aufgrund der zu erwartenden herausragenden Eigenschaften hinsichtlich einer Reihe von wichtigen technischen Leistungsgrößen wie Präzision, Integration, Kapazität oder Miniaturisierung eröffnet die Nanotechnologie ein enormes Anwendungspotenzial. Daher gibt es derzeit sehr viele Überlegungen und Vorschläge für mögliche Innovationen auf der Basis dieser Technik.

Am weitesten fortgeschritten sind die Technologien zur Bearbeitung von Oberflächen mit Nanometer-Präzision (Ultrapräzisionsbearbeitung), die vor allem in der Optik von Bedeutung sind. Ein wichtiges Teilgebiet der Nanotechnologie befasst sich mit der Herstellung ultradünner Schichten. Da die Funktionen vieler Objekte wesentlich von den Eigenschaften der Oberfläche bestimmt werden, lassen sich auf diesem Wege viele Produkte an die gewünschten Anforderungen anpassen. Auch die Untersuchung und Herstellung der Eigenschaften von Partikeln mit Nanometerabmessungen sowie die damit unmittelbar verknüpften Nanopulver und nanostrukturierten Materialien werden heute zur Nanotechnologie gezählt.

Die größte Entwicklungsdynamik für die Erschließung des Nanobereiches geht derzeit von der Elektronik aus, wo man bei der aktuellen Chipproduktion bereits Strukturen im Sub-µ-Bereich erzeugt. Da das Ende der klassischen Photolithographie bei ca. 0,1 µm erreicht wird, besteht bei Beibehaltung der derzeitigen Generationenfolge bereits im nächsten Jahrzehnt der Bedarf an neuen Lithographietechniken im Bereich 1-100 nm. Allerdings zeigt sich, dass einige wesentliche physikalische Voraussetzungen makroskopischer Technologien beim Übergang zu nanoskaligen Strukturen nicht mehr gelten. So treten hier zunehmend Quanteneffekte (wie z.B. der Tunneleffekt) in den Vordergrund.

Eine wesentliche Grundlage für die künftige Entwicklung der Nanotechnologie bilden die sogenannten Rastersondenverfahren. Hierbei wird eine sehr spitze Sonde rasterartig im Subnanometer-Abstand über ein Objekt geführt und ein atomgenaues Abbild der Oberfläche erzeugt.

Nachdem es mit dem Raster-Tunnelmikroskop (RTM) Anfang der 80er Jahre erstmals gelang, eine Oberfläche in atomarer Auflösung abzubilden, gibt es inzwischen mehr als zwanzig verschiedene solcher Rastersondentechnologien. Auch eine Reihe kommerzieller Geräte sind seit Jahren auf dem Markt. Hierbei setzt sich vor allem das Rasterkraftmikroskop (RKM) immer mehr durch. Im Gegensatz zum Tunnelmikroskop ist es nicht auf elektrisch leitende Stoffe wie Metalle begrenzt, sondern eignet sich auch zur Untersuchung von nicht leitenden Materialien und sogar von lebenden Zellen.

Da RTM und RKM auf einer stark lokalisierten Wechselwirkung basieren, kann man die Sonden als eine Art Nanopinzette verwenden. Man bringt die Sondenspitze so nahe an ein Atom/Molekül heran, dass dieses aufgrund der Wechselwirkung praktisch „festklebt“ und gezielt verschoben werden kann. Inzwischen wurden so bereits atomare/molekulare Muster bzw. einfache neuartige Moleküle erzeugt. Von einer „Nanofabrik“ aus Tausenden oder Millionen von parallel arbeitenden Rastersonden, die z.B. komplexe molekulare Strukturen oder elektronische Bauelemente aus einfachen Grundbausteinen zusammenbauen, ist man allerdings noch weit entfernt.

Im Prinzip bilden die Rastersondentechnologien ein natürliches Ende der Bemühungen zur Miniaturisierung von Strukturen im klassisch physikalisch/technischen Sinne. Auf dem Weg hierzu hat man sich der Nanotechnologie über die Feinwerk- und die Mikrotechnologie durch eine schrittweise Verfeinerung des jeweiligen Instrumentariums „Top-down“ genähert. Ein zweiter, als „Bottom-up“ bezeichneter Weg des Aufbaus von Nanostrukturen, der heute noch weitgehend als utopisch einzustufen ist, wird eher durch chemisch/biologische Ansätze bestimmt. Er basiert auf Prozessen der Selbstorganisation, bei denen sich Atome, Moleküle, Molekülverbände und Bauteile von selbst zu funktionsfähigen Einheiten zusammenfügen.

Einmal in Gang gesetzt, schreitet er nach seinem inneren Plan fort, sei es auf eine energetisch günstige Form zu oder hin zu einem System, dessen Gestalt und Funktion in den benutzten Bausteinen selbst verschlüsselt ist.

Grundlage der Selbstorganisation sind sogenannte Selbstassoziationseffekte zwischen Molekülen.

Dabei profitiert man von schwachen, ungerichteten Bindungskräften, welche den Aufbau und die Eigenschaften von z.B. Flüssigkristallen, Emulsionen, Kolloiden oder ultradünnen Schichten bestimmen. Bei ihrer Bildung gibt es den Anschein, als könnten sich ähnliche Struktureinheiten unterschiedlicher Moleküle gegenseitig „erkennen“, so dass supramolekulare geordnete Strukturen oder Muster entstehen. Solche Prozesse können auch durch äußere Einwirkungen gezielt ausgelöst werden.

Die wirtschaftliche Umsetzung in weiten Bereichen der Nanotechnologie wird noch relativ lange brauchen, wird aber langfristig gesehen in vielen Produkten des täglichen Lebens Anwendung finden.

3.2 Historie

Ausgewählte Meilensteine der Nanotechnologie

Eine Rede machte den Anfang

1959 Der Physiker Richard Feynman (1918-1988), Urvater der Nanotechnologie, hält unter dem Titel: "Viel Spielraum nach unten" vor der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft eine wegweisende Rede zu einer zukünftigen Nanotechnologie.

1974 Den Begriff “Nanotechnik“ kreierte der Japaner Norio Taniguchi von der Tokyo Science University.

1976 Als Nanotech-Papst wird Dr. K. Eric Drexler genannt. Er befasst sich mit künstlich zusammengesetzten Proteinen und Biomolekülen.

1981 IBM Forschungslaboratorium in Zürich entwickeln Gerd Binnig und Heinrich Rohrer das Raster-Tunnelmikroskop. Mit seiner Hilfe können erstmals Atome nicht nur sichtbar gemacht sondern auch bewegt werden.

In den "Proceedings of the National Academy of Sciences" (PNAS) erscheint die erste Fachveröffentlichung zum Thema molekulare Nanotechnologie. Der Autor ist Eric Drexler, ein Forscher am Space Systems Laboratory des Massachussetts Institute of Technology (MIT).

1985 Richard Smalley von der amerikanischen Rice Universität entdeckt eine völlig neue Form des Kohlenstoffs: Ein fußballförmiges Molekül aus 60 Kohlenstoffatomen, das Buckminsterfulleren.

1986 Gerd Binnig und Heinrich Rohrer erhalten den Nobelpreis für ihre Entwicklung des Raster-Tunnelmikroskops.
Eric Drexler gründet das Foresight Institute in Palo Alto, Kalifornien. Widmen soll sich das Institut den "kommenden Möglichkeiten, Materialien und Produkte mit atomarer Präzision zu bauen."

1987 Die Forscher Theodore Fulton and Gerlad Dolan von den Bell Laboratories konstruieren den ersten Ein-Elektron-Transistor.

1988 William deGrado und seine Kollegen an der DuPont Universität synthetisieren erstmals ein Protein, in dem sie es Baustein für Baustein entwerfen und konstruieren. An der amerikanischen Stanford Universität wird zum ersten Mal offiziell ein Kurs "Nanotechnologie" angeboten. Der Dozent: Eric Drexler.

1989 Züricher IBM-Forscher schreiben mithilfe des Raster-Tunnelmikroskops aus 35 Xenonatomen das Logo ihres Unternehmens auf eine Atomoberfläche.
Die erste internationale Nanotechnologie-Konferenz findet in Palo Alto, Kalifornien statt.

1990 Die Nanotechnologie erhält erstmals ein eigenes Fachjournal: Die erste Ausgabe von "Nanotechnology", herausgegeben vom britischen Institute of Physics erscheint im Juli.

1991 Der japanische Forscher Sumio Iijima entdeckt die Nanotubes, wenige Nanometer kleine Röhrchen aus Kohlenstoff mit ungewöhnlichen Eigenschaften.

Mehrere Unternehmen beginnen eigene Forschungsprogramme zur Nanotechnologie, darunter auch IBM. J. A. Armstrong, Leiter der Forschung, schreibt dazu: "Ich glaube, dass Nanowissenschaft und Nanotechnologie zentral für die nächste Epoche des Informationszeitalters sein werden...".

Auch das japanische Handels- und Industrieministerium will Nanoforschung verstärkt fördern.

1992 Das renommierte Wissenschaftsmagazin Nature veranstaltet in Tokio ihre erste internationale Nanotechnologiekonferenz.
Im gleichen Jahr stellt das „Institute for Scientific Information“ fest, dass die Vorsilbe "nano" unter den neuen Fachjournalen besonders häufig vertreten ist.

1996 Richard Smalley erhält den Nobelpreis für seine Entdeckung des Buckminsterfullerens.

1997 Nadrian Seeman von der New York Universität konstruiert ein DNA-basiertes nanomechanisches Bauteil und demonstriert damit die generelle Eignung der DNA für nanotechnologische Anwendungen.

1998 Forscher des IBM Nanotechnologieprogramms entwickeln den ersten Nanotube-Transistor. Ein einzelnes Nanoröhrchen wurde dafür auf einen Silizium-basierten Feldeffekttransistor appliziert.

Einrichtung von Nanotechnologiezentren in Deutschland

1999 Mark Reed und James Tour von der Yale Universität entwickeln einen elektronischen Schalter aus nur einem organischen Molekül.

In Deutschland werden unter Förderung des BMBF fünf neue Kompetenzzentren für Nanotechnologie eingerichtet. Ihre Forschungsschwerpunkte umfassen unter anderem Nanoanalytik, Nanostrukturen für die Optoelektronik, ultradünne funktionelle Schichten und Nanochemie.

2000 Forscher der Cornell Universität erschaffen einen funktionierenden Nanopropeller durch Kombination eines Enzyms mit winzigen Nickelpropellern.

Der amerikanische Computerexperte Bill Joy warnt im Magazin "Wired" vor den Risiken der Zukunftstechnologien und beschwört Visionen von alles zerstörenden amoklaufenden Nanobots herauf. Sein Artikel sorgt weltweit für Aufsehen und kontroverse Diskussionen.

2001 Forscher von IBM und der Universität von Delft konstruieren die ersten Nanotransistoren und logischen Gatter, die komplett aus Nanoröhrchen bestehen.

2002 Forscher der Cornell Universität konstruieren einen Transistor aus nur einem speziell entworfenen und konstruierten Molekül zwischen zwei Goldelektroden.

IBM Forscher haben den schnellsten Nanoröhren -Transistor vorgestellt und gezeigt, dass Carbon Nanoröhren (CNT's) – röhrenförmige Moleküle aus Kohlenstoffatomen, die 50.000 mal dünner sind als das menschliche Haar- eine bessere Performance bieten als die schnellsten Silizium-basierten Transistoren.

IBM Forschern im schweizerischen Rüschlikon haben unter dem Codenamen „*Millipede*“ (Tausendfüßler) eine neue Art der Datenspeicherung entwickelt. Eine Billion Bits (1Tbit) können auf einer Fläche von 1 Quadratzoll untergebracht werden. Auf einer Briefmarke findet so der Inhalt von 25 DVD's oder 25 Millionen Buchseiten Platz.

Der taiwanesische Halbleiterhersteller TSMC kündigt an, einen nur neun Nanometer kleinen CMOS Transistor bauen zu wollen.

2003 Phaedon Avouris, Chef von IBM‘s Nanoforschung in Yorktown Heights, New York, hat mit seinem Team im Labor die Funktion eines Nano-Feldeffekt-Transistors (CNT-FET) nachgewiesen.

INTEL hat erstmals voll funktionsfähige SRAM-Bausteine (Static Random Access Memory) auf der Basis der 65nm Technologie hergestellt. Sie zeichnen sich durch Transistoren mit einer Gatelänge von 35 nm aus. Jede SRAM Zelle besteht aus sechs Transistoren. Zehn Millionen dieser Transistoren würden auf einem Quadratmillimeter Platz finden und somit etwa auf die Spitze eines Kugelschreibers passen.

Forscher der „Purdue University“ in Indiana entwickeln eine vielversprechende Technologie – Kobalt-Nanoringe, welche die Speicherkapazität und damit die Leistungsfähigkeit von Computern enorm verbessern.

Die Arbeitsgruppe von Prof. Dieter Bimberg an der TU Berlin ist weltweit führend bei der Herstellung und Anwendung von Quantenpunkt-Bauelementen. Der Arbeitsgruppe ist es jetzt gelungen, mit Quantenpunktlasern ultraschnelle Pulsfolgen für die optische Datenübertragung zu erzeugen. Die dabei erreichte Taktrate von 20 Milliarden Pulsen pro Sekunde (20 GHz) ist die höchste, welche bisher weltweit erreicht wurde.

Professor David F. Kelley von der "University of California" im amerikanischen Merced (Kalifornien) findet eine Lösung zu kostengünstigeren Verfahren in der Nanotechnologie, um das Silizium in Solarzellen ersetzen können, indem er sehr kleine halbleitende Partikel, die Quantenpunkte ("quantum dots") herstellt.

Die Forscher Jwa-Min Nam, C. Shad Thaxton und Chad A. Mirkin am "Department of Chemistry and Institute for Nanotechnology, Northwestern University" in Evanston, IL, USA haben auf Nanopartikeln basierende biologische Barcodes zur sehr genauen Detektion von Proteinen entwickelt.

Das Team um Pulickel Ajayan und seine Kollegen vom Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering (Rensselaer Polytechnic Institute) im Bundesstaat New York setzen mehrwandige Nanoröhren als Gassensoren ein, mit denen das Gas bei einer 65% geringeren Spannung ionisiert werden kann, als in herkömmlichen Sensoren.

Dazu kommt, dass das Gerät extrem sensitiv arbeitet, da die gemessene Entladungszeit im Gerät 6mal höher ist als bei konventionellen Elektroden. So können damit Gaskonzentrationen verschiedener Gase in einem Gemisch niedriger 10^{-7} Grammolekül pro Liter gemessen werden.

Ein Forscherteam um J. P. Novak vom "Naval Research Laboratory" in Washington setzen Kohlenstoff-Nanoröhren ein, die als Gassensor zum Aufspüren von chemischen Nervengiften dienen.

Das Team nutzt einen Dünnfilm-Transistor aus einem Netz von einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhren, um die Substanz Dimethylmethylphosphonat (DMMP) zu detektieren. DMMP ist ein chemischer Verwandter des Nervengases Sarin. Novak und seine Kollegen hoffen jedoch, den Sensor weiter verbessern zu können, ihn insbesondere durch die Verwendung bestimmter Polymere für mehrere chemische Stoffe sensibel zu machen.

Die ersten Standardisierungsvorschläge zur Kommerzialisierung der Nanotechnologie kommen von Edward Rashba und Daniel Gamota.

Die Standards sollten als eine Möglichkeit angesehen werden, die Wertschöpfungskette der gesamten Nanotechnologie voranzubringen; das betreffe nanoskalige Materialien, die Bausteine für Komponenten und funktionelle Systeme bilden.

2004 Ein kanadisches Forscherteam um Zheng-Hong Lu von der „University of Toronto“ hat flexible, organische Lichtemitter (FOLED) hergestellt. In zwei Jahren will das Team ein marktfähiges Produkt entwickeln.

Forscher der „University of California“ (Berkeley) und der Stanford University haben einen funktionsfähigen Silizium-Schaltkreis mit eingebauten Kohlenstoff-Nanoröhren entwickelt. Der Chip enthält Tausende von Kohlenstoffnanoröhren, die auf einem Quadratzentimeter großem Siliziumchip mit dem Schaltkreis verbunden sind.

US-Forscher der „University of California“ unter der Leitung von Professor Bart Kosko zeigen erstmals, dass winzige Antennen in Form von Nanoröhren-Transistoren die Übertragung elektrischer Signale erheblich verbessern können.

An der "Harvard University" und am "California Institute of Technology" wird ein Ansatz für adressierbare integrierte Nanosysteme entwickelt.

Die Forscher um Charles M. Lieber nutzen Feldeffekttransistoren-Arrays (cNW-FET) basierend auf molekularer Modifikation von gekreuzten Halbleiter-Nanodrähten.

Forscher um Zhong L. Wang vom "Georgia Institute of Technology" haben nahtlose, kreisförmige Nanoringe – mit einem Durchmesser zwischen 1 bis 4 Mikron und einer Dicke von 10 bis 30 nm - aus einzelnen Kristallen von Zinkoxid hergestellt. Die Ringe eignen sich aufgrund des benutzten Materials für verschiedenste Anwendungen, bspw. für nanoskalige Sensoren und elektrische Umformer oder piezoelektrische Resonatoren.

Die deutsche Bundesregierung vertreten durch Forschungsministerin Edelgard Bulmahn startete eine Innovationsinitiative "Nanotechnologie erobert Märkte". Für die gestarteten Leitinnovationen, die sich an den Wertschöpfungsketten der Automobilbranche, der Optischen Industrie, der Pharma- und Medizintechnik sowie der Elektroniksparte ausrichten stehen für die nächsten vier Jahre 200 Mio Euro zur Verfügung.

Forscher der chinesischen Tsinghua-Universität in Peking haben den Einfluss von Mangan auf die Geometrie, die elektrischen Eigenschaften und die Spinpolarisation von offenen GaN-Nanoröhren und -Arrays untersucht. Im Ergebnis konnten sie Mn-dotierte GaN-Nanoröhren als Elektronenquelle in zukünftigen spinpolarisierten Bauteilen einsetzen.

Ein Report von "Invest Australia" gibt einen Überblick über die F&E-Entwicklungen von Australien. Aus dem Bericht geht z. B. hervor, dass die Nanotechnologie an oberster Stelle der australischen Forschungsanstrengungen steht. Die Regierung investiert ca. 100 Millionen australische Dollar (73,5 Millionen U.S.-Dollar) jährlich in 70 Forschungsinstitutionen, die auf dem Gebiet der Nanotechnologie arbeiten.

Dresden wird zum wichtigsten Standort der europäischen Spitzenforschung auf dem Gebiet der Nanoelektronik mit der Grundsteinlegung für das neue Forschungszentrum für Nanoelektronische Technologien (CNT).

Das Forschungsinstitut wird mit Unterstützung von Bund und Freistaat Sachsen, von Infineon und AMD sowie der Fraunhofer-Gesellschaft aufgebaut.

Mit Bildschirmen (OLED-Displays) auf Nanotechnologie-Basis will der südkoreanische Konzern SAMSUNG das Fernsehen neu definieren. Im Jahre 2006 sollen die ersten Produkte auf den Markt kommen.

Forscher von INFINEON stellen den kleinsten Nanoröhren-Transistor der Welt mit einer Kanallänge von nur 18 nm vor. Für den Nanotransistor ließen die Forscher Kohlenstoff-Nanoröhren, die jeweils nur einen Durchmesser von 0,7 bis 1,1 nm aufweisen, in einem kontrollierten Prozess wachsen. Die heutigen Transistoren sind knapp 4mal so groß.

Zwischen August und Oktober 2004 führte Nanoforum zusammen mit der Europäischen Kommission eine Online-Befragung von 720 Personen aus 32 europäischen Ländern durch. Dies war bisher die umfassendste Befragung zum Thema Nanotechnologie seiner Art in Europa und erbrachte u.a. folgende generelle Erkenntnisse:

- Nanotechnologie wird innerhalb von 10 Jahren einen starken Einfluss auf die europäische Industrie (90% Zustimmung) und Einwohner (80%) haben;
- Europas Position wird deutlich hinter den USA sowohl in der Nanowissenschaft (76%) als auch im Transfer von Nanotechnologie in die Industrie (77%) wahrgenommen;
- ein Einfluss der Nanotechnologie wird insbesondere in den Bereichen Chemie und Materialien, Informations- und Kommunikationstechnologien und Gesundheit erwartet;
- die Forschungsförderung über das europäische Rahmenprogramm sollte signifikant erhöht werden (79%).

2005 IBM stellt auf der CeBIT erstmals einen lauffähigen Prototypen von "Millipede" (Tausendfüßler) einer breiten Öffentlichkeit vor. Dieser Chip, der bis zu 1 Terabit an Daten auf einem Quadratzoll speichern kann, könnte dem gängigen Flash-Speicher Konkurrenz machen.

Forscher des Nanotechnologie Zentrums am Georgia Institute of Technology, Atlanta, (GATECH) haben neue leichtgewichtige organische Solarzellen mit Hilfe von Pentazen (C22 H14) in Verbindung mit C60-Molekülen entwickelt.

Nach Aussage von Li Zhonghai, Direktor der chinesischen Standardisierungsbehörde, werde an 15 Regelungen für Nanomaterialien gearbeitet, die ab dem 01. April 2005 veröffentlichten sieben Standards seien der erste Schritt dazu.

Forscher von DUPONT (USA), der "University of Illinois" und der "Columbia University" haben ein Netz aus Kohlenstoff-Nanoröhren-Halbleiter für die organische Elektronik entwickelt, mit denen sie organische Transistoren mit einem hohen Gegenwirkleitwert trotz relativ großem Source-Drain-Abstand herstellen können.

In den kommenden fünf Jahren will die Bundesregierung deutsche Unternehmen und Institute der OLED-Branche mit 100 MillionenEuro fördern, z.B. die Fraunhofer-Institute in Potsdam und Dresden, die langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Organischen Leuchtdioden (OLEDs) verfügen.

Forscher von Hewlett Packard der Quantum-Science-Research-(QSR-) Gruppe kündigen eine Revolution in der Computertechnik an. Eine neuartige Technologie Crossbar Latch - Kreuze aus winzigen Nanometer breiten Platindrähten - soll Transistoren als Hauptbestandteil moderner Rechner komplett ersetzen, möglicherweise schon ab **2012**.

Ein Report von LUX RESEARCH und FOLEY & LARDNER schätzt die Situation bei den Patenten im Bereich Nanotechnologie sehr kritisch ein. Die Analysten untersuchten 1.084 US-Patente mit 19.485 Patentansprüchen und gelangen zu dem Schluss, dass Nanotech-Gewinner und -Verlierer nicht vom Konsumenten sondern durch die Gerichte bestimmt werden könnten.
Die untersuchten 1.084 US-Patente betreffen fünf Nanomaterialien:

Dendrimere
Quantenpunkte (-kristalle)
CNTs
Fullerene
Nanodrähte

Der Chip-Weltmarktführer Intel, der bereits Ende 2005/Anfang 2006 erste 65-nm-Prozessoren in Großserie fertigen will, hat bei der Präsentation seiner 65-nm-Fertigungstechnik zahlreiche Stromsparmöglichkeiten herausgestellt.

Die Dresdner Firma „NOVALED“ stellt energieeffiziente OLEDs her und nutzt dabei einen einzigartigen Ansatz zur Dotierung der Ladungsträgertransport-schichten. Ergebnis sind OLEDs mit niedrigster Betriebsspannung, hoher Stromeffizienz, top-emittierenden Strukturen, Anpaßbarkeit auf beliebige Substrate (bspw. Folien) sowie Transparenz (bspw. Fensterscheiben als Beleuchtungsmittel).

2006 Wissenschaftlern vom Fraunhofer „Institut für Angewandte Polymerforschung“-IAP in Potsdam ist es gelungen, mit leuchtenden Polymeren transparente OLED-Anzeigen herzustellen. Deren Helligkeit, Lebensdauer und Wirkungsgrad ist so hoch, dass erste kommerzielle Anwendungen absehbar sind. Die Forscher haben dafür eine neue Art von Metallelektroden entwickelt, die die Polymerschicht mit elektrischem Strom versorgt.

Amerikanische Forscher um Thomas H. LaBean in Durham (US-Bundesstaat North Carolina) nutzen die Fähigkeit der DNS zur Selbstorganisation für die großvolumige Herstellung nanoskaliger Strukturen in der Form eines 4x4 Rasters, auf dem Molekülmuster festgelegt werden können.

Die vorgestellten Forschungsergebnisse eröffnen nun die Möglichkeit, elektronische oder optische Schaltkreise in Serie zehnmal kleiner als derzeit produziert herzustellen.

Während die heutige Halbleiterherstellung noch auf Silizium setzt, nutzen die Duke-Forscher DNS-Stränge für die Strukturierung. Das Verfahren beim Erzeugen der Gitter sei hinsichtlich der Größenordnung mit momentan eingesetzten photolithographischen Verfahren im 65-nm-Prozeß vergleichbar.

Das Unternehmen „NANOCRYPT“ aus Stuttgarter ist nach eigenen Angaben auf Nanotechnologie in Verbindung mit Kryptographie spezialisiert und vertreibt aufbauend auf dem Konzept der 2D und 3D Barcodetechnologie in Kombination mit digitalen Signaturen und Image Processing bis hin zum Nanoscalebereich - unter dem Namen nanoTICKET, nanoIP, nanoMORSE und nanoSEAL – neue Applikationen.

Das nanoSEAL-Verfahren ermöglicht bspw. verschiedensten Produkten Fälschungsschutz und Originalitätsnachweis und nanoMORSE ist eine neuartige Anwendung im Bereich der sicheren Authentifizierung und Identifizierung durch die Verwendung von ultraschnellen, nanoskalierten ferroelektrischen Flüssigkristallen (FLCs) in Kombination mit verschlüsselt emittierten Lichtpulsen von einigen Nanosekunden Dauer.

Das Bell Labs Technical Journal bringt eine Sonderausgabe zum Thema Nanotechnologie heraus. Themen sind u.a.: RF MEMS/NEMS; Nanobatterie von MPHASE; Genchip; Design von MEMS-Kraftsensoren; Plastikelektronik; kontrollierte Kristallisation; superhydrophobische Oberflächen; Nanophotonik; Quantenkaskadenlaser (QKL), Nanoröhren und LUCENT-Patente.

3.3 Stand der Nanotechnologieforschung

Entwicklungsstand und Anwendungsfelder der Nanotechnologie:

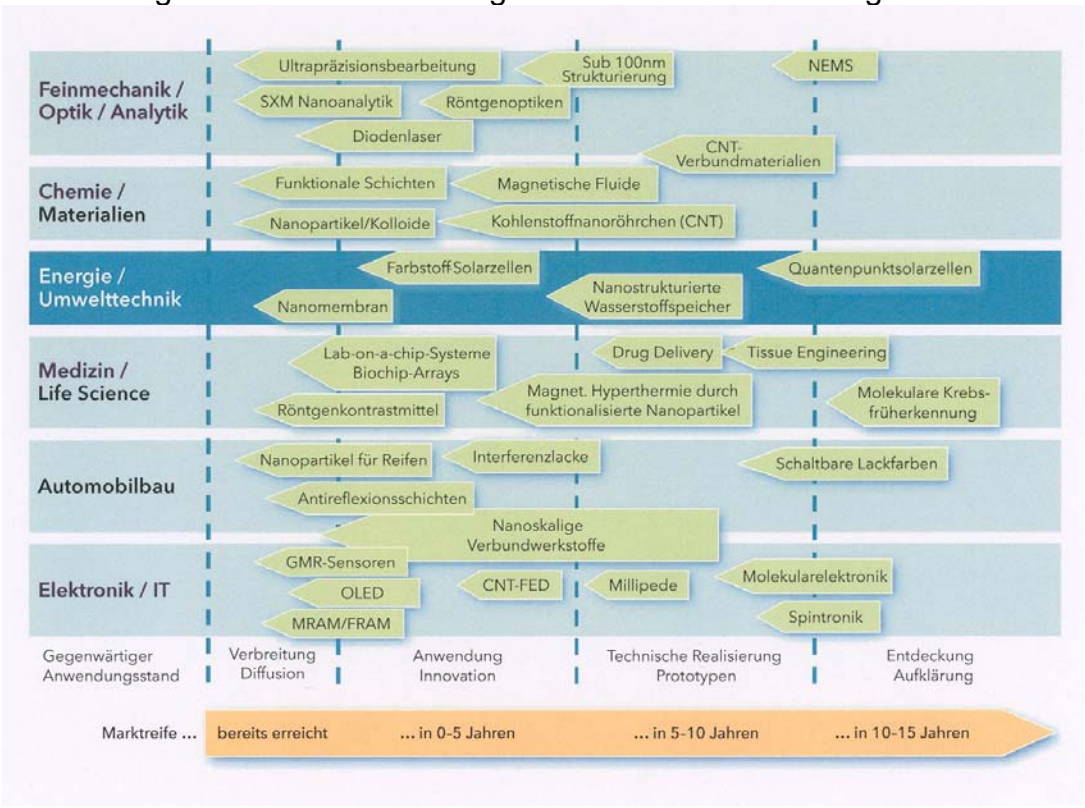


Abbildung 3.2: Entwicklungsstand und Marktreife einzelner Nanotechnologieanwendungen

Nanotechnologie wird neben der Informationstechnologie und der Biotechnologie als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts betrachtet.

Nanowissenschaften beschäftigen sich mit Strukturen und Systemen in typischen Abmessungen zwischen einem und einhundert Nanometern, welche neuartige mechanische, optische, elektrische, magnetische und chemische Eigenschaften aufweisen.

Jüngste Entwicklungen auf diesem Gebiet lassen uns das enorme Potenzial nanotechnologie-basierter Anwendungen nur erahnen. In den letzten Jahren wurden von den führenden Industrienationen finanzstarke Programme zur Förderung der Nanotechnologieforschung aufgelegt, weltweit haben sich die öffentlichen Investitionen in der Nanotechnologieforschung von ca. 432 Millionen Euro im Jahre 1997 auf derzeit (Stand 2004) über 3 Milliarden Euro erhöht [KOM 04].

Den Beitrag, den die Privatwirtschaft zur Finanzierung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Nanotechnologie liefert, lässt sich nicht präzise ermitteln, es wurde jedoch ein Volumen auf annähernd 2 Milliarden € geschätzt; damit betragen die Gesamtinvestitionen rund 5 Milliarden Euro. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die EU mit 56 % der Gesamtinvestitionen aus Privatmitteln hinter den USA und Japan mit 66 % bzw. 73 % zurückliegt.

Diese hohen Investitionskosten, die weltweit zur Verfügung gestellt werden, begründen sich mit den Marktzahlen für Nanotechnologieprodukte, die einige Marktforschungsinstitute und Dachorganisationen veröffentlichten. So schätzte z.B.

die National Science Foundation (USA) den "Nanotech-Markt" im Jahre 2010 auf 1 Billion US-Dollar. Diese globale Einschätzung für einen "Nanotech-Markt" ist als unrealistisch anzusehen, denn es gibt keinen klar umrissenen Markt der Nanotechnologie, es gibt „nur" die unterschiedlichsten Teilmärkte mit den unterschiedlichsten Marktdynamiken, Ausprägungen und deren Anwendungsfelder (siehe Abbildung 3.2). Diese Technologie basiert zum einen auf der Biologie, Physik, Chemie und Ingenieurstechnik und generiert zum Beispiel Endprodukte in den Märkten Materialwesen, Elektronik, Pharmazie, Energie, Chemie und Medizin um nur einige zu nennen. In allen diesen Bereichen kann die Nanotechnologie Produkte und Verfahren verbessern, neu gestalten oder aber auch überflüssig machen.

Im Report "Emerging Nanoelectronics Markets, The Next Opportunity for the Semiconductor and Advanced Materials Industries" beschreibt NANOMARKETS (das amerikanische Unternehmen „NANOMARKETS“ ist ein Marktforschungs- und Analyseunternehmen mit der Spezialisierung auf Nanotechnologie) ausführlich aktuelle und zukünftige Möglichkeiten für die Halbeiter-, Material- und Ausrüstungsindustrie. In diesem Report schätzen sie den Markt für **Nanoelektronik** auf 10,8 Milliarden US-Dollar im Jahre 2007. Der Umsatz auf diesem Markt könnte sich bis zum Jahre 2011 auf 82,5 Milliarden US-Dollar entwickeln.

Den Markt für **Nanospeicher-Produkte** prognostizieren sie auf 8,6 Milliarden US-Dollar für das Jahr 2007 und dieser soll auf 65,7 Milliarden US-Dollar in 2011 steigen. Einen Schwerpunkt bilden dabei leistungsstarke und **nichtflüchtige Speicher** für mobile Kommunikations- und EDV-Anwendungen. Eine sehr starke Nachfrage werde es bei **Nanosensoren** geben, insbesondere für Anwendungen in der Medizin und in der Raumfahrtindustrie. Hier erwartet NANOMARKETS einen Markt von 446 Millionen US-Dollar im Jahre 2007, der auf 5,6 Milliarden US-Dollar in 2011 wachsen soll.

Bei den Displays mit nanotechnologischen Komponenten wird der Markt auf 1,6 Milliarden US-Dollar in 2007 geschätzt. Dieser soll auf 7,5 Milliarden in 2011 wachsen [NMarkets 04].

3.3.1 Europa, International

Es erscheint nicht übertrieben anzunehmen, dass Nanotechnologie die Zukunft der Menschheit nachhaltig verändern wird. Dies und der damit verbundene wirtschaftliche Impact führen weltweit zu konkurrenzbetontem und äußerst dynamischem Vorantreiben der wissenschaftlichen Bemühungen.

Entsprechend haben physikalische, chemische und biologische Grundlagenforschung in den letzten Jahren stürmische Fortschritte bei der Erzeugung und Charakterisierung nanoskopischer Systeme erzielt, wobei die Grenzen zwischen den einzelnen Wissenschaftsdisziplinen oftmals verschwimmen. Auffällig ist, dass gerade in diesen Grenzbereichen einige der interessantesten Entdeckungen gemacht werden. Kein Wunder also, dass weltweit von den führenden Industrienationen finanzstarke Förderungsprogramme und Netzwerke aufgebaut werden deren Ziel es ist, wissenschaftliche Bemühungen zu bündeln, die Interdisziplinarität zu fördern und durch Einrichtung spezieller Infrastrukturen Effektivität und Leistungsfähigkeit der F&E Aktivitäten zu verbessern.

Bisher gründeten 30 Staaten Nationale Förderprogramme zur Nanotechnologie Förderung [2].

Die USA, Japan und Europa nehmen die führende Rolle im Bereich der Nanotechnologieforschung ein. Es soll hier an dieser Stelle ein kurzer Überblick über deren Aktivitäten gegeben werden.

3.3.1.1 Europa

Innerhalb des 2., 3. und 4. Rahmenprogramms wurde die Nanotechnologie mit mindestens 45 Millionen Euro gefördert. Davon fielen 20 Millionen Euro auf das 2. und 3. Rahmenprogramm, weitere 25 Millionen Euro wurden ab 1994 in die in Richtung Informationstechnologie ausgerichtete Initiative MELARI (Microelectronics Advanced Research Initiative) investiert.

Innerhalb des 5. Rahmenprogramms (1998-2002) wurde Nanotechnologieforschung in drei verschiedenen thematischen Programmen gefördert:

- „Technologie der Informationsgesellschaft“ (User Friendly Information Society, IST)

  In diesem Programm wurde die Nanotechnologieforschung mit etwa 319 Millionen Euro unterstützt.

  Rund die Hälfte davon wurde für „Künftige und entstehende Technologien“ (Future and Emerging Technologies, FET) aufgewendet, der andere Teil wurde an Proaktive Initiativen wie MELARI und NID (Nanotechnology Information Devices) vergeben.
- „Lebensqualität und Management lebenserhaltender Ressourcen“ (Quality of Life and Management of Living Resources)

  Hier wurde insbesondere die Nanobiotechnologie in der Leitaktion 3 “Die Zellfabrik“, die sich mit der Grundlagenforschung im Bereich Mikrobiologie und anwendungsorientierter Forschung im Bereich der Biotechnologie befasst, mit 400 Millionen Euro gefördert.
- „Nachhaltiges Wachstum und Wettbewerbsfähigkeit“ (Competitive and Sustainable Growth, GROWTH)

  Dieses Teilprogramm unterstützte die Nanotechnologie einerseits im Rahmen der Leitaktion 1 „Innovative Prozesse und Organisation“ (KA1-"Innovative Products, Processes and Organisation"), sowie unter dem Programm „Generisch ausgerichtete Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten“ (Generic Activities, GA), "Materials and their Technologies for Production and Transformation" (GA 1A) und "Measurement and Testing" (GA 2) [3].

Im Zuge des sechsten EU - Rahmenprogramms für Forschung und technologische Entwicklung (RP6, für den Zeitraum 2002 bis 2006) wurde von der Europäischen Kommission im Programm „Integrating Research“ für den vorrangigen Themenbereich „Nanotechnologies, intelligent materials, new Production Processes“ ein Budget von 1429 Millionen Euro beschlossen [4]. Im selben Programm wurde für den Themenbereich „Genomik und Biotechnologie im Dienste der Medizin” (“Genomics and biotechnology for health“) 2150 Millionen Euro zur Verfügung gestellt, die sich auf die Aktivitäten „Fortgeschrittene Genomik und ihre Anwendungen im Dienste der Medizin“ („Advanced Genomics and its Applications for Health”) mit 1100 Millionen Euro und „Bekämpfung der wichtigsten Krankheiten“ “Combating major diseases” mit 1050 Millionen Euro aufteilen.

Die Europäische Kommission hat am 6. April 2005 ihren Vorschlag für das 7. europäische Forschungsrahmenprogramm für den Zeitraum 2007-2013 veröffentlicht. Das 7. RP wird sich nach dem Kommissionsvorschlag in vier spezifische

Programme: „Zusammenarbeit", „Ideen", „Humanressourcen" und „Kapazitäten" gliedern und weist eine Budgetaufteilung von 70.909 Millionen Euro auf (siehe Grafik).

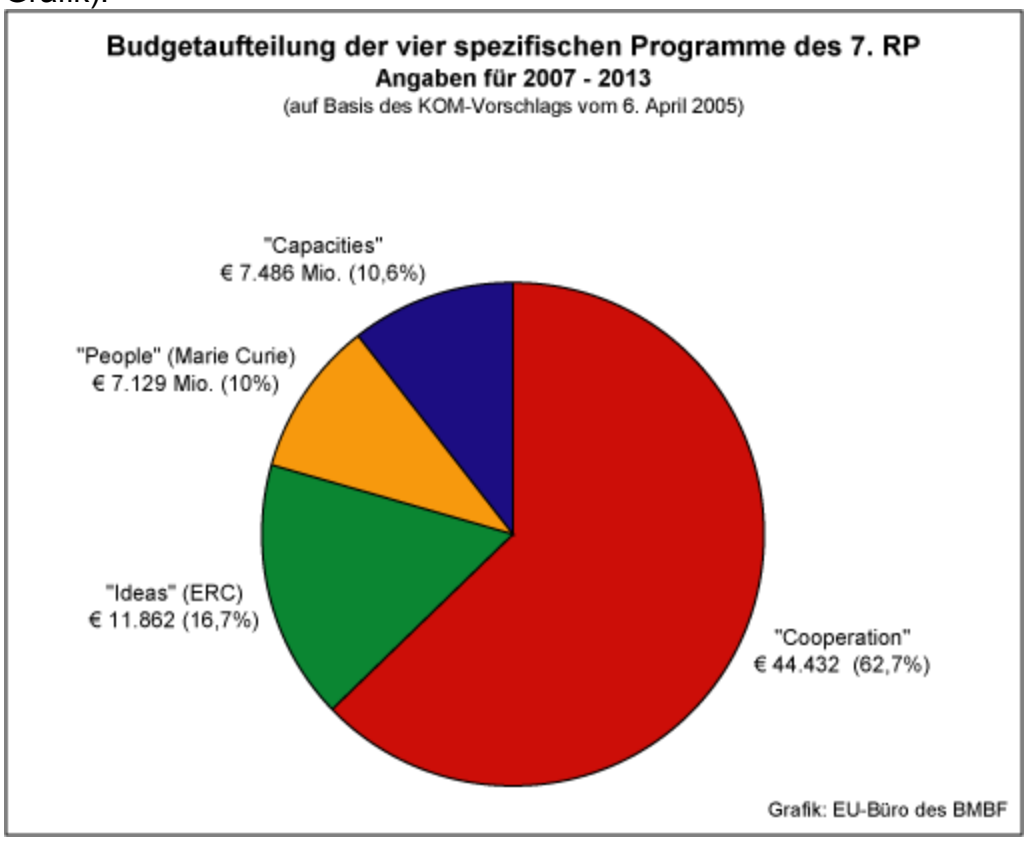


Abbildung 3.3: Budgetaufteilung des 7. Forschungsrahmenprogramms

Zusätzlich wurde für den Bereich „Maßnahmen der Gemeinsamen Forschungsstelle außerhalb des Nuklearbereichs“ ein Betrag von 1.817 Millionen Euro eingeplant [5].

Für das Programm „Zusammenarbeit“ wurden neun Themen als Teilprogramme beschlossen:

- Gesundheit
- Lebensmittel, Landwirtschaft und Biotechnologie
- Informations- und Kommunikationstechnologien
- Nanowissenschaften, Nanotechnologien, Werkstoffe und neue Produktionstechnologien
- Energie
- Umwelt (einschließlich Klimaänderung)
- Verkehr (einschließlich Luftfahrt)
- Sozial-, Wirtschafts- und Geisteswissenschaften
- Sicherheit und Weltraum

Darin ist für den Bereich „Nanowissenschaften/-technologien, Materialien und neue Produktionstechnologien“ eine Summe von 4.832 Millionen Euro an Forschungsgeldern geplant [6].

Betrachtet man vergleichsweise Europa, Japan und die USA, so gibt es zwischen den Nationen keine eindeutigen „Gewinner“ oder „Verlierer“ in der Nanotechnologie.

Es lassen sich aber gewisse Tendenzen erkennen. Europas Stärke im Bereich der Nanowissenschaften wird dadurch belegt, dass im Zeitraum 1997-1999 der europäische Anteil an den weltweiten Veröffentlichungen 32 % betrug, gegenüber 24 % in den USA und 12 % in Japan. Allerdings scheint sich die Industrie dieses Wissen nicht immer nutzbar zu machen. Der Anteil der EU an den weltweiten Patenten beträgt 36 %, gegenüber 42 % für die USA, was auf eine Schwäche bei der Umsetzung der FuE in Anwendungen hindeutet [KOM 04].

3.3.1.2 Deutschland

Deutschland nimmt innerhalb Europas eine Vorreiterrolle in der Nanotechnologieforschung ein. Die Gründung der anfangs sechs Kompetenzzentren wurde in den USA mit großem Interesse verfolgt und hat vermutlich den forschungspolitischen Kurs der US-Regierung mit beeinflusst.

Das BMBF finanziert im Zuge einer Initiative zur Förderung der Nanotechnologie Forschungsvorhaben mit etwa 15 Millionen Euro jährlich. Die Förderung erfolgt vor allem in den Bereichen physikalische und chemische Technologien, Materialtechnologien sowie Laserforschung. Betroffen sind aber insbesondere auch Förderbereiche der Informationstechnik, der Biowissenschaften und der Medizintechnik. Seit 1993 wurden insgesamt ca. 110 Millionen Euro für Projekte der Nanotechnologie festgelegt.

Nach Angaben des BMBF ist die Förderung der Nanotechnologie seit 1998 stark gestiegen, die Projektfördermittel für diesen Bereich sind seit 1998 von 27,6 Millionen Euro auf 123,8 Millionen Euro im Jahr 2004 mehr als vervierfacht wurden. Zusammen mit der Projektförderung des Bundeswirtschaftsministeriums und der institutionellen Förderung gerechnet, wird sich die Steigerung von 293,1 Millionen Euro in 2004 auf 298,3 Millionen Euro im Jahr 2005 fortsetzen [BundFor 04]. Damit lag Deutschland in Europa an der Spitze, gefolgt von Frankreich (180 Millionen Euro), Großbritannien (130 Millionen Euro), Italien (60 Millionen Euro).

Ergänzend zur Projektförderung werden Kompetenzzentren der Nanotechnologie gefördert. Im Oktober 1998 gründete das BMBF 6 Kompetenzzentren für Nanotechnologie in denen 160 Forschungseinrichtungen und 160 Industrieunternehmen auf den verschiedenen Gebieten der Nanotechnologie zusammenarbeiten. Zwischenzeitlich führte es zur Gründung dreier weiterer Zentren:

- Nanomat - Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
- CCN Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e. V. – Braunschweig
- ENNaB – München
- CeNTech GmbH – Münster
- HanseNanoTec – Hamburg
- CC-NanoChem – Saarbrücken
- CC-Nanobiotech – Kaiserlautern
- Kompetenzzentrum „Ultradünne funktionale Schichten“ – Dresden
- NanOp - Berlin

Die Kompetenzzentren haben sich jeweils auf ein Teilgebiet der Nanotechnologie spezialisiert, so hat das Zentrum in Dresden seinen Fokus auf nanodünne Schichten und deren Anwendungen beispielsweise in der Mikroelektronik, Optik, Medizin und im Maschinenbau gelegt.

Ausgehend von ihrem Teilgebiet sollen sie ein Netzwerk der Akteure aufbauen, das insbesondere die disziplinübergreifende Zusammenarbeit und Kommunikation stärkt, Öffentlichkeitsarbeit leistet, ökonomische Rahmenbedingungen verbessert und das technische und wirtschaftliche Potenzial des jeweiligen Teilaspektes der Nanotechnologie bewertet.

Neben diesen neun Kompetenzzentren sind in Deutschland 11 weitere Forschungseinrichtungen wie das „Research Centre Microtechnology and Nanostructures“ an der Universität Dortmund, der RWTH-Nano Club in Aachen sowie verschiedene Institute der Max-Planck-Gesellschaft (MPG), der Hermann-Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HFG) und der Wissensgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibnitz (WGL) in der nanotechnologischen Forschung aktiv.

In der nebenstehenden Grafik sind Informationen zur Forschungsförderung in Deutschland und den verschiedenen Finanzierungsmöglichkeiten durch Fremdkapital und Eigenkapital im Bereich Nanotechnologie dargestellt.

Die Anteilsfinanzierung durch staatliche Einrichtungen wird unterschieden in die Förderung von F&E-Projekten (Projektförderung) und die direkte Finanzierung von Instituten (Institutionelle Förderung). Der überwiegende Teil der Projektförderung wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF realisiert, ein kleinerer Teil durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA.

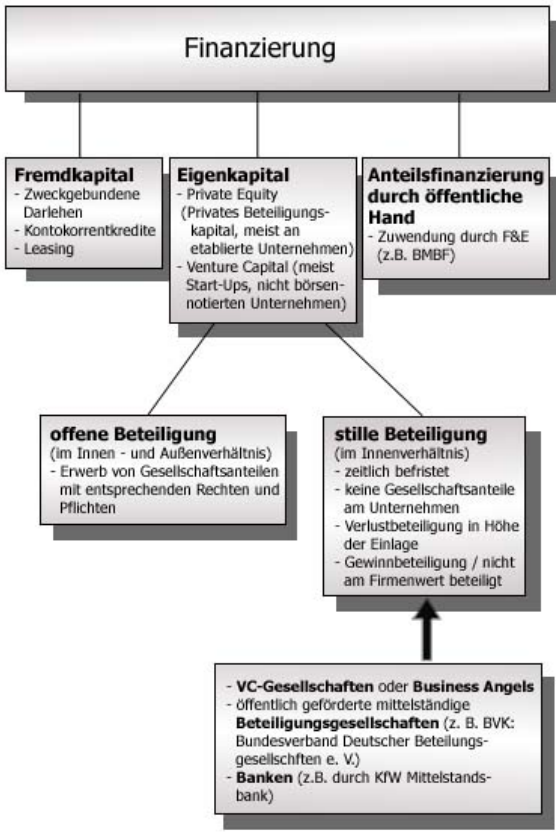


Abbildung 3.4: Nanotechnologie - Finanzierungsmöglichkeiten

Im Rahmen des 2004 veröffentlichten Rahmenprogramms (Laufzeit 2004-2007) zur Nanotechnologie werden zukünftig insbesondere sechs Leitinnovationen mit rund 200 Millionen € gefördert [Rsiet 04]:

- **NanoMobil** in der Automobilbranche
- **NanoLux** für die Optische Industrie
- **NanoFab** in der Elektronik
- **Nano for Life** in den Lebenswissenschaften (Nanobiotechnologie)
- NanoMikroChem innovative chemische Nanotechnologie sowie Prozess- und Mikroverfahrenstechnologien
- NanoChance zur Unterstützung FuE-intensive klein- und mittlere Unternehmen (KMU)

Außerdem wurde der Schwerpunkt Nanoelektronik bereits im Zeitraum 2000-2004 mit Bundesmittel in Höhe von 377 Millionen € gefördert [7].

3.3.1.3 USA

Im Oktober 1998 wurde in den USA vom National Science and Technology Council (NSTC) die Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN) eingerichtet, als nationale Institution, welche die Planung der R&D (research and development) Aktivitäten in den USA leitet. Ein Subkomitee des NSTC mit dem Name Nanoscale Science, Engineering, and Technology (NSET) ist für die Koordination der unter der Regierung Clinton im Jahr 2000 gegründeten National Nanotechnology Initiative (NNI) zuständig.

Das Budget, das US-Regierungseinrichtungen insgesamt in Nanotechnologie-forschung investierten, stieg von 116 Millionen US-Dollar im Jahr 1997 auf 255 Millionen US-Dollar 1999. Standen der NNI im Jahr ihrer Gründung noch

270 Millionen US-Dollar zur Verfügung, wurde das Budget 2001 bereits auf 465 Millionen US-Dollar aufgestockt und im Haushaltsjahr 2002 um weitere 50% angehoben. Für das Jahr 2004 hat die US-Regierung 989 Millionen US-Dollar der "National Nanotechnology Initiative" zur Verfügung gestellt, was einem Zuwachs von ungefähr 15% gegenüber dem Jahre 2003 entspricht [NNanoIn 05].

Der Senat hat am 18.11.2003 einen Gesetzentwurf verabschiedet, in welchem für die Nanotechnologieforschung in den Jahren 2005 - 2009 eine Förderung von

3,7 Milliarden US- Dollar bewilligt wurden [8]. Diese Fördermittel sollen unter anderem 2 Millionen neue Jobs in den USA schaffen.

3.3.1.4 Japan

In Japan wurden bereits Ende der 80er Jahre sowohl anwendungs- als auch grundlagenorientierte Forschungsprogramme gestartet.

Durch Programme wie ERATO (Exploratory Research for Advanced Technology) wurden innovative Forschungen vor allem an den Universitäten angeregt. Wissenschaftler konnten hier über einen Zeitraum von fünf Jahren bis zu zwanzig Millionen Euro für ihre Projekte erhalten. Gefördert wurden unter anderem die wegweisenden Arbeiten Toshio Yanagidas zu Molekularmotoren und zur Funktionsweise von Muskelgeweben an der Universität Osaka [9].

Die Notwendigkeit interdisziplinärer Forschung wurde früh erkannt, so wurde 1992 vom Ministry of International Trade and Industry (MITI, jetzt Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)) das Joint Research Center for Atom Technology (JRCAT) in Tsukuba gegründet, und das Angström Projekt „Ultimate Manipulation of Atoms and Molekules“ aufgelegt. Das MITI förderte dieses Projekt seit 1992 über eine Laufzeit von 10 Jahren mit etwa 250 Millionen US-Dollar, weitere 150 Millionen US-Dollar werden von der Industrie getragen.

Darüber hinaus wurden vom japanischen Council for Science and Technology Policy (CSTP) eine ganze Reihe weiterer Förderprogramme aufgelegt. Die Förderungen dafür stiegen von 120 Millionen US-Dollar 1997 auf ca. 465 Millionen im Jahre 2001. Der CSTP plant im Zeitraum von 2001 bis 2006 eine Summe von 200 Milliarden US-Dollar in die Nanotechnologieforschung zu investieren.

Des weiteren hat die japanische Regierung in einer Kabinettsentscheidung vom 31.03.2001 den „Basisplan für Forschung und Technologie“ verabschiedet. Dieser sieht für den Zeitraum von 2001-2005 ein Budget von insgesamt 24 Billionen Yen (etwa 178 Milliarden Euro) für staatliche Ausgaben für Forschung und Entwicklung im Bereich der Grundlagenforschung vor.

Das Grundlagenkonzept setzt Prioritäten für die Ressourcenallokation in vier Bereichen:

- neben den Life Sciences,
- der Informations- und Telekommunikationstechnologie,
- den Umweltwissenschaften liegt ein besonderes Augenmerk auf
- der Förderung der Nanotechnologie.

Die japanische Regierung betrachtet diese als Schlüsselwissenschaft, die auch zu Erkenntnissen in den anderen Bereichen beitragen kann. Im Jahre 2004 betrugen die jährlichen öffentlichen Ausgaben für die Nanotechnologie fast eine Milliarde Euro, womit Japan vor den USA und der EU rangierte.

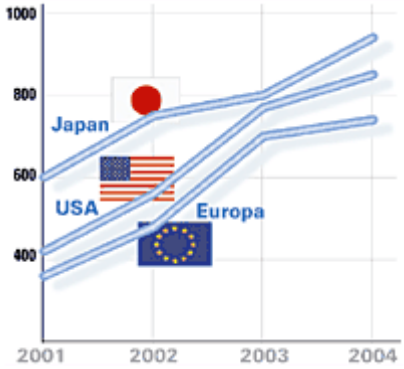


Abbildung 3.5: Öffentliche Förderung von Nanotechnologie in Millionen Euro

3.3.1.5 Drittländer

Die Nanotechnologie - eine der am stärksten wachsenden Technologien weltweit - wird derzeit in allen relevanten Industrienationen als ein wichtiges Zukunftsfeld erkannt und entsprechend gefördert. Nicht nur in den USA, Japan und in Europa werden daher nationale oder forschungsspezifische Programme aufgelegt, sondern auch in Korea, China, Taiwan, Australien, und weiteren Nationen.

Die folgende Abbildung 3.6 zeigt die öffentlichen Investitionen weiterer wichtiger Länder in Asien, Australien, Nordamerika und Ozeanien in der Nanotechnologieforschung.

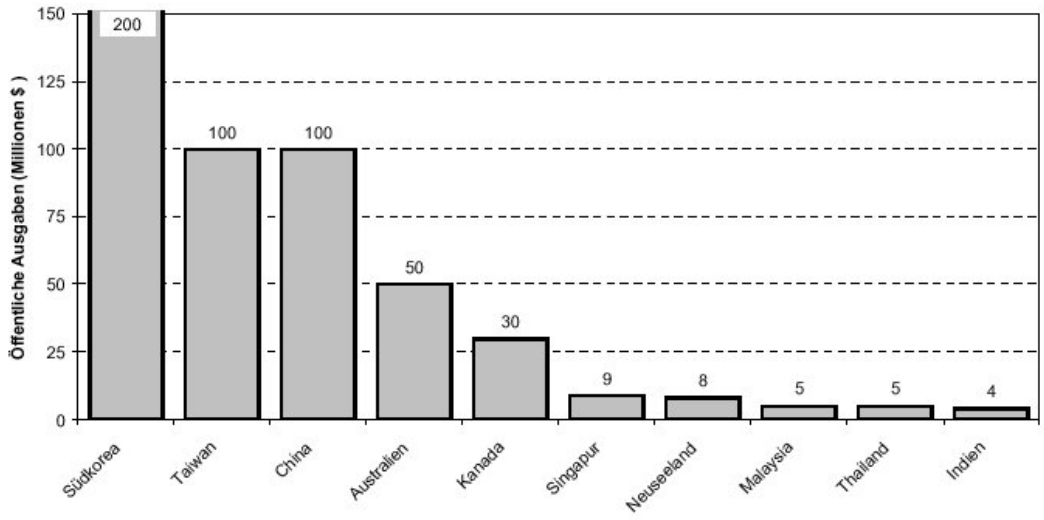


Abbildung 3.6: Investitionshöhen der wichtigsten Drittländer

Der Bereich der Nanotechnologie wird in China schon seit 1986 in großer Breite entwickelt, besonders in den letzten Jahren investierte China mehr und mehr in dieses Forschungsfeld, was von staatlicher Seite durch folgende Ministerien und Fördervereine unterstützt wurde bzw. wird:

- Ministry of Science and Technology (MOST)
  2000-2004, 973 Projekte, 3,7 Millionen US-Dollar, Nanomaterialien und Nanotechnologie
- National Natural Science Foundation of China (NSFC)
  2000, 161000 US-Dollar für Carbon Nanotube Electron Transport,
  2004, 247 Millionen US-Dollar für die Nanoelektronik
- Nanotechnology Research Center (Bejing University)

Förderungen durch die NSFC, die in der jüngsten Vergangenheit bereits einige Großprojekte für die Mikrosystemtechnik (MST) unterstützt hat, weitet ihre Aktivitäten nun auch auf Nanoprojekte aus. Gleichzeitig ist beabsichtigt, die Nanotechnologie in ihrer Grundlagenforschung zu stärken und komplexe, integrierte Halbleitersysteme für folgende Forschungs- und Anwendungsbereiche zu fördern:

- Nano-Biotechnologie
- Theorie des Micro-Machine-Designs
- neue Mikrokomponenten, die auf neuen physikalischen und chemischen Eigenschaften basieren
- Grundlagen für die Schlüsseltechnologien in der Informationstechnik.

95 % der chinesischen Wissenschaftler und Techniker im Bereich der Nanotechnologie sind in Universitäten (35 %) und Forschungseinrichtungen (60 %) tätig, nur 5 % in Unternehmen. Etwa 40 % der Forschung findet davon in den beiden Hauptzentren Peking und Shanghai statt. Dort sollen in den nächsten Jahren drei weitere nationale Nano-Forschungszentren, in Anbindung an die „Chinese Academy Sciences“ (CAS), entstehen (siehe Abbildung 3.7).

Als Hauptforschungsgebiete sind Nanomaterialien, Nanobiologie und –pharmazeutika sowie Nanoelektronik vorgesehen.

Abbildung 3.7: CAS Institute

Über 320 Firmen in China konzentrieren sich derzeit hauptsächlich auf die Produktion von Nanomaterialien, weniger auf die Forschung. Hier kommt Shenzhen neben Peking und Shanghai als drittes regionales Zentrum hinzu.

4 Nanotechnologie – eine neue Querschnitttechnologie

Forschungsgegenstand der Nanotechnologie sind Materialien oder Bauelemente, deren charakteristische Längenskala im Bereich unter 100 Nanometer liegt. Solche Nanostrukturen führen zu neuartigen Eigenschaften, die für eine Vielzahl von technischen Anwendungen höchst attraktiv sind.

Die Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie. In Ihr fließen die Ergebnisse aus der Physik, Chemie und Biologie zusammen. Als besonders geeigneter Werkstoff hat sich das Erbmolekül DNA erwiesen, eine andere Hoffnung ruht derzeit auf den so genannten Nanotubes.

Die gemeinsamen Forschungsergebnisse fließen nicht in ein einzelnes Anwendungsgebiet, sondern sind die für eine hohe Zahl von Wissenschafts- und Technologiezweigen von Relevanz. Aus heutiger Sicht kristallisieren sich einige Schwerpunkte der Nanotechnologie heraus.

- die Nanomechanik: befasst sich mit beweglichen Komponenten aus nur wenigen Atomen und den daraus herstellbaren Maschinen. So konnten IBM Wissenschaftler am Forschungslabor Zürich bei der Speicherung von Daten eine Speicherdichte von einer Billion Bits (1 Terabit) pro Quadratzoll erreichen. Dies entspricht dem zwanzigfachen von derzeit marktüblichen Magnetspeichern. Bei dem Projekt spielt Nanomechanik anstelle von herkömmlicher magnetischer oder elektronischer Speichertechnologie die zentrale Rolle. Mit Tausenden von feinsten Spitzen "schreibt" Millipede winzige Vertiefungen, die einzelne Bits repräsentieren, in einen dünnen Film aus Kunststoff. Das Resultat entspricht einer Lochkarte auf Nanometerebene und die Bits lassen sich löschen und überschreiben. Die Terabit-Dichte wurde mit einer einzelnen Silizium-Spitze erreicht, die Vertiefungen mit einem Durchmesser von 10 Nanometern erzeugt.
- die Nanoelektronik: Da die herkömmliche Transistortechnologie aufgrund der Wellennatur der Elektronen langfristig an ihre physikalischen Grenzen stößt, könnte die Molekularelektronik, die mit Logikbausteinen aus kleinsten Partikeln oder Molekülen arbeitet, Abhilfe schaffen. Sie untersucht die verschiedenen Konzepte für die Nutzung der elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen für vielfältige Anwendungen auf dem Gebiet der Informationstechnologie. Als nächste Entwicklungsstufe, die sich noch in der Grundlagenforschung befindet, könnten *Quantencomputer* mit bisher unvorstellbarer Rechenleistung die zukünftigen Aufgaben lösen.
- die Nanobiotechnologie: verfolgt einerseits die Nutzung biologischer Nano-Objekte in technischen Systemen, von der Sensorik bis zur Photovoltaik. Sie wendet andererseits Verfahren zur Untersuchung und Beeinflussung biologischer Systeme an. Die Medizintechnik sowie die molekulare *Diagnostik* werden von diesen Forschungsergebnissen wesentlich profitieren. Sie wird Schrittmacher in der Diagnostik und Pharmaforschung, in der Umwelt-, Sicherheits- und Produktionstechnik sowie der Elektronik der Zukunft.
- die Nanomedizin: ist eine Kombination von Verfahren aus der Biotechnologie und Mikrosystemtechnik zum Zwecke einer medizinischen Nutzung. Sie sieht ihre größte Herausforderung in der Diagnostik, in innovativen Krebstherapien und wichtigen Implikationen für das Gesundheitswesen.
- die Nanooptik: Die Anwendung nanotechnologischer Verfahren zur Herstellung optischer Geräte unter Nutzung neuester optischer Effekte schafft die

Voraussetzung für optische Hochgeschwindigkeits-Kommunikationstechnik, neuartige optische Sensoren und Laserlichtquellen.

- die Nanomaterialien: Dieses Forschungsgebiet befasst sich mit der Erforschung und Entwicklung neuartiger Werkstoffe und Materialsysteme auf der Basis kleinster Partikel, deren wesentliche Eigenschaften auf der Nanoskaligkeit beruhen. Diese Nanopartikel weisen im Verhältnis zu ihrem Volumen eine riesige Oberfläche auf. Das heißt, dass bei ihnen weit mehr Atome an der Oberfläche liegen als bei größeren Körpern. So können sie mit ihrer Umgebung wesentlich besser in chemische und physikalische Wechselwirkung treten. Die daraus resultierende hohe Reaktivität bietet die Möglichkeit, Werkstoffe spezifischer auf den jeweiligen Verwendungszweck auszurichten. Optische, elektrische und magnetische Eigenschaften, aber auch die Härte, Zähigkeit oder das Schmelzverhalten dieser neuen Nanomaterialien unterscheiden sich deutlich von den herkömmlichen Materialen.

  Bereits heute sind diese Erkenntnisse im Alltagsleben zu finden: Kratzfähige Autolacke, wasserabweisende Beschichtungen von Sanitäranlagen und UV-absorbierende Sonnencremes sind ebenso auf diese Forschung zurückzuführen wie die Entwicklung magnetischer Schichten von Computerfestplatten.

- die Nanochemie: befasst sich mit der Erzeugung sowie der Veränderung von chemischen Systemen, die ihre Funktionalität aus der Nanoskaligkeit beziehen. Supramolekulare funktionale Systeme bilden die stoffliche Grundlage für neue Materialien. Die Chemie stellt hier die Schlüsselbranche für die Herstellung von Strukturen im Nanometerbereich dar. Schon heute beruhen viele Produkte auf der Herstellung von Teilchen, die kleiner als zehn Nanometer sind und die Form von Kugeln, Kristallen, Plättchen oder Röhren haben. Metalle, Keramik oder Kunststoffe, die Nanoteilchen enthalten oder mit ihnen beschichtet sind, besitzen neue, außergewöhnliche Eigenschaften (siehe auch Nanomaterialien). Sie sind beispielsweise kratzfest, entspiegelt, Wasser, Fett oder Schmutz abweisend. Auch Oberflächen, die Bakterien abtöten oder chemische Reaktionen ermöglichen und beschleunigen (katalysieren), werden durch Nanopartikel Realität.
- die Nanoanalytik: liefert schließlich die analytischen Methoden und Werkzeuge zur Erfassung der Basisphänomene und zur Produktcharakterisierung und sorgt für eine analytische Qualitätssicherung in nationalen sowie internationalen Normungskriterien.

4.1 Nanowerkzeuge

Schon in der Antike sind Belege darüber gefunden worden, dass die Menschen sich auch damals intensiv damit beschäftigt haben, Produkte mittels technischer Werkzeuge herzustellen. Treiber der Entwicklung war damals wie auch heute die Herausforderung, neue Materialien immer schneller, präziser und zuverlässiger bearbeiten zu können – ein Trend, der nicht unterbrochen wurde und heute zum Ausreizen der physikalischen Grenzen moderner Fertigungsverfahren führt.

Abgesehen von frühen nanotechnologischen Entwicklungen, wie z.B. die der Glasmacher im Mittelalter, die wussten, dass Glas, das für Kirchenfenster verwendet wurde, durch Beigabe geringer Gold-, Silber- oder Kupferpartikel rot oder auch blau einzufärben möglich war, begann das Zeitalter der Nanotechnologie erst mit den Entwicklungen der Rastersondenverfahren. Was diese Glashersteller nicht wussten,

dass die winzigen Goldmengen in der Glasschmelze Nanopartikel zu einigen hundert Atomen bilden, die je nach Beigabemenge und Glassorten die Wellenlänge des Lichts verändern.

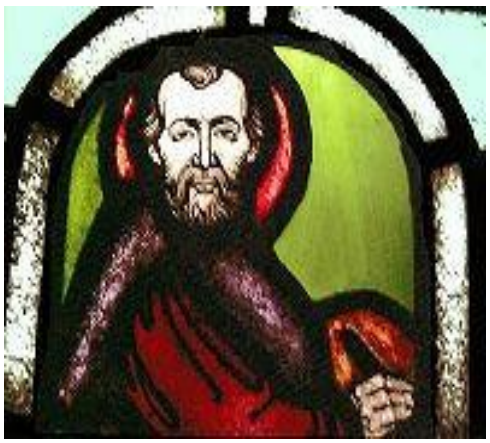


Abbildung 4.1: Rubinrote Farbe im Fensterglas

Der erzeugte Effekt: statt goldgelb leuchteten die Fenster in rubinroter Farbe.

Die Anwendung und Weiterentwicklung solcher Nanopartikel setzt eine geeignete Analyse derartiger kleiner Strukturen voraus. Da die Nanoobjekte kleiner sind als die Wellenlänge des optischen Lichtes, ist die Auflösung herkömmlicher optischer Mikroskope unzureichend. Daher wurden neue Methoden zur Analyse nanoskaliger Objekte notwendig.

Als die wichtigsten Nanowerkzeuge sind heute die Rastersondenverfahren, die zu einem wesentlichen Teil Wegbereiter moderner Nanotechnologie sind und sowohl die Fabrikation als auch die Analyse individueller funktionaler Einheiten gestatten, anzusehen.

Durch die bahnbrechende Erfindung des *Raster-Tunnelmikroskops* durch Gerd Binnig, Heinrich Rohrer und Christoph Gerber konnten 1981 die experimentellen Möglichkeiten dafür geschaffen werden. 1986 wurde ihnen der Nobelpreis für diese Neuentwicklung verliehen.

Bis heute ist auf der Basis dieses Funktionsprinzips eine ganze Familie von Rastersondenverfahren entstanden, die es erlauben, physikalische, chemische und biologische Eigenschaften bis zur atomaren Skala zu analysieren und zu manipulieren. Es können einzelne Atome abgebildet, die Kräfte zwischen zwei Atomen gemessen, die molekulare Erkennung zwischen zwei Biomolekülen studiert und die Hybridisierung von zwei DNS-Strängen nachgewiesen werden.

Im weiteren Sinne umfasst dies das Messen von Eigenschaften, das Kontrollieren und Steuern von Funktionen und Prozessen im Nanometer-Maßstab, das Positionieren und Manipulieren von Nano-Objekten sowie Modifizieren und Strukturieren.

Die Rastersondenverfahren sind wie wohl keine andere Methodenklasse zuvor unentbehrliche Werkzeuge bei der Entwicklung nanoskaliger Ansätze.

Die Möglichkeit der Oberflächenanalytik, der elementaren Abläufe und Zusammenhänge von Prozessen auf atomarem Niveau hat den größten Teil der bestehenden Nanotechnologien erst möglich gemacht. Prinzipiell ist es möglich, den größten Teil der bekannten Wechselwirkungsarten zu detektieren und zu nutzen. Neben ihrer erheblichen Bedeutung für die Grundlagenforschung als universell

einsetzbares Werkzeug finden Rastersondenverfahren bereits heute zunehmend Anwendung in Bereichen der industriellen Produktions- und Qualitätskontrolle.

Dies gilt insbesondere für die Halbleiter- und Magnetspeicherindustrie, so finden sie bereits ihre Anwendung zur Funktions- und Fehleranalyse von hochintegrierten Schaltungen. Die Rastersondenverfahren besitzen außer ihrer hohen atomaren Ortsauflösung noch weitere Eigenschaften, die sie für die Funktions- und Fehleranalyse integrierter Schaltungen interessant machen. Ein Vorteil gegenüber den berührungsbehafteten Messungen mittels mechanischer Messnadeln ist die enorme Vielfältigkeit der Rastersondenverfahren. So ist es ohne nennenswerte Veränderungen im Messaufbau möglich, unterschiedliche physikalische Größen wie z.B. elektrische Spannungen und Ströme, Temperaturen oder Topologien zu detektieren. Auch sprechen der relativ geringe apparative Aufwand, die einfache Handhabung sowie die Möglichkeit, unter Raumbedingungen messen zu können, für die Rastersondenverfahren.

Die wichtigsten Repräsentanten der Familie der Rastersondenverfahren stellen heute die Raster-Tunnelmikroskopie, die Rasterkraftmikroskopie und optische Rasternahfeldmikroskopie dar. Ohne diese damit assoziierten Technologien wären weitere Forschungsarbeiten im atomaren Bereich nicht denkbar.

Für das Vordringen in immer kleinere Dimensionen müssen Werkzeuge geschaffen werden, die uns diese Welt erschließen.

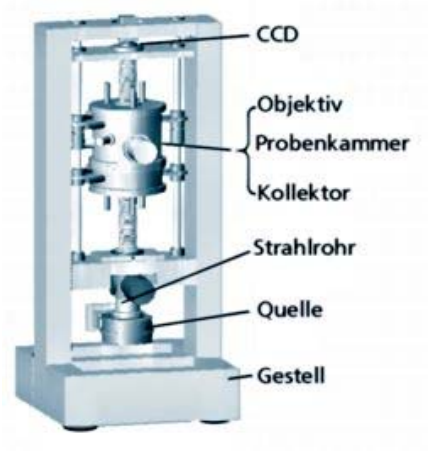


Abbildung 4.2: EUV Mikroskop

Extremes Ultraviolett-Licht (EUV) spielt dabei momentan für die Halbleiterherstellung die entscheidende Rolle.

Mit den EUV-Mikroskopen eröffnen sich neue Möglichkeiten bei der Untersuchung von Phänomenen, die ein hohes räumliches Auflösungsvermögen erfordern. Durch die Kombination mit spektroskopischen Methoden erschließt sich ein breites Anwendungsspektrum auf den Gebieten der Werkstoff-, Biologie- und Halbleiterstrukturforschung. So hat Intel den ersten kommerziellen EUV-Stepper – Lithografieanlangen für Chips - vorgestellt, mit der die *EUV-Lithografie* den Übergang von der reinen Forschung zur Entwicklung vollziehen soll. „Die Anlage heißt Micro Exposure Tool (MET). Bislang sei man im Zeitplan und ab 2009 soll die Produktion von Chips mit Strukturen um 30 bis 40 nm anlaufen (32-nm-Node). EUV steht für Extremes Ultraviolett und bezeichnet im Zusammenhang mit EUV-Lithografie die Chipherstellung mit weichem Röntgenlicht der Wellenlänge 13,5 nm“ [Heion 04].

4.2 Nanomechanik

Die Nanomechanik befasst sich mit beweglichen Komponenten aus nur wenigen Atomen und den daraus herstellbaren Maschinen. So ist es dem Team um R. Böckmann bereits gelungen, ein nanomechanisches System mit einer Achse und Lager mittels verschiedener Moleküle zu konstruieren und eine natürliche Imitation eines Motors in der sogenannten ATP-Synthese zu finden. Dies könnten die ersten Schritte zu den Nanomaschinen sein, die später ganze Produktionsstätten bilden sollen, um zunächst sich selbst und schließlich Dinge der makroskopischen Welt zu produzieren [RBoeck 02]. Von solchen Grundlagenexperimenten bis hin zu ersten Bauelementen, tatsächlichen Schaltkreisen und realistischen mechanischen Anwendungen ist noch ein aufwendiger und steiniger Weg zurück zu legen.

1985 wurde an der Rice University neben Graphit und Diamant ein weiteres stabiles Kohlenstoffmolekül entdeckt, das aus sechzig zu einer Kugel verbundenen Kohlenstoffatomen besteht. Es wurde *Buckyball* bzw. Fulleren genannt, nach den Kuppelbauten des Ingenieurs Buckminster Fuller.

Nanotechniker interessieren sich vor allem für langgezogene Fullerene, den sogenannten Nanotubes (*Nanoröhren*). Diese Kohlenstoff-Nanoröhren kann man sich als aufgerollte Atomlagen eines Graphitgitters vorstellen; es werden dabei einwandige und mehrwandige Nanoröhren unterschieden. Der typische Durchmesser von einwandigen Nanoröhren beträgt 1,4 Nanometer. Wegen ihrer herausragenden mechanischen und elektronischen Eigenschaften werden die Kohlenstoff - Nanoröhren derzeit intensiv untersucht. Sie haben ein enormes Anwendungs-potenzial als Feldemissionsspitzen für Bildschirme, als neuartige Tunnelmikroskopspitzen, als zukünftige Bauelemente einer nanoskaligen Elektronik sowie als Wasserstoffspeicher für den Kraftfahrzeugbau. Je nach Bauart der Röhren können sie metallisch oder halbleitend sein. Sie können somit als nanoskalige Bausteine für die Herstellung von Transistoren auf molekularem Maßstab dienen. Die Kohlenstoff-Nanoröhren konnten erstmalig 1991 synthetisiert werden und sind derzeit die Bausteine in der Nanomechanik. Sie sind äußerst stabil und dabei so elastisch, dass sie auch enorme Verbiegungen und Quetschungen unbeschadet überstehen.

Zwar ist bisher nur die Herstellung einfacher 3D-Strukturen geglückt, in hochkomplexen Rechnersimulationen existieren jedoch bereits Nanoräder und Nanomotoren. So zeigen Illustrationen, dass sich das Gebilde aus einer Fullerenröhre und mehrerer damit verbundener Benzolmolekülen sehr gut als Nanozahnrad eignet. Dies sind die Grundlagen eines zukünftigen Nanomotors, dessen mögliche Funktionsweise mit Laserstrahlantrieb bereits simuliert wurde.

Bei diesen Simulationen werden keineswegs die Gesetze klassischer Mechanik einfach auf molekularer Ebene angewendet, sondern es muss mit Modellen auf Basis der quantenmechanischen Beschreibung der Moleküle gerechnet werden.

Ein Forscherteam um Alex Zetti vom Lawrence Berkeley National Laboratory hat einen Nanometer-Motor mit einem Durchmesser von 500 nm hergestellt. Dieser sitzt auf einem Siliziumchip und besteht aus einem 100 - 300 nm langen Rotorblatt aus Gold, welches eine mehrwandige Kohlenstoff-Nanoröhre als Achse - mit einer Achslänge von 40 nm - nutzt.

Abbildung 4.3: Nanometer-Motor

Diese elektrostatischen Motoren stellen einen Meilenstein in der Nanotechnologie dar und zeigen, dass Nanotubes und andere Nanostrukturen manipuliert und zu einer echten Komponente angeordnet werden können. Der Rotor kann sich vor- und rückwärts drehen (spannungsgesteuert) und als Mikrowellen-Oszillator arbeiten oder er kann Flüssigkeiten in mikrofluidischen Bauteilen mischen [Nature 03].

Einen anderen Weg beschreiten Forscher, die die natürlich vorhandene, selbstregenerierende Substanz der *DNA* und die zu ihrer Bearbeitung bereits entwickelten Techniken der Molekularbiologie und Biochemie nutzen wollen, um Nanostrukturen mit neuen Eigenschaften und Fähigkeiten zu erzeugen. Zwar gelang es Wissenschaftlern an der University of New York bereits, dreidimensionale Würfel aus DNA-Strängen herzustellen, doch diese sind nicht so widerstandsfähig, wie vergleichbare Strukturen aus Kohlenstoffmolekülen.

Phantastisch anmutend ist die Idee eines rein mechanischen Computers, dessen logische Gatter aus beweglichen Teilen in Nanogröße bestehen. Da in atomaren Dimensionen nahezu keine Trägheit herrscht, kann ein solches nanomechanisches System mit sehr hohen Geschwindigkeiten arbeiten. Quantenmechanische Rechnungen zeigen, dass dabei so gut wie keine Reibung entsteht und die frei werdende thermische Energie daher gering ist.

Wissenschaftler des IBM Forschungslaboratoriums Zürich und der Universität Basel haben diese neue Methode zum Nachweis von DNS-Defekten mit Hilfe von Mikromaschinen aus Silizium entwickelt. Wie die Forscher in der Ausgabe des Wissenschaftsmagazins Science vom 14. April 2000 berichten, haben sie entdeckt, dass DNS-Stränge winzige "Finger" aus Silizium verbiegen. Die direkte Umsetzung biochemischer Reaktionen in nanomechanische Bewegungen könnte für die Entwicklung von Nano-Robotern genutzt werden.

Die Wissenschaftler nutzten die als Hybridisierung bezeichnete Basenpaarung zwischen zwei Einzel-DNS-Strängen. Kern des Instrumentes ist eine Reihe von Silizium-Kantilevern, die in einer mit Pufferlösung gefüllten Kammer montiert sind.

Die *Kantilever* sind 500 Mikrometer lang, 100 Mikrometer breit, weniger als 1 Mikrometer dick und werden auf einer Seite mit bestimmten Rezeptoren beschichtet. Injiziert man eine Substanz,

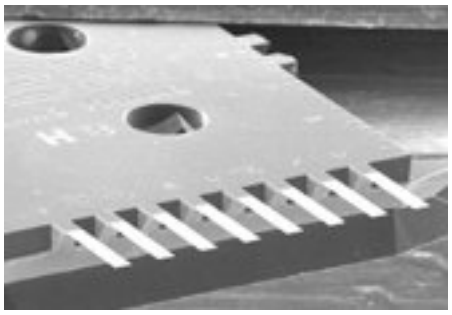


Abbildung 4.4: Kantilever

die mit den Rezeptoren reagiert, docken Moleküle am Kantilever an. Wird jeder Kantilever mit andern Rezeptoren beschichtet, können verschiedene Substanzen in der gleichen Lösung an entsprechenden Rezeptorschichten andocken.

Die Erhöhung der molekularen "Packungsdichte" auf dem Kantilever führt zu einer Oberflächenspannung und damit zur Verbiegung des Kantilevers. Die Verbiegung in der Größenordnung von 10 – 20 Nanometern kann mit einem Laserstrahl nachgewiesen werden.

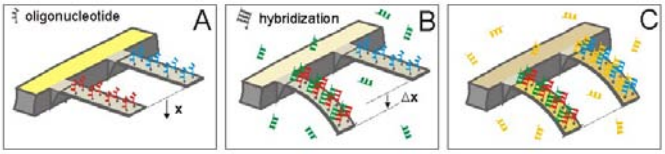


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Experiments

Bild A: Zwei Kantilever sind jeweils mit Einzelstrang-DNA bedeckt
Bild B: Der erste Kantilever biegt sich durch Hybridisierung
Bild C: Der zweite Kantilever biegt sich durch Hybridisierung

„Die Möglichkeit, Biologie zur Erledigung von spezifischen mechanischen Aufgaben auf der Nanometerskala mit Hilfe von Siliziumtechnik zu nutzen, eröffnet einen völlig neuen Weg zum autonomen Betrieb von Nanomaschinchen ohne Energiezufuhr oder Computersteuerung von außen. Wir haben eine Methode gefunden, die in der DNS die Arbeit verrichtet. Wir benötigen so für den Betrieb von winzigen Maschinen weder Batterien noch Motoren oder andere Hilfsmittel dieser Art“, erklärt James Gimzewski vom IBM Forschungslabor Zürich. So könnten beispielweise extrem kleine Ventile, die auf spezifischen DNS-Code oder auf biochemische Effekte anderer Moleküle reagieren, in der Krebsbehandlung Anwendung finden. „Die Ventile könnten chemisch so programmiert werden, dass sie sich nur öffnen, wenn sie biochemische Signale von einem anvisierten Tumortyp erhalten. Dies würde die richtige Therapie am richtigen Ort mit minimalen Nebenwirkungen und ohne chirurgische Eingriffe ermöglichen“. Obwohl diese Idee wie Science Fiction anmutet, wird weltweit an der Realisierung solcher Pläne gearbeitet. Am 13.April 2000 unterzeichnete die NASA ein entsprechendes Forschungsabkommen mit dem Nationalen US-Krebsforschungsinstituts NCI [Heionnew 00].

IBM Forschungsprojekt „Tausendfüßler“ erreicht zwanzigfache Dichte heutiger Magnetspeicher

Mit der Lochkarte fing es an, über den Ringspeicher bis zur Festplatte ging die Entwicklung. Die ersten beschreibbaren Datenträger kamen auf den Markt. Diese mechanischen Speichermedien waren zunächst einmal billig und unhandlich, was sich allerdings im Vergleich zur Kapazität relativiert. Es folgten andere magnetische

und optische Speichersysteme wie z.B. Magnetbänder, Disketten, CD-ROMs und DVD's.

Im Jahr 2002 kam das Comeback der Lochkarte, diesmal aber in Briefmarkenformat.

IBM Wissenschaftler am Forschungslabor Zürich haben im Rahmen des Projektes „*Millipede*" (Tausendfüßler) mittels Nanotechnologie bei der Speicherung von Daten eine Speicherdichte von einer Billion Bits (1 Terabit) pro Quadratzoll erreicht. Das entspricht dem zwanzigfachen von derzeit marktüblichen Magnetspeichern.

Bei dem Projekt spielt Nanomechanik anstelle von herkömmlicher magnetischer oder optischer Speichertechnologie die entscheidende Rolle.

Der Kern dieses nanomechanischen System's, auch „Microelectro mechanical system" (MEMS) genannt,

bildet eine zweidimensionale Anordnung von V-förmigen

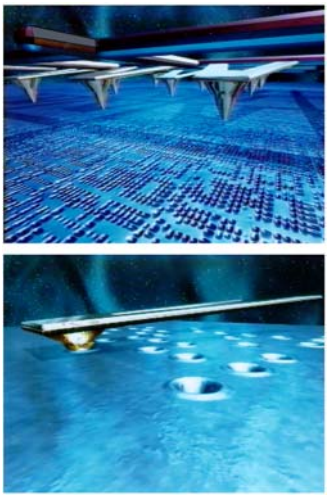


Abbildung 4.6: Millipede

Silizium-Federzungen (Kantilever), die universell adressierbar und 0,5 μm dünn und 70 μm lang sind. Diese Kantilever mit den feinen Spitzen aus Silizium schmelzen winzige Löcher in ein Polymersubstrat, um einzelne Bits zu schreiben. Diese Spitzen werden auch dazu verwendet, um die Löcher wieder nachzuweisen, also um die Bits zu lesen.

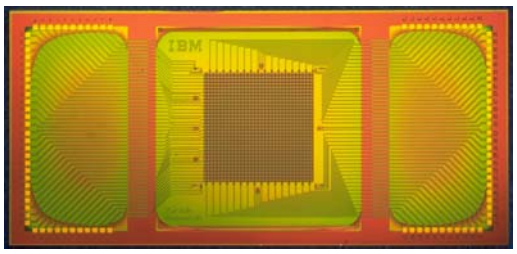


Abbildung 4.7: Millipede Chip

Elektromagnetische Aktuation bewegt das Polymersubstrat mit dem Speichermedium auf dessen Oberfläche sehr präzise in x-und y-Richtung, so dass jede Spitze in ihrem Speicherfeld von 100 µm Seitenlänge lesen und schreiben kann. Die kurzen Distanzen tragen wesentlich zu einem geringen Energieverbrauch bei.

Schreibvorgang:

Die Daten schreibt der 7x14 mm große Prototyp (Abbildung 4.7) mit 64*64 Spitzen in Form von 10 nm kleinen Vertiefungen durch Erhitzung des in dem Kantilever

integrierten Widerstandsdrahts auf 400 °C in einen Polymerfilm auf ein Silizium-Substrat (Abbildung 4.6). Ein Loch stellt eine logische „1“ dar, kein Loch symbolisiert eine logische „0“.

Jede der Schreib-Spitzen sitzt gepaart mit einem Lese-Sensor auf den weitgehend stoßunempfindlichen Silizium-Federzungen und ist parallel einzeln ansteuerbar.

Das Resultat der Speicherung von Daten entspricht der althergebrachten Lochkarte, jedoch auf der Skala der Nanometer und die Bits lassen sich im Gegensatz zu den Daten auf einer Lochkarte löschen und überschreiben.

Um Daten zu überschreiben, setzt die Spitze Vertiefungen in die Polymerfilmoberfläche. Deren äußere Ränder überlappen die alten Vertiefungen und löschen so die alten Daten.

Lesevorgang:

Zum Lesen wird die Temperatur des Widerstands auf ca. 300 °C reduziert, dies hat zur Folge, dass der Polymerfilm nicht aufgeweicht wird. Taucht nun die Spitze in eine Vertiefung, erhöht sich der Wärmeaustausch zwischen ihr und dem Speichersubstrat, der Lese-Sensor kühlt sich geringfügig ab und führt zu einer messbaren Veränderung des Widerstands.

Die Wissenschaftler erhoffen sich mit dieser revolutionären Nano-Speichertechnik einen Durchbruch ihrer Entwicklung, denn aktuelle Speichertechnologien stoßen allmählich an ihre fundamentalen physikalischen Grenzen.

Die Funktionstüchtigkeit dieses Konzepts hat das Team am IBM Forschungslabor Zürich mit einem experimentellen Speicherchip – auf dem sich etwa 25 Millionen Buchseiten oder der Inhalt von 25 DVD’s auf der Fläche einer Briefmarke speichern lassen - bereits im Juni 2002 mit mehr als tausend Spitzen erprobt.

Mit dieser wiederbeschreibbaren Lochkartentechnik versucht IBM den Flashspeicher aus SD-Cards abzulösen. Die SD Card (Secure Digital Memory Card) sind briefmarkengroße Flash-Speicherkarten mit einer Kapazität von 128 MB - 1GB. Sie sind eine Entwicklung des Konsortiums von Matsushita Electric, SanDisk und Toshiba, um den Sicherheits-, Kapazitäts- und Leistungsanforderungen der Multimedia-Applikationen gerecht zu werden.

Mit der Millipede Technologie könnte die Kapazität von Flash Memory für mobile Endgeräte wie Handys, PDA’s sowie multifunktionale Armbanduhren auf 10 -15 GB bei Abmessungen von 24 x 32 x 2,1 mm gesteigert werden.

Der Energieverbrauch hängt stark von der Datenrate ab, mit der die Geräte betrieben werden. Bei wenigen Megabits pro Sekunde dürfte Millipede nicht mehr als 100 Milliwatt (Schreibzyklus) benötigen, was in etwa dem Energiebedarf eines Flash Memory entspricht und deutlich unter demjenigen von magnetischer Speicherung liegt [10].

4.3 Nanobiotechnologie

Aus den zukunftsträchtigen Technologien der kommenden Jahrzehnte,

der Biotechnologie, der Chemie, der Physik und der Nanotechnologie, kündigt sich eine neue Renaissance durch verschmelzende Technologien an, die Nanobiotechnologie, ein noch sehr junger Forschungszweig. Er ist charakterisiert durch eine hohe Interdisziplinarität und setzt eine enge Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern -Molekularbiologen, Pharmazeuten, Physikern, Biochemikern, Medizinern und Ingenieuren - auf einem hohen Niveau voraus.

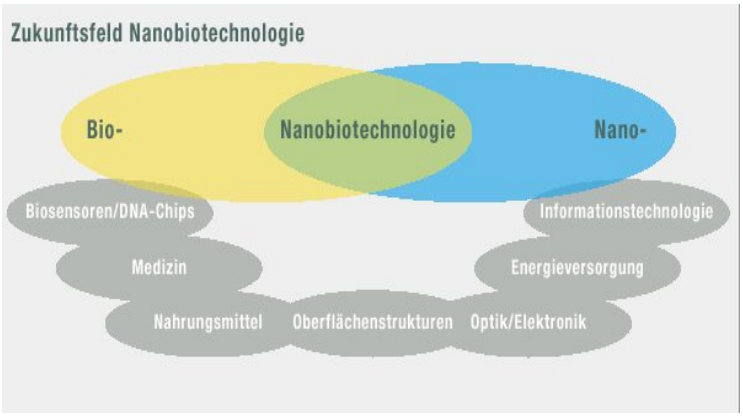


Abbildung 4.8: Anwendungsgebiete der Nanobiotechnologie

In diesem interdisziplinären Gebiet geht es um Forschung und Entwicklung auf der Schnittfläche von Biotechnologie und Nanotechnologie. Die Biotechnologie umfasst die biologische, medizinische und pharmazeutische Forschung. Die Nanotechnologie stellt die hierfür notwendigen Instrumente und Verfahren bereit, die einen Blick in die Welt der Nanometer und damit ein größeres Verständnis der in diesem Bereich vorkommenden Phänomene ermöglicht.

Um nanobiotechnologisches Wissen in neue Produkte, Verfahren und Dienstleistungen umsetzen zu können, macht sich die Nanobiotechnologie den Aufbau und die Organisation funktioneller Einheiten nach biologischem Vorbild zu nutze - jede Zelle eines lebenden Wesens ist letztendlich nichts anderes als ein Nanoassembler, eine sich selbst replizierende, molekulare Maschine im nanoskaligen Maßstab. Sie verwendet atomare und molekulare Bauteile, um daraus sowohl Kopien ihrer selbst als auch komplexe Biomoleküle wie beispielsweise Enzyme, Hormone oder Proteine zu produzieren, um zu innovativen Anwendungen in unterschiedlichsten Technologiebereichen zu gelangen.

Für die Wissenschaftler wird es auch zukünftig leichter sein, bereits bestehende Modelle aus der Natur zu übernehmen, als immerzu neue erfinden zu müssen. Denn eines ist sicher, die Natur hatte etwa 400 Millionen Jahre Zeit, sich zu entwickeln und die Evolution hat mit Sicherheit die raffiniertesten Systeme und hochkomplexe Prozesse und Mechanismen bereits hervorgebracht.

Dieser neue Forschungszweig schlägt die Brücke zwischen der unbelebten und belebten Natur und zielt darauf ab, biologische Funktionseinheiten in grundlegender Hinsicht zu verstehen sowie funktionale Bausteine im Nanometermaßstab unter Einbeziehung technischer Materialien, Schnittstellen und Grenzflächen kontrolliert zu erzeugen.

„Die Nanobiotechnologie ist in der Regel durch folgende Aspekte charakterisiert:

- Nanoskaligkeit (in mindestens zwei Dimensionen, d.h. keine einfache, nm -dicke Schicht) spielt für die Anwendung eine funktionstragende Rolle (die Funktion ist an Nanoskaligkeit oder die molekulare Struktur gebunden)
- Biokomponente ist Bestandteil der Anwendung
- Potenzial zum Maßschneidern der funktionellen Einheiten oder zur Kontrolle bzw. für eine Ansteuerung auf der Nanoskala ist gegeben (technologischer Aspekt)“ [MWev 02].

Eine weitere Untergliederung wird in [VWag 04] vorgeschlagen. Es wird der Bereich, in dem Biomoleküle zur Entwicklung leistungsfähiger Verfahren und technischer Systeme nutzbar gemacht werden, als **Bio2Nano** bezeichnet und der Einsatz der

Nanotechnologie zur Analyse oder Manipulation von Biomolekülen als **Nano2Bio**. Dieser Forschungsbereich ist vor allem darauf ausgerichtet, den nanoskaligen Bereich für Verfahren innerhalb der Biotechnologie und der *Life-Sciences* zu erschließen.

Die Nutzung der Nanobiotechnologie mit dem Kürzel „Bio2Nano“ könnte künftig in den Bereichen Informations- und Kommunikationstechnologie, der Energie- und Umwelttechnik, etc. für technische Anwendungen sorgen.

Die Nanobiotechnologie stellt also eine neue Wissenschaftsdisziplin dar, die wegen ihres besonderen Querschnittscharakters schon zum gegenwärtigen Zeitpunkt industriell relevant ist. Zwar ist ein Großteil dieses Technologiefeldes noch von Grundlagenforschung geprägt, dennoch liegen bereits kurz- und mittelfristige Anwendungsoptionen mit ersten wirtschaftlichen Umsetzungen, beispielsweise in der Medizin, der Automobilindustrie oder im Pharmabereich, vor.

Dank der Nanobiotechnologie entstehen substanziell neue Einblicke in die Funktion biologischer Systeme. Gleichzeitig wird sie zur Gestaltung einer völlig neuen Klasse von miniaturisierten Geräten und Systemen führen.

4.3.1 Nanobiotechnologie in der Medizin

Die Nanobiotechnologie steht heute erst am Anfang ihrer Entwicklung. Dennoch ist absehbar, dass sie vor allem im Bereich der Medizin eine große Zukunft haben wird.

Grob können wir diesen Teilbereich der Nanobiotechnologie in drei Anwendungsfelder - Forschung, Diagnose und Therapie - gliedern.

Die Nanobiotechnologie wird die Medizin voraussichtlich in den nächsten 20 bis 30 Jahren deutlich verändern, sowohl in der medizinischen Forschung, in der Diagnose wie auch in der Therapie. Diagnosen können einerseits im Frühstadium einer

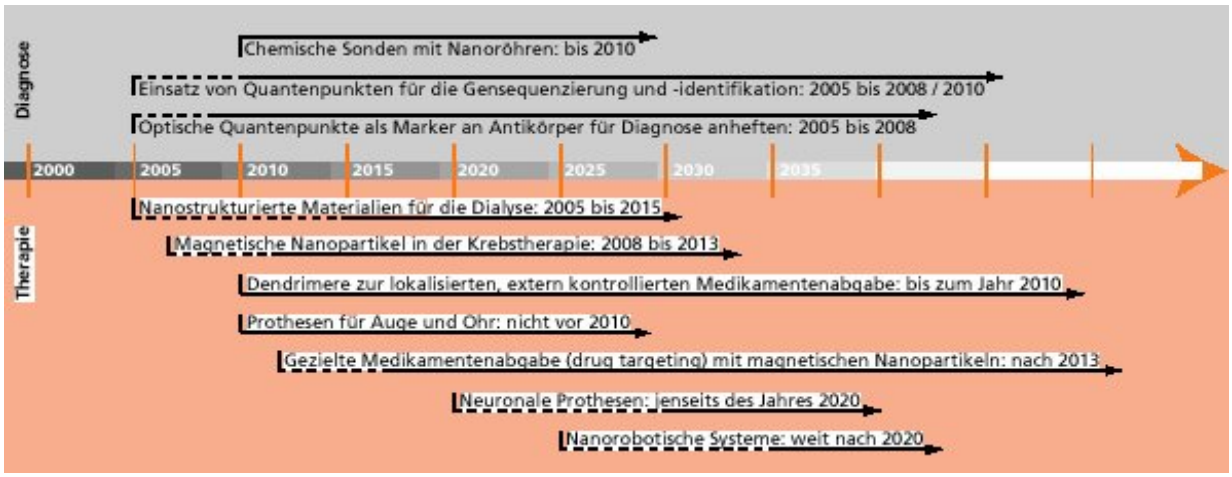


Abbildung 4.9: Anwendungsfelder der Nanobiotechnologie in der Medizin

Krankheit durchgeführt werden, andererseits liefern sie spezifischere und genauere Resultate.

Nanobasierte Therapien werden neue schonendere Therapiemöglichkeiten eröffnen, werden wirksamer sein als konventionelle Therapien und weniger Nebenwirkungen aufweisen. Vor allem bei Krebs, aber auch bei viralen Erkrankungen und anderen Krankheiten sind erhebliche Fortschritte zu erwarten.

Die Nanobiotechnologie stellt der Medizin eine bunte Palette neuer Instrumente und Verfahren in Aussicht. Welche sich endgültig durchsetzen werden, ist zurzeit noch fragwürdig. Während die Bereiche Forschung und Diagnose schon relativ bald von

den neuen Möglichkeiten profitieren, sind die Fachleute skeptischer, wenn es um den Einsatz der Nanobiotechnologie in der Therapie geht.

Verglichen mit der Forschung und Diagnose wird man sich bei der Krankheitsbehandlung - wie beispielsweise virale und bakterielle Infektionen, Autoimmun- und Stoffwechselkrankheiten und Gehirnerkrankungen - zehn bis zwanzig Jahre länger gedulden müssen,

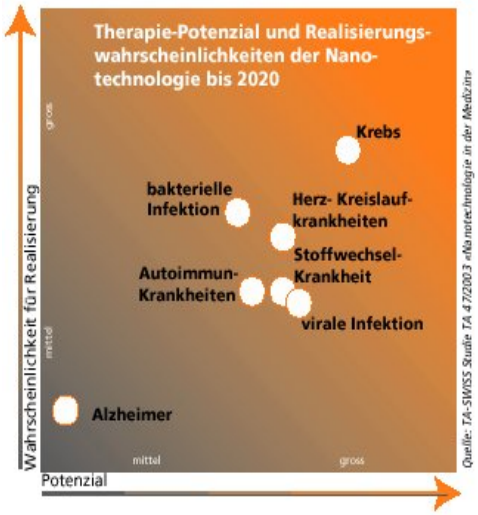


Abbildung 4.10: Therapiepotenziale der Nanotechnologie

bis die Nanobiotechnologie sich etabliert haben wird (Abbildung 4.10).

Weitere mögliche Anwendungsgebiete der Nanotechnologie im Bereich der Medizin werden im Kapitel 5.4 beschrieben.

4.3.2 Nanobiotechnologie in der Automobilindustrie

Das Auto nimmt in Deutschland sowohl in wirtschaftlicher und technologischer als auch in gesellschaftlicher Hinsicht eine herausragende Stellung ein.

Die Automobilindustrie gehört in Deutschland zu den wichtigsten Wirtschaftsfaktoren, sie beeinflusst maßgeblich die Entwicklung der gesamten Volkswirtschaft. Sie ist damit Motor und – auch in schwierigen konjunkturellen Zeiten – Stabilisator der deutschen Volkswirtschaft.

Die Automobilindustrie erwirtschaftet 20 Prozent des Bruttoinlandsproduktes, jeder vierte Steuereuro, jeder sechste Arbeitsplatz hängt an der Automobilindustrie. Entwicklung, Produktion, Vertrieb und Nutzung des Automobils tragen entscheidend zur Entstehung von Einkommen und Beschäftigung in Deutschland bei.

Dank der deutschen Automobilbranche – mit einem Jahresumsatz von 208 Milliarden Euro in 2003 und 773000 direkt Beschäftigten – ist Deutschland nach den USA und Japan die drittgrößte automobilproduzierende Nation [11].

Damit etabliert sich die Automobilindustrie in Deutschland zum Schrittmacher für das nächste Jahrzehnt. In der Fahrzeugbranche steckt noch ein gigantisches Marktpotenzial, welches zu nutzen gilt. Dafür sind zwei Trends verantwortlich, einerseits schafft eine Vielzahl neuer Fahrzeugkonzepte und Technologien die Basis für einen zusätzlichen Umsatz rund um intelligente Mobilitätslösungen. Andererseits wächst der Automobilmarkt auf Grund des Wunsches nach kundenspezifischen Lösungen und der weiterhin steigenden Bedürfnisse nach individueller Mobilität kontinuierlich. Ständig steigende Anforderungen an die Kraftfahrzeuge hinsichtlich Emissionen, Verbrauch, Sicherheit und Komfort bedingen immer komplexere

Systeme, die in der Regel aus einer Kombination von Mechanik und Elektronik bestehen. Wurden solche Systeme in der Vergangenheit bisher meist noch getrennt nach elektronischen und mechanischen Systemen entwickelt, steht heutzutage immer stärker der elektrische, elektronische und softwaretechnische Ansatz im Vordergrund. Bei der Verbindung der einzelnen Elektronikkomponenten sorgen Sensoren, Mikroreaktoren, Bussysteme, Betriebssysteme und Softwarelösungen, die intelligent miteinander verknüpft sind, für einen reibungslosen Ablauf.

Moderne Fahrzeuge bieten dem Fahrer und den Mitfahrern heute eine Vielzahl neuer Dienste an. Diese beinhalten Aspekte der Fahrerunterstützung, wie z.B. Auskünfte über den Fahrzeugzustand und Navigation, Elemente der Information und Unterhaltung, sowie Büro-Anwendungen, durch die das Fahrzeug zu einem mobilen Arbeitsplatz wird.

Derartige Systeme befinden sich derzeit in einer schnellen Weiterentwicklung.

Der wertmäßige Anteil der Elektronik im Automobil soll bis zum Jahr 2010 zwischen 35 und 50 Prozent liegen. Bis zu sechs Steuergeräte und mehr als 100 Sensoren sind bereits heute im modernen Automobil integriert.

System	Abb.	Sensors			
Distronic	DTR	3	Common-rail diesel injection	CDI	11
Electronic transmission control	EGS	9	Automatic climate control	KLA	13
Roof unit	DBE	7	Active body control	ABC	12
Automatic brake control	ABS	4	Tire pressure monitoring	RDK	11
Power lock	ZV	3	Electronic stability programme	ESP	14
Dynamic light regulation	LWR	6	Parktronic system	PTS	12

Abbildung 4.11: Sensoren im modernen Automobil

Fahrzeugsensoren bilden die Basis der intelligenten Automobile, hierbei kommt der Drucksensorik schon seit langem eine besondere Bedeutung innerhalb der Fahrzeugsensorik zu. Anwendungsfelder im Automobil sind der Luftdruck, der Ansaug- und Abgastrakt, der Kraftstofftank, Brems- und Hydraulikflüssigkeitsdruck, Radluftdruck und Klimaanlagensysteme.

Die Elektronik und Software gewinnen heute bei der technischen Weiterentwicklung der Fahrzeuge immer mehr an Bedeutung. Ohne sie gebe es keinen "Quantensprung" in der Sicherheitstechnologie und keine Fortschritte bei der Verbrauchs- und Emissionsreduzierung.

Nanomaterialien im Auto

All diese Entwicklungen am Fahrzeug sorgen für eine hohe Innovationsdynamik in der Automobilindustrie. Ursache dafür ist zum einen der permanente Kosten- und Wettbewerbsdruck, der auf alle Unternehmen – Automobil- und Zulieferindustrie - einwirkt. Daneben steigen aber auch die Anforderungen der Kunden an Sicherheit, Komfort und Mobilität. Einen weiteren Einfluss üben der verstärkte Umweltschutz

bezüglich der Umweltbelastung (Stickstoff, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Kohlendioxid und Rußpartikel), die Verknappung der Rohstoffe und die strenger werdende Gesetzgebung in vielen Ländern aus.

All diese Faktoren führen zu immer neuen Entwicklungen im Automobil. Autos werden in den nächsten zehn Jahren ca. 30 % leiser, der Verbrauch wird um 15 % sinken und der Ausstoß an Schadstoffen wird dank neuer Motoren und Katalysatoren nur noch 1/1000 dessen betragen, was noch heute Stand der Technik ist.

Um diesen genannten Forderungen gerecht zu werden, wird im Automobilbau

der Zukunft eine breite Palette nanotechnologischer Entwicklungen – sogenannte Funktionswerkstoffe - Einzug halten, die erforderlich sind, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit dieser für die deutsche Volkswirtschaft so wichtigen Branche zu erhalten. Es werden sich Veränderungen – dank der Nanotechnologie - von der Antriebstechnik über den Innenbereich bis zur Karosserie ergeben.

Aus diesem Grund wurden in einem Workshop Vertreter deutscher Automobilhersteller und Zulieferer zu einer Priorisierung der wirtschaftlichen und deren Anwendungsfelder im Automobilbau

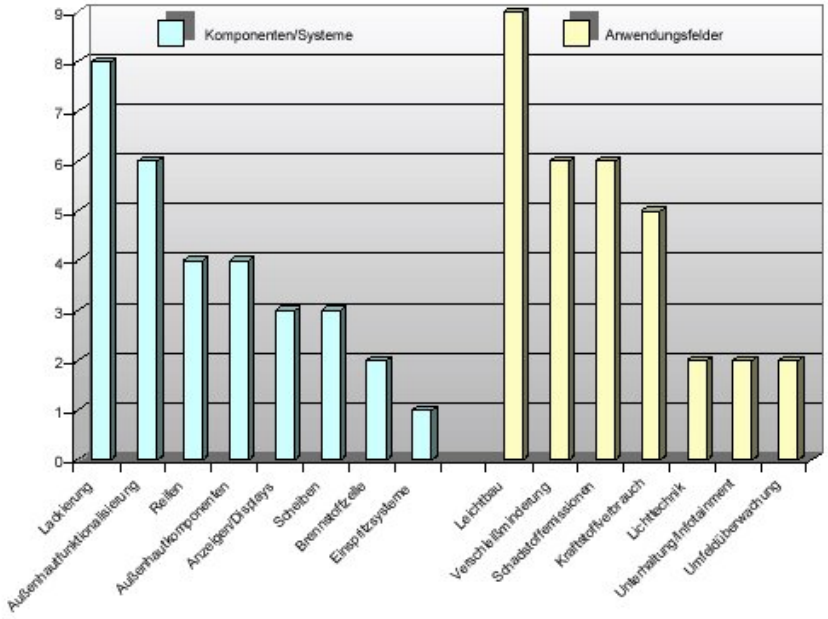


Abbildung 4.12: Priorisierung nanotechnologischer Komponenten/Systeme

Relevanz verschiedener Nanotechnologieentwicklungen bis zum Jahr 2006 befragt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 4.12 zusammengefasst [WLut 04].

Entsprechend aufmerksam wird beobachtet, was sich weltweit in der Branche verändert und welche Entwicklungen in Bezug auf Antriebskonzept, Sicherheit, Material, Ausstattung, Innenraum, Elektronik und Zulieferer den Automobilbau prägen.

Nanotechnologie wird als die neue zukünftige Querschnittstechnologie für die Automobilindustrie betrachtet. Sie revolutioniert die herkömmliche Werkstofftechnik; es entsteht eine völlig neue Klasse von Werkstoffen, die uns beispielsweise auf der Basis von metallischen Eigenschaften helfen, neue technische Funktionen im Automobil zu integrieren. Durch das Einbringen von Nano-Partikeln, oder –Flocken, -Fasern, -Plättchen, -Röhren in metallische, keramische oder halbleitende Werkstoffe entstehen Nanokomposite, bzw. durch Aufbringen auf herkömmliche Werkstoffe Nanostrukturen mit überlegenen neuen Funktionalitäten für den Automobilbau.

Insgesamt erhofft man sich von der Nanotechnologie Verbesserungen in vielen Bereichen, so von der Ökologie über die Sicherheit bis hin zum Komfort.

Nanotechnologie im Auto ist bereits heute bei einigen Anwendungen zur Realität geworden und wird in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. Angesichts der vielfältigen Entwicklungsbemühungen auch in angrenzenden Branchen, z.B. in der Luft- und Raumfahrt, im Maschinen- und Anlagenbau, in der Chemie oder der Elektronik, ist zu erwarten, dass ausgeprägte Spin-off-Effekte vom Automobilbau in andere Branchen hineinwirken. Darüber hinaus wird nanotechnologische Kompetenz in der Automobilindustrie der Zukunft zu einer Voraussetzung gehören, die zum Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit in dieser Branche unbedingt notwendig ist.

Das Spektrum nanotechnologischer Entwicklungen im Automobilbau (Abbildung 4.13) reicht von bereits heute eingesetzten Komponenten,

wie:

- Rußpartikel mit einer verästelteten Struktur als Füllstoff im Autoreifen
- (Reifen wird griffiger ohne das der Rollwiderstand zunimmt) oder eine
- kratzfeste und hochglänzende lackierte Oberfläche die sogar das Auspolieren kleiner Kratzer zulässt.

Abbildung 4.13: Nanotechnologische Komponenten im Automobil

weiter über konkrete Entwicklungsbemühungen:

- beschlagfreie Scheiben durch hydrophil beschichtete Oberflächen – *Lotus Effekt*
- Entspiegelung von Oberflächen
- Nutzung von vollelektrischen Antrieben auf der Basis von Brennstoffzellen. (Durch die Verwendung eines Oxidpulvers für die Zellenbeschichtung kann die Dichte der Zelle reduziert werden, wodurch die Betriebstemperatur wesentlich sinkt.)

bis hin zu visionären Produktideen:

- Rundumverglasung des Fahrzeuges durch transparente Werkstoffe mit geringer Dichte und hoher Festigkeit sowie einer hohen Farb- und Witterungsbeständigkeit

Ein wichtiges übergreifendes Ziel bei der Entwicklung der Automobile der Zukunft ist die Erhöhung der Energieeffizienz und damit die Einsparung von Kraftstoff und die Reduzierung der Abgasemissionen, denn wie sparsam ein Fahrzeug wirklich ist, zeigt in erster Linie der absolute Treibstoffverbrauch oder die CO_2-Emissionen pro gefahrenem Kilometer. Diese Forderungen sollen durch Zugabe von Nanopartikel zum Kraftstoff, den Einsatz von Abgas-Katalysatoren mit nanoskaligen Edelmetallpartikeln sowie durch eine nanoskalige Beschichtung der Zylinderwände im Motor erreicht werden.

Eine weitere Möglichkeit bietet der Einsatz der hybriden Grätzel Solarzelle in einem Wasserstoff Automobil als Energieträger der Zukunft.

4.3.3 Nanobiotechnologie in der pharmazeutischen Industrie

Während viele Branchen über eine Sättigung des Marktes klagen und mit der weltweiten Wirtschaftsflaute kämpfen, ist der Gesundheitssektor ein Wachstumsmarkt – weltweit insbesondere in Deutschland und den USA.

Seit Anfang der 90er Jahre legt die Branche im Vergleich zur Gesamtwirtschaft jedes Jahr überproportional zu.

Dafür gibt es mehrere Gründe: Spätestens 2050 steht die Alterspyramide Kopf. Mit zunehmender Lebenserwartung wird die Zahl der 80 -Jährigen und Älteren erheblich ansteigen. Heute leben 3,2 Millionen Personen dieses Alters in Deutschland, dies entspricht 4% der Bevölkerung. Im Jahre 2050 werden etwa 9,1 Millionen oder 12% der Bevölkerung dieses Alter erreichen und 36 % der Bevölkerung wird älter als 60 Jahre sein.

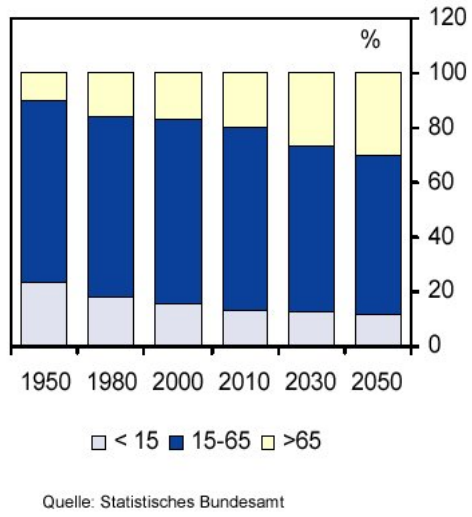


Abbildung 4.14: Bevölkerung Deutschlands bis 2050

Mit dem Alter nimmt auch die Nachfrage nach medizinischer Leistung zu. Zwischen dem 50. und 80. Lebensjahr steigt die medikamentöse Therapie um das Vierfache.

Niemals zuvor hatte unsere Gesundheit einen so hohen Stellenwert wie heute. Für die deutsche Bevölkerung rangiert die Gesundheit heute schon ganz oben auf der Werteskala. 80 Prozent der Bundesbürger stuft die eigene Gesundheit als „sehr wichtig“ ein.

Die Gesundheit ist für jeden einzelnen Menschen wie auch für die Gesellschaft von einer zentralen Bedeutung, denn Medizin und Gesundheit sind eng miteinander verbunden. Das Auftreten neuer Krankheiten, ein zunehmendes Gesundheitsbewusstsein mit einem immer höheren Lebensalter der Bevölkerung und Fragen der Finanzierbarkeit von Gesundheitsleistungen haben das Gesundheitswesen in den letzten Jahren zunehmend in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses gerückt.

Die überproportional gestiegenen Gesundheitsausgaben (239,7 Milliarden Euro und damit 11,3 Prozent des Bruttoinlandsprodukts - laut Statistisches Bundesamt in Wiesbaden am 15.03.2005) im Jahr 2003 im Vergleich zu den Wachstumsraten der Volkswirtschaft sowie die immer umfangreicher gewordenen gesetzlichen

Anforderungen an medizinische Dienstleistungen und Medizinprodukte haben zu einem zunehmenden Kostendruck im Gesundheitswesen sowie in der pharmazeutischen Industrie geführt [SEch 05], [12].

Die wichtigsten Herausforderungen pharmazeutischer und biopharmazeutischer Unternehmen sind neben dem hohen Konkurrenzdruck ein zeitlich begrenzter Patentschutz, nach dessen Ablauf Marktanteile und Rentabilität bedroht sind. Vor allem wenn man berücksichtigt, dass die Forschung nach einem neuen Medikament von der ersten Synthese des Wirkstoffes bis zur Zulassung eines Arzneimittels heute zwischen 8 und 10 Jahren beträgt und Kosten von ca. 800 Millionen Euro verursacht.

Zahlreiche technologische Neuentwicklungen haben die Pharmaindustrie in den letzten Jahren entscheidende Schritte voran gebracht – dazu zählen zum Beispiel miniaturisierte Instrumente und Implantate (Cochlear- und Retina Implantat [13]),

DNA-Chips für die Diagnostik genauso wie bildgebende Verfahren oder Biomaterialien, die als Ersatzmaterialien in der Humanmedizin Anwendung finden. Dies basiert zweifellos auf der Anwendung aktuellster natur- und ingenieurwissenschaftlicher Methoden und Kenntnisse der Nanobiotechnologie.

Der vorläufige Höhepunkt in der Entwicklung der Biotechnologie ist ihre Verbindung mit Halbleitertechnologien auf der Nanometerskala, wie mikroelektromechanische Systeme, die in die Entwicklung von Biochips einfließen. Mit solchen Biochips bieten sich der Pharmaindustrie modernste Instrumente für die schnellere Erforschung von Wirkstoffen, für genauere Diagnosen und das Verstehen biologischer Mechanismen. So entwickelte unter anderem Infineon eine „Biochip-Systemlösung, welche die Entwicklung von Medikamenten erheblich beschleunigen soll. Herzstück ist ein Biochip, auf dem ein ganzes „Labor in Miniaturformat“ untergebracht wurde. Optisch analysiert dieser auf nur einem Quadratzentimeter zeitgleich die Reaktion von bis zu 400 bekannten Genen auf einen bestimmten Wirkstoff“ [14].

Siemens entwickelte in Zusammenarbeit mit weiteren vier Partnern einen Biochip für die gleichzeitige Analyse von 128 Proben des Erbmoleküls DNS [15].

Abbildung 4.15: Biochip für die Massenanalyse von Erbmolekülen

Schwerpunkt der Nanobiotechnologie in Verbindung mit den aktuellen Forschungsergebnissen aus der Nanotechnologie ist die Entwicklung von neuen Therapeutika und Diagnostika, auch unter pharmakogenetischen Aspekten (Erbeigenschaften des Menschen), die die individuelle genetische Konstitution des Patienten und damit die Verträglichkeit des Wirkstoffs berücksichtigen.

Damit können die Risiken für den einzelnen Menschen auf ein Minimum verringert und gleichzeitig die Chancen für eine bessere medizinische Versorgung in der Zukunft dank neuartiger Ansätze in der Genetik deutlich verbessert werden.

So werden die Ärzte mit Hilfe der Pharmakogenetik voraussichtlich in einigen Jahren in der Lage sein, auf Grund von genetischen Markern die Wirksamkeit und/oder Verträglichkeit eines Arzneimittels bei einem bestimmten Patienten präziser

vorherzusagen. Das Ziel lautet „individuelle Medizin“, jedem die für seine Gene „maßgeschneiderten Medikamente“ verabreichen zu können.

„So sprechen zum Beispiel Menschen mit einer bestimmten Mutation im Rezeptor für den Beta-Agonisten Salbutamol nicht auf die Pharmakotherapie (Prüfung der genetischen Anlagen) an. Tests können helfen, jene Patienten zu identifizieren, die Medikamente zum Beispiel langsam metabolisieren, weil sie Mutationen in den Schlüsselenzymen CYP2D6 und CYP2C19 haben“ [16].

Mit Hilfe der Genetik wird die Medizin in Zukunft eine exaktere Unterscheidung von Erkrankungen – wie Herz-Kreislaufleiden, Diabetes oder Krebs - mit verschiedenen Ursachen treffen können und damit die Voraussetzungen für eine gezieltere und wirksamere Behandlung schaffen.

Am 21. Oktober 2004 wurde die erste Rohfassung des menschlichen *Genoms* aus dem Jahre 2001 von den 20 am Humangenom-Projekt beteiligten Forschungszentren aus sechs Ländern präzisiert. Sie veröffentlichten im britischen Fachjournal "Nature - Finishing the euchromatic sequence of the human genome " (Bd. 431, S. 931-945) eine hochgenaue Version des menschlichen Erbgutes.

So verfügt der Mensch nur über etwa 20.000 bis 25.000 Protein-kodierende Gene und nicht 30.000 bis 40.000, wie die Forscher ursprünglich noch im Jahr 2001 aus der Rohfassung des menschlichen Genoms angenommen hatten [17].

Mehr als 99 Prozent und damit für die allermeisten Lebensprozesse verantwortlichen Erbsubstanzen des Menschen sind jetzt mit einer bisher unvorstellbar hohen Genauigkeit entziffert wurden. Im Gegensatz zur Rohfassung aus dem Jahr 2001 mit ca. 150.000 Lücken sind die Sequenzen der 24 menschlichen Chromosomen jetzt nur noch an 341 Stellen unterbrochen.

Abbildung 4.16: Ausschnitt der Doppelhelix-Struktur der menschlichen DNA

Die Zahl der chemischen Bausteine des Erbmoleküls DNA beziffert das Konsortium nun auf 3,08 Milliarden. Davon sind 2,88 Milliarden mit bislang unerreichter Genauigkeit in den frei zugänglichen Datenbanken des öffentlich finanzierten Genomprojektes gespeichert.

Dieses Projekt wurde 1990 von der "Human Genom Organisation" (HUGO) ins Leben gerufen, einem internationalen Konsortium bestehend aus 20 internationalen Forschungszentren.

Das Ziel dieser internationalen Organisation ist es, das gesamte menschliche Genom - etwa 3 Milliarden Bausteine des menschlichen Erbmaterials - zu entschlüsseln und jedes darin enthaltene Gen zu identifizieren.

Die Ergebnisse sollen das Verständnis der Erbkrankheiten erleichtern und wenn möglich neue Wege der Diagnostik und der Therapie aufzeigen.

Das deutsche DHG-Projekt stellte bis zum Juni 2004 täglich seine Forschungsergebnisse frei verfügbar ins Internet (www.dhgp.de), danach wurden die Aktivitäten auf diesem Gebiet beendet. Zukünftig werden die drei deutschen

Forschergruppen: das Institut für Molekulare Biotechnologie in Jena, das Max-Planck-Institut (MPI) für molekulare Genetik in Berlin und die Gesellschaft für Biotechnologische Forschung in Braunschweig im „nationalen Genomforschungsnetz: Krankheitsbekämpfung durch Genomforschung“ gebündelt sein.

Diese weitgehend vollständige Entschlüsselung des humanen Genoms hat in jüngster Zeit zu bedeutenden Fortschritten in der genetischen Forschung geführt. Es ist zu erwarten, dass die Fortschritte in der sogenannten Pharmakogenomik es eines Tages erlauben werden, durch die Entschlüsselung von heute noch nicht bekannten molekularen Mechanismen Medikamente für derzeit nicht oder unzureichend behandelbare Erkrankungen zu entwickeln.

Während vor einigen Jahren lediglich wenige neue Medikamente und Therapien aus den Biotech-Laboratorien stammten, wird dieser Anteil bald zwei Drittel aller neuen Medikamente und Therapien ausmachen. Schon heute stammen zwei der 10 weltweit umsatzstärksten Medikamente aus den Biotech-Laboratorien.

Der Einfluss nanotechnologischer Erkenntnisse auf verkaufbare Produkte besteht schon seit Jahren in den Bereichen Elektronik, Datenspeicherung, funktionelle Schichten oder Präzisionsoptiken. Prozentual gesehen sind in den letzten Jahren nanotechnologische Erkenntnisse jedoch zunehmend stärker in die Felder der Biologie, Chemie, Pharmazie, Orthopädie und Medizintechnik eingeflossen als in diese angestammten Bereiche.

Bereits heute sind deutliche Einflüsse nanotechnologischer Erkenntnisse auf nationalen und internationalen Milliardenmärkten bei der Pharmakaherstellung, medizinischen Diagnostik, Analytik oder bei chemischen und biologischen Katalysatoroberflächen zu erkennen.

Speziell in den Bereichen Pharmakascreening, Biochips und bei der analytischen Unterstützung industrieller Entwicklungen besteht ein deutlich wachsendes Industrieinteresse.

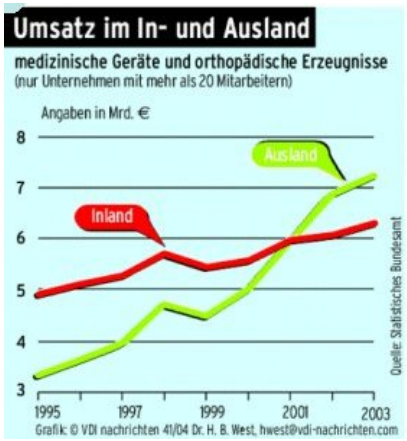


Abbildung 4.17: Internationaler Umsatz an medizinischen Geräten

4.3.4 Anwendungsbereiche von Biochips

Die Hauptanwendungsbereiche von Biochips liegen in der Medizintechnik und in der Pharma-Industrie (z.B. Krebsdiagnostik). Hier liegt ein Haupteinsatzbereich vor allem in Genexpressionsstudien. Dabei wird die Genaktivität in einem bestimmten Gewebe angezeigt. Zum Beispiel kann das Expressionsprofil von gesundem und krankem Gewebe verglichen werden. Die vergleichende Analyse von zwei verschiedenen Proben ist mit einem Array möglich. Nach Isolation der mRNA aus den zu

untersuchenden Geweben und Umwandlung in cDNA werden die Nukleinsäuren der beiden zu vergleichenden Proben mit verschiedenen Fluorophoren markiert. Dasselbe Mikroarray wird dann simultan mit beiden Proben hybridisiert.

Daraus ergibt sich ein charakteristisches, verschiedenfarbig fluoreszierendes Muster. Nach der Auswertung können so die Gene, die nur beim erkrankten Gewebe aktiv sind, ermittelt werden. Expressionsprofile gesunder und kranker Gewebeproben können somit Auskunft geben über veränderte Genaktivitäten bei Krankheiten wie Krebs, Alzheimer oder Bluthochdruck und mögliche Ansatzpunkte für die Therapie zeigen.

Außerdem können Biochips auch in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden, zum Beispiel für den Nachweis gentechnisch veränderter Organismen in Lebensmitteln. Weiterhin können diese Chips in der Umwelttechnik den Nachweis von Kontaminationen durch bestimmte Keime erbringen oder sie können zum Aufspüren von biologischen und chemischen Kampfstoffen dienen.

Derzeit gibt es in Abhängigkeit der auf der Oberfläche aufgebrachten Molekülart folgende Arten von Biochips: **DNA-Chip**, **Protein-Chip**, **Zell-Chip**, **Lab on a Chip**.

4.3.4.1 DNA – Chip

DNA-Chips spielen eine zunehmende Rolle als Werkzeuge in der Medizin, der Biochemie und der Pharmaindustrie. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem kleinen festen Probeträger (z.B. Nylon-/ Nitrozellulosemembranen oder Glasplättchen), auf den eine Anordnung synthetischer DNA-Sequenzen, die die Gene repräsentieren, in einem bestimmten Raster (Array) aufgebracht werden, so dass sich gleichförmige Reihen und Spalten ergeben.

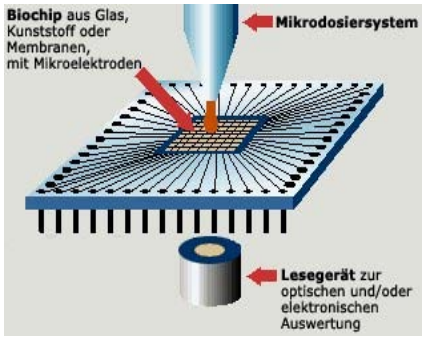


Abbildung 4.18: Testsystem für DNA, RNA und Proteine

Bei hochintegrierten DNA-Chips können mehr als 10.000 verschiedene bekannte Gene aus verschiedenen Geweben gleichzeitig analysiert werden.

Das Prinzip besteht darin, alle auf dem DNA-Chip befindlichen Genproben gleichzeitig mit einer Nukleinsäureprobe zu hybridisieren (Watson Crick-Base-Pairing).

Dazu wird in erster Linie fluoreszenzmarkierte cDNA eingesetzt, die durch reverse Transkription von RNA aus der zu untersuchenden Probe gewonnen wird. Das parallele Hybridisieren einer Nukleinsäureprobe mit einer Vielzahl von komplementären Genproben auf einem DNA-Chip führt zu einem charakteristischen Hybridisierungsmuster mit entsprechender Hybridisierungsintensität. Die DNA-Chiptechnologie bietet also die Möglichkeit, eine sehr große Zahl von Genen gleichzeitig zu untersuchen, und liefert so ein umfassendes und zugleich detailliertes Bild der Veränderungen im Genexpressionsmuster, wodurch komplexe regulatorische Zusammenhänge entschlüsselt werden können. [DSchoMDel].

Arten der Mikroarrays

Die auf der Matrix an einen bestimmten, d.h. bekannten Ort immobilisierte DNA bezeichnet man als Proben-DNA. Die zu untersuchende markierte cDNA aus dem Experiment/Kontroll-Gewebe wird als Target-DNA bezeichnet. Die Target DNA wird über den Ort der Hybridisierung auf dem Chip identifiziert und anhand der Floureszenzstärke ggf. quantifiziert.

Nach der immobilisierten Proben-DNA unterscheidet man zwischen

Format I und Format II Mikroarrays.

Bei den Format I Arrays werden cDNA (500 bis 5000 Basen lang) als Proben-DNA

außerhalb des Chips synthetisiert (Ex-situ-Verfahren) und anschließend in definierten Mengen auf den Chip aufgebracht. Das Aufbringen der Moleküle erfolgt mit speziellen Geräten, den sog. Spottern oder Nanoplottern, welche die Lösungen im Pico- bzw. Nano-Liter Maßstab auf die Chipoberfläche auftragen. Beim Spotting unterscheidet man zwischen Kontaktverfahren und kontaktlosem Verfahren.

Beim Kontaktverfahren taucht ein Stempel oder eine Nadel (Pin) in die zu spottende Lösung ein und druckt auf das Trägermaterial. Dabei berührt die Spitze der Nadel die Oberfläche des Chips. Beim kontaktlosen Verfahren berührt die Nadel des Spotters die Oberfläche nicht. Die Flüssigkeit wird, ähnlich dem Tintenstrahldrucken, durch verschiedene Verfahren auf die Chipoberfläche aufgesprüht (z. B. piezoelektrisches Spotting). Vor allem für die Herstellung von Protein-Chips ist ein kontaktloses Verfahren zu bevorzugen, um beim Spotten nicht die Struktur der Proteine zu beschädigen.

Bei den Format II Arrays werden kürzere Sequenzen benutzt, hier werden Oligonucleotide (20 bis 25 Basen lang) oder Peptid-Nucleinsäuren (PNA) als Proben-DNA direkt auf dem Chip synthetisiert (In-situ-Verfahren) oder konventionell erst synthetisiert und dann immobilisiert. Im Gegensatz zu den cDNA-Array's wird ein Gen durch mehrere Oligonucleotide repräsentiert.

DNA-Chips können also eine Reihe von langwierigen und teuren diagnostischen Verfahren massiv vereinfachen und beschleunigen. Das Potenzial biologischer Sensoren kann verstärkt werden, indem Know-how aus der Mikro- und der Nanotechnik in die Sensorentwicklung einfließt. Durch die Übertragung der hochentwickelten DNA-Chiptechnologie auf die Bereiche Protein-Analytik, industrielle Produktion, Umweltanalytik und medizinische Diagnostik wird es künftig möglich sein, Krankheiten, Stoffeigenschaften und Prozesse einfach, schnell und preiswert zu analysieren. Dazu gehören z.B. Altern und Hormonstatus, frühe Diagnose von Erbkrankheiten, Krebs und Allergien, Medikamentenauswahl und Medikamentenmengen, Wirksamkeit von Kosmetika und Waschmitteln, Lebensmittelqualität, Umweltverschmutzungen, mikrobiologische Zusammensetzungen von Fermentationen, genetisches Potenzial von Produktionsstämmen, DNA-Methylierung, aber auch Zellentwicklung und -differenzierung.

Weiterführende Informationen sind unter „ Zusammenfassung cDNA-Microarray-Technologie“ und „BioDatenbanken“ zu finden [18].

4.3.4.2 Protein-Chip

Aufgrund der inhärenten Natur der Proteine stellt die Entwicklung und Herstellung von Protein-Arrays eine große Herausforderung für die Industrie dar.

Proteine stellen gegenüber der Nukleinsäure sehr instabile Moleküle dar, sie sind äußerst empfindlich gegenüber äußeren Bedingungen wie Temperatur, pH-Wert, Ionenstärke usw. Die Änderung der für das jeweilige *Protein* spezifischen optimalen Bedingungen führt häufig zu Denaturierung und damit zum Verlust der Aktivität des Proteins.

Es gibt viele Herausforderungen bei der Konstruktion eines funktionsfähigen Proteinchips wie:

- die Wahl einer geeigneten Oberflächenchemie, welche spezifisch die jeweiligen Proteine oder Antikörper an die Oberfläche bindet und somit ihre Struktur und ihre biologische Aktivität bewahrt
- das Identifizieren und Isolieren geeigneter Fängermoleküle, die mit dem gewünschten Protein eine Bindung eingehen
- die Entwicklung geeigneter Nachweisverfahren, um chipgebundene Protein-Ligand-Interaktionen zu messen

Zusammenfassend kann man sagen, dass an Protein-Chips weitaus höhere Anforderungen gestellt werden als an DNA-Chips. Das erklärt auch die Tatsache, dass bisher nur wenige Protein-Chips entwickelt wurden.

Die Forscher sehen aber schon heute eine riesige Bandbreite von Anwendungsmöglichkeiten für diese Protein-Chips - von der Grundlagenforschung, wie und an welches Molekül ein bestimmtes Protein bindet, bis hin zur Anwendung in der Medizin, an Hand der Proteinzusammensetzung unterscheiden zu können, ob es sich um gesunde oder kranke Zellen handelt.

So herrscht schon heute eine wachsende Nachfrage nach Geräten, mit denen Proteomanalysen [19] durchgeführt werden können. Denn sowohl Forscher, Pharma- und zunehmend auch Diagnostikunternehmen erhoffen sich durch die Proteomanalyse einen Effizienzschub beim Auffinden neuer Angriffspunkte für Medikamente, diagnostischer Marker und biologischer Schlüsselmoleküle. Den Grund dafür sehen sie darin, dass die Techniken der Proteomanalyse erstmals die Perspektive eröffnen, alle von der Zelle gebildeten Proteine – das Proteom – quantitativ auf einmal zu erfassen und durch das entsprechende Proteinmuster einen Fingerabdruck des physiologischen Zustandes der Zelle zu erhalten. Der Vergleich dieser individuellen Proteinmuster in kranken und gesunden Zellen ermöglicht es, die Schlüsselproteine aufzuspüren, die über Krankheit und Gesundheit entscheiden.

Einige Beispiele für derzeit im Stadium der Grundlagenforschung angesiedelte Proteinchips zeigen, dass die Entwicklung des Marktes für Proteomforschung bei weitem noch nicht abgeschlossen ist. Die weitere Entwicklung wird davon abhängen, ob pharmazeutische Unternehmen sich von Investitionen in die Proteomforschung einen return of investment versprechen sowie staatliche und europäische Fördergelder dafür bereitgestellt werden.

„Am Stuttgarter Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB entsteht ein neuartiger Proteinchip auf der Basis Protein bindender Silica-Nanopartikel. Die Oberfläche dieser winzigen Partikel, deren Durchmesser weniger als ein Zehntausendstel Millimeter beträgt, kann mit verschiedensten Fänger-Proteinen ausgestattet werden. Die so ausgestatteten Partikel werden dann in dünnen, gleichmäßigen Schichten auf Siliziumträger aufgebracht. Nach dem Kontakt mit einer Probe können die Chips mit Hilfe modernster Massenspektrometrie, der MALDI-TOF-Massenspektrometrie, analysiert werden. Die Kenntnis der Massen der gebundenen Proteine liefert einen direkten Hinweis auf ihre Identität. Bisher müssen die Proben für die MALDI-TOF-Massenspektrometrie in einem mehrstufigen Prozess

für die eigentliche Messung vorbereitet werden. Mit unseren Nanopartikeln können die Proteine erstmals direkt angereichert und gemessen werden, sagt Wissenschaftler Dr. Günter Tovar, Leiter der IGB-Arbeitsgruppe Biomimetische Grenzflächen. Gleichzeitig erreicht man mit Hilfe der Nanopartikel eine höhere Empfindlichkeit“ [20].

Das chinesische Unternehmen „HealthDigit“ hat mit einem Protein-Chip eine Analyse durchgeführt, die zehn Krebsarten im Anfangsstadium erkennen kann. Mittels dieses

Chips können innerhalb von zwei Stunden die ersten Ergebnisse geliefert werden. Nötig sei dafür ausschließlich ein Tropfen Blut des Patienten. Das Blut wird auf Proteine getestet, die in der frühen Krebsphase auftreten, noch bevor sich erste Krankheitssymptome zeigen. Der Protein-Chip ist nach Angaben des Unternehmens für Tumore in Organen wie Leber, Lunge, Prostata, Magen und Darm geeignet [Shan 02].

Forscher des Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie Itzehoe (ISIT), die zusammen mit Siemens AG Erlangen und Infineon Technologies München ein Labor in Chipgröße entwickelt haben, erhielten dafür den Zukunftspreis 2004. Auf dem fingernagelgroßen Chip sind Biomoleküle als „Fängermoleküle“ verankert, die Moleküle aus einer Lösung binden.

Mit diesem Chip können Analysegeräte hergestellt werden, die nicht größer als eine Scheckkarte sind und eine schnelle Diagnose von Patienten vor Ort oder Umweltgifte in Flüssen oder Seen erlauben.

Es könnte damit bei einer Blutuntersuchung DNA-Bausteine oder Proteine erkannt werden, mit dem vor Ort der Erreger der Lungenkrankheit Sars festgestellt werden könnte.

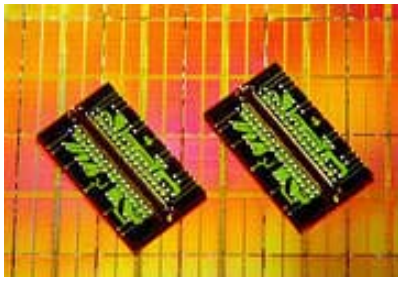


Abbildung 4.19: Labor in Chipgröße

Das Auswertesystem gibt diagnostische Informationen als elektrisches Signal aus und ist damit wesentlich schneller, robuster, einfacher und billiger als optische Verfahren [21].

Ausblick:

Für künftige Multiparameter-Chips in der Diagnostik, wo mehrere Parameter aus einer Probe parallel analysiert werden sollen, können Protein-Biochips ein wertvolles Testsystem darstellen.

Besonders bei der Abklärung von Indikationen, bei Fehlen eines eindeutigen Krankheitsbildes (wie unklare Infektionssymptomatik mit Fieber) oder auch bei Erkrankungen mit mehreren möglichen auslösenden Faktoren (wie reaktive Arthritiden, Autoimmunerkrankungen etc.) wären Multiparameter-Testsysteme sehr hilfreich. Alle relevanten diagnostischen Parameter können auf den Chip aufgebracht und parallel analysiert werden. Durch diese parallele Testung auf viele verschiedene Krankheitserreger kann auf aufwendige Einzeltests verzichtet werden. Die genaue Krankheitsursache könnte sehr viel schneller und kostengünstiger diagnostiziert und

der Patient sofort optimal behandelt werden. Der Einsatz in Krankenhauslabors, bei Laborärzten, aber auch in Arztpraxen zur „vor-Ort-Diagnose“ wäre denkbar [Diag 03].

4.3.4.3 Zell-Chips

Zu den jüngeren Entwicklungen der Biochiptechnologie zählen Zell- oder Gewebe-Chips.

Während Gen- bzw. DNA-Chips, mit denen das Expressionsmuster von Tausenden von mRNAs aus Geweben oder einzelnen Zellen routinemäßig auf einem einzigen Chip qualitativ und quantitativ analysiert werden kann, heute zum Stand der Technik gehören und sich in den letzten Jahren zu einer robusten und zuverlässigen Methode in der medizinischen und angewandten Forschung entwickelt haben, wird die Wirkung von Substanzen auf kranke und gesunde Zellen bisher noch oft von Hand untersucht.

Um dies zu automatisieren, wurden auf Zell-Chips schachbrettartig (Array) winzige Gewebeproben angeordnet. Mit verschiedenen Färbe- und Lichttechniken lässt sich dann detailliert in jeder Zelle beobachten, wie sich eine bestimmte Substanz etwa in ihrer Wirkung auf Nervengewebe und Darmschleimhaut unterscheidet. Automaten erkennen und ordnen die Färbungen auf den Hunderten von Testfeldern der Chips, mittels eines Computers werden anschließend diese Daten ausgewertet.

Ein Forscherteam der Universität Ulm präsentierte ein Mikroarray lebender Zellen auf mikro- und nanostrukturierten Oberflächen zur Detektion der direkten Zellantwort auf Einzelzellebene.

Der Einzelzell-Chip stellt einen neuen Typ von Zellkultur dar. Zellen aus beliebigem biologischem Material werden einzeln an definierten Positionen gehalten.

Bei einem mikrostrukturierten Trägermaterial, das in zellanziehende (zytophile) und zellabstoßende (zytophobe) Zonen unterteilt ist, werden die zytophilen Bereiche in nanometrischer Dimension weiter untergliedert. Diese Nanostrukturierung erfolgt derart, dass mit geeigneten Substanzen beladene Nanopartikel in den Mikrokompartimenten des Chips ortsfest positioniert werden, um den einzelnen Zellen „Anschluss“ zu bieten. Auf diese Weise, dass heißt durch Simulierung einer natürlichen Umgebung, gelingt die Individualisierung der Zellen, die eigentlich auf Zell-Zell-Kontakte angewiesen sind.
Sinn und Zweck dieser von Dr. Hinz und seiner Arbeitsgruppe entwickelten Konfiguration eines Mikroarrays lebender Zellen auf mikro- und nanostrukturierten Oberflächen ist die Möglichkeit, die Zellen individuell stimulieren zu können (mit beliebigen natürlichen oder nichtnatürlichen Reizen) und eine direkte, zeitlich auflösbare Zellantwort auf Einzelzellebene zu erhalten. Für die biologische und medizinische Forschung und Praxis hat dieses vielfältig einsetzbare System große Bedeutung. Die Detektion physiologischer Reaktionsweisen und daraus ableitbare statistisch relevante Aussagen, die sich in kurzer Zeit gewinnen lassen, schaffen die Voraussetzung zum Beispiel für eine effektive Wirkstoffentwicklung. Profitieren können von dem System, das die Beurteilung individueller Reaktionsmuster von Probanden und Patienten, aber auch von anderen lebenden Systemen, zum Beispiel Bakterien, ermöglicht, insbesondere die medizinische Diagnostik und die Individualisierung der Therapie. Darüber hinaus lassen sich weitere Fragestellungen der Biotechnologie wie etwa die Optimierung industriell genutzter Zellkulturen durch den Einzelzell-Chip einer Beantwortung zuführen.

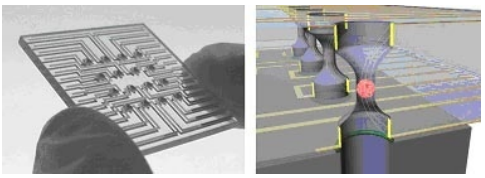


Abbildung 4.20: Einzelzell- und 3D-Gewebe-Mikrokapillar-Biochips für funktionelle Proteomik und

Die Mikrostrukturierung der Chips erfolgt einerseits durch Erzeugung von Texturen mit geläufigen Verfahren wie beispielsweise der Photolithographie und andererseits auf chemischem Wege, wenn zellfreundliche von zellabweisenden Zonen abzugrenzen sind. Alternativ zum echten Einzelzell-Chip kann auch eine definierte Zahl von Zell-Zell-Kontakten festgelegt werden. „Ein wesentlicher Schlüssel für die Funktion der Chips, betont Dr. Hinz, sind „intelligente“ Substrate als Chip-Oberflächen, in die eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren für die Erfassung physikalischer Messgrößen integriert werden können. Ein wichtiger Aspekt ist zudem die Anknüpfung des Zell-Chips an die Umgebung zur Sicherstellung der Versorgung der Zellen wie auch der individuellen Adressierung der Reize und der Detektion der Zellantwort.“ [PPiet 03]

Ein anderes Forscherteam der Firma Biegler entwickelte gemeinsam mit Oridis Biomed einen Roboter, der es ermöglicht mehrere hundert unterschiedliche Gewebeproben in Form eines Gewebearrays zu arrangieren. Mit Hilfe dieses Roboters können in einem Arbeitsgang bis zu 500 Proben mittels Antikörperreaktionen in der Proteinzusammensetzung analysiert werden. Diese Analyse dient insbesondere dazu, die Spezifität und Krankheitsrelevanz deregulierter Genprodukte zu zeigen. Durch den Einsatz von Gewebearrays wird - ähnlich wie bei DNA-Arrays - die Analysekapazität und Effizienz gegenüber klassischen Analyseverfahren drastisch erhöht. So können Analysen, die bisher Jahre gedauert haben, innerhalb weniger Tage durchgeführt werden [Biegl 05].

4.3.4.4 Das Labor auf einem Chip

Das Labor auf einem Chip (LOC) vereinigt viele Einrichtungen, Geräte und Reagenzien eines analytischen Labors auf der Fläche eines Fingernagel großen Plättchens aus kristallinem Festkörpermaterial (z.B. Silizium).

Für diese Systeme sehen die Forscher eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten auch für kleine und mittlere Firmen, so zum Beispiel in der Lebensmittelkontrolle, dem Schadstoff-Monitoring und der Entwicklung neuer Medikamente; wobei in diesen Ausführungen nur die biomedizinischen Anwendungsbereiche betrachtet werden.

Lab-on-a-Chip		
DNA	Proteine	Zellen
Hybridisierung	Trennung und Nachweis	Enzymatischer Aufschluss
Sequenzzierung	Protein-Ligand-Wechselwirkungen	Transfektion
Vervielfältigung	Enzym Kinetik	Sortierung

Diese biochemischen Labore, die auf einem Chip integriert sind, haben das Potenzial, bestehende, einige Stunden in Anspruch nehmende Verfahren auf wenige Minuten zu verkürzen oder eine Kombination verschiedener Analysemethoden von

DNA oder Proteinen zu erlauben, z.B. eine hochparallele Kapillarelektrophorese auf Chipbasis, mit Detektion und

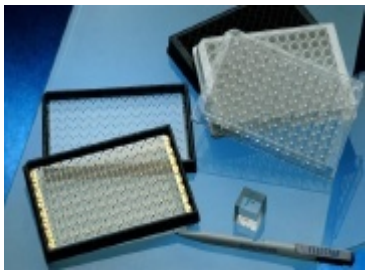


Abbildung 4.21: Mikrofluidische Lab-on-a-Chip-Struktur

Auswertung der Substanzen und einer Fraktionierung der gewünschten Moleküle. Anwendungen sind dabei – nach der vollständigen Sequenzzierung der menschlichen Erbsubstanz – insbesondere in der funktionellen Genomanalyse zu sehen.

Auch das kontinuierliche Überwachen von biochemischen Prozessen, die konstante Medikamentendosierung und die direkte Erfassung von Patientendaten am Krankenbett (Point-of-Care-Diagnostik, POCD) werden umfassend möglich. Die Echtzeitüberwachung kritischer medizinischer oder biochemischer Parameter kann besonders gut mit solchen mikrofluidischen Systemen realisiert werden, da bei diesen verschiedenste funktionelle Elemente auf engstem Raum kombinierbar sind. Fluidsysteme aus Verteilern, Mischern, Ventilen und Reservoirs können z.B. bei Enzymtests oder bei der Polymerase-Kettenreaktion (Polymerase Chain Reaction, PCR) zeitaufwändige manuelle Arbeitsschritte vermeiden. Durchflusssysteme können Analyse- und Syntheseschritte kombinieren, die in Makrosystemen verschiedene Geräte benötigen. Einfache Mischerstrukturen erlauben eine kontinuierliche Herstellung von sonst nicht stabilen Wirkstoffen unmittelbar vor der Zuführung zum Patienten. Neue und für optische Detektionsmethoden einsetzbare Polymere ermöglichen eine hohe Biokompatibilität, verbunden mit der Möglichkeit einer optischen Analyse von biologischen Wechselwirkungen.

Durch diese enorm kleinen Abmessungen der Chips werden nur sehr kleine Probenvolumina für die Analysen benötigt, die Messungen können dadurch bedeutend schneller durchgeführt werden. Die jüngsten Entwicklungen in diesem Bereich betreffen die Herstellung von so genannten Nanostrukturen - Millionstel Millimeter kleine Gebilde für die Erforschung und Manipulation von Proteinen, Makromolekülen und einzelnen Zellen. Beispiele für Anwendungen sind Sensorsysteme für die Zellanalyse, Proteinforschung, Blutanalyse, organische Toxikologie, Entwicklung und Herstellung neuer Medikamente.

Mit diesen neuen Systemen erhofft sich die Pharmaindustrie eine Verkürzung der klinischen Prüfphasen I bis III sowie eine schnellere und kosteneffektivere Einführung neuer Medikamente.

Fazit

Die Entwicklung dieser neuartigen Multifunktionalen Labore im Nanometerbereich fördert die Interaktion zwischen der Physik, der Mathematik, der Chemie, der Biologie und den Ingenieurwissenschaften. Diese LOC werden in Zukunft die Labortätigkeit wesentlich verändern. Unterschiedlichste Analysen können schnell und präzise durchgeführt werden und vor allem, direkt vor Ort. Ob in den Pharmalaboren, den Arztpraxen, oder in der Umweltanalytik. Zeitnah stehen die Ergebnisse zur Verfügung, schneller als bisher können notwendige Maßnahmen in die Wege geleitet werden.

Weiterhin erlauben diese LOC eine neue Qualität der Analysen. Zu den sehr geringen Herstellungskosten kommt hinzu, dass nur extrem geringe Mengen der meist sehr teuren Reagenzien benötigt werden. Teure Reagenzien sind heute, neben dem Zeitaufwand, der wichtigste Grund dafür, dass sich Labore auf wenige Tests beschränken, die Analysen daher ungenauer ausfallen. Die Möglichkeit, mehr Tests zum gleichen Preis durchführen zu können, wird die Sicherheit aller möglichen Analysen, gerade Standardanalysen in der Medizin, in der Lebensmittelherstellung oder der Umweltüberwachung erheblich erhöhen.

Aber trotz des Enthusiasmus, der mit den Zukunftsaussichten dieser neuen multifunktionalen Labore und damit ebenfalls neu entwickelter Medikamente in Verbindung steht, bleiben Schwierigkeiten und Einschränkungen nicht aus. Es bleiben immense Herausforderungen für weitere Forschungsarbeiten bestehen. Die 30.000 Krankheiten, die die Medizin heute kennt, können durch Ärzte erst ein Drittel angemessen behandeln werden, die Therapie bringt in vielen Fällen eine Linderung, aber noch keine Heilung.

Nach Angaben des Forschungsinstitutes -Stanford-Institute, MPG – dürfte sich das Marktpotenzial für folgende Bio-Chips so entwickeln (in US-$):

	DNA	Protein-Chips	Lap-on-Chips	Total
2001	249	8	35	292
2005	745	68	157	950

[myrese05]

4.4 Nanomedizin

Entwicklungen in der Medizin

Die Anwendung virtueller Techniken hat sich bis heute am eindrucksvollsten im Bereich der Medizin durchgesetzt. Errungenschaften wie die Computertomographie, Kernspintomographie und besonders auch die Endoskopie sind zu wichtigen Begriffen in der Behandlung von komplizierten Erkrankungen der Prostata, Galle und Niere, aber auch bei Tumor- und Krebserkrankungen geworden.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von chirurgischen Operationstechniken, ausgehend von herkömmlichen Verfahren über mikrochirurgische Techniken, bis hin zur „Schlüsseloch-Chirurgie“ und endoskop-assistierter Mikrochirurgie sind von entscheidender Bedeutung für den Fortschritt bei den modernen operativen Behandlungsmethoden in der Neurochirurgie.

Wesentliche Ziele dieses Entwicklungstrends im Therapiebereich sind daher, neuartige Therapietechniken zu realisieren, bei denen sich die Vorteile verfügbarer leistungsstarker Diagnoseverfahren (z.B. CT und NMR-Bildgebung) durch die Kombination mit mikrosystemtechnischen Instrumentarien zum Vorteil für den Patienten anwenden lassen. Es sind dabei Operationsverfahren zu erschließen, die bei möglichst geringer traumatischer Belastung der Patienten zu einem größtmöglichen Behandlungserfolg führen.

Durch diese neuen Diagnoseverfahren sowie eine immer besser werdende präoperative Darstellung der Patientenanatomie können im Bereich der Neurochirurgie immer früher pathologische Veränderungen erkannt werden. Diese neuen Verfahren führen zu einer frühzeitigen Entwicklung mikrochirurgischer

Techniken in der Neurochirurgie, die den Wunsch nach minimalinvasiven und möglichst atraumatischen Operationsmethoden Rechnung tragen.

Bereits seit mehreren Jahren zählt die Endoskopie bzw. minimalinvasive Chirurgie zu den anerkannten und auch erfolgreichen Operationsmethoden in der neurochirurgischen Universitätsklinik Mainz sowie auch in den USA.

Anhand einer Minikamera wird ein Bild des Körperinneren auf einen Bildschirm übertragen, mit Hilfe dessen der Chirurg erkennen kann, wie das zweite endoskopische Besteck mit den jeweiligen Instrumenten bedient werden muss.

CT – Computertomographie

Die CT findet häufig ihre Anwendung bei Operationen zur Zertrümmerung von Gallen- und Blasensteinen, aber auch bei Prostata - Erkrankungen. Durch diese Behandlungsmethoden sind weniger schmerzvolle und langwierigere Operationen, eine schnellere Heilung und auch ein kürzerer Krankenhausaufenthalt möglich.

Während die vor 100 Jahren von Wilhelm Conrad Röntgen entwickelten Röntgenstrahlen das Durchleuchten des Körpers ermöglichten, kann mit der Computertomographie bereits eine mehrschichtige Aufnahme des Körpers oder des Gehirns abgebildet werden, welche mittels eines Computers in ein dreidimensionales Bild umgewandelt werden kann.

Die Darstellung von Organen oder Körperteilen eines Patienten in dreidimensionalen Bildern spielt eine besondere Rolle sowohl bei der Diagnose von Krankheiten als auch bei chirurgischen Eingriffen [22].

Auch die neusten Entdeckungen (Nobelpreis 2003, Paul Lauterbur und Sir Peter Manfield) zum Einsatz der Magnetresonanztomographie (MRT) als bildgebendes Verfahren für die exakte und schonende Abbildung der inneren Organe des Menschen tragen zur entscheidenden Bedeutung für die medizinische Diagnostik, Behandlung und Nachbehandlung des Patienten bei.

Abgesehen von diesem Bereich der High-Tech-Medizin konzentriert sich die Forschung besonders seit den neunziger Jahren darauf, die Tele-Operation bzw. -Chirurgie weiterzuentwickeln, die ermöglichen soll, dass eine Operation nicht vor Ort von einem Arzt überwacht, sondern auch online per Computer gesteuert werden kann. Obwohl diese Art der Operation bislang nicht allzu zukunftsträchtig beurteilt wird, gibt es im Bereich der Roboter-Chirurgie bereits einige neue Verfahrensweisen, wie zum Beispiel Robodoc, einen Roboterarm, der beim Einsetzen neuer Hüftgelenke hilft - eine bislang sehr aufwendige und schwere Operation. Besonders in der Frankfurter Unfallklinik wird diese Methode genutzt, bei der Robodoc das Einsetzen der neuen Gelenkpfanne erleichtert, indem er exakte Verbindungsstellen in den Knochen fräst. Die Verwendung von Zement als Stabilisator wird obsolet, und das Implantat und die Knochen können besser zusammenwachsen.

Die große Bedeutung der Anwendung neuer und spezialisierter Technologien in der Medizin zeigt sich auch in der Behandlung von Hörbehinderungen. Hier wird hinter das Ohr ein Implantat gesetzt, welches durch elektronische Impulse die Hörnerven stimulieren kann, um die Hörleistung zu optimieren (Cochlea-Implantat).

Weitere technologische Fortschritte sind zu erwarten durch die zunehmende Miniaturisierung der Bauteile, die mittels nanotechnischer Werkzeuge hergestellt werden können.

Cochlea-Implantat

1) Ein Mikrophon hinter dem Ohr (nicht dargestellt) empfängt den Schall und wandelt ihn mit Hilfe eines Sprachchips in Code um.
2) Die kodierten Signale werden an die Sendespule und von dort durch die Haut an das Implantat im Innenohr weitergeleitet.
3) Das Implantat entschlüsselt das Signal und wandelt es in elektrische Schallmuster um, die über die Kabelverbindung zu den Elektrodenbündeln entlang der Schnecke gelangen.
4) Etwa 20 Elektroden stimulieren den Hörnerv, der das Signal an das Gehirn weiterleitet. Dort entsteht ein Höreindruck.

Abbildung 4.22: Cochlea Implantat

Weiterhin sollte noch erwähnt werden, dass seit Anfang der neunziger Jahre verstärkt an der Behandlung von Sehverlust geforscht wird, um eine Möglichkeit der begrenzten Wiederherstellung zu entwickeln. Dafür wird in Deutschland seit 1995 vom BMBF ein interdisziplinärer Forschungsverbund (EPI-RET) zwischen Ärzten des Kölner Zentrums für Augenheilkunde der Universität Köln sowie aus weiteren Instituten der Bereiche Mikrosystemforschung, Mikroelektronik, Optoelektronik, Neurophysik und Neuroinformatik gefördert. Das Ziel dieses Verbundes ist die Entwicklung einer vollständig implantierbaren Netzhautprothese für Blinde (RETINA IMPLANT), ein Implantat aus Silizium mit integrierten Mikrophotodioden, Mikroverstärkern und Stimulationselektroden. Dieses Retina Implantat ist so beschaffen, dass es unter die Netzhaut anstelle der degenerierten Photorezeptoren implantiert werden kann. Der Chip wandelt das einfallende Licht in lokale Reizströme um, welche die verbliebenen Nervenzellen in der Netzhaut stimulieren.

In der zweiten Phase (2000-2003) des Projektes wurde tierexperimentell erprobt, ob mit den bisher entwickelten Implantaten eine spezifische, also ortsaufgelöste Aktivierung des visuellen Kortex möglich war und ein begrenztes Sehvermögen wieder hergestellt werden konnte.

In einer dritten Phase ist jetzt beabsichtigt, die bisher entwickelten Prototypen eines Retina Implantates bei freiwilligen Versuchspersonen, die an Retinitis pigmentosa (RP) erblindet sind, darauf zu untersuchen, ob damit Sehvermögen erzielt werden kann. Für diesen Entwicklungsschritt haben mehrere Forscherteams unter wesentlicher Beteiligung der Aachener Augenklinik entsprechende Untersuchungen vorbereitet.

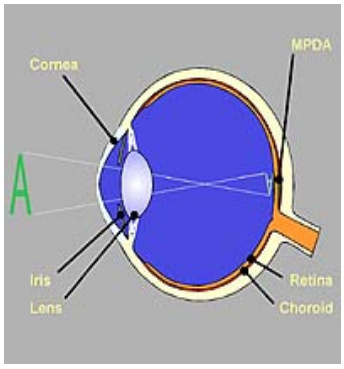


Abbildung 4.23: Retina-Implantat

Auch an der University of California arbeitet man daran, implantierbare Nervenprothesen für Auge und Ohren zu entwickeln. Einer Forschergruppe gelang es, eine biologische Membran mit einem Nanoröhrchen-Netzwerk zu verbinden. Aus diesem Experiment schließen die Forscher, dass eine Verbindung biologischer Systeme auf Zellebene mit nanoelektronischen Komponenten zukünftig möglich sein wird [AMey 05].

4.4.1 Nanotechnologie in der Medizin

Die Nanotechnologie bringt für die Medizin völlig neue Diagnose- und Heilverfahren mit sich. Dabei kann man heute nur spekulieren, welche Ideen und Vorstellungen einmal praktisch umgesetzt werden können und welche Visionen bleiben. Aus Sensoren, Aktoren, Mikrokontroller sowie der Firmware und Molekularmotoren lassen sich schon heute autonome Nanoroboter projektieren, die im Labor am gläsernen Menschen selbständig bestimmte Funktionen erfüllen. Die Realisierung dieser Zwergroboter bedeutet jedoch für die Wissenschaft und Technik gewaltige Herausforderungen.

Visionäre wie Eric Drexler und der Papst der Nanomedizin Robert Freitas, der 1999 seinen ersten Band des Standardwerks über die Nanomedizin veröffentlichte, vertreten die Meinung, dass Nanoroboter zur künftigen medizinischen therapeutischen Behandlung ihren Einsatz finden werden [3Sat 05].

Abbildung 4.24: Der gläserne Mensch

Der prominente Nanowissenschafter Richard Smalley, der für die Entdeckung der Fullerene (Buckyballs) den Nobelpreis erhielt, zweifelt an ihrer Realisierbarkeit aus den Gründen der Navigation. Ein Nanoroboter müsste einerseits nicht nur gegen einen starken Blutstrom ankämpfen, andererseits muss er sich mit dem Phänomen der Brown'schen Bewegung auseinander setzen. Sie ist eine Folge unregelmäßiger

Stöße der sich ständig bewegenden Atome und Moleküle, die durch permanente Zusammenstöße der makroskopischen Teilchen mit winzigen Partikeln und Molekülen in der Flüssigkeit verursacht werden. Durch dieses Ereignis würde sich die gewünschte zielgerichtete Fortbewegung in eine Zufallsbewegung (random walk) verwandeln.

Die Nanomedizin leidet darunter, in der öffentlichen Wahrnehmung irgendwo zwischen Wissenschaft, Prophezeiung und Science Fiction angesiedelt zu sein.

Wie wichtig es dabei allerdings ist, diese sich neu entwickelnde Technologie auf ihre Sinnhaftigkeit hin zu überprüfen, sehen schon sehr viele Wissenschaftler.

Nanotechnologie als Chance, deren Risiken abgewägt werden müssen, zu verstehen, um Horrorszenarien von kleinsten, sich selbst reproduzierenden Killerrobotern begegnen zu können, braucht es Information und Aufklärung.

Für medizinische Aufgaben sehen die Wissenschaftler zukünftig sogenannte autonome Miniroboter, die vor allem drei Hauptaufgaben lösen werden:

- die Stärkung des körpereigenen Immunsystems
- die beschleunigte Regeneration des Körpers sowie
- die lokal angewendete Mikro- und Nanochirurgie.

Nanoroboter, die zur Stärkung des körpereigenen Immunsystems dienen, existieren in vielen verschiedenen Typen, die alle jeweils auf eine einzelne Aufgabe wie das Finden und Eliminieren eines bestimmten Virentyps spezialisiert sind. Neben der Bekämpfung von Viren und Bakterien übernehmen diese Nanoroboter auch Aufgaben, die das körpereigene Immunsystem nicht selbst erfüllen kann, wie die Bekämpfung von schädlichen Naniten oder aber auch das Degenerieren von Prionen. Hiermit gelingt es beispielsweise den Medizinern, Krankheiten wie Creutzfeld-Jakob oder Alzheimer zu behandeln oder rechtzeitig vorzubeugen. Nahezu alle besseren Präparate, die zur Stärkung des Immunsystems angewendet werden, bauen auf Naniten auf, und entsprechende Therapien sind sehr erfolgreich, aber leider auch sehr kostspielig [Nanit].

In einem zweiten Anwendungsbereich der Medizin werden Nanoroboter dazu eingesetzt, um Verletzungen am Körper zu behandeln und zu reparieren. Hierbei finden vor allem die so genannten Neuronennäher ihren Einsatz, ein spezieller Typ von Nanorobotern, die auf dem Gebiet für durchtrennte Nervenbahnen spezialisiert sind und die Heilung beschleunigen. Durch ihren Einsatz können selbst Querschnittslähmungen wieder geheilt werden, sofern die entsprechenden Verletzungen noch nicht zu alt sind. Falls sich die abgetrennten Nervenbahnen bereits zurückgebildet haben, ist aber durch eine Rekonstruktion der Nerven immer noch eine Heilung möglich, wenn auch ungleich komplizierter.

Neben diesen Möglichkeiten muten die anderen Nanorobotertypen, die zur beschleunigten Regeneration genutzt werden, geradezu einfach an. So sind spezielle Naniten in der Lage, Zellgewebe zu produzieren und somit den Heilungsprozess von schweren Verletzungen wie Stich- und Schnittwunden oder Verbrennungen zu beschleunigen.

In der Regel werden sie dabei mit anderen Verfahren kombiniert, um die Heilungsgeschwindigkeit bei einem Patienten auf das Hundertfache zu beschleunigen. So sind selbst großflächige Verbrennungen innerhalb weniger Tage verheilt, oder abgetrennte und wieder angenähte Gliedmaßen bereits nach ein paar Stunden wieder voll einsatzfähig.

Rehabilitation und physiotherapeutische Maßnahmen können in einem Bruchteil der normal notwendigen Zeit durchgeführt werden, sofern man sich einer Behandlung mit den sogenannten Naniten unterzieht.

Den dritten Anwendungsbereich von Nanorobotern sehen die Wissenschaftler auf dem Gebiet der lokal angewendeten Mikro- und Nanochirurgie. Dies bedeutet, dass Nanoroboter im menschlichen Körper „vor Ort“ chirurgische Aufgaben erfüllen.

Hierzu gehören insbesondere das Finden und Zerstören von Krebs- oder Tumorzellen, was beispielsweise eine besonders schonende und gefahrlose Gehirnchirurgie oder Zellauffrischungen ermöglicht. Teilweise finden auch kosmetische Operationen mit Naniten statt, weil andere Werkzeuge dafür nicht fein oder präzise genug sind. Diese Anwendungen werden auch als Mikrochirurgie bezeichnet.

In der Nanochirurgie werden gezielt abgestimmte Gentherapien verordnet, bei denen Naniten das genetische Material einer Person aufbessern oder verändern. In der Regel werden solche Maßnahmen bereits vorher am Embryo einer Person durchgeführt, wo verhältnismäßig wenige Zellen verändert werden müssen. Eine nachträgliche Veränderung des eigenen Erbguts zählt zu den aufwendigsten Therapien, die es überhaupt gibt.

Da Nanoroboter nur eine begrenzte Funktionsdauer besitzen, bevor sie ausfallen, muss gewährleistet werden, dass sie nach Beendigung ihrer Aufgabe aus dem Körper ausgeschieden werden können.

Die meisten in einem Organismus eingesetzten Nanoroboter sind in der Lage sich in so kleine Teile zu zerlegen, dass sie über die normalen Ausscheidungssysteme wie Leber und Nieren den Körper verlassen können. Medizinische Nanoroboter zerstören sich also in der Regel selbst, damit sie später die Blutgefäße nicht verstopfen und zu lebensgefährlichen Embolien führen. Aus diesem Grund dürfen auch Nanoroboter je nach Einsatzgebiet im menschlichen Körper nur eine gewisse Maximalgröße aufweisen. Für im Blut schwimmende Nanoroboter, dem geläufigsten medizinischen Nanitentyp, gilt beispielsweise eine maximale Größe von 5 Mikrometern.

Es gibt verschiedene Methoden, Naniten in einen Organismus einzuführen. Neben einer Injektion mit herkömmlichen Spritzen besteht auch die Möglichkeit der Inhalation nanitendurchsetzter Dämpfe.

Hierbei gelangen die Nanoroboter über die Lunge in den Körper. Eine weitere Methode besteht darin, die Naniten über Schleimhäute oder direkt über offene Wunden dem Körper zuzuführen [Nanit].

4.4.1.1 Diagnostik und Therapie in der Nanomedizin

Schneller, früher und genauer sollen zukünftig Krankheiten dank den Nanowissenschaften diagnostiziert werden können. Diese Meinung vertreten internationale Fachleute der Nanomedizin auf diesem Gebiet.

Nach einer Studie von [SWISS 03] wird die Bedeutung der Nanotechnologie in der Medizin für die Forschung, Diagnose und Therapien in den nächsten 20 Jahren sehr stark an Bedeutung gewinnen.

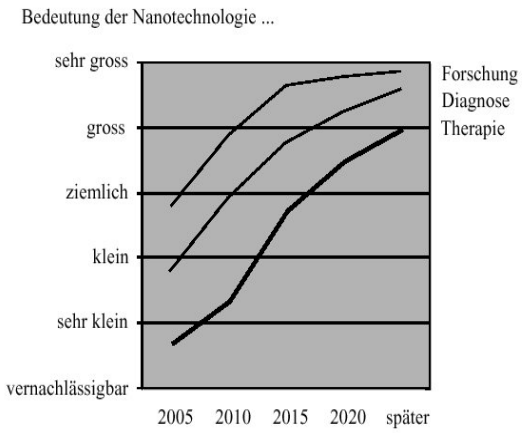


Abbildung 4.25: Bedeutung der Nanotechnologie in der Medizin

Für folgende Krankheitsgruppen, die in den Industrieländern mit Abstand die häufigsten Todesursachen darstellen, wird die Nanotechnologie therapeutisch eine hohe Bedeutung erlangen:

- Krebserkrankungen
- Kardiovaskuläre Krankheiten
- Bakterielle Infektionen
- Virale Infektionen
- Alzheimersche Krankheiten
- Autoimmunerkrankungen
- Stoffwechselkrankheiten

Diagnosen könnten somit bei diesen Krankheitsbildern schneller, schon im Frühstadium gestellt werden, liefern spezifischere und genauere Resultate als die bisherigen Methoden.

Vor allem eröffnet sich über die Nanotechnologie die Möglichkeit, medizinische Bildgebungsverfahren bis zur molekularen Auflösung zu steigern.

Künftige Diagnosegeräte und Wirkstoff-Fähren werden in Zukunft die Größe lebender Zellen haben. "Die Nanotechnik wird praktisch alle Krankheiten des 20. Jahrhunderts besiegen, alle körperlichen Schmerzen und das Leiden", prophezeit der angesehene Biochemiker Robert Freitas vom kalifornischen Foresight-Institut und Autor des Buches „Nanomedicine“ [23].

In einigen Jahren will die Duisburger High-Tech-Firma Microtec, die ein Mikro-U-Boot entwickelt hat, mit welchen Forscher zukünftig pharmazeutische Wirkstoffe mittels Nano-Fähren zielgerichtet in die menschlichen Venen injizieren können, ohne dass sie auf dem Weg zum Wirkungsort abgebaut werden.

Mittels dieser Nano-Fähren - wenn sie mit einer Ultraschallsonde ausgestattet werden – könnten atemberaubende Bilder aus dem Körperinneren geliefert werden. Ziel dieses Verfahrens ist es, in den Blutbahnen winzige Tumorgeschwülste anzusteuern und diese mit radioaktiven Substanzen zu bestrahlen. Weiterhin könnten individuell abgestimmte Medikamente hiermit genau und niedrig dosiert am behandlungsort freigesetzt werden. Ebenfalls denkbar wäre es, mit diesen Fähren und Mini-Bohrern und Fräsen krankhafte Ablagerungen in den Blutgefäßen zu öffnen bzw. zu entfernen.

Auch Mikrochips mit feinsten Detektoren für Mikroorganismen und Krankheitserreger könnten in den nächsten Jahrzehnten in die Venen der Patienten geschleust werden,

um winzige Silikonkapseln einzusetzen und damit frisch transplantierte Zellen vor den Abwehrmechanismen des Körpers zu schützen [FOKUS 04].

4.4.1.2 Zukunftshoffnungen für die Diagnostik in der Krebstherapie

Weltweit erkranken über 250.000 Kinder jedes Jahr neu an Krebs. In der dritten Welt stirbt die Mehrzahl dieser Kinder an dieser Erkrankung aufgrund unzureichender medizinischer Versorgung. Dagegen werden in Ländern der Technologiestaaten die meisten Kinder von ihrer Krankheit geheilt, nicht zuletzt durch Einsatz molekularbiologischer Methoden in Diagnostik und Therapie.

Wenn auch die eigentliche Ursache von Krebserkrankungen weiterhin nicht bekannt ist, weiß man, dass in einigen Fällen eine Krebsentstehung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine konkrete Ursache zurückgeführt werden kann, oft entwickelt sich das Gewebewachstum jedoch ohne erkennbaren Grund.

Wie diese Vorgänge auf der Ebene der Moleküle wirklich ablaufen, haben Molekularbiologen schon teilweise herausgefunden. Diese Erkenntnisse werden heute genutzt, um nicht nur die Diagnostik zu verfeinern, sondern auch die Therapie zu verbessern. Mit Hilfe der Molekulargenetik konnten Forscher in den letzten Jahren auch in die Steuerungsmechanismen von Krebszellen eingreifen und dadurch neuere Prinzipien in der Krebsbehandlung entwickeln. Es ist zu erwarten, dass sich in Zukunft die Krebsbehandlung von Patient zu Patient mehr unterscheiden und damit individualisieren wird.

Um diese Gefahren besser verstehen und bekämpfen zu können, ist es essenziell, die biologischen Netzwerke, die durch Krankheiten gestört werden, in ihrer Gesamtheit zu erfassen und zu analysieren. Nur so kann man langfristig hoffen, komplexe Erkrankungen wie Krebs oder andere häufige Volkskrankheiten zu verstehen und ganzheitlich zu behandeln. Dazu ist es notwendig, alle Gene und Genprodukte, die dabei beteiligt sind, zu identifizieren und ihre Funktion innerhalb des gestörten biologischen Netzwerkes zu erforschen. Dafür können die sogenannten „Lab on a Chip“ (LOC) zum Einsatz kommen.

Durch die Zusammenführung der traditionellen Fachrichtungen, wie z.B. die Molekularbiologie mit den neuen Möglichkeiten der nanotechnologischen Werkstoffentwicklung, könnten zukünftig die biologischen Netzwerke analysiert werden und somit zu einem wesentlichen Fortschritt in der Medizin beitragen, sofern der interdisziplinäre Dialog zwischen Grundlagenforschung und medizinischer Anwendung eng genug geführt wird. Die noch heute naiv erscheinende Computersimulation, man könne eines Tages mit nanochirurgischen Werkzeugen, den sogenannten „Nanorobotern“, präziser ohne operativen Eingriff “von innen ” zum Ort des Geschehens gelangen, um dort gezielt in das Krankheitsgeschehen eingreifen zu können, kann vielleicht in dreißig Jahren zur Realität werden.

Solche winzigen Roboter, zeigt Abbildung 4.26, die sich in Gefäßen der menschlichen Blutbahn fortbewegen und gezielt an

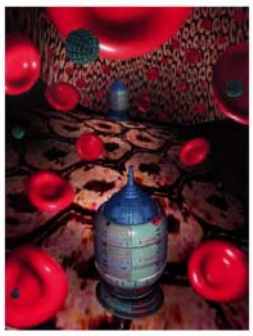


Abbildung 4.26: Nanoroboter

Zellen und Blutgefäßen krankhafte Ablagerungen schonend beseitigen können oder auch Krebszellen mit lokalisierten Laserstrahlen zerstören. Noch ist die Konstruktion solcher Gebilde in der Größenordnung von Molekülen nicht gelungen. Erst wenn es gelingt, diese atomare und molekulare Dimension sicher zu beherrschen, können die Voraussetzungen für die langfristige belastbare Optimierung von Produkteigenschaften im Bereich der Medizin entstehen.

Einzelne Module, die dereinst als Bauteile von Nanorobotern dienen könnten, gibt es bereits. Wissenschaftlern der amerikanischen Cornell-Universität beispielsweise ist es gelungen, die aus sechs Proteinmolekülen bestehende "Nanoturbine", die Bakterien und Muskeln in Bewegung hält mit einem Nickelpropeller zu versehen und diesen durch Zugabe der biochemischen Energie ATP, die dem Körper aus den „Energiefabriken“ der Zelle, den sogenannten Mitochondrien, bereitgestellt wird, in Rotation zu versetzen. So oder ähnlich könnte man sich den Antrieb eines künftigen Zwergroboters vorstellen [BWiss 00].

4.4.1.3 Nanowerkzeuge für die Diagnose

Jede Vision benötigt ihre Werkzeuge, so auch die Medizintechnik, die wie andere Technologiebereiche in die Welt der Zwerge vorstoßen wird.

In 20 oder 30 Jahren sind vielleicht die Werkzeuge des Arztes auf molekulares Format geschrumpft. Die Mikrosystemtechnik ist heute auf dem besten Wege, die hierfür erforderlichen Werkzeuge zu liefern.

Der amerikanische Chemie-Nobelpreisträger Richard Smalley ist überzeugt: „Wir werden Apparate in der Größenordnung lebender Zellen bauen. Sie könnten uns als Implantate dienen, oder wir lernen, wie wir den genetischen Code verändern können“ [VDE 01].

Die Nanowerkzeuge erschließen uns den Zugang zu den Nanostrukturen und ermöglichen den Umgang mit ihnen.

Die Vorrausetzung dafür wurde mit der Erfindung der rastermikroskopischen Methoden Anfang der 80er Jahre geschaffen, wie die Raster-Tunnelmikroskopie (STM- scanning tunnelling microscope), die Raster-Kraftmikroskopie (AFM- atomic force microscope) und die Optische Raster-Nahfeldmikroskopie (SNOM – scanningnear field optical microscope).

Ein Raster-Tunnelmikroskop nutzt den quantenmechanischen Tunneleffekt, um die Oberflächentopologie eines Festkörpers abzubilden. Eine auf atomarer Ebene scharfe Spitze wird über die Oberfläche gerastert. Dabei bildet sich ein Tunnelstrom zwischen Oberfläche und Spitze aus.

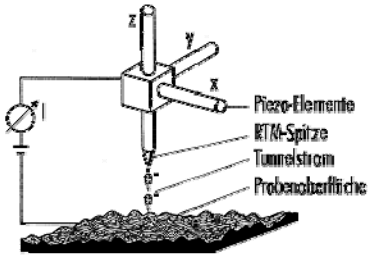


Abbildung 4.27: Prinzip des Raster-Tunnelmikroskops

Dieser dient zur Regelung der Spitze und liefert gleichzeitig die topologischen Informationen.

Diese Erfindung von G. Binnig und H. Rohrer eröffnete nicht nur neue Bereiche der Beobachtungsgabe (im Sub-Angström-Bereich), sondern sie bot auch bisher ungeahnte Möglichkeiten, die Materie auf der Stufe der Atome, Einzelmoleküle und Atomgruppen lokal zu beeinflussen und zu transformieren.

Dendrimere in der Therapie

Neben der Diagnostik liegt ein zweiter Schwerpunkt der Nanomedizin auf Verfahren, die es ermöglichen, Therapeutika präzis an ihr Ziel zu führen ("drug targeting"). Dazu werden die Wirkstoffe in Nanopartikeln oder -kapseln verpackt, die mit Antikörpern oder anderen Erkennungsmolekülen gekoppelt sind und auf diese Weise die gewünschten Zielzellen finden. Die Idealvorstellung wäre, mit dieser Methode Krebszellen selektiv abzutöten, ohne gesunde Zellen zu schädigen. Als besonders vielseitige Trägermaterialien haben sich die Dendrimere (nach dem griechischen Wort dendros für Baum) erwiesen.

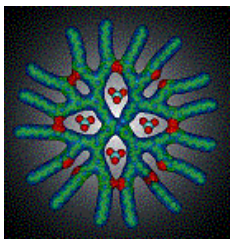


Abbildung 4.28: Computermodell eines harnstoffhaltigen Dendrimers

Sie sind kaskadenförmige, nanoskalige Moleküle, die einem Molekülzentrum entspringen und sich zu einer feinen Architektur verästeln, ähnlich einer Baumkrone. Aufgrund der Hohlraumfähigkeit der Dendrimere können Therapeutika selektiv eingeschlossen sowie durch Modifizierung der Oberflächeneigenschaften Zielort und Verweilzeit gesteuert werden.

Eine interessante Perspektive ergibt sich für Dendrimere auf dem Gebiet des Tumor-Targeting. Ziel ist es hier, eine feste chemische "Verpackung" eines Radiometalls im Kern eines Dendrimers und gleichzeitig dessen Platzierung in ein Zielgewebe zu erzielen.

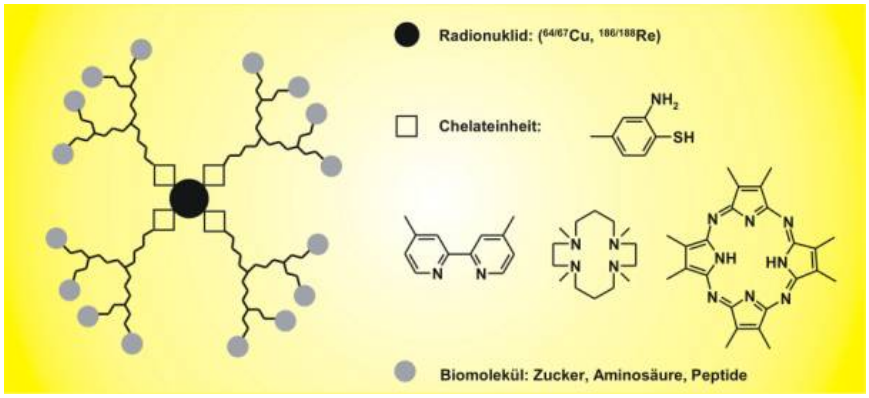


Abbildung 4.29: Eingekapselte Radionuklide

Damit soll das Radiotherapeutikum selektiv im Tumor deponiert werden, um dort eine hohe zelltoxische Strahlendosis unter weitgehender Schonung des gesunden Gewebes zu erreichen.

Auch fluoreszierende Dendrimere für die medizinische Diagnostik haben Wissenschaftler vom Kekulé-Institut für Organische und Biochemie der Universität Bonn entwickelt. Gadolinium(III)-Verbindungen werden in der Kernspintomografie eingesetzt, sie dienen als Kontrastverstärker, um den Bildkontrast bei der Untersuchung von Blutgefäßen, Organen und Geweben zu verstärken. Sie verweilen aber nur für kurze Zeit im abzubildenden Gewebe.

Wird das Gadolinium langsam mit einem nanometergroßen "Dendrimer-Omnibus" bewegt, lassen sich kontrastreiche Bilder erzeugen [R-UBonn 03].

Andere Forschungsgruppen versuchen neue Therapien mit der sogenannten Magnetflüssigkeits-Hyperthermie. An der Berliner Charité experimentieren z.B. Neurochirurgen mit winzigen Eisenoxidpartikeln, bekannt auch als „ultra-small superparamagnetic iron oxides“ (USPIO),

die in Tumore durch Injektion oder über die Blutbahn gebracht und dann mittels eines elektromagnetischen Feldes erhitzt werden. Diese Methode verspricht neue Möglichkeiten im Kampf gegen gefährliche und schwer zugängliche Hirntumore. Die häufigsten Hirntumore sind die Glioblastome, die ohne Behandlung in nur wenigen Wochen zum Tod führen.

Im Tierversuch konnten mit dieser Methode Tumore zur Rückbildung bzw. zum Absterben angeregt werden.

Einen sehr anspruchsvollen Ansatz verfolgen Wissenschafter des amerikanischen Massachusetts Institute of Technology. Sie versahen DNA- Moleküle mit einer metallischen Nanoantenne und konnten dann mittels eines Radiosignals DNA-Doppelstränge dazu veranlassen, sich in zwei Einzelstränge zu teilen.

Da sich diese Methode auch auf *Proteine* und andere Biomoleküle anwenden lassen dürfte, bietet sie Möglichkeiten, Vorgänge auf molekularer Ebene per **"remote control"** zu manipulieren.

Gen - Taxis

Wie bereits erwähnt, spielen die kontrollierte Freisetzung von Arzneimitteln und ihr gezielter Transport zum Wirkort in der pharmazeutisch-technologischen Forschung eine bedeutende Rolle. Biogene Arzneistoffe wie Peptide, Proteine, Plasmide, DNA-Fragmente oder Immunmodulatoren können nur in speziellen Trägersystemen therapeutisch eingesetzt werden. Gegenwärtig erscheinen Wirkstoffträger, die auf Mikro- oder Nanoemulsionen, Liposomen und anorganischen oder polymeren Nanosphären basieren, als sehr aussichtsreich. Diese Systeme müssen den

Arzneistoff gegenüber metabolischen Einflüssen des Körpers abschirmen, zugleich aber eine kontrollierte, genau definierte Wirkstofffreisetzung im Organismus über einen möglichst definierten Zeitraum gewährleisten. Um diese Ziele zu erreichen versucht man, die physikochemischen und biophysikalischen Eigenschaften der Trägermaterialien mit einfachen chemischen und physikalischen Methoden gezielt zu optimieren. Dabei spielen Größe, Oberflächenladung, Hydrophilie und *Hydrophobie* der Grenzfläche sowie die Morphologie der Oberfläche eine bedeutende Rolle.

Die Medizin wirkt nur, wenn die Arzneimittel dorthin gelangen, wo sie auch wirken sollen, um ein maximales therapeutisches Ergebnis erzielen zu können. Oft kein leichtes Unterfangen, die Natur setzt mit gutem Grund der Freizügigkeit im Körper Grenzen. Vor allem, um ihn vor Krankheitserregern zu schützen, hat sie Hindernisse, so genannte biologische Barrieren, errichtet.

Ein alter Traum von Ärzten und Pharmakologen rückt in die Nähe der Realität: Nanopartikel als Transporter, die zum Beispiel Medikamente genau dorthin bringen, wo sie benötigt werden. Anders als bisherige Mittel, die sich im ganzen Körper verteilen - oft mit schädlichen Nebenwirkungen. Nanomedizin macht es möglich, die Wirkungen zu konzentrieren um andere Organe zu schonen. Richtig eingesetzt, können die Nanopartikel Medikamente oder neues Erbgut in kranke Zellen und Gewebe schleusen, Tumore zerstören oder Krankheitserreger frühzeitig entdecken helfen.

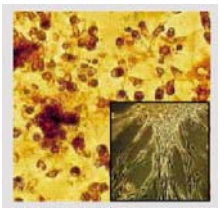


Abbildung 4.30: Zelle eines bösartigen Gehirntumors

Schon seit längerem versuchen Wissenschaftler wie Prof. Dr. Claus Michael Lehr, Biopharmazeut von der Universität des Saarlandes, Erbkrankheiten zu heilen, indem er defekte Gene durch gesunde ersetzt. Bislang allerdings erfolglos.

Seine neue Methode ist der Einsatz von „Gen-Taxis“ als Wirkstoff-Transportmittel bei der Gentherapie. Darunter versteht man die kontrollierte Einschleusung von zusätzlichen Genen in den erkrankten Organismus, ohne dass dabei die Keimzellen und damit die Nachkommenschaft genetisch verändert werden.

Wie allerdings festgestellt wurde, ist das lange, fadenförmige und äußerst instabile DNA-Molekül in eine Rattenzelle beziehungsweise in den Zellkern zu schleusen sehr problematisch, es stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Die Forschergruppe um Prof. Lehr versucht in mehr als 100 klinischen Studien, dieses Prinzip bei erblichen Krankheiten, Tumoren, Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie bei der Immunisierung anzuwenden.

Ein französisch-italienisches Forscherteam vom französischen Forschungszentrum CNRS in Straßburg und der Universität Triest versuchte sich erfolgreich an Kohlenstoffnanoröhrchen als Transporter für kleine Wirkstoffmoleküle wie Antibiotika oder Krebstherapeutika. Besonders attraktiv an ihrem Konzept ist die Idee, nicht nur einen, sondern zwei verschiedene Wirkstoffe oder Marker kontrolliert anzuknüpfen. Auf diese Weise könnten beispielsweise Kombitherapien mit unterschiedlichen Wirkstoffen durchgeführt oder die Aufnahme des Wirkstoffs mit Hilfe eines Markers überwacht werden [SpDirekt 05].

Das Einschleusen von DNA mit dem Ziel einer Gentherapie stellt heute noch ein Wagnis dar. Ein Versuch in den USA, der Viren als Genfähren benutzte, um eine Erbkrankheit zu kurieren, endete mit dem Tod des Patienten. Seitdem sieht Prof. Lehr wachsende Chancen für seine Methode: "Viren sind zwar beim Transport von Genen effizienter, aber sehr viel gefährlicher" [UBakow 03]. Allerdings räumt er ein, dass er die Risiken der Nanotechnik auch noch nicht voll überblickt. Seinen Zellkulturen schadet es jedenfalls nicht, wenn sie DNA-beladene Staubkörnchen in sich aufnehmen. Die Nanopartikel aus Silikat (SiO_2) mit einem Durchmesser von 200-300 nm haben den Vorteil, dass sie die Stoffwechselvorgänge der Zellen nicht beeinträchtigen und unverändert wieder ausgeschieden werden können.

Wie jedoch der menschliche Organismus darauf reagiert, ist noch unklar, zumal die Substanzen kaum abgebaut werden. Manchmal kann es sogar vorteilhaft sein, wenn Nanopartikel lange im Körper verweilen. Aus diesem Grund werden derzeit umfangreiche Studien über den DNA-Transfer unternommen, um Mechanismus und Wirkungsweise von DNA-Transportsystemen aufzuklären und zu verbessern.

4.5 Nanoelektronik

Ein Handy, das simultan übersetzt, wenn der chinesische Geschäftspartner anruft, ein „intelligentes“ Auto, das den Verkehrsfluss beobachtet und in gefährlichen Situationen eingreift, der Serviceroboter, der die Hausarbeit erledigt - alles Visionen einer zukünftigen Nanoelektronik. Um sie zu verwirklichen, müssen logische Schalter, Speicherbausteine und Sensoren in Computern immer kleiner und effizienter werden.

Wie bereits beschrieben, stößt eine weitere Reduzierung der Strukturgrößen von CMOS-Halbleiterbauelementen schon vor Erreichen atomarer Dimensionen auf naturgegebene Schwierigkeiten, so können einerseits die je Flächeneinheit stetig steigenden Verlustleistungen nicht mehr ausreichend abgeführt werden, andererseits erfordern die Schaltungsverbindungen heute schon 20 und mehr Verbindungsebenen. Bei diesen kleinen Abständen zwischen den Leitungskanälen treten immer häufiger Bitfehler infolge von Tunnel- und Übersprechstörungen auf. Diese beschriebene Problematik kann als die große Chance der Nanoelektronik angesehen werden.

Die Nanoelektronik befasst sich einerseits mit allen Gebieten der auf Silizium basierenden CMOS-Elektronik, in denen Strukturen im Nanometerbereich von Bedeutung werden. Sie beschäftigt sich mit den Eigenschaften von Halbleiter- und Metallstrukturen in den Dimensionen von 1nm < d < 1 µm.

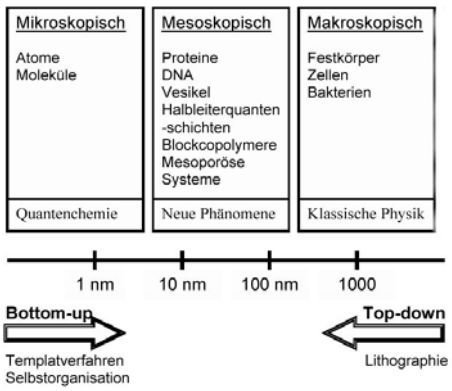


Abbildung 4.31: Zwei verschiedene Ansätze der Nanoelektronik

Andererseits zielen eine Reihe alternativer Ansätze in den verschiedenen Entwicklungslabors auf die Nutzung neuer nanoskaliger Effekte ab, die im Übergangsbereich zwischen der mikroskopischen und mesoskopischen Ebene auftreten.

Durch völlig differente Konzepte können neuartige elektronische, optische und magnetische Bauelemente hergestellt werden, die ihre kommerzielle Anwendung in der Elektronik und Mikroelektronik, Faseroptik, Avionik sowie in der Supraleiter- und Telekommunikationsindustrie finden können.

Die Nanoelektronik von morgen baut sich vielleicht ihre Funktionselemente im Extremfall Atom für Atom auf und schafft Architekturen, in denen sich supraleitende mit magnetischen, magnetische mit halbleitenden, halbleitende mit organischen und organische mit metallischen Komponenten auf der Nanometerskala verbinden können.

4.5.1 Der Übergang von der Mikro- zur Nanoelektronik

Die Mikroelektronik und ihre Anwendungen spielen heute auf allen technischen Gebieten und in fast allen Lebensbereichen wie Gesundheit, Mobilität, Information & Kommunikation, Sicherheit und Unterhaltung eine unverzichtbare Rolle.

Nach dem Niedergang der New Economy im Jahr 2002 ist sie in ein tiefes Tal der Ernüchterung gefallen, heute nun kehrt sie auf einen Wachstumspfad zurück.

Das European Information Technology Observatory (EITO) veröffentlichte in seiner neusten Marktanalyse im Jahre 2004, das die Stagnation auf dem ITK-Markt vorbei sei, der Markt für Informationstechnik und Telekommunikation (ITK) ist in Westeuropa um 3,1% auf 611 Milliarden € gestiegen (2003: 0,8%). Für 2005 geht die EITO sogar von einem weiteren Wachstum um 4,4% aus. Weltweit ist der ITK-Markt im Jahr 2004 um 4,3% auf 2,17 Bio. € angewachsen und 2005 wird er um weitere 130 Milliarden € ansteigen“.

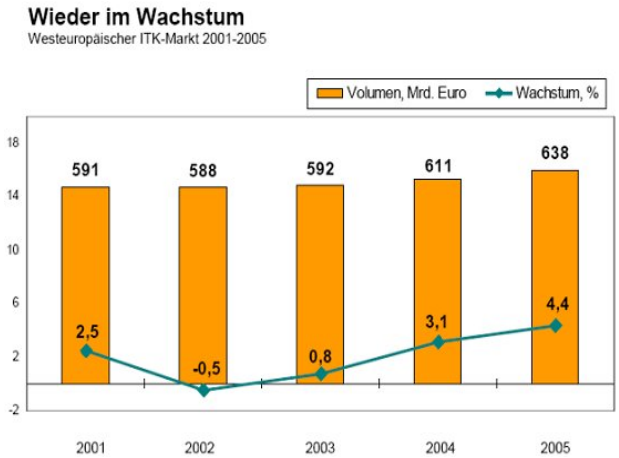


Abbildung 4.32: Westeuropäischer ITK-Markt

Dies konnte auch der Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) bestätigen, seine Wachstumsprognose für das Jahr 2004 von 2,5% im deutschen ITK-Markt auf 131 Mrd € konnte erreicht werden. Damit wurde das erwartete Wachstum von rd. 1,7% erstmals seit 2001 wieder übertroffen [24].

Die Erkenntnis wächst, dass die Mikroelektronik mit ihren Anwendungen in der Informations- und Kommunikationstechnik nach wie vor eine Schlüsselrolle für die Leistungsfähigkeit jeder Industrienation spielt. Sie ist Markttreiber tief greifender

Veränderungen in Wirtschaft und Gesellschaft, durchdringt alle Branchen und verändert die meisten Geschäftspraktiken und Konsumgewohnheiten. Computertechnologie, Mobilkommunikation, Internet, elektronische Medien sowie die Sicherheit der Endgeräte verschmelzen dank der Mikroelektronik immer stärker zu einer neuen multimedialen Kommunikationstechnologie, die zum *Katalysator* einer gigantischen Globalisierung der Information wird.

Die Mikroelektronik unterliegt einer rasanten Entwicklung. Diese vollzieht sich bis heute streng nach der von Gordon Moore formulierten und als Mooresches Gesetz bekannten Formulierung, dass die meisten Kenngrößen der Halbleitertechnologie eine exponentielle Entwicklung aufweisen. So verdoppelt sich zum Beispiel die Anzahl der Transistoren pro Speicherchip etwa alle 18 Monate. Die Dynamik der Mikroelektronik äußert sich unter anderem in einer drastischen Preissenkung, Reduzierung des Energieverbrauchs, sowie extremer Steigerung von Leistungsfähigkeit und Komplexität. Diese extrem schnelle Entwicklung auf dem Halbleitermarkt erfordert von den Herstellern sehr hohe Investitionen für den Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionsetat.

Zur Aufrechterhaltung dieser Entwicklung legt die International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) für die Halbleiterindustrie entsprechende Spezifikationen und Meilensteine fest, die alle zwei Jahre durch ein Gremium neu erarbeitet werden.

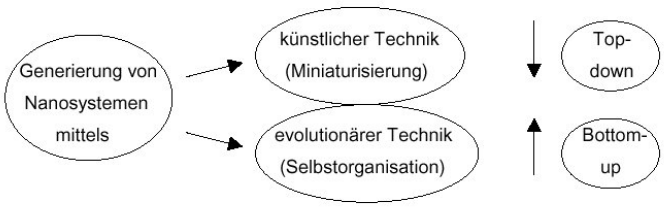
Ursprünglich 1992 als National Technology Roadmap for Semiconductors der amerikanischen Semiconductor Industry Association (SIA) entstanden, wurden im Jahr 1998 die wichtigen Halbleiter-Entwicklungsregionen Europa, Japan, Korea und Taiwan mit einbezogen, so dass die ITRS heute die weltweite Entwicklung der Mikroelektronik vorgibt.

Die letzte gemeinsame Ausgabe aus dem Jahre 2003 der SIA sieht künftig einen dreijährigen Turnus zum Technologiewechsel voraus; bis zum Jahre 2001 gingen die Experten von einem zweijährigen Wechsel aus [DLamm 04].

Die Ursache dieses Turnuswechsels lag in der Frage begründet, wann die Massenproduktion für die 90-nm-Halbleiterproduktion (Prozessoren und Memorychips) erfolgen kann. Zwischenzeitlich konnten AMD und Intel mit der Auslieferung der 90 nm Chips beginnen. Bereits im Herbst 2003 kündigte Intel-Chef Paul Otellini die ersten Wafer mit SRAMs, gefertigt in einem 65-Nanometer-Prozess an [25]. In wenigen Monaten – im ersten Quartal 2006 - soll nun die erste Großserien-Produktion der Pentium-Prozessoren mit 65-Nanometer-Strukturen ausgeliefert werden [26]. Aufgrund einer merklichen Reduzierung der Leckströme und damit verbunden eine deutliche Reduzierung des Stromverbrauchs bei gleicher Performance sollen die Chips in mobilen, batterie- oder akkubetriebenen Geräten, wie beispielsweise PDA und Handy, zum Einsatz kommen.

Die Experten der SIA fragen sich schon seit längerem: wie lange kann das exponentielle Wachsen der Rechenleistung – Verdopplung der Komplexität eines Chips – auf Siliziumbasis noch anhalten. Vielleicht kann dies beim nächsten gemeinsamen Treffen der ITRS vom 19.-20. April 2006 in München geklärt werden. Der Fortschritt sei künftig schwieriger und stufenweise etwas langsamer – dreijähriger Turnuswechsel - zu bewältigen, aber bis zum Jahr 2018 könnten vielleicht Chips mit 15-nm Architektur gefertigt werden. Danach wären maximal noch ein bis zwei weitere Transistorverkleinerungen möglich, bis auch diese Fertigungsmethode auf Basis des extrem ultraviolettem Belichtungs- oder Lithographieverfahrens aufgrund des immer ungünstigeren Stromverbrauchs durch unerwünschte Leckströme endgültig an ihre Grenzen stößt.

Das bisherige Fortschreiten der konventionellen Mikroelektronik in Richtung immer kleinerer und dünnerer Strukturen stößt beim Übergang von der Mikro- zur Nanoelektronik zunehmend auf fundamentale physikalische als auch ökonomische Grenzen, insbesondere im Bereich der Prozess-, Material- und Designtechnologien. Aus diesem Grund machen sich führende Halbleiterhersteller bereits heute ihre Gedanken – für die Zeit nach 2018 – wenn voraussichtlich die Skalierung der Siliziumtechnik nicht fortgesetzt werden kann, wie sie ihre zukünftige Technologie- und Wettbewerbsfähigkeit weltweit weiterhin sichern können.



Der Marktdurchbruch in der zukünftigen Halbleiterherstellung und somit auch für die Informations- und Kommunikationstechnik könnte sich auf Basis der Nanoelektronik in zwei Schritten vollziehen:

Zunächst werden mit neuen Lithographieverfahren - welche extrem kurze Lichtwellen verwenden - immer kleinere Strukturen in Silizium-Rohlinge geätzt (Top-down). Längerfristig könnte die „Bottom-up-Nanoelektronik“ und „Nanosystemtechnik“ genutzt werden, in denen die „echte“ Nanotechnologie eingesetzt wird; kontrollierte Selbstorganisationsprozesse einzelner Atome oder Moleküle werden für den Aufbau von Schaltkreisen und Systemen genutzt.

Um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, werden bereits heute sehr viele Forschungsprojekte im Bereich der Nanostrukturen mit einer Reihe innovativer Materialien - wie Kohlenstoff-Nanoröhrchen, Silizium-Nanodrähte, Tri-Gate-Transistoren, Spintronik-Bauelemente, Interferenzbauelemente, optische Schalter und Verbindungshalbleiter - ins Leben gerufen.

4.5.2 Die Erfindung des Transistors und der integrierten Schaltung

Lange bevor die amerikanischen Physiker Walter Brattain, William Shockley und John Bardeen Ende des Jahres 1947 den Transistor auf der Basis des Kristalltrioden-Konzepts (Verbund unterschiedlich dotierter Germanium-Kristalle mit Emitter, Basis und Kollektor) in den Laboratorien des Telefonkonzerns Bell entdeckt hatten, legten viele Pioniere, wie Maxwell, Hertz und Faraday, die Grundlagen dafür, dass die elektrische Energie für die Menschen nutzbar wurde.

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zum Schalten und Verstärken von elektrischem Strom verwendet wird. Die Bezeichnung ist eine Kurzform für die englische Bezeichnung transient resistor, die den Transistor als einen durch Strom steuerbaren Widerstand beschreibt.

Weitgehend von der Öffentlichkeit unbeachtet bleibt jedoch bisher die Tatsache, dass nur zwei Monate später die beiden Deutschen Herbert Mataré und Heinrich Welker in den Labors von Westinghouse in Paris unabhängig von Brattain einen eigenen Transistor präsentierten, den sie „Transistron“ nannten. Als Mataré 1952 dann in Deutschland die Transistorenfirma Intermetall gründete, konnte er bereits ein Jahr vor dem ersten amerikanischen Transistorradio und zwei Jahre vor dem legendären Sony TR-55 den ersten Prototypen eines Transistorradios mit Kopfhörern präsentieren [FKreu].

Texas Instruments kommerzialisierte 1954 den Transistor und Regency brachte damit das erste Transistorradio TR1 auf den amerikanischen Markt. Damit war zum ersten Mal für alle Musik und Information ortsunabhängig frei zugänglich, was eine weitere Revolution auslöste: den Rock'n Roll. Vollends den Stein ins Rollen brachte dann die Erfindung des integrierten Schaltkreises im Oktober 1958 durch den Amerikaner Jack St. Clair Kilby, Wissenschaftler bei der Firma Texas Instruments Inc. Die erste integrierte Schaltung, war eine neuartige, miniaturisierte elektronische Schaltung, in der die verschiedenen elektronischen Bauteile wie Widerstand, Kondensator, Diode und Transistor auf einem Halbleiter-Substrat (Germanium) integriert aufbaut wurden. Am 12. September 1958 führte er den 1. Prototyp seines integrierten Schaltkreises – einen Phasenschiebungs-Oszillator – vor. Sein Patent Nr. 320275 wurde ihm erst 1964 nach erbitterten gerichtlichen Streitigkeiten erteilt, da nahezu zeitgleich der Amerikaner Norbert Noyce (Faichild Semi.) und der Schweizer Physiker Jean Amedee Hoerni 1958 die Planartechnik zur Herstellung von integrierten Halbleiterbauelementen verwirklicht hatten, aber später zum Patent anmeldeten [27]. Noyce brachte die Planartechnologie zur Praxisreife und schuf damit die Grundlage für die industrielle Fertigung der Chips.

Gordon Moore, Robert Noyce und Andy Grove wollten Mitte der 60er Jahre die schwerfälligen Magnetspeicher in den riesigen Computern durch miniaturisierte Transistoren aus Silizium ersetzen. Um dies zu verwirklichen, gründeten sie am

18. Juli 1968 die Start-Up-Firma Intel.

Ihr Auftragsbuch füllte anfänglich gerade mal eine einzige Seite.

Ein Jahr nach der Firmengründung, 1969, entwickelte Intel-Ingenieur Marcian Ted Hoff den ersten Mikrocomputer Intel 4004 mit 2300 Transistoren. Es folgten:

- die 8 Bit Generation mit den Prozessoren Intel 8008 (April 1972), Intel 8080 (April 1974), Intel 8085 (1976)
- die 16 Bit Generation mit den Prozessoren Intel 8086 (Mai 1978), Intel 80186 (1981), Intel 80286 (Mai 1983)
- die 32 Bit Generation mit den Prozessoren Intel 80386 (Oktober 1985), Intel 80486 (April 1989), Pentium (März 1993), Pentium Pro (November 1995), Pentium II (1997), Pentium III (1999), Pentium 4 (2000)
- die 64 Bit Generation mit den Prozessoren Itanium (2001), Itanium II (2002), Xeon (2004), Celeron (2005) [BLeit], [28].

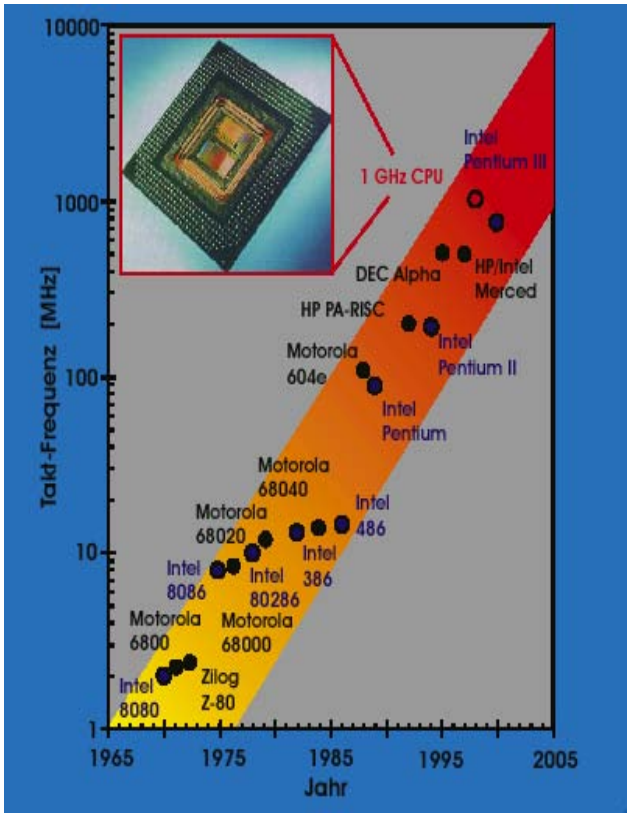


Abbildung 4.33: Entwicklung der Mikroprozessoren

Gordon Moore bemerkte 1965, nur wenige Jahre nach der Erfindung der Integrierten Schaltung im September 1958 durch Jack Kilby, dass die Dichte der Transistoren auf einer Integrierten Schaltung mit der Zeit exponentiell ansteigt. Als Folge daraus wächst auch die Rechenleistung der Computer exponentiell, d.h die Menge der Daten, die ein Chip speichern kann, verdoppelt sich alle 18 Monate.

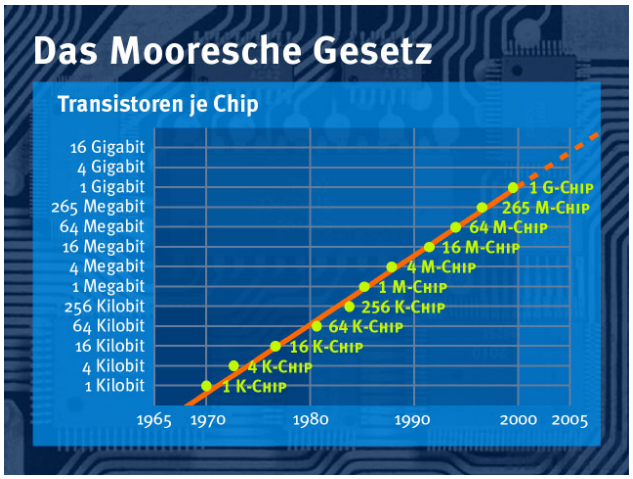


Abbildung 4.34: Moorsches Gesetz

Die Presse griff diese Äußerungen von Gordon Moor auf und nannte diese Regelmäßigkeit das **Mooresche Gesetz**.

Seit über 30 Jahren hat sich das Mooresche Gesetz bewährt, welches die zeitabhängige Reduzierung der Abmessung von Siliziumtransistoren beschreibt.

Die von der japanischen Firma Fujitsu prognostizierte Extrapolation dieser Kurven zeigt (Abbildung 4.35), dass es zwei Wege zur weiteren Miniaturisierung gibt.

In den ersten Jahrzehnten des neuen Jahrtausends muss entschieden werden, ob der Quantensprung in die Nanoelektronik realisiert werden kann oder ob die Moore 'sche Kurve in eine Sättigung geht und vielleicht im Jahre 2018 Chips in

15 nm - Architektur gefertigt werden können, um danach endgültig an ihre physikalischen Grenzen zu stoßen.

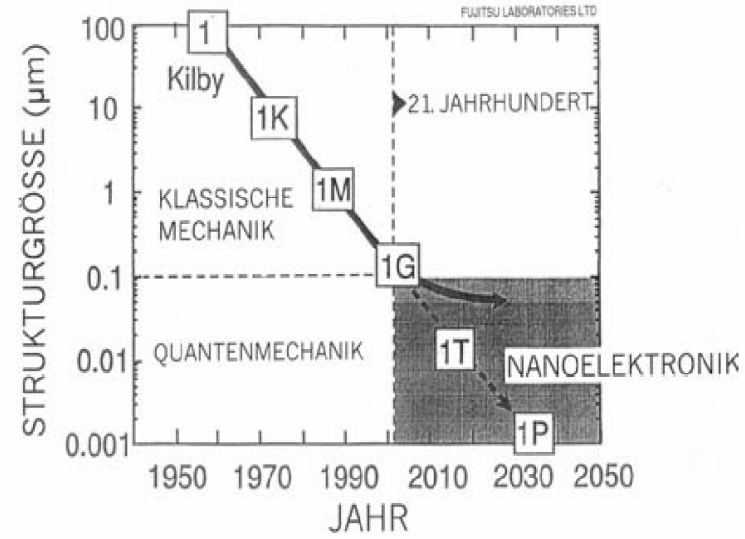


Abbildung 4.35: Extrapolierte Kurve der moorschen Gesetzmäßigkeit

Dabei spielen nicht nur physikalische Gesetzmäßigkeiten – wie beispielsweise:

- die Elektromigration (durch zu hohe Stromdichten), eine von elektrischen Strömen im Festkörper hervorgerufene allmähliche Materialwanderung aufgrund der Wechselwirkung der bewegten Elektronen (Elektronenwind) und den Metallionen in den Gitterstrukturen unter dem Einfluss des Elektronenimpulses, der zur Degradation von Funktionsschichten und den Leiterbahnen führt und somit zum endgültigen Ausfall der integrierten Schaltung
- die quantenmechanische Wellennatur der Elektronen, die bei Abmessungen in der Größenordnung der DeBroglie-Wellenlänge

  ($\lambda_e \approx 8$nm) das elektronische Verhalten von den zulässigen Energiezuständen bis zu Leckströmen durch Quantentunneln dominiert sowie

- die Auflösung der lithografischen Herstellungsverfahren integrierter Schaltungen

eine Rolle, sondern ebenfalls ökonomische Randbedingungen, da der Technologieaufwand überproportional anwächst.

Falls die lineare Extrapolation der Mooreschen Kurve realisiert wird, kommt man in den Bereich von Strukturgrößen, bei denen das elektronische Verhalten der Bauelemente durch Quanteneffekte qualitativ verändert wird. Ein Ende der Miniaturisierung ist bei der Größe einzelner Atome zu erwarten, da die Verdrahtung der Zelle auf einem Chip nicht dünner als ein einzelnes Atom werden kann.

Die Masken der heutigen mikroelektronischen Bauelemente werden mit Eximer Lasern, die mit Wellenlängen von 193 und 248 Nanometern arbeiten, belichtet.

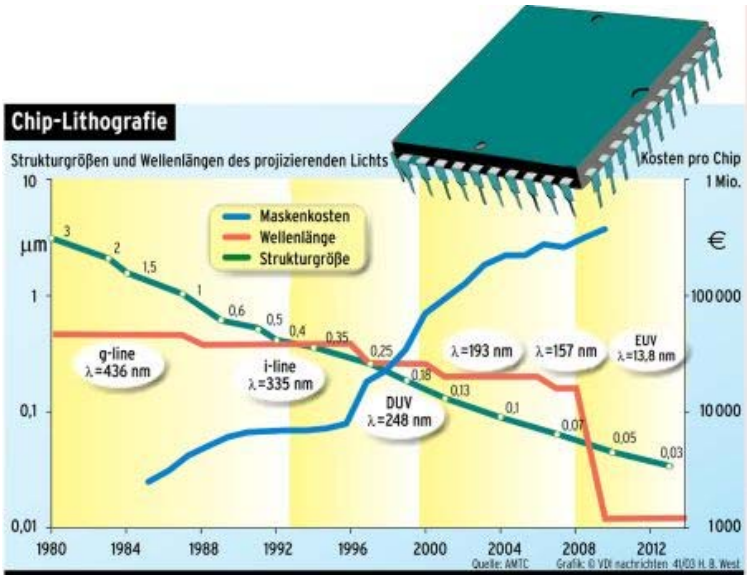


Abbildung 4.36: Strukturgrößen in Abhängigkeit zu den Chipkosten

Sie gehören schon in den unsichtbaren, kurzwelligen UV-Bereich.

Für die nächste Chipgeneration, die im Jahre 2006 in die Produktion gehen soll, sind Wellenlängen von 157 nm vorgesehen, die mit Fluor-Lasern erzeugt werden können.

Nach den Visionen der „International Technology Roadmap for Semiconductors“ (ITRS) sind Verkleinerungen der Strukturabstände zwischen 50nm und vielleicht sogar 35nm möglich, ohne die Funktionsweise der elektronischen Schaltungen zu verändern.

Da in wenigen Jahren die Grenze der optischen Belichtungstechnik endgültig ausgereizt sein wird, werden bereits heute in den Labors die Grundlagen für die „Extreme Ultraviolett-Lithographie“ (EUVL) geschaffen, die mit einer extrem kurzwelligen UV-Strahlung von nur noch 13 nm Wellenlänge betrieben werden und so Strukturabstände von zunächst 50 nm und später unter 35 nm ermöglichen.

Es ist auch zukünftig zu erwarten, dass der Bedarf an Rechenleistung der integrierten Schaltungen zunehmen wird. Durch hohe technologische Herausforderungen – wie die Extreme Ultraviolett-Lithographie - kann eine weitere Minimalisierung der Strukturgröße realisiert und damit die Leistungsfähigkeit gesteigert werden. Die Herstellung von Mikroprozessoren wird zunehmend kostenintensiver und sie wird einmal auf eine Strukturgröße stoßen, unterhalb derer keine kleinere Skalierung möglich ist.

Daher ist man bemüht, Alternativen für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen zu finden. Ein Ansatz besteht darin, die Strukturelemente nicht wie bisher durch Modellierung des Trägermaterials zu erstellen, sondern Moleküle mit den gewünschten elektrischen Eigenschaften zu verwenden, welche auf dem Trägermaterial anzuordnen und miteinander zu verbinden sind.

Diesen entgültigen Quantensprung in der Miniaturisierung der elektronischen Schaltkreise erhoffen sich die Wissenschaftler durch die Nanoelektronik und hier speziell durch die Kohlenstoff-Nanoröhren.

Diese Carbon Nanotubes weisen den Vorteil auf, dass sie kontrolliert und definiert wachsen. Ob es zur Ablösung von Silizium durch diese Nanotubes komplett oder ob es zu einer Wechselbeziehung kommt und einzelne Elemente davon in der zukünftigen Siliziumtechnologie Einzug halten werden und der CMOS-Fertigungstechnik den Schritt in den einstelligen Nanometerbereich ermöglichen,

kann heute mit Bestimmtheit keiner beantworten. Wissenschaftlich geklärt ist, dass sich Kohlenstoff-Strukturen auch auf Silizium-Wafer aufbringen lassen. Dies eröffnet Perspektiven zur Herstellung von Carbon-Schaltkreisen, die mit der herkömmlichen Siliziumtechnologie kompatibel sind.

Wenn die Nanotechnik in etwa hält, was sie bisher versprochen hat, getreu dem Motto: immer kleiner, dünner und zuverlässiger, können wir nicht nur mit extrem schnellen Transistoren auf der Basis von Nanodrähten und völlig neuen Speicherkonzepten rechnen, sondern auch Elektronikschaltungen entwickeln, die mit winzigen Maschinen aus der MEMS-Technologie (Micro electro mechanical Systems) kombinierbar sind. Deren Verwendung zielt in Richtung der angestammten MEMS-Anwendungsbereiche Automobilelektronik, Kommunikations- und Datentechnik sowie Medizinelektronik und eine Reihe weiterer, sehr attraktiver Einsatzmöglichkeiten mit hervorragenden Wachstumschancen. MEMS in der Medizintechnik finden heute sowohl als winzige Sensoren zur Blutdruckmessung in Kathedern oder Manschetten als auch in Form von Mini-Beschleunigungssensoren in Herzschrittmachern ihre Anwendung.

Die Nanoelektronik könnte den Bereich bis zur Größe einzelner Atome ausfüllen. Auch wenn bei Hochenergiephysikern die Hoffnung besteht, noch kleinere Teilchen als Atome für die Informationsspeicherung und Verarbeitung einsetzen zu können, scheint es unrealistisch, die Serie Mikro- und Nanoelektronik mit Piko- und Femtoelektronik fortzusetzen (Abbildung 4.37).

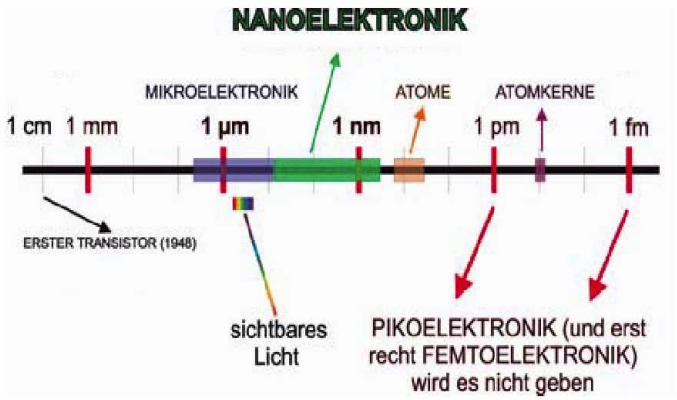


Abbildung 4.37: Zukunft der Nanoelektronik

Die Ansätze der heutigen Grundlagenforschung für die Nanoelektronik konzentrieren sich auf Nanotubs, molekularelektronische Speichermedien, Einzelelektronen-Transistoren, Quantenpunkt-Bauelemente, die Spintronik, photonische Kristalle, staubkornkleine Chipsysteme („smart dust“) sowie DNA- und Quantencomputer.

4.5.3 Neue Materialien, Bauelemente und Konzepte zukünftiger Computer

4.5.3.1 Resonanztunnel Elemente

Resonanztunnelelemente, d. h. Resonanz-Tunnel-Dioden (RTD) und Resonanz-Tunnel-Transistoren (RTT), stellen eine wichtige Brücke zwischen herkömmlichen Festkörper-Halbleiter-Bauelementen und den Quanteneffekt-Bauelementen dar. Nähert man sich bei den Strukturgrößen eines Bauelements der so genannten de-Broglie-Wellenlänge, so verhalten sich die Elektronen nicht mehr wie Teilchen, sondern als Welle. Es treten charakteristische Eigenschaften wie Interferenzen oder Tunneln auf.

4.5.3.1.1 Resonanz-Tunnel-Diode

Zur Beschreibung der Funktionsweise der Resonanz-Tunnel-Diode (RTD) ist der quantenmechanisch zu erklärende Tunnelprozess von grundlegender Bedeutung. Die RTD, die im Jahre 1974 von L.L. Chang, L.Esaki, R. Tsu erstmals vorgestellt wurde, stellt neben weiteren wie z.B. dem Ein-Elektron-Transistor (SET) und dem Resonant Tunneling Hot Electron Transistor (RHET) das quantenmechanische Bauelement dar, das bereits zuverlässig bei Raumtemperatur funktioniert und ermöglicht so einen schaltungstechnischen Einstieg in die Welt der Quantenschaltelemente.

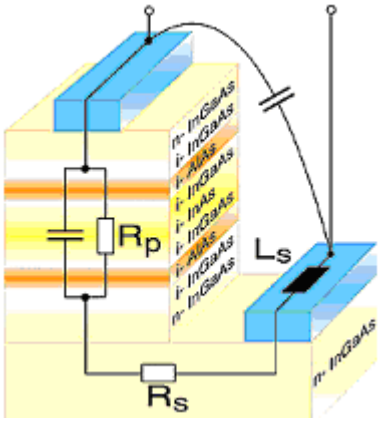


Abbildung 4.38: Schematischer Aufbau einer RTD

Die RTD besteht im Kern aus zwei ca. 15 Atomlagen dicken Aluminiumarsenid Schichten (AlAs) als elektronische Barriere (Wände), getrennt durch eine ebenfalls nur ca. 20 Atomlagen dünne Mittelschicht. Die Herstellung der dafür erforderlichen Halbleiterschichtpakete für die Resonanztunneldioden (Abbildung 4.38) erfolgt mit der Molekularstrahlepitaxie auf Indiumphosphid-Substraten. Dieses Verfahren erlaubt die atomlagenweise Schichtung unterschiedlicher Kristalle wie z.B. Indiumarsenid (InAs) und Aluminiumarsenid (AlAs) und deren Mischkomponenten [29].

Die Strom-Spannungs-Kennlinie hat grundsätzlich Diodencharakter. Bis zu einer gewissen Spannung überlagert sich jedoch ein Tunnelstrom, der ab einem bestimmten Schwellwert abfällt und damit eine abfallende Kennlinie zur Folge hat (Abbildung 4.39).

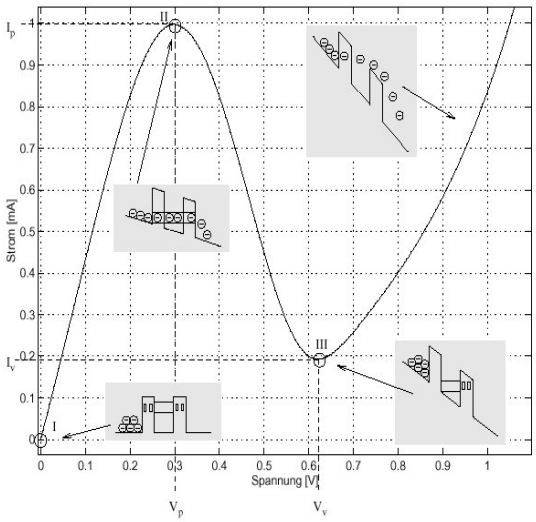


Abbildung 4.39: Strom-Spannungs-Kennlinie einer RTD

Mögliches Einsatzgebiet stellen z.B. Oszillator-Bauelemente dar. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen könnten auch Hochfrequenz-Oszillatoren im THz-Bereich realisiert werden. Im Forschungszentrum Jülich wurde bereits ein Streifenleiteroszillator auf Halbleiterbasis in integrierbarer Technologie planar aufgebaut, der als wesentliches Element eine Resonanz-Tunnel-Dioden auf GaAs Basis enthält, deren charakteristische Eigenschaft eine negativ-differentielle Strom-Spannungskennline darstellt. Mit diesem neuen RTD-Oszillator ist eine Optimierung der Ausgangsleistungen – in einem Frequenzbereich > 100 GHz – möglich [30]. Aber auch sehr schnelle logische Systeme sind vorstellbar, die zwischen den eingezeichneten bistabilen Punkten (II und III) schalten würden.

4.5.3.1.2 Resonanz-Tunnel-Transistor

Wie bereits beschrieben, werden in der klassischen Mikroelektronik die Halbleiterbauelemente – aufgrund der Vorgaben der ITRS - immer kleiner. Die kleinsten Strukturgrößen werden in wenigen Jahren das sogenannte Quanten-Limit erreichen.

Im Institut für Schichten und Grenzflächen (ISG) des Forschungszentrums Jülich werden durch elektronenlithographische Methoden kleine Resonanz-Tunnel-Transitoren mit Strukturgrößen kleiner 100 nm hergestellt [31].

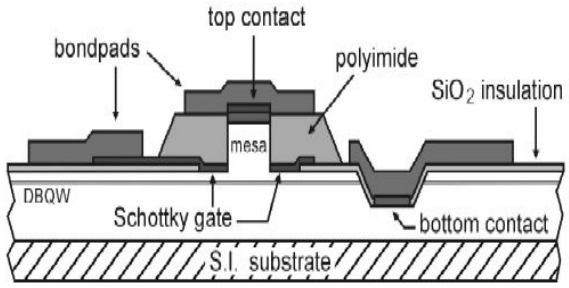


Abbildung 4.40: Schematischer Aufbau eines Resonanz-Tunnel-Transistors

Da bei Resonanz-Tunnel-Transistoren nur geringe Ladungsmengen transportiert werden, besitzen sie eine geringe Leistungsaufnahme und schnellere Schaltzeiten (bis 350 GHz) als die üblichen CMOS-Transistoren. Bild 4.40 zeigt den schematischen Aufbau eines RTT mit einem Schottkygate.

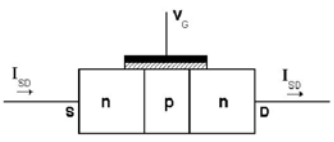
4.5.3.2 Einzelelektronen Transistor

Einzelelektronen-Tunnel (Single Electron Tunnelling, SET) Transistoren sind die Schlüsselbauelemente für eine zukünftige Nanoelektronik, die auf dem Effekt der Coulomb-Blockade beruhen. Sie gestatten den kontrollierten Transfer einer einzigen Elementarladung.

Einzelelektronen Transistoren könnten die Feldeffekt-Transistoren ablösen, wenn die heutige CMOS-Technologie an die Grenzen der Miniaturisierung stößt. Sie bestehen im Wesentlichen aus einer „Insel“, die sich zwischen zwei Tunnelkontakten befindet. Über diese Kontakte können die Elektronen auf die Insel tunneln oder von ihr abfließen.

Im Wesentlichen ähnelt der Aufbau des SETs des einen konventionellen MOSFETs.

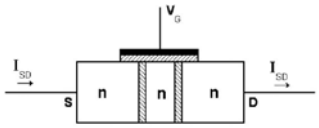
Um den Strom I_{SD} beim MOSFET zu steuern, genügt es, die Gatespannung V_G zu verändern.



MOSFET

Die p-dotierte Schicht kann nicht beliebig verkleinert werden, da unter 20 nm Schichtdicke Quanteneffekte auftreten - der sogenannte Tunneleffekt - der den Stromkanal und die Steuerelektrode kurz schließt und somit das Bauelement zerstört.

Der Stromfluss beim SET kann ebenfalls durch eine Spannung V_G an der Steuerelektrode beeinflusst werden. Die Insel kann theoretisch auf atomare Größe verkleinert werden.



SET

Es gibt viele Typen von SET-Transistoren, die aus unterschiedlichen Materialien (Metalle, Halbleiter, Kohlenstoff-Nanoröhrchen, Atomcluster) aufgebaut sind, unterschiedliche elektrische Parameter und Abmessungen besitzen und in verschiedenen Temperaturbereichen (von Millikelvin bis Raumtemperatur) arbeiten [KHof 00].

Beispielsweise bestehen die klassischen metallischen SET-Transistoren aus zwei Tunnelkontakten des Typs Metall - Isolator - Metall mit einer kleinen metallischen Insel zwischen den Kontakten.

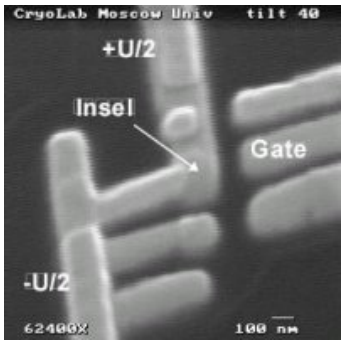


Abbildung 4.41: SET-Transistor aus AL-AL2O3-AL mit Winkel-Schrägschattenbedampfung

Diese Insel wird durch eine kapazitiv angekoppelte Steuerelektrode polarisiert. Damit ein Elektron vom Source-Gebiet durch die Isolatorschicht auf die Metallinsel und zum Drain-Gebiet tunneln kann, muss das Elektron jeweils einen diskreten Energiebetrag entsprechend der Gleichung $Ec=e^2/2C$ (Coulomb-Ladungsenergie, C stellt die Gesamtkapazität der Insel dar) überwinden. Dieser Drainstrom kann über den Gate-Anschluss gesteuert werden. Um das Bauelement auch bei Raumtemperatur betreiben zu können, dürfen die Metallinsel sowie die Isolatorgebiete nicht größer als zwei Nanometer sein. Dies gelang einer Gruppe von Wissenschaftlern um C. Dekker an der Technischen Universität Delft [TTeep]. Die Besonderheit ihrer Untersuchungen lag darin begründet, dass dieses Bauelement aus einem metallisch leitenden Kohlenstoff-Nanoröhrchen präpariert wurde, also einem zylindrischen Kohlenstoffmolekül aus der Familie der Fullerene mit einem Durchmesser von nur wenigen Nanometern.

Anwendung fand ein SET z.B. an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara zur Bestimmung extrem kleiner Abstände.

Die Wissenschaftler nutzten für ihre Messung, dass die vibrierende Metallelektrode die Spannung beeinflusst, wenn einzelne Elektronen durch den SET diffundieren. Diese Spannungsdifferenz wird gemessen, sie erlaubt Rückschlüsse auf die Größe der Vibrationsauslenkung der Elektrode.

Die Messeinrichtung ist extrem empfindlich. Mit ihr können die Wissenschaftler Abstände von einem billionstel Meter messen. Diese Länge entspricht etwa einem Hundertstel des Durchmessers eines einzelnen Atoms [32].

4.5.3.3 Triple-Gate-Transistor

Die Entwicklung des Triple Gate MOSFET (Kanallänge 15 nm, Abbildung 4.42) Transistors erlaubt es den Halbleiterherstellern (z.B. Intel, AMD, IBM), das „Moorsche Gesetz“ in der „alten“ Siliziumtechnik entsprechend den Vorgaben der ITRS für 2007 – Realisierung eines Milliarden Transistor-Chip’s - weiter zu verfolgen.

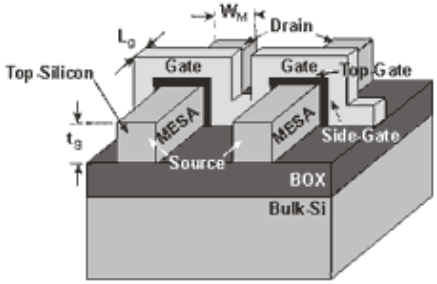


Abbildung 4.42: Triple Gate Transistor

Während der Strom in herkömmlichen MOSFETs nur an der planaren Oberfläche gesteuert wird, erfolgt bei dem Triple-Gate-Transistor eine dreiseitige kontrollierte Steuerung. Aufgrund der dreiseitigen Ansteuerung von oben und von den beiden Seiten wird bei dieser Transistorkonfiguration von einem „Triple-Gate-Transistor“ gesprochen. Im Bild 4.42 ist der schematische Aufbau eines Triple-Gate-Transistors dargestellt.

Das Design des dreidimensionalen Transistors mit einem Gatter auf der oberen Seite und zwei Gatter an den Seiten zeigt im Rasterelektronenmikroskop (REM) das Bild 4.43.

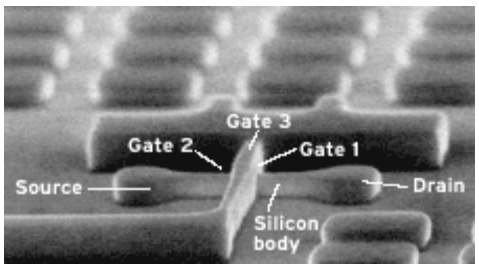


Abbildung 4.43: REM-Aufnahme eines Triple-Gate-Transistors

Diese drei Gatter definieren die gesamte Gatterbreite. In 5000 – facher REM - Vergrößerung ist im Bild 4.44 dargestellt, wie sich das Gate um die Leiterbahnen des Transistors windet. Durch diesen Schaltungsentwurf werden kürzere Schaltzeiten des Transistors erreicht.

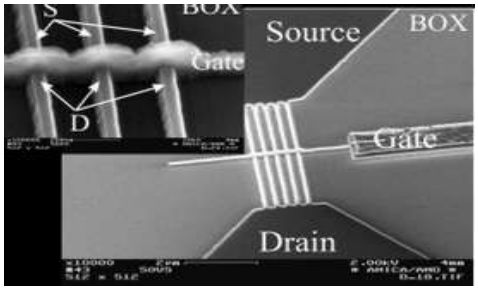


Abbildung 4.44: 5000-fache REM-Vergrößerung eines Triple-Gate-Transistors

Herstellungsverfahren der Triple-Gate-Transistoren

Mit einem neuen Herstellungsverfahren, einer Kombination aus **Silicon-on-Insulator (SOI)** Technologie und Nickel-Silicide Metal-Gate werden die Bauelemente in einer sehr dünnen Halbleiterschicht aus Silizium (Siliziumfilm) hergestellt, die auf einer vergrabenen isolierenden Schicht (Box) liegen. Mit dieser Maßnahme – Oxidschicht unmittelbar an der Unterseite der dotierten Gebiete von Drain und Source - wird dem unerwünschten Leckstrom zwischen Drain und Source bei einem stromlosen Transistor begegnet. Somit ist es ebenfalls möglich, eine vollständige dielektrische Isolation jedes einzelnen Bauelementes einer integrierten Schaltung zu erreichen.

Weiterhin sorgt dieses Verfahren einerseits für eine „Streckung“ des Siliziumgitters innerhalb des elektrischen Pfads und damit für eine verbesserte Mobilität der Ladungsträger. Andererseits erhöht diese Struktur die effektive Breite des elektrischen Pfads im Transistor und ermöglicht somit eine verbesserte Streuung des Stromflusses.

Diese genannten Faktoren führen zu höheren Durchlassströmen, niedrigeren Sperrströmen sowie kürzeren Schaltzeiten, was insgesamt zu einer höheren Transistorleistung - mit Taktfrequenzen im Terahertz-Bereich - und somit zu höheren Prozessorgeschwindigkeiten führt.

Die Herstellung des vergrabenen Isolators erfolgt meist in einem separaten Arbeitsschritt vor dem Beginn der jeweiligen Prozesstechnologie. Für die Herstellung der SOI-Wafer aus herkömmlichen polierten Siliziumwafern werden unterschiedliche Herstellungsverfahren - das SIMOX-, das Bonding-Wafer- und das Smart-Cut-Verfahren - angewendet.

Separation-by-Implantation-of-Oxygen – Verfahren (SIMOX)

Beim SIMOX -Verfahren werden Sauerstoff-Ionen in einer sehr hohen Dosis tief in einen Siliziumwafer geschossen. Beim anschließenden Ausheilen der Strahlenschäden bei Temperaturen über 1000°C bildet sich eine geschlossene homogene Schicht Siliziumdioxid in der Tiefe (Graben). Dieses Verfahren ergibt für elektronische Schaltkreise zahlreiche Vorteile: geringere ohmsche und kapazitive Verluste ermöglichen höhere Arbeitsfrequenzen und Leistungen pro Chipfläche. Gleichzeitig verringern sich der Energiebedarf und damit die Speisespannung (wichtig bei Batteriespeisung). Hinzu kommen erhöhte Resistenz gegen Temperatur und ionisierende Strahlung. Nachteilig bei diesem Verfahren sind die relativ hohen Investitionskosten für den Hochstrom Ionenbeschleuniger und die erforderlichen leistungsfähigen Öfen.

Bonding-Wafer-Verfahren (Direktbonden)

Gegen einen Substratwafer wird durch direkten atomaren Kontakt durch einen klebstofffreien Prozess ein zweiter Wafer „angesprengt“. Er stellt – ganz unabhängig vom Substratwafer – das gewünschte Material der Dünnschicht zur Verfügung und

anschließend erfolgt ein Rückverdünnen einer Seite bis zur gewünschten Stärke der aktiven Schicht.

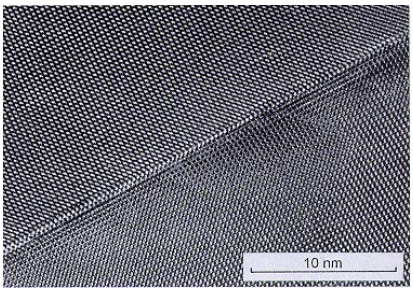


Abbildung 4.45: Elektronenmikroskopische Querschnittsabbildung an der Kontaktfläche zweier direkt gebondeter und getemperter Saphir-Wafer

Entscheidend für das Direktbonden sind neben der geometrischen Passfähigkeit die mikroskopische Ebenheit der Oberflächen und ihre verfügbaren atomaren bzw. molekularen Bindungszustände.

Gewöhnlich führt das Bonden in Luft bei Raumtemperatur zu einer relativ schwachen van-der-Waals-Bindung. Um stärkere Bindungen zu aktivieren, werden die Partner nachträglich erwärmt (getempert). Man strebt möglichst geringe Erwärmung an, einerseits aus ökonomischen und technologischen Gründen – etwa um temperaturempfindliche Strukturen zu schonen – und andererseits zum Begrenzen thermischer Spannungen, um die Auswahl unterschiedlicher Materialien möglichst nicht einzuschränken.

Rückverdünnen durch Schleifen und Polieren bedeutet Verluste (opfert einen Wafer) sowie einen hohen Aufwand, besonders bei teurem Material und der Forderung nach homogener, möglichst geringer verbleibender Dicke.

Wirtschaftlicher und eleganter ist demgegenüber das „Absprengen“ des Wafers unter zurücklassen einer vorher bestimmten Schichtdicke. Dies gelingt unter Vorgabe einer definierten Rissebene mit dem sog. Smart-Cut-Verfahren.

Smart-Cut-Verfahren

Ein ziemlich neues Verfahren, das Smart-Cut-Verfahren, besteht in der Implantation von Borionen zusätzlich zur Wasserstoff-Implantation. Damit werden dicht unterhalb der Oberfläche eines Festkörpers Störungen erzeugt, die bei anschließender Erwärmung Risskeime und schließlich einen makroskopischen Riss parallel zur Oberfläche ausbilden. Dadurch wird eine dünne Schicht abgesprengt. Verbleibende Unebenheiten der entstandenen Oberfläche lassen sich anschließend problemlos polieren.

Vorteile der SOI-Technologie

- Bei der SOI-Technologie wird eine Isolierschicht zwischen die Oberfläche eines Siliciumwafers (auf der die Halbleiter-Chips hergestellt werden) und das Siliciumsubstrat eingebracht, um schnellere Bauteile zu produzieren, die einen wesentlich geringeren Stromverbrauch aufweisen als Chips aus üblichen Siliciumwafern.
- Die relative Treiberfähigkeit der Transistoren steigt durch die wesentlich verringerten Source- und Drain-Kapazitäten. Diese beeinflusst in herkömmlichen sperrschichtisolierten Technologien mittlerweile in starkem Maße die Verzögerungszeit eines Gatters.

- Ebenfalls kann die parasitäre Kapazität insbesondere zwischen den unteren Verdrahtungsebenen und dem Substrat um bis zu 20 Prozent verringert werden. In diesem Zusammenhang verstärken SOI-Technologien den Zugewinn, der durch den Einsatz von Kupfer-Metallisierung und low-k-Materialien erreicht wird.
- Auf Grund eines steileren Ausschaltverhaltens kann die Schwellenspannung der Transistoren geringer gewählt werden. Hierdurch erhöht sich bei sonst unveränderten Parametern unter anderem der Sättigungsstrom und somit die erreichbare synchrone Schaltfrequenz. Alternativ kann bei gleich bleibender Leistungsfähigkeit die Versorgungsspannung reduziert werden, was für den rapide wachsenden Markt der low-power / low-voltage-Anwendungen für batteriebetriebene portable Geräte von großem Interesse ist.
- Das Volumen der Sperrschichten an allen pn-Übergängen bestimmt wesentlich das Leckstromverhalten einer CMOS-Schaltung. Da diese Sperrschichten jedoch in sehr viel geringeren Ausmaßen vorliegen, ergeben sich Unterschiede im Bereich von bis zu zwei Größenordnungen zu Gunsten von SOI-Technologien.
- Durch die vollständige dielektrische Isolation der Bauelemente durch den Isolator Siliziumdioxid (SiO_2) lassen sich aufwendige Zwischenschritte zur lateralen Isolation, wie sie z.B. mit der sogenannte „Shallow Trench Isolation“ (STI) notwendig werden, umgehen.

Anwendung des Triple-Gate-MOSFETs als nichtflüchtiger Speicher

Auf der Basis der vorgestellten Triple-Gate-MOSFETs wurden am Institut für Halbleitertechnik der RWTH Aachen (IHT) Speicherbauelemente hergestellt, die auch ohne Spannungsversorgung Informationen speichern und somit als nichtflüchtige Speicher bezeichnet werden können.

Hierzu wurde die Gate-Isolationsschicht durch zwei isolierende Siliziumdioxid-Schichten ersetzt, zwischen denen nur wenige Nanometer große Nanodots aus Silizium angeordnet sind. Diese Nanodots wurden mittels eines speziellen Niederdruck Depositionsprozesses (LPCVD – Low Pressure Chemical Vapor Deposition) aus der Silan-Gasphase (SiH4) abgeschieden. Silan ist ein pyrolytisches Gas, das mit Luft oder Wasserdampf explosionsartig reagiert.

Dieser Depositionsprozess ist selbstorganisierend. Dies bedeutet, dass Größe, Anordnung und Form der Silizium-Nanodots sich aufgrund der Material- und Prozessparameter ergeben, ohne dass aufwändige Strukturierungsverfahren

für die Definition der einzelnen Nanodots - welche einen Durchmesser von 5-10 nm aufweisen - angewendet werden müssen.

Auf einer Fläche von einem Quadratmillimeter finden ca. vier Milliarden Nanodots Platz (Dichte $4 \cdot 10^{11}$ cm^{-2}). Nach der Deposition einer zweiten isolierenden Siliziumdioxid Schicht und der Herstellung der obersten Gate-Elektrode konnte so ein Speicher-Feldeffekttransistor herstellt werden, wie die Querschnittdarstellung im Bild 4.46 zeigt.

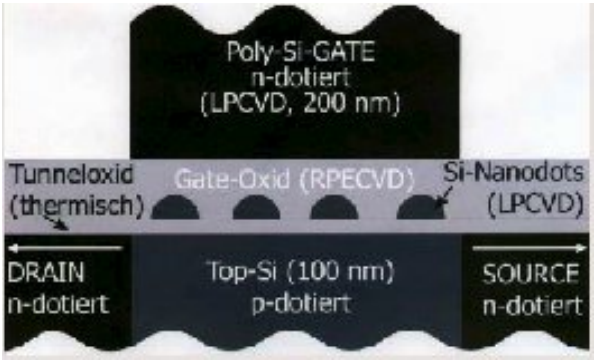


Abbildung 4.46: Querschnitt eines Floating-Dot- Speichertransistors aus Silizium Nanodots

4.5.3.4 Feldeffekttransistoren auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren

Elementarer Kohlenstoff (carboneum) ist ein preiswertes und häufig vorkommendes Material. Kohlenstoff ist den Menschen schon seit langer Zeit bekannt, er wurde in Form von Holzkohle verwendet. Die Römer setzten diese carbo fossiles zur Metallgewinnung ein, während die Chinesen sie zur Porzellanherstellung verwendeten. Erst A.L. Lavoisier erkannte 1775, dass es sich um ein eigenständiges Element handelt und gab ihm den Namen carboneum. 1985 entdeckten Sir Harold W. Kroto, Richard E. Smalley und Robert F. Curl die so genannten **Fullerene**, eine neue Modifikation des Kohlenstoffs. Der elementare Kohlenstoff existiert in mehreren Modifikationen, als farbloser, kubischer Diamant, als grauer, hexagonal kristallisierender Graphit und in Form verschiedener Fulleren-Modifikationen.

Die Moleküle sind in der Form eines Fußballs aus Sechs- oder Fünfecken aufgebaut. Die drei Forscher erhielten dafür 1996 den Nobelpreis für Chemie.

Die eigentliche Geburtsstunde der Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon-Nanotubes oder kurz CNTs) war im Jahre 1991.

Sumio Iijima fand beim experimentieren mit seinem Fulleren-Generator unter bestimmten Reaktionsbedingungen im Ruß mikroskopisch kleine röhrenförmige Gebilde mit nur wenigen 10 nm Durchmesser, aber einigen Mikrometern Länge.

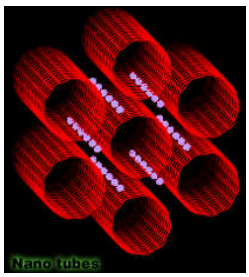


Abbildung 4.47: Kohlenstoffnanoröhre

Bei diesen Röhrchen sind die Kohlenstoffatome wie ein Gerüst von Sechsecken zu langgestreckten Hohlzylindern geformt, ihr Durchmesser kann von einem Nanometer bis zu einigen hundert Nanometern betragen. Ihre Wände bestehen wie die der Fullerene oder wie die Ebenen des Graphits nur aus Kohlenstoff, wobei die Kohlenstoffatome eine wabenartige Struktur mit Sechsecken und jeweils drei Bindungspartnern einnehmen (vorgegeben durch die *sp2*- Hybridisierung).

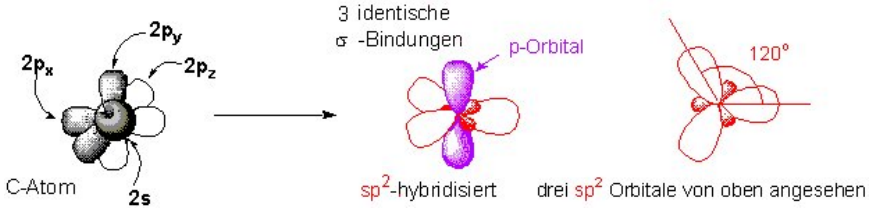


Abbildung 4.48: Hybridisierungsablauf zu 3 Bindungspartnern des Kohlenstoffs

Die Länge der Kohlenstoffnanoröhrchen liegt typischerweise zwischen 100nm und einigen µm, es wurden aber bereits Längen von 20 cm erreicht.

Man unterscheidet zwischen ein- und mehrwandigen (single wall nanotube SWNT bzw. multiple wall nanotube MWNT), zwischen offenen oder geschlossenen Röhren und zwischen leeren und gefüllten Röhren (z.B. mit Silber, flüssigem Blei oder Edelgasen). Der Durchmesser von SWCNTs liegt zwischen 0,4 nm und 5 nm.

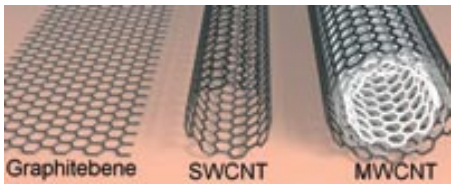


Abbildung 4.49: Ein- und mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen

Die inneren Röhren der mehrwandigen Nanotubes können bis zu 3 Angström (0,3 Nanometer) betragen, damit sind sie einige 10.000 Mal dünner als das menschliche Haar.

Fullerene

Fullerene sind neben Diamant und Graphit eine weitere allotrope Form des Kohlenstoffs. Sie sind kugelartige Gebilde mit einer geschlossenen Polyederstruktur, das häufig aus einer geraden Anzahl von Kohlenstoffatomen besteht. Sie folgen der Regel von Euler, nach der ein aus Fünf- und Sechsecken gebildeter Polyeder genau 12 Fünfecken besitzen muss, um eine in sich geschlossene Struktur zu bilden.

Ihre Entdecker R. Curl, H. Kroto und R. Smalley erhielten 1996 den Nobelpreis für Chemie.

Die bekanntesten und stabilsten Vertreter haben die Summenformeln C_{60}, C_{70}, C_{76}, C_{80}, C_{82}, C_{84}, C_{86}, C_{90}, C_{94}.

Das mit Abstand am intensivsten erforschte ist C_{60} – ein Molekül mit 60 Kohlenstoffatomen - das zu Ehren des Architekten Buckminster Fuller „Buckminister-Fulleren“ genannt wurde, da es den von ihm konstruierten geodätischen Kuppeln ähnelt.

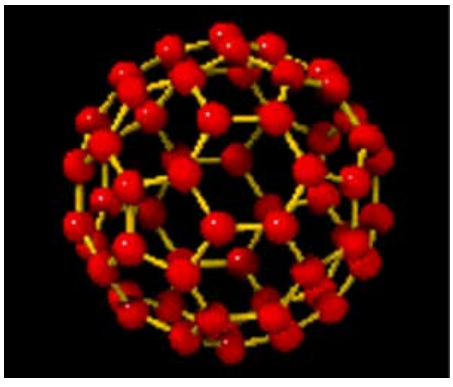


Abbildung 4.50: Modell eines "Buckyballs" mit 60 Kohlenstoffatomen

Das Molekül hat eine außergewöhnlich hohe Symmetrie. Es kann durch 120 Operationen (Drehungen/Spiegelungen) auf sich selbst abgebildet werden.

Entdeckung und Herstellung

Es gibt grundsätzlich drei verschiedene Methoden, diese Nanoröhren zu gewinnen.

Wie bereits erwähnt, wurden diese neuartigen elektronischen Kohlenstoffnanoröhren 1991 von dem japanischen Forscher Sumio Iijima, einem Wissenschaftler der NEC Corporation, als weitere allotrope Form von Kohlenstoff – bei einer Lichtbogenentladung zwischen Kohlenstoffelektroden - entdeckt.

- Diese erste Methode bildet die Grundlage vieler Herstellungsverfahren für Kohlenstoffnanoröhren. Im Jahre 1993 stieß er bei seinen Forschungsarbeiten auf die einwandigen Kohlenstoffnanoröhren, welche er im Lichtbogen unter Zusatz von Katalysatoren herstellte.
- Die zweite Methode, Nanoröhren zu erzeugen, besteht in einer katalytischen Zersetzung von kohlenstoffhaltigem Gas in einem Ofen, das sogenannte CVD-Verfahren (Chemical-Vapour-Deposition). Damit können ganze Felder von weitgehend parallelen Röhren auf einer Unterlage aufwachsen, was eine nahezu 100-prozentige Ausbeute ohne unerwünschte Beiprodukte an den langen zylindrischen Nanotuben ermöglicht.
- Die dritte Art, veröffentlicht durch den Nobelpreisträger Richard Smalley 1996, besteht im Laserverdampfen von Graphit mit einem zusätzlichen Katalysator. Die so entstehenden Nanotubes haben die Tendenz, sich in Bündeln – so genannten Ropes – anzuordnen. Diese Methode erlaubt eine 80% ige Ausbeute an den Nanotuben, hingegen konnte S. Iijima mit seinem Herstellungsverfahren nur 20% an Köhlenstoffröhren herstellen.

Jedes der drei Verfahren (Lichtbogen, Gaszersetzung, Laserverdampfung) ist inzwischen so weit entwickelt, dass damit größere Mengen gleichmäßiger (in Durchmesser, Länge, Defekte, Mehrwandigkeit) CNTs hergestellt werden können.

Eigenschaften und vielfältige Anwendungen

Aufgrund ihrer einmaligen strukturellen, mechanischen, physikalischen, chemischen und elektronischen Eigenschaften versprechen sich viele Wissenschaftler für diese Nanoröhren breite Anwendungsbereiche für zukünftige Entwicklungen. Sie sind exzellente Leiter für elektrischen Strom und Wärme, härter als Stahl und zurzeit teurer als Diamant. Weiterhin sind sie ausgezeichnete Feldemissionsquellen und damit für Display - Anwendungen geeignet.

Die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstoffnanoröhren sind hervorragend,

ihre mechanische Steifigkeit, die den Aramidfasern (bekannte Namen sind Nomex und Kevlar) entspricht, ist zehnmal zugfester als Stahl und fast doppelt so stabil wie Diamant, das bislang härteste bekannte Material der Welt.

Für die Halbleiterhersteller sind vor allem die Strombelastbarkeit und die Wärmeleitfähigkeit von hohem Interesse, erstere ist ungefähr 1000-mal höher als bei Kupferdrähten, letztere ist bei Zimmertemperatur mit 4500 W/m*K beinahe doppelt so hoch wie die von Diamant (2000-2500 W/m*K) und das elffache der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer (402 W/m*K).

CNTs können sich wie Halbleiter verhalten, da sie sich unter sanftem Druck mit einer ultrafeinen Spitze eines Atomkraftmikroskops vom metallisch leitenden Röhrchen plötzlich zum Halbleiter verwandeln. Dabei verändert sich die sogenannte Bandlücke, die physikalische Größe, die zwischen Leiter, Halbleiter und Isolator entscheidet.

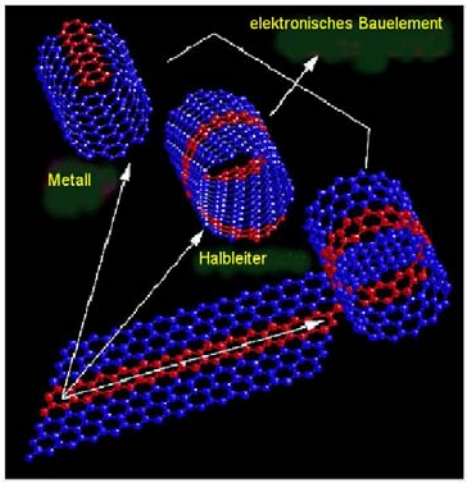


Abbildung 4.51: Nanoröhren als Metall und Halbleiter

Die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband erstreckt sich über den Bereich von Null (wie bei Metall) bis zu 1,1 eV (Silizium). Nanotubes können p- und n- dotiert werden, auf diese Weise lassen sich pn-Übergänge herstellen.

Die elektrischen Eigenschaften der Kohlenstoff-Nanotubes hängen von der Orientierung ihrer Längsachse in Bezug auf das Gitter der Graphitschicht ab. Es gibt viele Möglichkeiten, eine Scheibe Graphit nahtlos zusammenzurollen.

Die Art des Aufwickelns (siehe Bild 4.51) bestimmt die elektrischen Eigenschaften - halbleitend, metallisch - des Materials.

Aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften sind für CNTs vielfältige Anwendungen denkbar:

- Durch ihre hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie ihren nahezu längenunabhängigen Widerstand und ihre hohe Stabilität sind metallische Nanotubes ideal für leitende Verbindungen in der Mikroelektronik.
- Die ausreichend große Energielücke bei halbleitenden SWCNTs legt die Entwicklung von Schaltungselementen wie (Leistungs-)Transistoren (CNFETs, Carbon Nanotube Field Effect Transistors) nahe.
- Der kleine Krümmungsradius der Nanotube-Spitzen ist eine ideale Voraussetzung für Niederspannungs-Feld-Emissions-Bausteine (FEDs).

Elektrische Bauelemente auf der Basis von Nanoröhren

Um eine breite technologische Nutzbarkeit dieser genannten Nanotubes zu schaffen, müssen jedoch die Grundlagenforscher noch viele Probleme lösen – zum Beispiel die Trennung der metallischen von den halbleitenden Nanotubes, die bei der Herstellung grundsätzlich als Gemisch entstehen. Hier stellt die Reinigung dieser Nanotubes nach wie vor eine sehr schwierige Aufgabe dar, d.h der entstehende schwarze, lockere und leichte Filz (verklumpte Nanotubes), der bei der Laser-Ablation bei der Verdampfung von festem Kohlenstoff mit metallischen Partikeln entsteht, muß gelöst werden.

Für die Herstellung elektronischer Bauelementen, wie Dioden und Transistoren, benötigt man ausschließlich halbleitende Röhren. Diese konnten jedoch noch nicht von den metallischen Röhren vollständig getrennt werden.

Dieses Kernproblem der Nanoelektronik, die Trennung von halbleitenden und metallischen Kohlenstoff-Nanoröhren, konnten Physiker vom Forschungszentrum Karlsruhe experimentell lösen. Sie entwickelten ein Verfahren, mit dem die verschiedenen Röhren getrennt und sortiert werden, indem sie die Röhren in einer

Seifenlösung einem elektrischen Wechselfeld mit einer Frequenz von 10MHz aussetzten [33].

Die metallischen und die halbleitenden Nanoröhren wandern in entgegengesetzte Richtungen. Damit können die metallischen Röhrchen abgeschieden werden, die nichtmetallischen verbleiben in der Lösung. In der Versuchsanordnung im nebenstehenden Bild werden die metallischen Nanoröhren (schwarz) in einer Suspension zwischen den Mikroelektroden abgeschieden, die halbleitenden (gelb) verbleiben in der Lösung.

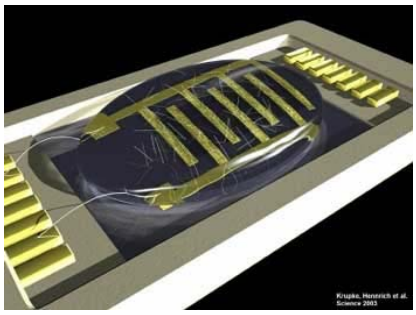


Abbildung 4.52: Versuchsanordnung zur Trennung von Nanoröhren

CNT-Feldeffekt-Transistoren

Wie bereits beschrieben, lassen sich die Nano-Tubes leitend oder halbleitend herstellen und dotieren. Damit bietet sich die Möglichkeit, auch aktive Schaltelemente wie Dioden, Feldeffekt- oder Leistungstransistoren aus CNTs herzustellen.

Aufgrund ihrer Eigenschaften lassen sich aus CNT's Transistoren fertigen, die eine höhere Belastbarkeit in Bezug auf Spannungen sowie Temperaturen - und damit höhere Taktfrequenzen - als Siliziumtransistoren aufweisen. Erste experimentelle, funktionsfähige Transistoren wurden bereits hergestellt.

Drei Forscher von Lucents Bell Labs, Jan Hendrik Schön, Zhenan Bao und Hong Meng, haben den ersten adressierbaren Transistor gefertigt, der auf der Basis einer organischen Schwefel-Kohlenstoff Verbindung – dem Thiol – mit halbleitenden Eigenschaften besteht.

Dresdner Physiker entwickelten mit Regensburger Kollegen einen Molekültransistor, der aus zwei Carbonröhren – die sich zwischen einem C_{60}-Kohlenstoffmolekül (d) befinden - besteht. Durch einen gezielten Eingriff kann dieses C_{60}-Molekül gedreht werden, so dass die Enden der anstoßenden Röhrchen überbrückt werden und ein Stromfluss ermöglicht wird.

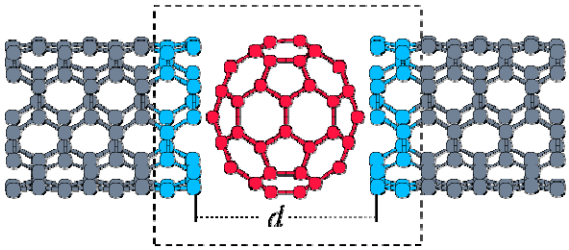


Abbildung 4.53: Molekültransistor

Damit wurde ein erster Schritt in Richtung einer völlig neuen Generation von Computerchips mit Molekültransistoren durchgeführt, die auf der Basis der Nanotechnologie bestehen.

Allerdings müssen auf diesem Weg noch wichtige technische und physikalische Probleme gelöst werden. Dazu gehören die zuverlässige Trennung von metallischen

und halbleitenden CNTs, die Konfektion von CNTs mit definierten Energielücken sowie deren kontrollierte elektrische Kontaktierung und Integration.

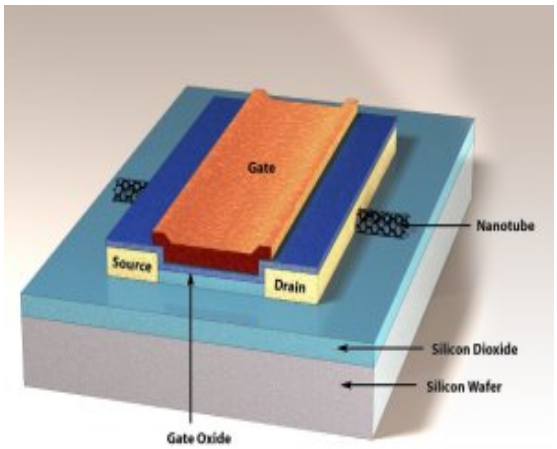


Abbildung 4.54: Kohlenstoff-Nanotransistor

Die größte Herausforderung für die Entwicklung von Nanotransistoren ist die Fertigung von Elektroden und die Kontaktierung von elektrischen Kontakten.

Die weitere Grundlagenforschung sucht nach Möglichkeiten, komplexe Schaltkreise aus verschiedenen Kohlenstoffnanoröhren gezielt an vordefinierten Stellen auf Silizium-Wafern aufwachsen zu lassen.

Kontaktierung

Grundlage für den Einsatz von molekularen elektronischen Bauelementen ist die Möglichkeit der Einbeziehung in konventionelle Schaltkreise. Dazu ist eine Kontaktierung von molekularen Strukturen notwendig. Am Institut für Physikalische Hochtechnologie e. V. (IPHT) in Jena wurde eine Kontaktierungstechnik entwickelt, die auf dem Prinzip der Elektronenstrahlinduzierten Ablagerung im Rasterelektronenmikroskop beruht (electron beam-induced deposition - ebd) und der Kontaminationslithografie entspricht. Dabei wird eine dünne Goldschicht mit im Rasterelektronenmikroskop geschriebenen Linien maskiert, die in einem folgenden Ätzschritt in Golddrähte strukturiert werden.

Nanoröllchen

Den Forschern der University of California in Los Angeles gelang es, flache Graphitlagen zu winzigen Röllchen aufzuwickeln. Diese Röllchen sind den Nanoröhren sehr ähnlich, denn auch sie bestehen aus aufgerolltem Graphit - nur dass deren Hülle von einem oder mehreren ineinander geschachtelten Zylindern gebildet wird, während die Rollen nur aus einer einzigen aufgerollten Graphitlage bestehen.

Durch diese vergleichsweise einfachere Herstellung spielen diese Neuschöpfungen unter den Nanoröhren sehr interessante Möglichkeiten für ähnliche Verwendungszwecke wie die Nanoröhren und mit ihnen ist vielleicht eine schnellere Umsetzung in technologische Produkte möglich als mit ihren anspruchsvollen Verwandten, den Nanoröhren. Die Röllchen könnten als Adsorptionsmittel für Gase wie auch für Wasserstoff dienen und so als Speichermaterial genutzt werden - vorausgesetzt es gelingt, dazu die Lösungsmittelreste zu entfernen. Die Röllchen fügen sich damit gut in die Familie der Nanoröhren ein.

Nanodrähte

Neben den Nanoröllchen stellen die Nanodrähte eine vielversprechende Klasse nanostrukturierter Halbleiter dar. Diese, auch „Nanowires“ oder „Nanowhisker“

genannten Strukturen, besitzen einen Durchmesser von einigen hundert Nanometern bis zu wenigen Nanometern. Die Länge der Nanodrähte kann dabei mehrere Mikrometer erreichen. Allen Nanodrähten gemeinsam ist der kristalline Kern aus einem Halbleitermaterial. Dies kann ein Halbleiter der vierten Hauptgruppe sein, wie z.B. Silizium oder Germanium, möglich sind aber auch III-V- oder II-VI-Verbindungshalbleiter wie InP oder ZnO. Der Vorteil von Silizium als Basismaterial für Halbleiter-Nanodrähte besteht darin, daß sich viele Prozesse aus der Siliziumtechnologie auch für die Herstellung, Bearbeitung und Untersuchung der Nanodrähte verwenden lassen. Je nach verwendetem Herstellungsprozess besitzen einige Nanodrähte neben dem kristallinen Kern eine Hülle aus einem anderen Material, z.B. amorphes Siliziumdioxid, so genannte „core-shell"-Strukturen. Ebenso möglich ist die Herstellung von Heterostrukturen entlang der Längsachse des Nanodrahtes. Diese Nanodrähte können als Schalter, Sensor, Laser oder Datenspeicher zum Einsatz gelangen. Und wenn die Bedingungen stimmen, wachsen sie auch von allein heran und bilden komplexe Netzwerke.

So konnten Forscher von Hewlett-Packard und der Universität von Kalifornien in Los Angeles ein neues Verfahren zur Segmentierung von molekularen Nanochips entwickeln, mit dem sich prinzipielle Probleme bei der Konstruktion von logischen Schaltungen aus Nanodrähten lösen lassen. Einer Arbeitsgruppe um Prof. L. Samuelson von der Universität Lund (Schweden) ist es gelungen, auf der Grundlage eines InAs/InP-Heterostruktur-Nanodrahts ein Einzelelektron-Transistor zu realisieren. Auch einfache Logikbausteine wie OR, AND und NOR wurden bereits auf Basis von Nanodrähten verwirklicht. Elektrolumineszenz an p-n-dotierten Nanodrähten, optisch und sogar elektrisch gepumpte Lasertätigkeit konnte an Nanodrähten beobachtet werden [FM Kolb 04].

Nanodrähte können je nach Materialgruppe mittels folgender Verfahren hergestellt werden [Mzach]:

- CVD (Chemical Vapour Deposition),
- Sauerstoff-assistiertes Wachstum (OA),
- VLS (Vapour Liquid Solid)-Wachstum,
- MBE (Molecular Beam Epitaxy).

Dünnfilmtransistoren aus Nanodrähten

Forscher der Firma nanosys brachten mit einem chemischen Gasphasenabscheidungsverfahren aus Monosilan (SiH_4) und Diboran (B_2H_6) im Ultraschallbad Nanodrähte auf einem Trägermaterial aus Kunststoff auf. Beim Auftragen bestimmte die Flussrichtung die Ausrichtung der Nanodrähte aus Silizium und Cadmiumsulfid, sodass ein paralleler Film von Drähten entstand. Der Dünnfilm-Feldeffekttransistor kann mit

elektronischen Eigenschaften aufwarten, die deutlich besser sind als die amorpher (Thin Film Transistor) oder organischer Transistoren [Nature03].

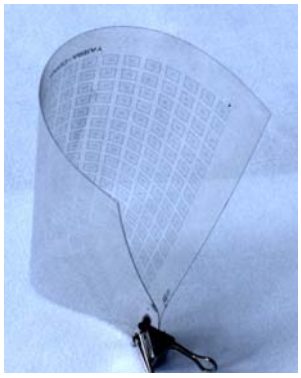


Abbildung 4.55: Dünnfilmtransistor aus Nanodrähten

Datenspeicher aus Nanodrähten

Eine Forschergruppe um J. Fraser Stoddart an der UC Los Angeles in Zusammenarbeit mit Hewlett-Packard hat einen Datenspeicher aus metallischen Nanodrähten und organischen Molekülen entwickelt.

Die Nanodrähte sind in zwei aufeinander liegenden Schichten verlegt, wobei die Drähte der oberen Schicht quer zu denen der unteren Schicht liegen.

Am Kreuzungspunkt zwischen zwei Drähten befindet sich eine Monolage von Rotaxan-Molekülen, die durch elektrische Pulse zwischen zwei verschiedenen Zuständen hin und her geschaltet werden können. Auf diese Weise lassen sich Daten mit einer Dichte von 6,4 Gbits/cm^2 speichern [Ychen03].

4.5.3.5 DNA–Feldeffekttransistor

Ein Physikerteam vom „Technion-Israel Institute of Technology“ hat durch biologische Selbstorganisation einen Nanotransistor hergestellt. Das Forscherteam um Kinnert Keren und Erez Braun setzte einen zweistufigen Prozess zur Herstellung dieses Transistors ein. Um Kohlenstoff-Nanoröhren die Bindung an bestimmte Bereiche von Desoxyribonukleinsäure (DNA) - Strängen zu ermöglichen, wurden Bakterienproteine eingesetzt. Der Rest des DNA-Moleküls wurde zu einem leitenden Draht umgewandelt.

Zunächst wurde ein zentraler Bereich eines langen DNA-Moleküls mit Proteinen vom E-Coli Bakterium beschichtet. Die Graphit-Nanoröhren - mit Antikörpern beschichtet - wurden dem DNA-Molekül hinzugefügt und gingen eine Bindung mit dem Protein ein. Eine Lösung aus Silberionen wurde hinzugefügt. Die Ionen binden dann an die Phopshat-Ketten der DNA, aber nur da, wo kein Protein zu finden ist. Die Reduktion der Ionen zu metallischem Silber mittels Aldehyd führt dann zur Bildung eines leitenden Drahtes.

Im nächsten Schritt versahen Keren und Co das DNA-Molekül mit einer Goldhülle. Das Edelmetall blieb dabei nicht an dem Protein-beschichteten Teilstück haften, sodass zwei Gold-Enden des Biomoleküls mit dem Nanoröhrchen in der Mitte übrig blieben. Dieses Paket setzten die Forscher anschließend auf einer mit einer dünnen isolierenden Oxidhaut überzogenen Silicium-Halbleiterschicht ab. Die beiden leitenden Gold-Enden verbanden sie mittels eines herkömmlichen Lithographie-Prozesses mit je einer elektrischen Zuleitung. Auf diese Weise entstanden die Source- und die Drain-Elektrode eines Feldeffekttransistors (FET) [Scien 03].

4.5.3.6 Integrierte Schaltkreise

Der Entwurf integrierter Schalktreise im Nanometer-Bereich ist eine der großen Herausforderungen der Nanotechnologie in der heutigen Zeit und gilt als eines der höchsten Ziele speziell in der Nanoelektronik.

Falsch gefaltete Proteinpartikel, bekannt als Prionen, könnten Anwendung bei der Erzeugung von Mikroschaltkreisen finden. Prionen (proteinaceous infectious particle) sind Proteine, die zylinderförmig, etwa 150 nm lang, 10 nm dick und säurefest sind, sowie in vielen Fällen auch widerstandsfähig gegen den Abbau durch Proteasen. Diese äußerst komplexe Aufgabe, die Herstellung integrierter Schaltkreise, konnten Forscher des Whitehead Institutes und der University of Chicago lösen. Sie haben die winzigen Prionen als Matrize verwendet, um Metalle darauf aufzubringen.

Der resultierende elektrisch leitfähige Draht ist viel dünner als herkömmliches Material. Die Ergebnisse ihrer Forschungen präsentierten die Wissenschaftler im Fachblatt Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS).

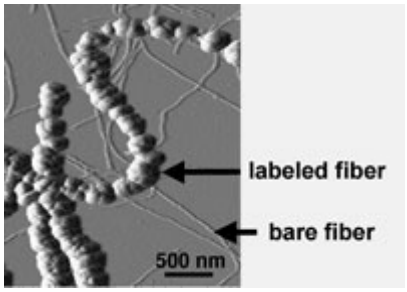


Abbildung 4.56: Proteinfasern ohne Überzug („bare fiber“) und mit Metall-Überzug („labeled fiber“)

Auch die Chinesin Yu Huang, die am Massachusetts Institute of Technology forscht, hat ein neues Verfahren zur Herstellung von elektronischen Schaltkreisen auf der Basis von Nanodrähten entwickelt. Sie schüttet Nanodrähte aus Silizium in eine Ethanol-Lösung. Anschließend drückt sie die Flüssigkeit durch sehr feine Kanäle in einer Plastikform, wobei sich die Drähte parallel ausrichten. Auf diesem Weg stellt sie Netze aus Nanodrähten her, die als elektronische Schaltkreise zur Anwendung gelangen können. Auf diese Weise ist es auch möglich, mehrere Schichten aus Nanodrähten zu dreidimensionalen Schaltungen zu verknüpfen. Obgleich marktfähige Schaltkreise erst 2020 erwartet werden, interessieren sich schon heute Halbleiterhersteller wie Intel für diese neue Technologie [YuHua 01].

Ein weiteres neues Verfahren aus der Ruhr-Universität Bochum [34] in Zusammenarbeit mit den Firmen Prema und Semikron revolutioniert Design und Aufbau von Halbleiterbauelementen, zum Beispiel Chips: Mit der so genannten Hochenergie-Ionenimplantation – Ionen werden auf mehrere Millionen Elektronenvolt beschleunigt - ist es erstmals möglich, elektronische Schaltkreise nicht nur auf ihrer Oberfläche, sondern auch gezielt in tiefen Materialschichten zu bearbeiten. Selbst schwere Ionen können so Geschwindigkeiten von 100 Millionen Stundenkilometer erreichen und beim Auftreffen auf ein Substrat mehrere Mikrometer tief eindringen. Diese Methode erlaubt es erstmals, ein Substrat dreidimensional zu verändern und damit im Design und Aufbau von Bauelementen neue Wege zu gehen.

Diese Anwendung aus der Nanoelektronikforschung erlaubt eine kostengünstigere Produktion von elektronischen Chips und Geräten. Speziell im Bereich der Leistungshalbleiter konnte mit diesem Verfahren die Spannungsfestigkeit deutlich verbessert werden.

Chipkühlung

Die Chips der Zukunft könnten sich selbst kühlen. Diese Entwicklung stellten kürzlich Forscher der amerikanische Purdue University - mit einem Chip, der zwischen zwei eng benachbarten Carbon-Nanoröhren Ionen erzeugte - vor. Daraus resultierte ein Luftstrom, den die Forscher durch Mikrokanäle auf den Chip leiteten und damit die Hitze aus dem Kristall „abtransportierten“.

Um dies zu ermöglichen, nutzen sie das Prinzip der „Koronarwinde“ im Nanomaßstab. Koronarwinde entstehen durch Ionen, die einem elektrischen Feld folgen. Das wohlbekannte und gut dokumentierte Phänomen lässt sich mit einem elektrohydrodynamischen Modell auf der Grundlage der bahnbrechenden Maxwellschen Gleichungen erklären [RCJoh 04].

Eine andere Möglichkeit entdeckten Wissenschaftler der Bell Labs (Bell Telephone Laboratories), einer Abteilung von Lucent. Über eine winzig kleine Menge Flüssigkeit ist es möglich, den Halbleiter zu kühlen. „Nanogras“ nennt sich die Entwicklung von Bell. Dies sind kleine Nanotubes, über die auf bestimmte Stellen des Chips Flüssigkeit gesprüht wird. Derzeit werden Chips als ganzes gekühlt, so auch Bereiche, die keine Kühlung benötigen. Dazu muss mehr Energie aufgebracht werden, als nötig.

„Auf Leiterbahnen, durch die auf dem Chip Signale gesendet werden, würde dann das so genannte Nanogras „gepflanzt“, das dann die Flüssigkeit auf die heißen Punkte sprüht. Über einen Kühlkörper kondensiert die Flüssigkeit und kann dann wieder verwendet werden. Ganz ähnlich der Kühlung bei einem Auto. Dadurch, dass die Hitze da abgezogen wird, wo sie entsteht, kann sehr viel effektiver und energiesparender gekühlt werden [35].“

4.5.3.7 Drähte der Zukunft

Erstmals seit der neusten Erfindung von HP’s Quantum Science Research (QSR), den „Crossbar Latch“, halten es Experten für möglich, dass das Moore’sche Gesetz seine Gültigkeit verlieren wird. Denn möglicherweise ist damit ein wichtiger Schritt in die Richtung einer weiteren Miniaturisierung gelungen, wenn die traditionelle Chiptechnik nach Gordon Moore kein Miniaturisierungspotenzial mehr bietet.

Crossbar Latches sind Kreuze aus winzigen 2-40 nm breiten Platindrähten, an deren Schnittpunkten sich Säuremoleküle (Molekülschalter) befinden. „Das Ganze besteht nur aus Metall und Molekülen, sagte Phil Kuekes vom HP-Forscherteam. Wie in einem Transistor wird ein elektrisches Signal manipuliert, um logische Funktionen zu vollführen.“ Durch entsprechende Beschaltung der Kontrollleitungen ist es möglich ein NOT-Gate zu erzeugen, ein der wichtigsten Grundgatter für die Realisierung weiterer Schaltkreise.

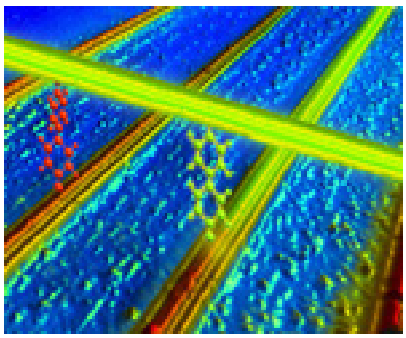


Abbildung 4.57: Crossbar Latch

Auch die Verstärkung von Signalen sei mit der neuen Technologie möglich, glauben die Wissenschaftler.

Da es den Forschern von HP bereits gelungen ist, die beiden weiteren notwendigen Basisgates, das AND- und OR-Gate zu erzeugen, steht einer ersten komplexeren Schaltung theoretisch nichts mehr im Weg, leider aber nur theoretisch. Praktisch gesehen wird es noch Jahre interdisziplinärer Forschung und Entwicklung brauchen, bis der erste Chip mit „Crossbar Latches“ funktionieren wird. Quantenphysiker müssen die Schaltungen so auslegen, dass sie auch bei diesen Größen noch funktionieren, Technologen und auch Chemiker müssen eine kostengünstige Herstellung ermöglichen und, noch viel entscheidender, fehlertolerante Algorithmen und Strukturen müssen so miteinander verbunden werden, dass die Schaltungen auch trotz einer Vielzahl von Fehlern, die nicht zuletzt wegen der extremen Miniaturisierung verstärkt auftreten werden, trotzdem noch funktionieren. Der Quantenphysiker und Patenthalter der „Crossbar-Latches“ Philip J. Kuekes ist dennoch zuversichtlich, dass seine Entwicklung ihren Weg machen wird: „Auch wenn es noch Jahre dauern wird, könnte die Technik den Transistor ablösen, so wie dieser die Röhre und jene zuvor das Relais abgelöst haben.“ Bis dahin bleibt der Pensionist Transistor aber noch im Amt – in Moores Jahren gerechnet, versteht sich.

"Wir erfinden den Computer auf molekularer Basis neu", sagte Stan Williams, Direktor von Quantum Science Research bei HP. Schon 2012 könnten die ersten Rechner mit der neuen Technologie (Druckprozess) in den Fäden der Hemden marktreif sein [36].

Crossbar Latch

Ein *Crossbar-Latch*, was etwa so viel heißt wie Kreuzschienen-Verschluss,

ist ein Nano-Schalter, der in seinen räumlichen Abmessungen viel kleiner und leistungsfähiger ist als bisherige Transistorschalter.

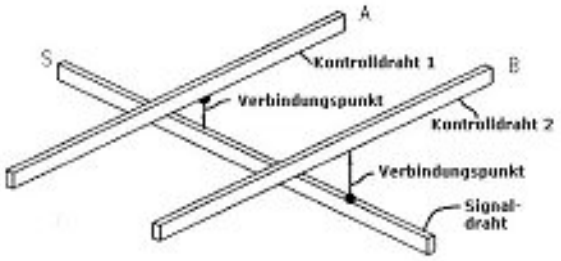


Abbildung 4.58: Schematischer Aufbau eines Crossbar Latch

Der im Experiment getestete Crossbar Latch besteht aus folgenden Komponenten:

- ein einzelner Nano-Draht, der das Signal führt
- zwei Nano-Kontrolldrähte

Der Signaldraht wird von den Kontrolldrähten gekreutzt. An den Berührungspunkten lassen sich die Verbindungen elektrisch schalten[37].

4.5.4 Niederdimensionale Systeme

Niederdimensionale Systeme unterscheiden sich von „Normal-“ dimensionalen Systemen vor allem durch die eingeschränkte Elektronenbewegung in einer oder mehreren Dimensionen. Dies erklärt die Bezeichnungsweise für Quantenpunkte (0D), –drähte (1D), -filme (2D), die angibt, in wie vielen Dimensionen sich die Elektronen noch frei bewegen können (siehe Bild: 4.59). Eine eingeschränkte Elektronenbewegung tritt auf, wenn die Abmessungen eines Bauelements die

deBroglie-Wellenlänge der Elektronen erreicht. Dies tritt z.B. in GaAs (200nm) bei einer Temperatur von ca. 5K auf.

In solchen Systemen sind Quantisierungseffekte zu erwarten, die vielfältige Auswirkungen unter anderem auf die Elektronenbewegung, Zustandsdichte und optische Übergänge haben. Die Quantisierungseffekte lassen sich für neue Bauteile mit verbesserten Eigenschaften nutzen.

Hier sei der HEMT (High Electron Mobility Transistor) genannt, der eine stark reduzierte Streuwahrscheinlichkeit für Elektronen besitzt, und dadurch kürzere Schaltzeiten und eine geringere Leistungsaufnahme ermöglicht, als es mit „klassischen“ Transistoren möglich wäre.

Auch die Fortschritte in der Halbleiterlasertechnologie (Quantenpunkt-, -graben, -film und Quantenfadenlaser) basieren auf niederdimensionalen Systemen, die unter anderem einen geringeren Schwellstrom (Strom, bei dem der Laser anfängt kohärentes Licht abzustrahlen) und eine verringerte Temperaturabhängigkeit zeigen. Optische Eigenschaften zeigen auch eine starke Dimensionsabhängigkeit. Zum einen ist es möglich, die energetische Lage der optischen Übergänge gezielt zu beeinflussen, zum anderen ist ein Anwachsen der Emissions- und Absorptionsstärke beim Übergang von 3D nach 0D vorhanden.

4.5.4.1 Nanostrukturen

Die Miniaturisierung von Bauelementen verlangt immer kleiner werdende Halbleiterstrukturen, sogenannte Nanoinseln oder Quantenpunkte.

Diese Halbleiter-Nanostrukturen haben wegen ihrer speziellen elektrischen und optischen Eigenschaften und ihrem Anwendungspotenzial für künftige mikro- und optoelektronische Bauelemente in den letzten Jahren große Beachtung gefunden. In diesen Nanostrukturen ist die Bewegung der Elektronen auf sehr kleine Raumgebiete beschränkt, wodurch die elektronischen Zustände quantisiert werden.

In den sogenannten „Quantenpunkten“ sind die Elektronen in allen drei Raumrichtungen (siehe Bild 4.59) in einem Potenzial eingefangen und somit können diese als „künstliche Atome“ betrachtet werden, in denen die Energiezustände in weiten Grenzen durch die geometrischen Abmessungen variierbar sind.

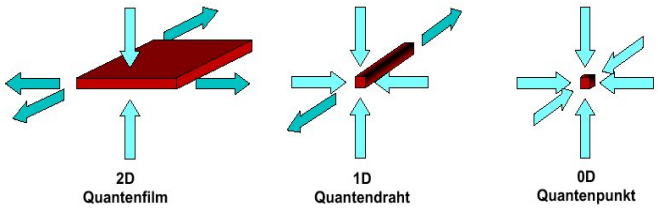


Abbildung 4.59: Einschränkung der Ladungsträgerbewegungsfreiheit durch Reduzierung der räumlichen Dimension

4.5.4.1.1 Quantenpunkte

Als Quantenpunkte (Quantendots) bezeichnet man Nanokristalle, die aus einigen hundert Atomen bestehen und Licht unterschiedlicher Wellenlänge in Abhängigkeit von ihrer Größe emittieren. Ein Quantenpunkt ist also eine nanoskopische Struktur, meist aus einem Halbleitermaterial (z.B. InGaAs oder auch CdSe). Nebenstehende Abbildung zeigt einen mit einem Raster-Tunnelmikroskop aufgenommenen Indiumarsenid Quantenpunkt. Die kleinen „Buckel“, die auf der linken Seitenfläche in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind, entsprechen jeweils zwei Arsenatomen.

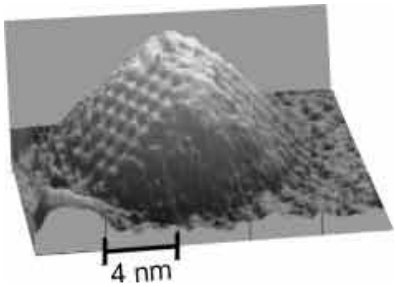


Abbildung 4.60: Indiumarsenid-Quantenpunkt

Mit einer Abmessung von nur wenigen Nanometern breit und hoch besitzen diese ultrakleinen Systeme grundlegend neue, physikalische Eigenschaften.

Bereits bei Zimmertemperatur wirken Quantenpunkte als Käfig für die Elektronen, sie sind in allen drei Raumdimensionen so weit eingeschränkt, dass sich die Ladungsträger nicht mehr frei bewegen und nur noch ganz bestimmte diskrete Energieniveaus besetzen können, während sie im Festkörper viele verschiedene Energiewerte annehmen. Zwischen den Energieniveaus im Quantenpunkt müssen die Elektronen hin und her springen, ähnlich wie in einem einzelnen Atom. Mit einem Unterschied: die Energieniveaus in den Quantenpunkten können über deren Größe, Form und Material beeinflusst werden. Dadurch lassen sich elektronische und optische Eigenschaften von Quantenpunkten präzise herstellen. Typischerweise beträgt ihre eigene atomare Größenordnung etwa 10^4 Atome.

Selbstorganisierte Quantenpunkte bieten eine Vielzahl neuer materialwissenschaftlicher und physikalischer Freiheitsgrade:

- Die Emissions- und Absorptionsenergien sind über die Größe und Zusammensetzung in weiten Grenzen einstellbar.
- Bauelemente können auf der Basis von Quantenpunkten mit Materialkombinationen hergestellt werden, die als Schichtfolgen nicht stabil sind. Eine große Bedeutung kommt hierbei der Realisierung von GaAs basierenden Telekommunikationsbauelementen zu, die in glasfasernutzenden Daten- und Nachrichtenübertragungssystemen als Sender dienen. Durch InGaAs Quantenpunkte können auf GaAs-Basis Laserstrukturen mit verteilter Rückkopplung mit sehr guter Einmodigkeit, spektrale Durchstimmbarkeit und niedrigen Schwellenströmen realisiert werden.
- Aus InGaAsN lassen sich, je nach Größe der verwendeten Strukturen, Quantenpunktlaser für sehr helles grünes, blaues oder ultraviolettes Licht herstellen.
- Wissenschaftler der Universität Paderborn produzierten Quantenpunkte in hervorragender Qualität, die als Einzelquantenpunkt-Photodiode zur Anwendung kamen. Ihr Anwendungspotenzial reicht vom Einzelelektron-Speicher über spektral abstimmbare Photoempfänger bis hin zur deterministischen Stromquelle, die über den Zustand eines Quantenbits gesteuert wird.

Quantenpunkte lassen sich mit Hilfe verschiedener Techniken herstellen:

- Chemische Reaktion zwischen einem Metall, z.B. Cadmium und einem Molekül, welches ein Selen-Ion abzugeben vermag. Es entstehen Kristalle aus Cadmiumselenid.
- Einen Quantenfilm zweidimensional mittels lithografischer Verfahren strukturieren und die Maske dann durch Ätzen übertragen.

- Ein selbstorganisiertes Wachstum, hier werden drei fundamentale Wachstumsmethoden unterschieden:
  - Schichtwachstum (van der Merwe)
  - Inselwachstum (Volmer-Weber) und
  - Stranski-Krastanow (Benetzungsschicht mit Inseln).

Bei der Herstellung kommt es vor allem darauf an, Quantenpunkte gleicher Größe und Zusammensetzung herzustellen, bestimmt doch die Größe ihre elektrischen, magnetischen und optischen Eigenschaften.

Die Herstellung von Quantenpunkten stellt eine große Herausforderung dar, weil wegen ihrer kleinen Abmessungen einerseits die Grenzen der gegenwärtigen lithografischen Herstellungsverfahren erreicht werden, und andererseits die Grenzflächen der Quantenpunkte möglichst defektfrei hergestellt werden sollen. Aus diesem Grunde wurden vermehrt Anstrengungen unternommen, Halbleiter-Quantenpunkte durch „selbstorganisiertes“ Wachstum herzustellen. In verspannten Halbleitersystemen kann eine Wachstumsinstabilität auftreten, welche zur Synthese selbstorganisierter und dreidimensional geordneter Quantenpunkte ausgenutzt werden kann, wobei die Anisotropie elastischer Verspannungen den bemerkenswerten Selbst-Organisationseffekt bedingt.

Ein elegantes und sehr einfaches Verfahren, solche Halbleiter Nanostrukturen zu erzeugen, beruht auf der spontanen Selbstorganisation. Die Bildung einer selbstorganisierten Nanostruktur ist schematisch in Abbildung 4.61 dargestellt.

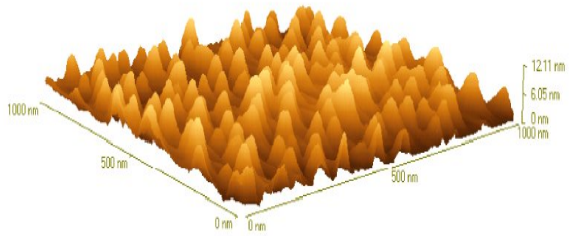


Abbildung 4.61: Hergestellter Quantenpunkt im selbstorganisierten Wachstum

4.5.4.1.2 Quantenpunkt-Bauelemente

HEMT (high electron mobility transistor)

Der High Electron Mobility Transistor, auch Modulation Doped Field Effekt Transistor (MODFET) genannt, ist eine spezielle Bauform des Feldeffekttransistors, hier speziell als Weiterentwicklung des GaAs-MESFET Transistors [OMar 05], für sehr hohe Frequenzen (>300GHz). Er ist ein relativ junges Bauelement, das erst durch moderne Prozesstechnologie ermöglicht wurde. Ausgangspunkt für die Entwicklung von HEMTs ist die Idee, die guten Beweglichkeitsverhältnisse in schwach dotierten oder undotierten Materialien für Feldeffekttransistoren zu nutzen. Die Beweglichkeit der Ladungsträger in einem normalen MOS-Transistor ist durch die Streuprozesse an der Oberfläche (der Grenzfläche zum Oxid) und auch durch die Dotierung, die meist im Kanal notwendig ist, stark herabgesetzt.

Um einen Kanal in undotiertem Material aufzubauen und die gute Beweglichkeit in diesem Material nicht durch eine raue Oberfläche zu vermindern, war der Einsatz von Heterotechniken, also die Kombination unterschiedlicher Halbleiter, notwendig. Durch die Fortschritte in der Molekularstrahlepitaxie der III-V-Halbleiter bei der Herstellung von Heterostruktur-MESFETs und durch den gemischten Einsatz von optischen

Lithographieverfahren und der Elektronenstrahllithographie zur Bearbeitung kleinster Abmessungen konnten Schichtdicken in der Größenordnung bis zu einer Atomlage realisiert werden. Als Resultat konnte ein extrem rauscharmer Transistor mit Gatelängen von 50 nm für Höchstfrequenzanwendungen, wie z.B. für Radar- und Satellitenkommunikation, hergestellt werden.

Aufbau:

Der HEMT besteht aus Schichten verschiedener Halbleitermaterialien mit unterschiedlich großen Bandlücken (verbotene Zone). Häufig wird das Materialsystem Aluminium-Gallium-Arsenid/Gallium-Arsenid verwendet, wobei das AlGaAs hoch n-dotiert und das GaAs nicht dotiert wird (siehe Querschnitt eines HEMT).

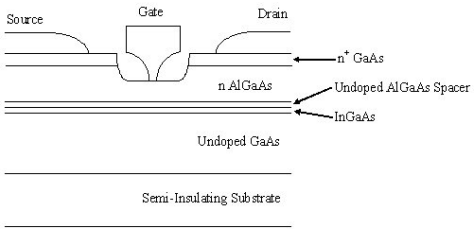


Abbildung 4.62: Querschnitt eines InGaAs HEMT

Da die verbotene Zone des AlGaAs größer ist als die des GaAs, bildet sich an der Grenzfläche dieser beiden Materialien auf Seiten des GaAs ein zweidimensionales Elektronengas (2DEG) aus, das als leitfähiger Kanal dienen kann.

Die Elektronenbeweglichkeit ist darin sehr hoch, aus diesem Grund ist der HEMT für Hochfrequenzanwendungen sehr gut geeignet. Die Steuerung des Bauelementes erfolgt, ähnlich wie beim MESFET, über ein Metallgate, das sich direkt auf den n-AlGaAs befindet.

Das HEMT-Prinzip ist auch auf andere Materialsysteme wie InGaAs/InP/AlInAs und Si/SiGe anwendbar.

4.5.4.1.3 Quantengraben- und Quantenpunktlaser

Ein Laser ist eine Lichtquelle, die Licht durch stimulierte Emission erzeugt. Dieses Licht besitzt in der Regel eine große räumliche Kohärenz, wodurch es sich besonders gut zu einem gebündelten Laserstrahl kollimieren lässt. Aufgrund der ebenfalls großen zeitlichen Kohärenz des Laserlichtes eines kontinuierlichen Lasers ist dieser in der Lage, extrem monochromatisches (d.h. einfarbiges) Licht zu liefern. Das Wort Laser ist ein Akronym von Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Lichtverstärkung durch angeregte Strahlungsaussendung). Auf demselben Prinzip wie der Laser basiert auch sein Vorläufer, der Maser, der aber Mikrowellenstrahlung aussendet. Der erste Laser wurde 1960 von Theodore Maiman gebaut [38]. Weiterführende Informationen zum Thema „Laser – Grundlagen und Anwendungen“ sind unter [39] sowie [40] verfügbar.

Quantenpunkte sind neben Quantengräben in Halbleitern derzeit eines der wichtigsten Forschungsgebiete in der Festkörperphysik. Die Möglichkeit, derartige Halbleiter-Nanostrukturen unter Ausnutzung von Selbstorganisationseffekten mit Hilfe epitaktischer Verfahren (Molekularstrahlepitaxie) herzustellen, hat sowohl die Grundlagenforschung wie auch die Anwendungsentwicklung entscheidend beeinflusst. Auf dem Gebiet der Photonik haben in den letzten Jahren neben den intensiv untersuchten III-V Verbindungshalbleitern (GaAs, GaN, GaS, InP, sowie

Mischkristalle wie das AlGaAs, GaInAs, GaInN, AlGaInP) auch die II-VI Verbindungen (CdS, CdSe, CdTe und ZnS) an Bedeutung gewonnen. Diese Materialien können die Grundlage – auf Grund ihrer effizienten optischen Übergänge und ihrer hohen Ladungsträgerbeweglichkeiten - für photonische Bauelemente auf den Gebieten der Optoelektronik und Nachrichtentechnik (speziell für neue Halbleiterlaser, die Quantengraben- und Quantenpunktlaser) bilden, mit denen neue Wellenlängenbereiche im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich erschlossen werden können.

Einen hohen Wissens- und Qualitätsstand hat man bereits seit einigen Jahren bei den Quantengrabenstrukturen erreicht. Insbesondere das Verfahren der Molekularstrahlepitaxie, mit welchem monolagengenau zweidimensionale Schichten hoher Reinheit gezüchtet werden können, hat diese Entwicklung stark forciert.

Bei dem Einsatz von Doppelheterostrukturen wird ein III-V-Halbleiter, z.B. GaAs mit zwei Deckschichten eines III-V-Halbleiters mit einer höheren Bandlücke, z.B. AlGaAs, umgeben [41]. Dabei ist es wichtig, dass beide Kristallschichten nahezu gleiche Gitterkonstanten aufweisen, da es sonst zu unerwünschten Versetzungen im Halbleiter kommt. Aufgrund der fast gleichen Gitterkonstanten und Symmetrieeigenschaften lassen sich beide Materialien perfekt und ohne Spannungen epitaktisch aufeinander abscheiden.

GaAs ist zudem wegen der kleinen effektiven Masse und der direkten Bandlücke gut für elektronische und optische Anwendungen geeignet.

Durch den Einsatz der Doppelheterostrukturen (Bild 4.63) in Diodenlasern konnte die Schwellenstromdichte je nach verwendeten Materialsystemen (GaAs/AlGaAs, InGaN/AlGaN) auf 10 bis 1000A/cm^2 entscheidend reduziert werden und somit den Einsatz als Quantengrabenlaser auch bei Raumtemperaturen ermöglichen.

In Abhängigkeit vom verwendeten Material der aktiven und passiven Schichten lassen sich Laserdioden mit unterschiedlichen Emissionswellenlängen herstellen.

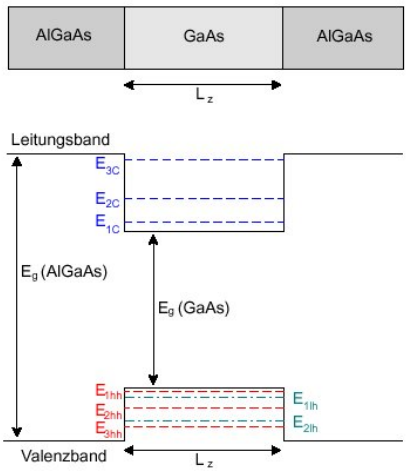


Abbildung 4.63: Doppelheterostruktur

Auf dem Markt haben sich Wellenlängen in den Bereichen 650 - 850 nm, 850-870 nm, 905 nm und 1550 nm zuverlässig etabliert und sind aus der glasfasergestützten Kommunikationstechnik nicht mehr wegzudenken.

Weiterhin finden diese Halbleiterlaser für die Datenspeicherung sowie für CD-ROM Laufwerke, Barcodescanner und Lasermarkierer eine breite Anwendung.

Mittels der Quantengrabenlaser gelingt es derzeit jedoch nicht, alle technisch wichtigen Wellenlängenbereiche abzudecken. Mit dem Übergang zu neuen

Materialsystemen, wie z.B. Kristalle aus Galliumnitrid (GaN) konnten schon blauviolett emittierende Laserdioden realisiert werden, der blau-grüne Spektralbereich wurde jedoch bislang nur für Leuchtdioden erschlossen. Hier erhofft man sich Fortschritte einerseits durch Verwendung alternativer Materialien wie Zinkoxid (ZnO), aber auch durch neue Bauelementkonzepte, wie z.B. den Quantenpunktlaser. Bei diesem besteht der laseraktive Bereich aus einer unregelmäßigen Anordnung von Quantenpunkten mit Abmessungen von wenigen Nanometern. Diese Strukturen werden nicht lithographisch hergestellt, sondern können auf einfache Weise mittels eines Selbstorganisationsverfahrens erzeugt werden. Man hat damit eines der ersten Beispiele für die erfolgreiche Nutzung der so oft zitierten Selbstorganisationsverfahren vorliegen, mit denen es möglich ist, kleinste Strukturen bei minimalem Aufwand und geringen Kosten zu realisieren.

Im Vergleich zu Quantengrabenlasern haben Quantenpunktlaser weitere Vorteile. Mit ihnen ist es möglich, geringere Schwellenströme zu erreichen und die Emissionswellenlänge kann über einen größeren Bereich abgestimmt werden, da diese aufgrund der Größenfluktuation im Quantenpunktensemble über ein breites Verstärkungsspektrum verfügen.

Bereits 1994 konnte das erste Labormuster eines elektrisch gepumpten Quantenpunktlasers auf der Grundlage der Verbindungshalbleiter (InGaAs) vorgestellt werden [NKirst 94]. Im Jahre 1999 konnte durch einen Quantenpunktlaser erstmals die niedrigste Schwellstromdichte eines konventionellen Quantengrabenlaser unterboten werden [GTLiu 99], wodurch die 17 Jahre zuvor im Jahr 1982 vorhergesagte Überlegenheit von Quantenpunktstrukturen für Laseranwendungen [YArak 82] experimentell bestätigt werden konnte.

Aus Halbleitermaterialen wie beispielsweise GaAs und InAs lassen sich, je nach Größe der verwendeten Strukturen, Laser für sehr helles grünes, blaues oder ultraviolettes Licht herstellen, die schneller, temperaturunabhängiger und mit kleineren Stromstärken arbeiten (siehe Bild 4.64). Ob in der Materialbearbeitung, der medizinischen Behandlung, zur Datenübertragung in Telekommunikationsnetzwerken oder als Pumpquellen für Glasfasern, Halbleiterlaser sind in unserem Alltag weit verbreitet. Selbstorganisierte Quantenpunktlaser stellen hierbei eine gute Alternative zu den herkömmlichen Halbleiterlasern dar.

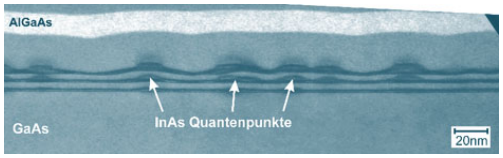


Abbildung 4.64: Das Innere eines Quantenpunkt-Lasers - die dunklen Punkte bestehen aus Indium und Arsenatomen

Quantenpunktlaser weisen gegenüber klassischen Halbleiterlasern weit überlegene Eigenschaften auf:

- Der Schwellstrom - der Wert, ab dem die Laseraktivität einsetzt - tendiert gegen Null, d.h. zum Ansteuern ist sehr viel weniger Energie erforderlich.
- Der Gewinn, das Maß für die Lichtverstärkung, ist etwa 20-mal größer als in sogenannten Quantengrabenlasern, die bis jetzt den Spitzenplatz markierten.
- Der „differentielle Gewinn“ - er gibt an, wie schnell der Laser getaktet werden kann - ist um einen Faktor tausend größer; das bedeutet eine etwa 30mal höhere Modulationsgrenzfrequenz und prädestiniert Quantenpunkt-Lichtquellen als Sendelaser für ultraschnelle Multigigabit-Übertragungsysteme in der optischen Nachrichtentechnik.

- Die Temperaturempfindlichkeit (vom absoluten Nullpunkt -273°C bis zu Raum- und höheren Temperaturen +80°C) ist um einen Faktor 50 geringer; damit werden teure Peltier-Kühlelemente [42] zur thermischen Stabilisierung der Laser entbehrlich. Extrem temperaturstabile Quantenpunktlaser ließen sich beispielsweise in Computern zur optischen Verbindung zweier Chips einsetzen und so die Daten mit einer zehn- bis tausendfach höheren Geschwindigkeit übertragen, als dies mit elektrischen Verbindungen möglich wäre.
- Neue Anwendungsfelder werden die Quantenkryptographie und die Quanteninformationsverarbeitung sein. Die Quantenkryptographie ermöglicht erstmals eine absolut abhörsichere Kommunikation (mit Ausnahme von One-Time-Pad) zwischen zwei Partnern. In ersten Prototypen wurden als Photonenquelle Laserdioden mit einer Wellenlänge von 711,6 nm verwendet, deren nanosekundenlangen Pulse entsprechend polarisiert und abgeschwächt in eine Glasfaserleitung eingekoppelt wurden. Die Abschwächung des Pulses ist notwendig, damit der Sender immer nur ein Photon auf einmal sendet. Schickt er mehrere Photonen, die alle die gleiche Polarisation haben, kann ein Spion ein Photon abzweigen, ohne die Übertragung zu stören. Deshalb ist die Aussendung eines einzelnen Photons mit einer bestimmten Polarität (z.B. Horizontal) notwendig, da eine Messung der Polarität diese irreversibel verändern würde und somit ein Lauscher keine Information über den geheimen Schlüssel erfahren kann, ohne bemerkt zu werden.

  Quantenkryptographie, die am weitesten entwickelte Anwendung der Quanteninformationsverarbeitung, hat seit einigen Jahren das Labor verlassen. Experimente unter realen Bedingungen sind, zumindest mit Systemen, die auf Kodierung mit schwachen Pulsen beruhen, heute schon fast zur Routine geworden. Aufgrund des schwachen Signals kann diese Technik nur auf relativ kurzen Strecken (20-30 km) eingesetzt werden. Die Datenrate ist vergleichsweise klein, deswegen werden in der Regel nur die Schlüssel übertragen. Die verschlüsselte Nachricht läuft üblicherweise über einen schnelleren konventionellen Kanal.

  US-Wissenschaftler vom „National Institute of Standards and Technology“ (NIST) haben einen völlig neuen Ansatz, um einen quantenkryptographischen Schlüssel mit einer Datenrate von einem Megabit pro Sekunde auszutauschen, verwendet. Das System von Joshua Bienfang und Kollegen erreicht damit eine um den Faktor 100 höhere Datenrate als bislang möglich.Sie implementierten das B92-Protokoll, das den Polarisationszustand von Photonen als Messgröße verwendet und übertrugen die Photonen eines Lasers über eine freie Strecke von rund 700 Meter. Um die Datenrate zu erhöhen, synchronisierten sie den Detektor auf der Empfängerseite mit dem sendenden Laser, so dass der Detektor nur dann aktiv wird, wenn ein gesendetes Photon zu erwarten ist.

  Einen Weltrekord in der Übertragung abhörsicherer Nachrichten konnten die an der LMU München forschenden Physiker Harald Weinfurter und Christian Kurtsiefer aufstellen. Sie sendeten ihre Daten – Schlüssel zur Decodierung - bei extremer Witterung im Sommer 2001 in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern einer britischen Firma über eine Distanz von 23,4 Kilometern zwischen den Gipfeln von Zugspitze und Karwendel.

  Als Sender diente ein nur wenig Zentimeter großer Goldspiegel, um den Laserdioden angeordnet waren. Der Spiegel wurde auf einem Teleskop angebracht und veränderte die Schwingungsrichtung der Lichtimpulse

(Polarisation). Die zufällig ausgewählten Lichtimpulse und ihre Schwingungsrichtungen wurden von Sender und Empfänger zu einer bestimmten Zeit miteinander verglichen. Danach erfolgte die Übersetzung in einzelne Bits.

Diesen Entfernungsrekord konnten Physiker der Universität Genf und der Schweizer Firma id Quantique im Jahre 2002 mit der Übertragung einzelner Photonen über Telekommunikationsglasfaserkabel über eine Entfernung von 67 Kilometern zwischen Genf und Lausanne übertreffen. Diese Entfernung stellt einen kritischen Punkt dar, weil die Photonen bisher nicht verstärkt werden können, da sie in diesem Fall die Polarisationseigenschaften verändern würde.

Quantenpunktlaser, die auf dem GaAs, InAs sowie InP – Materialsystem beruhen, werden die herkömmlichen Halbleiterlaser sowie die Quantengraben-, Quantendraht- und Quantenfilm-Laser aus den meisten Anwendungen verdrängen.

4.5.5 Photonische Halbleiter

Durch die neusten Erkenntnisse aus den Nanowissenschaften verspricht man sich zukünftig hoch integrierbare photonische Schaltkreise, die z.B. als Grundlage für photonisch arbeitende Computer dienen, entwickeln zu können.

Sie könnten das ergänzende Gegenstück zum elektronischen Schaltkreis sein; in der Elektronik funktioniert die Informationsübertragung durch Strom, in der Photonik durch Licht.

Licht als Träger von Information spielt heute in vielen Bereichen der Technik – vor allem in der Kommunikationstechnik – eine bedeutsame Rolle, insbesondere weil mit Photonen höhere Datenraten als mit Elektronen erreichbar sind. Bisher fehlten jedoch geeignete Werkstoffe, mit denen sich Licht effizient leiten und schalten lässt.

Bei Photonischen Kristallen, die erstmals 1987 von den Forschern Eli Yablonovitch und Sajeev John unabhängig voneinander theoretisch beschrieben wurden, handelt es sich um eine neue Materialklasse, deren Mitglieder sich durch einen räumlich periodisch variierenden Brechungsindex auszeichnen. Sie bestehen aus strukturierten Halbleitern, Gläsern oder Polymeren und zwingen das Licht mittels ihrer spezifischen Indexkontraststruktur dazu, sich in der für die Bauteilfunktion notwendigen Art und Weise im Medium auszubreiten.

Ihre Überlegungen beruhen auf der Idee, dass sich kristalline Materialien mit einer bestimmten Struktur gegenüber Lichtwellen genauso verhalten wie Halbleitermaterialien gegenüber Elektronen. Analog sind Photonische Kristalle durch Bandlücken in den Lichtquanten charakterisiert: Lichtwellen mit einer Frequenz, die in einer solchen Bandlücke liegt, können das Material nicht durchdringen bzw. sich nicht ausbreiten. Dieser Effekt beruht auf Vielfachreflexion, nicht auf einer einfachen Absorption wie in Metallen.

Die damit verbundenen Mehrfachstreuungen an dielektrischen Atomen führen in Analogie zur Ausbreitung elektronischer de Broglie Wellen in einem Halbleiterkristall zur Ausbildung einer photonischen Bandstruktur, welche für gewisse Frequenzbereiche vollständige photonische Bandlücken aufweisen kann.

Eine Lichtwelle, deren Frequenz in die Bandlücken des Kristalls fällt, könnte sich wie bereits beschrieben nicht in ihm ausbreiten, und zwar unabhängig von der Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle. Man erhält also einen Halbleiter für Licht.

Die Idee des photonischen Kristalls mit der Bandlücke war geboren. Doch der Weg bis zu seiner Herstellung war lang.

Den ersten photonischen Kristall mit Bandlücke im Zentimeterwellenbereich hatten Eli Yablonovitch und seine Mitarbeiter 1991 aus einem Keramikblock hergestellt [43]. Eine Bandlücke für sichtbares und infrarotes Licht herzustellen, blieb für sie zunächst unerreichbar.

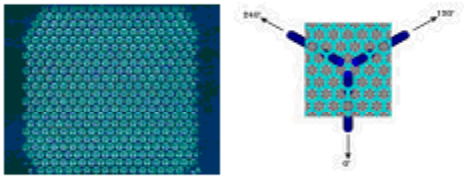


Abbildung 4.65: Dreifach durchlöchert: photonischer Kristall mit Bandlücke für Zentimeterwellen

Doch zehn Jahre später ist es der Arbeitsgruppe um Sajeev John von der Universität Toronto gelungen, einen Prototypen eines dreidimensionalen photonischen Kristalls aus Silizium herzustellen, der eine Bandlücke von 1,5 µm besaß und damit erstmals für die optische Telekommunikation im wichtigen Bereich lag.

Die Hoffnung, dass diese Kristalle zur Anwendung kommen könnten, basiert auf den am 10. April 2003 von Wissenschaftlern vom Institut für Nanotechnologie am Forschungszentrum Karlsruhe in der Nature Materials vorgestellten Verfahren, mit dem sie Photonische Kristalle erzeugen, die Halbleitereigenschaften für Licht mit Wellenlängen aufweisen, wie sie besonders in der Telekommunikation genutzt werden können. Es ist möglich, mit diesen Kristallen Wellenleiter mit sehr kleinen Kurvenradien im µm-Bereich bei sehr geringen Verlusten, effizientere Festkörperlaser, extrem schmalbandige optische Filter, Multiplexer sowie weitere neuartige optoelektronische Bauelemente zu realisieren [MDeub 04].

Marktstudien gehen davon aus, dass Leuchtdioden mittelfristig die Glüh- und Gasentladungs-Lichtquellen aus vielen Bereichen des täglichen Lebens inklusive der Raumbeleuchtung verdrängen werden. Im Bereich der Informationsverarbeitung existieren bereits Konzepte für rein optische Schaltelemente, die eines Tages als optische Hochgeschwindigkeits-Transistoren genutzt werden könnten.

Dem internationalen Team um Professor Dr. Martin Wegener ist es mit diesem Verfahren gelungen, eine kostengünstige und zuverlässige Herstellung von photonische Kristallen zu erforschen.

Eine Besonderheit dieser Kristalle ist, dass sich aus ihnen photonische Schaltelemente entwickeln lassen, die Licht einer bestimmten Wellenlänge ausfiltern oder Photonen praktisch verlustfrei weiterleiten und umlenken. Die neue Methode ist somit ein wichtiger Schritt hin zu photonischen Schaltkreisen und einer rein optischen Datenverarbeitung.

4.5.6 Spinelektronik – die neue Perspektive der Informationstechnik

Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, ist in den letzten Jahren eine Vielzahl von Halbleiterbauelementen entstanden, für deren Funktion gezielt quantenmechanische Effekte genutzt wurden. Diese Entwicklung wurde unter anderem durch die Herstellung von Nanostrukturen wie Quantenfilme, Quantendrähte und Quantenpunkte ermöglicht. Ein grundlegender quantenmechanischer Aspekt des Elektrons, sein Eigendrehimpuls (Spin) [44], wurde dabei jedoch weitestgehend ignoriert. Mit der sogenannten Spinelektronik (oder kurz

Spintronik) entsteht nunmehr eine neue Generation von Halbleiterbauelementen, die auf der Wechselwirkung des Spins der Ladungsträger mit den magnetischen Eigenschaften des Festkörpers beruhen. Hierbei werden Informationen auf einem Chip nicht mehr mit elektrischer Ladung gespeichert und verarbeitet, sondern mittels Veränderung der Magnetisierungsrichtung.

Die Spintronik stellt eine Weiterentwicklung der Magnetoelektronik dar. In der Magnetoelektronik finden magnetische und antimagnetische Metalle sowie isolierende oxidische Materialien ihre Anwendung.

Auf der Basis von dünnen Metall-Schicht-Systemen sind bereits wichtige Entdeckungen auf dem Gebiet der Magnetoelektronik, wie etwa der Riesenmagnetowiderstand (GMR: giant magnetoresistance effect) durch P. Grünberg und A. Fert, zur Anwendung (hochempfindliche Dünnschicht-Leseköpfe in Festplatten) gekommen. Bei Experimenten 1986 mit künstlich geschichteten magnetischen und nicht-magnetischen Materialien (siehe Bild 4.66) entdeckten die beiden Wissenschaftler die Abhängigkeit des Ladungstransports von der Spinrichtung der Elektronen.

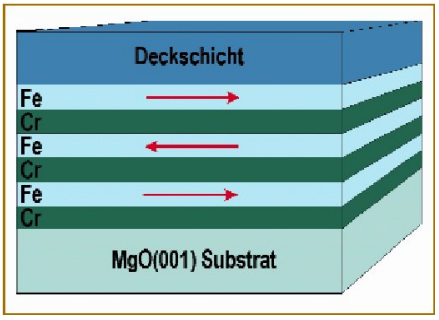


Abbildung 4.66: Schematische Darstellung einer magnetischen Eisen/Chrom Heteroschichtstruktur

Ein weiteres Phänomen war die Entdeckung, dass die relative Orientierung der Magnetisierungsrichtung der ferromagnetischen Schicht in den Heteroschichtsystemen von der Dicke der nicht-magnetischen Zwischenschicht abhängt. Dies wird heute auch als oszillierende Austauschkopplung bezeichnet. Bild 4.66 zeigt die schematische Darstellung einer magnetischen Heteroschichtstruktur, hier für Eisen/Chrom: Auf einer Unterlage (Magnesiumoxid-Einkristall) wird z. B. durch Verdampfung im Ultrahochvakuum eine Folge von ferromagnetischen Eisenschichten aufgebracht, die durch unmagnetische Chrom-Zwischenschichten getrennt sind.

Der GMR-Effekt beruht darauf, dass der Elektronenstrom, der durch das Schichtsystem fließt, je nach der Ausrichtung von den magnetischen Schichten (parallel oder antiparallel) einen unterschiedlich großen elektrischen Widerstand erfährt. Ursache ist die bei paralleler bzw. antiparalleler Ausrichtung der Magnetisierung unterschiedliche Streuung der im Strom vertretenen beiden Spinsorten. Bei antiparalleler Magnetisierungsausrichtung ist der Widerstand größer als bei paralleler Ausrichtung.

Der GMR-Effekt wurde bis heute an einer Vielzahl von Heteroschichtsystemen beobachtet. Seine Größe hängt von den verwendeten Materialien und von der physikalischen Beschaffenheit der Grenzflächen innerhalb der Heterostruktur ab.

Seit seiner Entdeckung arbeiten unzählige Arbeitsgruppen weltweit an der Weiterentwicklung und Anwendung von Magnetwiderstandseffekten. Der Widerstandsabfall in Schichtsystemen von magnetischen und nichtmagnetischen

Elementen ohne angelegtes Magnetfeld beruht in erster Näherung auf Streuung von Spins an den Schichtgrenzen antiferromagnetisch ausgerichteter Schichtsysteme. Durch Anlegen eines externen Magnetfeldes lassen sich die Spins in Richtung des angelegten Feldes zur ferromagnetischen Ordnung zwingen. Dadurch wird die Streuung beim Übergang in andere Schichten vermindert, der Widerstand sinkt. Dieser Effekt ist Gegenstand für weitere aktuelle Forschungsarbeiten, wie magnetisch steuerbare Widerstände, Magnetfeld-Sensoren und der Magnetic Random Access Memory (MRAM).

Alle diese Anwendungen nutzen die quantenmechanischen Eigenschaften des Spins aus, basieren jedoch ausschließlich auf metallischer Basis.

In dem neuen Forschungsgebiet der Spinelektronik werden nun Halbleiter mit Ferromagneten kombiniert, die die bisher systematische Trennung zwischen Speicherung und Verarbeitung von Informationen aufheben, um noch kleinere, schnellere und dichtere Schaltelemente – wie den Spin-Transistor und nichtflüchtige Speicher - mit zusätzlichen Funktionen entwickeln zu können, die neben der Ladung des Elektrons auch seinen quantenmechanischen Spin nutzen.

Dieser Eigendrehimpuls kann den Gesetzen der Quantenwelt folgend zwei Zustände einnehmen - Spin-up und Spin-down - oder eine Überlagerung dieser beiden Zustände sein.

Eine Spin-Elektronik auf Halbleiterbasis hat dahingegen den Vorteil, dass sowohl die sehr gut entwickelte Halbleitertechnik der konventionellen Elektronik genutzt werden kann, als auch eine Verbindung mit der Optoelektronik möglich ist. Hier können Wissenschaftler sich schon heute Spin-LEDs (light emmiting diodes), die brilliantes rechts- oder linkszirkulierendes Licht aussenden oder Spin-VCSELs (verticalcavity surface emmiting lasers) vorstellen, die im THz-Frequenzbereich getaktetes Laserlicht erzeugen.

Eine der Grundvoraussetzung für die Spintronik in Halbleitern ist die Bereitstellung und Kontrolle eines spinpolarisierten Stromes von Elektronen – aus einem Ferromagneten in einen nichtmagnetischen Halbleiter - , der durch die sogenannte „Spininjektion“ in Halbleitern erzeugt werden kann.

Halbleiter-Quantenpunkte werden aufgrund ihrer Eigenschaften bezüglich der langen Spin-Kohärenz-Zeiten oft als Kandidaten für eine zukünftige Quanten-Informationsverarbeitung herangezogen.

Desweiteren könnten aus der Zusammenführung von Elektronik, Photonik und Magnetik spinbasierte multifunktionale Bauelemente entstehen. Da mit Hilfe des Spins die Phasenkohärenz über große Längen- und Zeitskalen gespeichert und manipuliert werden kann, ist auch die Konstruktion von Quantenbits denkbar, die wiederum die Grundlage für den Bau eines Quantencomputers bilden können.

Seine Anwendung könnte aufgrund seiner wesentlich höheren Leistungsfähigkeit bei der Faktorisierung von Primzahlen zu enormen Veränderungen in der Kryptographie führen.

Eine zukünftige Quanteninformationsverarbeitung könnte Kernspins zur Speicherung und Elektronenspins zur Übertragung von Information nutzen.

Der Spin eines Elektrons spielte seit seiner Entdeckung vor etwa 80 Jahren - durch Georg E. Uhlenbeck und Samuel A. Goudsmith (1925) und wenige Jahre später (1928) durch Paul Dirac durch seine Dirac-Gleichung [45] bestätigt - eine bedeutende wissenschaftliche Rolle, ohne jedoch wichtige praktische Anwendungen gefunden zu haben. Seit der Entdeckung des Phänomens der elektrischen Spin-Injektion in paramagnetischen Metallen (1985) änderte sich die Lage zusehends.

Bevor die Spintronik in die etablierte Halbleitertechnologie einziehen kann, müssen in der Grundlagenforschung noch zahlreiche Probleme gelöst werden: die Distanz beim Spintransport, die Lebensdauer der Komponenten oder die Reaktion auf sehr niedrige Temperaturen (um Verluste bei der Anreihung der Spins zu vermeiden).

Auf der Suche nach neuen magnetischen Materialien mit möglichst hoher Spinpolarisation stehen seit einiger Zeit die beiden Verbindungsklassen Heusler-Verbindungen und Doppelperowkite im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten vieler Wissenschaftler. Die von Heusler entdeckten Verbindungen sind Legierungen aus unmagnetischen Metallen, die als Verbindung bis zu einer Temperatur von über 1200°C ferromagnetisch sein können. Insgesamt sind über 500 Heusler-Verbindungen bekannt, allerdings nur etwa 30, die oberhalb der Raumtemperatur ferromagnetisch sind.

Eine Forschergruppe um Univ.-Prof. Dr. Claudia Felser der Johannes Gutenberg-Universität Mainz entdeckte eine neue Verbindung in der Gestalt der Heusler-Phase Co_2CrAl und ihrer dotierten Form $CO_2Cr_{0.6}Fe_{0.4}Al$, die vielleicht das Material der Zukunft für die Informationstechnologie sein kann. Durch die Dotierung mit Eisen (Fe) lässt sich die Fermi-Energie für nur eine Spinrichtung verschieben. Bandstrukturrechnungen zeigen, dass in der einen Spinrichtung ein Metall, in der anderen ein Isolator vorliegt. Diese Verbindung ist also ein halbmetallischer Ferromagnet.

Dieses Material verfügt über eine hohe Spinpolarisation, d.h. viele Elektronen nur einer Spinrichtung sind am Stromtransport beteiligt. Zudem weist diese Verbindung eine hohe Spinpolarisation an der sogenannten „Fermi-Kante“ auf, dies ist eine Art Trennlinie zwischen mit Elektronen besetzten und unbesetzten Zuständen, an der der Strom geleitet wird. Vor allem weist diese neue Verbindung diese Eigenschaften auch bei Raumtemperaturen auf; denn für tiefe Temperaturen sind solche Materialien schon bekannt.

Im Rahmen eines weiteren Großprojektes amerikanischer Wissenschaftler von SUNY (Buffalo), Notre Dame University, Vanderbilt University (Nashville) und Naval Research Lab (Washington DC) wird die Spininjektion in Halbleitern mit niedriger Bandlücke untersucht. Seit Beginn der Forschungen an der Spininjektion in Halbleiter haben sich viele Gruppen auf Experimente mit InAs konzentriert. Dies hat dreierlei Gründe, zum Ersten hat sich InAs in der Entwicklung von Hybridstrukturen aus Halbleitern und Supraleitern bewährt. Viele der Arbeitsgruppen, die auf dem Gebiet der Spininjektion tätig wurden, hatten bereits Erfahrung mit InAs. Zum Zweiten hat InAs eine sehr große freie Weglänge für Elektronen und ist daher für einen ballistischen Transport sehr gut geeignet. Es sind jede Menge Quantentransportexperimente denkbar, wenn man es schafft, spinpolarisierte Elektronen in InAs zu injizieren. Zum Dritten hat InAs eine sehr starke Spin-Bahn Kopplung, die es theoretisch ermöglichen soll, den Spin über ein elektrisches Feld zu steuern. Diese Eigenschaft stellt auch die Grundlage für den von S. Datta und B. Das [SDat 00] 1990 vorgestellten Feldeffekttransistor - basierend auf einer Halbleiter-Heterostruktur mit ferromagnetischen Source-/Drain-Elektroden und elektrisch steuerbarem, spinpolarisiertem Kanalstrom – dar.

Dieser sogenannte „Datta-Transistor“ stellt seitdem häufig die Grundlage für weitere Projekte dar, bei denen die Probleme, die bei der Realisierung eines Spintransistors auf Halbleiterbasis offenbar auftreten, wie die ineffiziente Injektion bzw. Detektion spinpolarisierten Stroms an den Ferromagnet-Halbleiter-Kontakten sowie der relativ unbedeutende Anteil des spinabhängigen Widerstands an dem Gesamtwiderstand des Bauelements, erforscht werden können.

Ein weiteres Team der Universität von Buffalo hat in diesem Forschungsbereich einen revolutionären Durchbruch erreicht. Sie haben einen Halbleiter entwickelt, der der Außentemperatur standhält und die Spins nicht beeinträchtigt.

Diese Entwicklung lässt die Hoffnung aufkommen, dass schon in den nächsten Jahren ein Spintronik-Halbleiter entwickelt werden kann, der die Verarbeitung der Daten, die Speicherung und die Kommunikation auf einem einzigen Molekularchip vereint, der eine Größe von einigen Nanometern aufweist. In diesem Größenbereich würde der heute leistungsfähigste Rechner nur noch die Größe von einem Stück Würfelzucker aufweisen.

Mögliche Anwendungen magnetoelektronischer oder spinelektronischer Bauelemente können im Wesentlichen in drei Kategorien eingeteilt werden:

1. Ferromagnetische Schichtstrukturen für die magnetische Datenspeicherung, meist auf der Basis metallischer Ferromagnete, wie sie z.B. in modernen Festplatten genutzt werden.
2. Spinpolarisierter Stromtransport durch elektronische Halbleiter-Bauelemente, z.B. für den Spin-Transistor sowie für frei programmierbare Prozessoren. Die Programmierung erhält sich stromlos aufrecht und ist dennoch sehr schnell umprogrammierbar.
3. Manipulation einzelner spinpolarisierter Elektronen, z.B. für die Quanteninformationsverarbeitung.

4.5.6.1 Spin-Feldeffekt-Transistor

Bei der heutigen Entwicklung von Computern geht es inzwischen nicht nur um die weitere Miniaturisierung der Halbleiter, sondern auch um neue Funktionalitäten in den Schaltelementen. Der Spin als eine Basiseigenschaft des Elektrons als zusätzlicher Freiheitsgrad verspricht hier die Entwicklung neuartiger passiver und aktiver Bauelemente, die magnetische und Halbleiterstrukturen miteinander kombinieren. Weiterhin eignet sich der Spin auch als Speichereinheit (Quanten-Bit oder QuBit) für die Quanten-Informationsverarbeitung (Quantencomputer).

Ein zweites konzeptionelles Bauelement – neben dem Magnetoelektronischen Speicher (MRAM) - der Spin-Elektronik stellt der Spin-Feldeffekt-Transistor mit ferromagnetischen Source-/Drain-Elektroden und elektrisch steuerbarem spinpolarisiertem Kanalstrom (Abbildung 4.67) dar.

In diesem werden die Spins beispielsweise aus einer ferromagnetischen (FM) Elektrode (Polarisator) in einen Halbleiter injiziert, die ballistisch zu einer anderen ferromagnetischen Elektrode transportiert werden.

Die Spins können sich im Halbleiter bewegen und durch eine „Gate“-Elektrode manipuliert werden.

Damit erhält man zum Beispiel einen Spin-Schalter, der in programmierbaren Logik-Schaltungen mit geringem Leistungsverbrauch eingesetzt werden kann.

Dieser Entwurf – Realisierung eines Spin-FET (Feld-Effekt-Transistor) mit einem zweidimensionalen Elektronensystem (2DES) in InAs-Heterostrukturen - wurde von S. Datta und B. Das [SDatBDas 00] 1990 vorgestellt und es entfachte ein reges Interesse an Spin-Effekten in Halbleiter-Heterostrukturen.

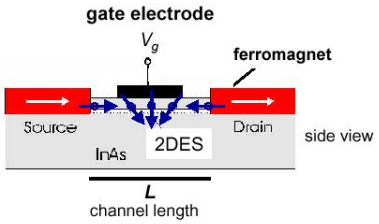


Abbildung 4.67: Spin-Feldeffekt-Transistor

Bei diesem Konzept des Spin-FET sollen Elektronen durch ferromagnetische Kontakte (rot) Spin-polarisiert in ein 2DES (blau) injiziert werden, die Spin-Polarisation über eine Spin-Bahn-Wechselwirkung im 2DES manipuliert und durch einen weiteren ferromagnetischen Kontakt wiederum detektiert werden.

Grundlegend neuartig an dem Vorschlag ist, dass die Gate-Spannung nicht - wie herkömmlich - die Leitfähigkeit im Halbleiter-Kanal steuert, sondern den Spin-Zustand der stromtragenden Elektronen.

Funktionsprinzip

Der Spintransistor besteht aus zwei ferromagnetischen Anschlüssen, der „Quelle“ und der „Senke“, die durch einen engen Halbleiterkanal - ein zweidimensionales Elektronengas - getrennt sind (Abbildung 4.68).

Der aus der Quelle in den Kanal fließende elektrische Strom ist spinpolarisiert und fließt ungehindert in die zur Quelle parallel magnetisierte Senke, falls er diese mit unveränderter Spinorientierung erreicht.

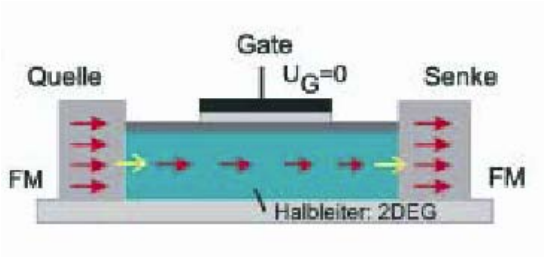


Abbildung 4.68: Spin-Feldeffekt-Transistor ohne Gatespannung

Beim Transport der Elektronen durch den Halbleiter kann ihr Spin leicht um innere und äußere Magnetfelder präzedieren. Diese Präzession führt zu einer kontinuierlichen Drehung der Spinrichtung des Elektrons innerhalb des Halbleiterkanals.

Erstaunlicherweise können innere Magnetfelder auch durch elektrische Felder – durch eine Spannung am Gate ($U_G \neq 0$) - erzeugt und gesteuert werden. Der Grund dafür liegt in den nahezu relativistischen Geschwindigkeiten der Elektronen, so dass in ihrem Ruhesystem das elektrische Feld auch eine magnetische Feldkomponente besitzt.

Wird die Gate-Spannung derart eingestellt, dass der Elektronenspin entgegengesetzt zur Spinausrichtung der Senke liegt, wird der Elektronentransport in die Senke blockiert (Abbildung 4.69). Auf diese Weise einen Strom zu sperren, erfordert wesentlich weniger Energie und die Umorientierung der Spins weniger Zeit als in einem konventionellen FET, bei dem die Elektronen durch ein stärkeres elektrisches Feld aus dem Kanal hinausgedrängt werden.

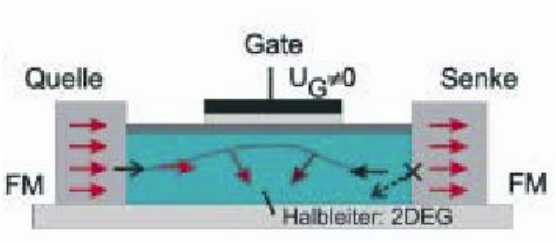


Abbildung 4.69: Spin-Feldeffekt-Transistor mit angelegter Gatespannung

Neben der Spinausrichtung ist auch der Erhalt der Spininformation über praktikable Längen- und Zeitskalen von entscheidender Bedeutung. So kann ein Spin-FET nur dann funktionieren, wenn die Elektronen vom Eintritt in den Kanal bis zum Austritt in dieselbe Richtung zeigen. Die Dauer dieser Ausrichtung (Spinlebensdauer) wird auch zur alles entscheidenden Frage, wenn es um die Realisierung eines Quantencomputers auf der Basis von Elektronenspins geht [BBescho].

4.5.6.2 Spinventile

Im nebenstehenden Bild ist eine vereinfachte Form einer Spinventilheterostruktur dargestellt. Diese Struktur besteht aus einer „magnetisch weichen“ Schicht F(frei), die durch eine dünne nicht-magnetische Zwischenschicht NM (2,5-3nm Kupfer) von einer zweiten „magnetisch harten“ Schicht F(pinned) entkoppelt ist. Diese Struktur lässt sich also nur schwer ummagnetisieren. Dagegen kann schon ein niedriges externes Magnetfeld die Magnetisierung zwischen der parallelen und antiparallelen Ausrichtung bei der magnetisch weichen Schicht umschalten.

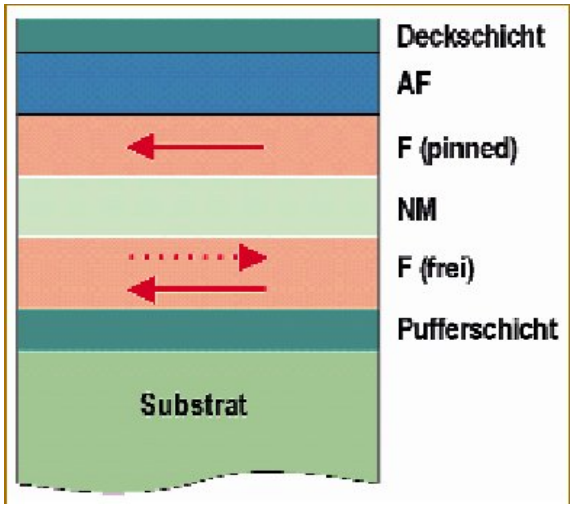


Abbildung 4.70: Spinventilheterostruktur

F(frei) = frei schaltbare magnetische Schicht, NM = nicht-magnetische Zwischenschicht,
F(pinned) = magnetische Schicht mit durch die angrenzende antiferromagnetische (AF) Schicht fest verankerter Magnetisierungsrichtung.
Die Zwischenschichtdicke wird so groß gewählt, dass zwischen den beiden magnetischen Schichten keine Wechselwirkung stattfindet.

Die magnetisch weiche oder „freie“ Schicht besteht meistens aus einer bestimmten Eisen-Nickel-Legierung (Permalloy). Diese Legierung ist ferromagnetisch, das heißt seine magnetischen Momente sind auch dann ausgerichtet, wenn kein äußeres Magnetfeld anliegt.

Die magnetisch schwer schaltbare Schicht F(pinned) wird dadurch erzeugt, dass man eine zweite Permalloy-Schicht mit einer antiferromagnetischen Schicht (beispielsweise aus einer Eisen-Mangan-Legierung oder aus Nickeloxid) bedeckt und dadurch die Magnetisierungsrichtung der zweiten Schicht verankert („pinned“). Dieses Pinning der magnetischen Schicht geschieht durch die sogenannte Exchange-Bias-Wechselwirkung an der Grenzfläche mit der angrenzenden antiferromagnetischen Schicht. Man kann die antiferromagnetische Schicht auch zwischen der Pufferschicht und der angrenzenden Permalloy-Schicht einbringen; dann wird diese Permalloy-Schicht durch Exchange-Bias verankert und die obere Permalloy-Schicht wird zur freien Schicht.

Jede Änderung in der relativen Ausrichtung der Magnetisierungen beider Schichten führt zu einer Widerstandsänderung, wobei der höchste Widerstand für antiparallele Stellung (Ventil zu), der niedrigste für parallele Ausrichtung der Magnetisierungen (Ventil auf) erreicht wird. Zwischen beiden Werten ändert sich der Widerstand entsprechend dem Kosinus des Winkels.

In den Spin-Ventil-Sensoren (spin-valve-sensor) reichen schon sehr kleine äußere Magnetfelder aus, um die Magnetisierungsanordnung der Heteroschicht zu schalten, da sein elektrischer Widerstand in Abhängigkeit von der Feldstärke sinkt.

Miniaturisierte Spin-Ventil-Sensoren werden heute bereits im Automobilbau z.B. als Drehzahlmesser, zur kontaktlosen Winkel- und Positionsmessung und als Leseköpfe in hochdichten magnetischen Festplattenspeichern eingesetzt. Der Sensor registriert dabei die Streufelder der magnetisch eingeschriebenen Bits auf der Festplatte.

4.5.6.3 Nichtflüchtige Speicherbauelemente

Vor allem im Bereich der Massenspeicher zeichnen sich neue Konzepte für nichtflüchtige Speicher, wie MRAM FeRAM und OUM ab. Bis diese Speichertypen wirtschaftlich sinnvoll nutzbar sind, müssen die Forscher und Entwickler der daran arbeitenden Halbleiterhersteller noch einige technische Probleme lösen.

4.5.6.3.1 Magnetische Arbeitsspeicher - MRAM

Ein Bit eines derzeit in der Mikroelektronik gebräuchlichen DRAM Speichersystems besteht im Wesentlichen aus einem Kondensator, der als Speicher für das Datenbit dient, sowie einem Transistor, welcher die Lese- und Schreibzugriffe steuert. Solche Speicher sind schnell (< 10 ns), gut miniaturisierbar und preiswert herzustellen. Ihr Nachteil besteht jedoch darin, dass sie wegen der unvermeidbaren Leckströme regelmäßig ausgelesen und aufgefrischt (Refresh alle 64 ms) werden müssen. Der Betrieb solcher Speicher ist daher auch dann mit Stromverbrauch und Wärmeentwicklung verbunden, wenn ihr Inhalt nicht verändert wird. Bei abgeschalteter Stromversorgung gehen außerdem die gespeicherten Informationen verloren, was nicht nur zu Problemen bei der Datensicherheit führt (etwa bei plötzlichem Stromausfall), sondern auch zu unerwünschten Wartezeiten beim Einschalten mikroelektronischer Geräte, da die zum Betrieb erforderlichen Daten (Betriebssystem) erst aus einem nichtflüchtigen Speicher in den Arbeitsspeicher übertragen werden müssen.

Abhilfe könnte in naher Zukunft ein Speichersystem schaffen, welches auf der magnetischen Speicherung von Informationen basiert, dabei aber im Unterschied zu konventionellen magnetischen Speichersystemen (Festplatte) ohne Verwendung mechanisch beweglicher Teile direkt elektronisch gelesen und beschrieben werden kann: der magnetische Direktzugriffsspeicher (Magnetic Random Access Memory, MRAM).

Magnetische Schichtstrukturen aus ferromagnetischen Lagen und nicht magnetischen Zwischenschichten (metallisch oder isolierend) werden – wie auch die bereits beschriebenen Spinventile - als potentielle Kandidaten für die Realisierung von MRAM's betrachtet, die zukünftig die heute in Computern eingesetzten dynamischen Random Access Memories (DRAM) auf Halbleiterbasis ersetzen bzw. teilweise verdrängen können.

MRAMs haben nach Auffassung vieler Experten das Potenzial, die Speicherlandschaft von heute zu revolutionieren, da ihr Vorteil gegenüber den DRAMs darin besteht, dass sie nichtflüchtig sind. Das heißt, sie behalten die in ihnen gespeicherten Informationen auch dann, wenn die elektrische Versorgung abgeschaltet wird, sie erhalten ein Gedächtnis.

Somit können MRAMs gleichzeitig als Arbeits- und Massenspeicher auf dem gleichen Modul eingesetzt werden, was wiederum zu Vereinfachungen bei der Architektur, zu kleineren Abmessungen und letztendlich zur Produktion billigerer Geräte führen kann. Außer für Desktop-Computer eignen sich MRAMs vor allem für mobile Systeme wie Handys und PDAs und können dort Speichermedien wie DRAM, Festplatte und Flash-Memory ersetzen. Da MRAM die Unterscheidung zwischen Arbeits- und Massenspeicher überflüssig macht, würden vor allem die lästigen Ladezeiten beim Hochfahren eines Computers oder Einschalten eines Mobiltelefons wegfallen. Da außerdem die für DRAMs notwendigen Auffrischungszyklen nicht benötigt werden, wird eine längere Betriebszeit für die Akku's erwartet.

Diese Vorteile von MRAMs gegenüber DRAMs und die großen Fortschritte bei der Herstellung von magnetischen Schichtstrukturen mit dem neuen magnetoresistiven Effekt zusammen mit anderen Effekten wie der Austausch-Anisotropie und der Zwischenschichtkopplung haben einen enormen Entwicklungs- und Investitionsschub auch in der Industrie an MRAMs bewirkt.

In dem folgenden Abschnitt soll ein kurzer Überblick in die geschichtliche Entwicklung, die Funktionsweise und Basiskonzepte für MRAMs sowie den Entwicklungsstand bei den Herstellungstechniken gegeben werden.

Geschichtlicher Hintergrund

Bereits Mitte der 80er Jahre wurde von der Firma Honeywell ein Konzept – welches auf dem AMR-Effekt (anisotroper Magnetwiderstand) basierte - für MRAM-Speicherbausteine entwickelt, das mit den heutigen produzierten Chips bereits einige Gemeinsamkeiten besaß:

- Schreiben unter Benutzung der magnetischen Hysterese
- Lesen unter Benutzung desselben Elements, in dem die Daten gespeichert sind, und
- Speicherzellen, die auf einem Chip integriert sind.

Die damals verwendeten magnetischen Materialen - zwei ferromagnetische Filme (NiFe), die durch ein nicht-magnetisches Metall mit schlechter elektrischer Leitfähigkeit (TaN) getrennt waren - hatten einen anisotropen Magnetwiderstandseffekt von etwa 2%, die erhaltene Widerstandsänderung betrug aber nur etwa 0,5%. Mit praktikablen Meßströmen wurden Spannungssignale im Bereich von 1 mV erreicht. Damit konnten integrierte 16 kbit MRAM Chips realisiert werden, die eine Zugriffszeit von 250 ns besaßen. Die Schreibzyklen lagen bei ca.100 ns [46].

Funktionsweise

Bei einer MRAM-Speicherzelle werden die Daten als Magnetfeldorientierungen der Speicherzelle „eingeschrieben“ und nicht als elektrische Ladung wie beim herkömmlichen DRAM-Chip.

Der MRAM besteht aus zwei ferromagnetischen Elektroden, die durch eine dünne Isolatorschicht voneinander getrennt sind. Durch diese nur wenige Atomlagen dicke Schicht kann wegen des quantenmechanischen Tunneleffektes auch dann ein Strom fließen, wenn die angelegte Spannung nicht ausreicht, um die Elektronen ins Leitungsband zu heben. Dabei hängt die auftretende Stromdichte u. a. von der anliegenden Spannung, den verwendeten Materialien, der dicke der Isolatorschicht und – in diesem Zusammenhang entscheidend – von der magnetischen Konfiguration der beiden Elektroden ab. Die Leitfähigkeit eines solchen Systems ist bei paralleler Ausrichtung der Magnetisierungsvektoren größer als im antiparallelen Fall.

Theoretisch lässt sich dieses Modell mit dem Phänomen des Tunnelmagnetwiderstands (TMR) erklären. Die Abbildung 4.71 zeigt den schematischen Aufbau einer MRAM-Speicherzelle aus magnetoresistiven Tunnelelementen (MTJ). Sie besteht aus mehreren Schichten, wobei für die Beschreibung des Funktionsprinzips

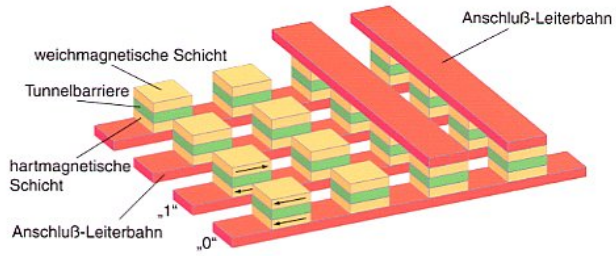


Abbildung 4.71: MRAM-Speicherzelle

nur drei Schichten notwendig sind.

Die MRAM-Speicherzelle besteht prinzipiell aus zwei magnetischen Schichten, zwischen denen sich eine Tunnelbarriere - die nichtmagnetische Schicht (Isolator) - befindet. Die Schichtdicke beträgt 3 bis 6 nm, dies entspricht etwa 10 bis 20 Atomen.

Die obere Schicht ist magnetisch weich. Kleine Ströme sind in der Lage das Magnetfeld in seiner Richtung zu verändern. Die untere Schicht ist magnetisch hart. Das Magnetfeld hat eine unveränderliche Magnetfeldrichtung, das als Referenz verwendet wird. Der Magnetfeld-Unterschied zwischen den beiden Schichten dient zur Unterscheidung des Speicherzelleninhaltes.

Die digitale „0“ entspricht dem hochohmigen Zustand, es fließt wenig Strom durch das Element. Dabei ist die Magnetfeldrichtung der beiden Schichten unterschiedlich (antiparallel). Die digitale „1“ entspricht dem niederohmigen Zustand, dabei fließt viel Strom durch das Element und die Magnetfeldrichtung der beiden Schichten ist gleich (parallel).

Die Programmierung der Speicherzellen erfolgt grundsätzlich durch einen Stromimpuls, der parallel zu einem ferromagnetischen Material geführt wird und dieses je nach Stromrichtung in die eine oder andere Richtung "auflädt", indem das ferromagnetische Material ummagnetisiert wird.

Beim Aufbau der Bauelemente und bei der Technik des Auslesens lassen sich gegenwärtig vier verschiedene Ansätze unterscheiden, sie basieren auf:

- Magnetischer Tunnelkontakt (MTJ)
- Spinventile
- Hybridstrukturen
- Giant Magneto Resistance (GMR)

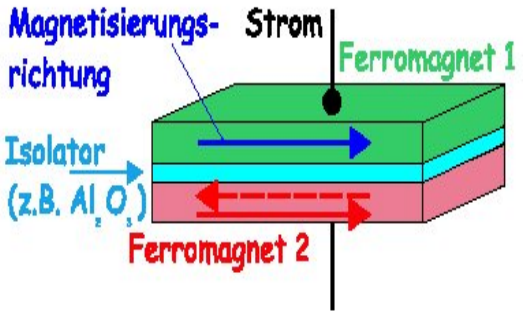


Abbildung 4.72: Magnetischer Tunnelkontakt

MRAM basierend auf magnetischen Tunnelkontakten

Seit Mitte 2003 beschäftigen sich intensiv verschiedene Halbleiterhersteller (Honeywell, Motorola, IBM, Infineon) mit der Entwicklung von MRAMs auf der Basis von magnetischen Tunnelkontakten. Ein solcher Tunnelkontakt bzw. magnetoresistives Tunnelelement (MTJ) besteht aus zwei dünnen ferromagnetischen Metallschichten (Ferromagnete), welche durch eine sehr dünne dielektrische Tunnelbarriere (Isolierungschicht) voneinander getrennt sind (siehe Abbildung 4.72 in Widerstand hängt von der relativen Orientierung der Magnetisierungen der beiden Ferromagneten ab.

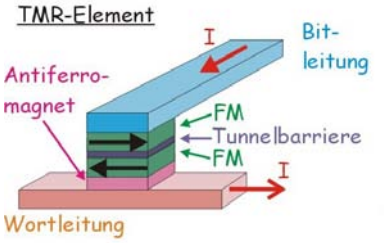


Abbildung 4.73: TMR Element

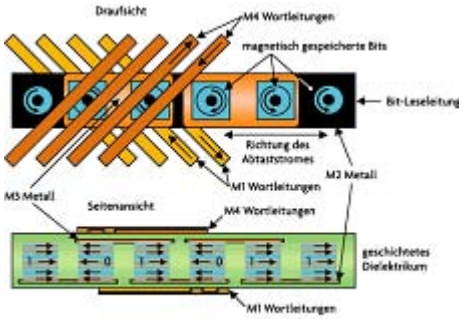
Der Elektronentransport erfolgt senkrecht zur Fläche der Schichten und wird gemessen, indem an den Elektroden über die Isolatorschicht eine Spannung angelegt wird.

Der Magnetowiderstand basiert auf einer spinabhängigen Tunnelwahrscheinlichkeit, bedingt durch eine energetische Aufspaltung der Energiebänder, verursacht durch den Spin der Elektronen. Dieser Magnetowiderstand ist direkt proportional zu den Polarisationsstärken der Elektronen an den zwei Isolator / Metallgrenzflächen, die zu

der Polarisation im Inneren der zwei magnetischen Filme unterschiedlich sein können.

Nebenstehende Bilder zeigen die Draufsicht sowie ein MRAM-Speicherzellenarray auf der Basis von magnetischen Tunnelkontakten.

Die beiden magnetischen Schichten verhalten sich wie ein kleiner Stabmagnet mit jeweils einem Süd- und einem Nordpol, dem sich ein magnetisches Moment zuordnen lässt. Die magnetischen Momente der beiden Magnete können nun gleichgerichtet oder einander entgegengesetzt sein und somit die beiden binären Zustände „0“ und „1“ repräsentieren.



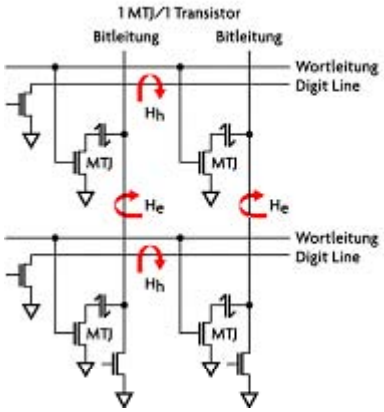


Abbildung 4.74: 2*2 Array einer MTJ Speicherzelle

Lesevorgang:

Das Auslesen der Zelle basiert auf der Grundlage, dass der Widerstand der Tunnelbarriere geringer ist, wenn beide ferromagnetischen Schichten die gleiche magnetische Orientierung aufweisen (parallel). Andererseits ist bei unterschiedlicher Polarisation (antiparallel) der Widerstand höher.

Dieser Unterschied wird dadurch erreicht, dass durch die Schichten mit einer Dicke von wenigen Atomlagen eine Polarisierung der Elektronen erreicht wird. Der untere Magnet lässt nur Elektronen einer bestimmten Spin-Polarisationsrichtung durch, die von dem zweiten Magneten in Abhängigkeit von dessen Ausrichtung durchgelassen oder gesperrt werden. Wenn beide Magnete gleichgerichtet sind, können die Elektronen die Tunnelbarriere überwinden. Ist der zweite Magnet allerdings entgegengerichtet, dann wird auch dieser Stromanteil gesperrt.

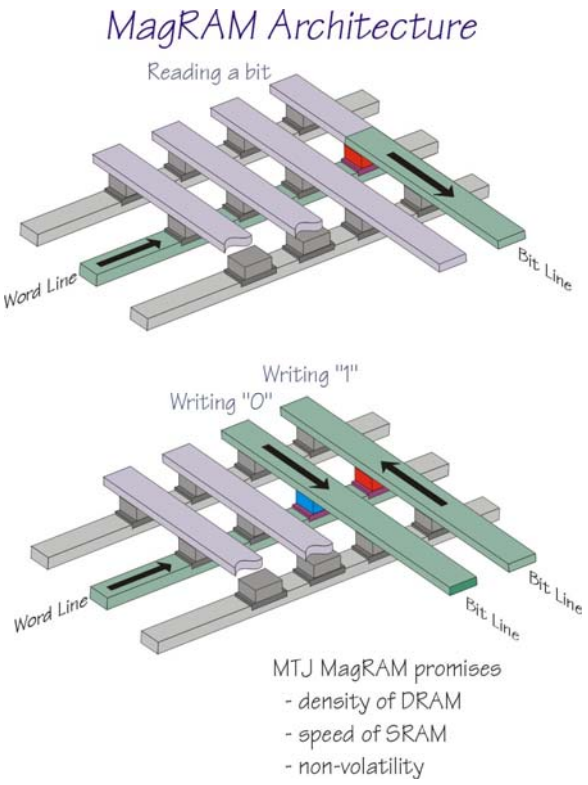


Abbildung 4.75: MRAM Architektur

Der relative Unterschied im Widerstand, der sich nun zwischen Wort- und Bitleitung ergibt beträgt typischerweise etwa 12 %.

Schreibvorgang:

Um die Zellen zu beschreiben, werden Ströme durch Leitungen geschickt, die nah an den magnetischen Zellen vorbeiführen, mit diesen aber nicht leitend verbunden sind. Diese Leitungen, die parallel zu den Wortleitungen geführt werden, bezeichnet man als Digit Lines. Durch das einen Strom umgebende Magnetfeld werden die Magnete, je nach gewünschtem Speicherzustand, gleichgerichtet oder entgegengesetzt ausgerichtet.
Dabei fließt der Strom in der Wortleitung immer in eine Richtung und führt zu einem immer einheitlichen Moment des zugehörigen Magneten, während unterschiedliche Flussrichtungen durch die Bitleitungen die gewünschten Zustände repräsentieren.

Eine große Hürde bei der Herstellung von MRAMs ist mit der Auswahl der Zelle beim Schreibprozess verknüpft. Bei der im Bild 4.75 dargestellten Methode müssen zwei orthogonale Ströme in Koinzidenz sein, um einen Schreibprozess zu erzeugen. Jeder Strom für sich allein muss klein genug sein, um die gespeicherten Daten nicht zu beeinflussen.

Diese zweidimensionale Auswahlmethode stellt hohe Anforderungen an die Homogenität des Speicherzellen-Arrays. Falls man einen sehr hohen Summenstrom verwendet, um auch noch einen sicheren Schreibvorgang der unempfindlichsten Zellen zu gewährleisten, läuft man Gefahr, das einer der beiden Teilströme bereits ausreicht, um die empfindlichsten Zellen bereits zu stören. Man erkennt daraus, dass die Anforderungen an die Homogenität der Zellen und die Toleranzen bei der Herstellung für die zweidimensionale Auswahlmethode sehr hoch sind.

Zellen-Auswahlmethoden

Viele Konzepte für magnetische RAMs benutzten ein 2D Auswahlschema für das Lesen der Daten.

Neuere MRAMs basieren auf MTJs, in denen Dioden oder Transistoren für die Auswahl der Zelle beim Lesevorgang eingesetz werden. Ein solches Auswahlschema ist in Abbildung 4.76 für ein Array dargestellt, in dem Dioden eingesetzt werden. Aufgrund der Sperrrichtung der Dioden kann der Strom nur von „1“ nach „0“ fließen.

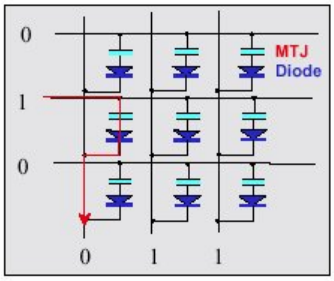


Abbildung 4.76: MRAM Speicherzellen-Array mit zusätzlichen Dioden zur Vermeidung von Störeffekten beim Lesevorgang

Mit diesem Schema ist es möglich, dass der Strom genau über eine MTJ fließt und alle anderen nicht beeinflusst. Es darf nur an der auszuwählenden Zeile eine „1“ (alle anderen eine „0“) anliegen, bei den Spalten ist es genau umgekehrt. Herstellungstechnisch wird im einfachsten Fall eine Diode in Reihe mit einem MTJ geschaltet.

Man hat, wie in Abbildung 4.76 dargestellt, durch die Verwendung von Dioden oder Transistoren keine Probleme beim Lesen, es gibt aber immer noch Einschränkungen durch die 2D Auswahl beim Schreiben. Um Selektivität auch beim Schreibprozess zu erhalten, gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen können vergrabene Drähte verwendet werden, mit denen zwei orthogonale Felder an jeder MTJ erzeugt werden können, mit deren Hilfe die freie Schicht umgeschaltet werden kann.

Einen anderen Ausweg bieten eindimensionale Auswahlmethoden. Dabei benutzt man einen Transistor pro Zelle für die Zellenwahl beim Schreibprozess. Dies reduziert die oben genannten Anforderungen an die Homogenität des Speicherzellen-Arrays und erlaubt zusätzlich die Anwendung kleinerer Ströme.

Ein einfaches 1D-Auswahlschema für den Lese- und Schreibvorgang in einer magnetischen Speicherzelle zeigt Abbildung 4.77.

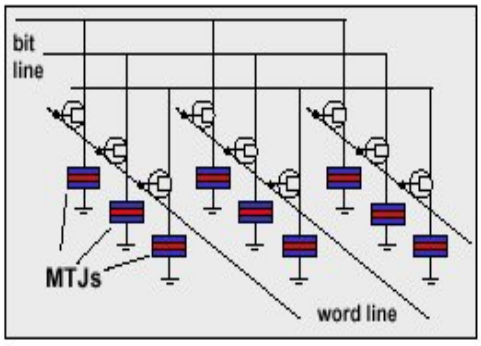


Abbildung 4.77: Eindimensionales magnetisches Auswahlschema (Lesen und Schreiben) für magnetoresistive Speicherzellen

Entscheidend ist, dass der Transistor die Auswahl der Zelle durchführt und nicht die 2D Schalteigenschaften der Zelle. Es kann ein sehr großer Strom zum Schreiben und

ein kleiner zum Lesen verwendet werden, um so vorhandene Parameterfluktuationen zu kompensieren. Der Schreibstrom sollte möglichst klein gehalten werden, um die Größe des Transistors klein halten zu können. Die erzeugte Spannung in einer Zelle wird mit einem Referenzwert verglichen, um daraus den Inhalt der Speicherzelle bestimmen zu können. Es sei darauf hingewiesen, dass nach wie vor ein 2D-Array von Speicherzellen vorhanden ist, dass aber der Transistor die Last der Zellenauswahl trägt. Deshalb wird die Konfiguration auch als eindimensionale magnetische Selektion bezeichnet.

Insgesamt kann man feststellen, dass MRAMs das Potenzial für einen Speicher besitzen, die genauso dicht und schnell sind wie DRAMs und zusätzlich den Vorteil der Nichtflüchtigkeit haben. Im Vergleich mit Flash-Speichern und EEPROMs besitzen MRAMs eine höhere Schreibgeschwindigkeit und es gibt keine Anzeichen dafür, dass eine Limitierung der Schreibzyklen besteht. Ferroelektrische RAMs (FeRAMs) sind wie MRAMs nichtflüchtig und besitzen eine hohe Schreibgeschwindigkeit.

Für FeRAMs gibt es zurzeit bereits Nischenanwendungen, sie stellen einen wichtigen Konkurrenten zu den MRAMs dar. Vor allem setzen japanische und koreanische Firmen auf diesen Speichertyp, da sie für diesen Bereich einen mehrjährigen Entwicklungsvorsprung besitzen. Allerdings können MRAMs dichter und damit billiger hergestellt werden.

In der folgenden Tabelle ist ein Vergleich der wichtigsten Parameter von verschiedenen Speicherkonzepten dargestellt [RSiet 04].

	DRAM	EEPROM	Flash	FeRAM	MRAM
Lesezyklen	$>10^{15}$	$>10^{15}$	$>10^{15}$	10^{12}-10^{15}	$>10^{15}$
Schreibzyklen	$>10^{15}$	10^{4}-10^{6}	10^{5}-10^{6}	10^{10}-10^{15}	$>10^{15}$
Schreibspannung	2,5-5V	12-18V	10-18V	0,8-5V	
Schreibenergie	10-200pJ	1pJ	10-200pJ	1pJ	10-200pJ
Schreibzeit	10 ns	1-10ms	1μs-1ms	20 ns	10 ns
Zugriffzeit	40-70ns	40-70ns	40-70ns	40-70ns	5 ns

Tabelle 4.1: Speichertechnologien im Vergleich mit MRAMs basierend auf magnetischen

MRAM basierend auf Spinventilen

Mit der Erfindung der Spinventil-Zelle wurden die Signalhübe und damit die Zugriffszeiten von MRAMs weiter verbessert, wobei die erreichbaren Dichten mit denen anderer festkörperbasierter Speicherbausteine konkurrieren können. In der Abbildung 4.78 wird die schematische Struktur einer Spinventil-Zelle wiedergegeben. Sie besteht aus zwei ferromagnetischen Schichten mit unterschiedlichen Koerzitivfeldern, so dass eine Schicht bei einem geringeren magnetischen Feld (weiche Schicht, z.B. NiFe, FeCo) leichter schaltet als die andere harte Schicht, z.B.CoFe, CoPt, AFi (CoFe/ Ru/ CoFe).

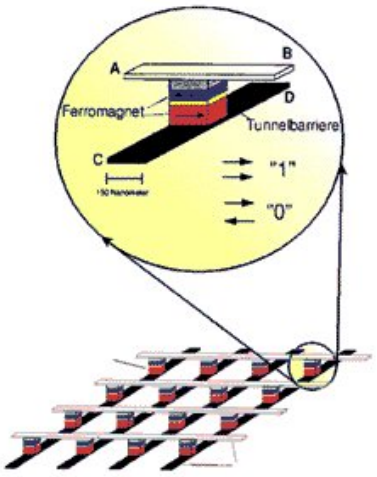


Abbildung 4.78: MRAM-Speicherzelle basierend auf Spinventilen und gekreuzten Leiterbahnen

Dies kann z.B. durch unterschiedliche Schichtdicken bei gleichem Material erreicht werden. Der Widerstand ist niedrig für parallele und hoch für antiparallele Magnetisierungsorientierung. Die weiche Schicht dient zum Auslesen des Speicherzustands, der in Form der Magnetisierungsrichtung der harten Schicht vorliegt. Ohne die harte Schicht umzuschalten, kann die Magnetisierungsrichtung des weichen Films parallel oder antiparallel zu der des harten Films gedreht werden. Der Strom, der durch die gekreuzt angeordneten Leiterbahnen fließt, erzeugt ein Magnetfeld, das den TMR-Widerstand schaltet.

Die Information wird als ferro- oder antiferromagnetischer Zustand, also als „1“ oder „0“, in die einzelnen TMR-Elemente geschrieben und wird nichtflüchtig gespeichert, d.h. sie geht auch bei Stromausfall nicht verloren und kann mit geringen Stromstärken ausgelesen werden.

Spinventil-Speicherzellen können mit lateralen Abmessungen bis zu etwa 0,2 µm realisiert werden. Dabei kann eine zweidimensionale Speicherorganisation verwendet werden. Allerdings sind die Ströme (Magnetfelder), die zum Schalten der harten Schicht benötigt werden, heute noch zu hoch, um eine sehr hohe Integrationsdichte zu erlauben (Stromtragfähigkeit der metallischen Leitungen, Heizeffekte).

Hybrid Strukturen

Beim geschichteten Aufbau von ferromagnetischen Halbleitermaterialien wird für die Auswertung einer Speicherzelle der Effekt genutzt, dass am Ende eines Magneten eine vertikale Komponente vorliegt. Fließt durch einen - unter dem Magneten angeordneten - dotierten Halbleiter ein Strom, so werden die Ladungsträger durch den Hall-Effekt lateral abgelenkt und es tritt eine Hallspannung (U_H) auf, die sich seitlich abgreifen lässt und die Ausleseschaltung wertet das vertikale Magnetfeld am Austritt des ferromagnetischen Materials durch einen kleinen Hall-Sensor aus [MJohn 00].

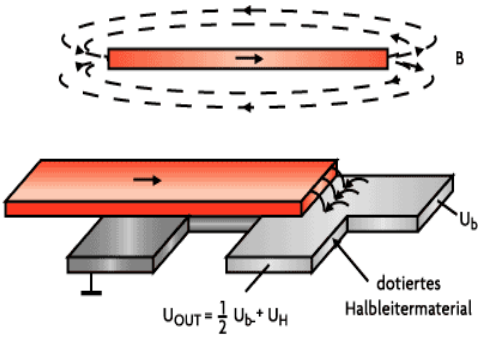


Abbildung 4.79: Hybride MRAM-Zelle

Giant Magneto Resistance (GMR)

Im Jahre 1988 entdeckte man parallel an der Universität Paris-Süd und an dem deutschen Forschungszentrum Jülich einen erstaunlichen Effekt bei der Leitfähigkeit von Metallen in Magnetfeldern; sie erhöht sich um bis zu 220 Prozent in bestimmten Kombinationen aus magnetischen und nichtmagnetischen Metallen. Riesig wie der Effekt sich andeudete, wurde er als giant magneto resistance (GMR) getauft.

Im Gegensatz zum MTJ-Schichtaufbau sind beim Riesenmagnetwiderstands-Effekt die ferromagnetischen Filmschichten durch eine nicht-ferromagnetische, aber leitende Schicht voneinander getrennt und liegen in der Stromebene, während sie bei MTJ senkrecht dazu liegen (Bild 4.80). Sind die Dimensionen dieses Schichtaufbaus ausreichend klein, so treten auf Quantenebene Wechselwirkungen zwischen den ferromagnetischen Schichten auf. Der Effekt besteht darin, dass an den Übergängen von den ferromagnetischen zu den nicht-ferromagnetischen Schichten vom Elektronen-Spin abhängige Veränderungen des Leitungsbandes auftreten, die zu einer Veränderung des ohmschen Widerstands des Schichtaufbaus führen, wobei diese Veränderung abhängig ist von der magnetischen Voreinstellung der einzelnen Schichten. Werden mehrere Schichten übereinander angeordnet, dann verstärkt sich dieser Effekt und es sind bei Raumtemperatur Widerstandsveränderungen in der Größenordnung von 100 % beobachtbar.

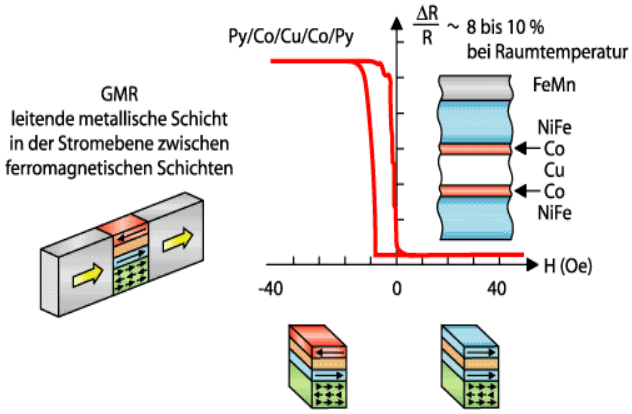


Abbildung 4.80: Der Aufbau einer GMR-Zelle

Der GMR-Effekt findet bereits millionenfach Anwendung bei Leseköpfen von modernen Festplatten. In einem einfachen Aufbau wird der GMR-Effekt bereits in serienmäßig gefertigten MRAMs von Honeywell für strahlungsunabhängige 16-Kbit-Speicher eingesetzt [SPerk].

4.5.6.3.2 Polymer-basierte FeRAM

Neben diesen vier schon etwas ausgereifteren Technologien gibt es noch alternative Konzepte, welche aber noch in den Kinderschuhen stecken.

Stefan Lai von der Intel Corp. stellte im Juli 2001 die Bedeutung von neuen nichtflüchtigen Speicherbausteinen vor. Neben den skalierbaren FeRAM und MRAM fand dabei ein weiterer interessanter Ansatz Berücksichtigung, der sich allerdings in einer noch frühen Phase des Lebenszyklus befindet.

Beim polymer-basierten ferroelektrischen RAM (PFeRAM) werden dünne Schichten aus Polymeren zwischen die Metallbahnen gelegt. Die Molekülketten der Polymere weisen dabei ein Dipolmoment (Bild 4.81) auf, das umgepolt werden kann und dann diesen Zustand nichtflüchtig behält. Dabei können relativ hohe Schreib- und Lesezyklen erreicht werden. Der besondere Vorteil der Technologie besteht darin, dass für die einzelnen Zellen keine Transistoren benötigt werden.

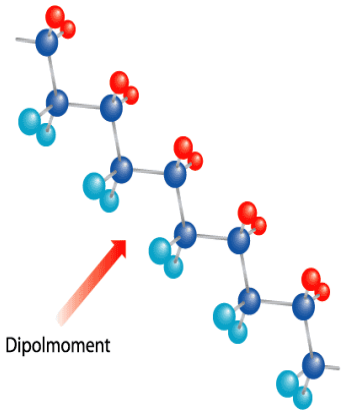


Abbildung 4.81: Molekülaufbau der ferroelektrischen Polymere

Auf diese Weise können mehrere Zellen im Rahmen einer Mehrlagen-Metallisierung übereinander angeordnet werden (Bild 4.82).
Die Eigenschaften dieser PFeRAMs mit ihren hohen Speicherdichten aber mäßigen Geschwindigkeiten lassen hoffen, dass sie bald einen konkurrenzfähigen Ersatz zu den bisherigen Festplatten bieten, welche dann aber ohne bewegliche Teile auskommen und so die Ausfallwahrscheinlichkeit senken [47].

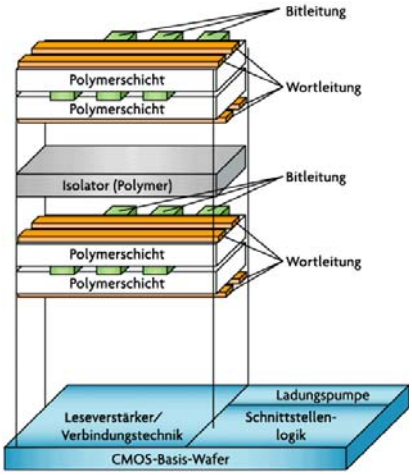


Abbildung 4.82: Schichtaufbau eines vierfach gestapelten polymer-basierten ferroelektrischen-RAM (PFeRAM)

4.5.6.3.3 Ovonic-Unified-Memory-Technologie - OUM

Ein weiterer Ansatz nichtflüchtiger Speicher, der sich derzeit ebenfalls im Stadium der Entwicklung befinden, ist ein Phasenwechselspeicher auf polykristalliner Chalkogenid – Basis namens Ovonic-Unified-Memory-Technologie (OUM), der sich langsam aber sicher als mögliche Massenmarkt-Technologie präsentiert

Diese nach dem 78-jährigen Erfinder und Ovonyx-Gründer Stan Ovshinsky benannte Speichertechnik stammt aus den 60er-Jahren und ist eng mit dem Beschreiben von CD's und DVD's verwandt: Ein dünner Film aus Chalkogenid [48] (z.B Tellur [49]) wird mittels eines Stromimpuls aufgeheizt und wandelt sich in ein amorphes Material, das eine andere elektrische Leitfähigkeit besitzt, um. Ein etwas schwächerer, dafür aber längerer Stromstoß kann den Prozess wieder umkehren (siehe Abbildung 4.83).

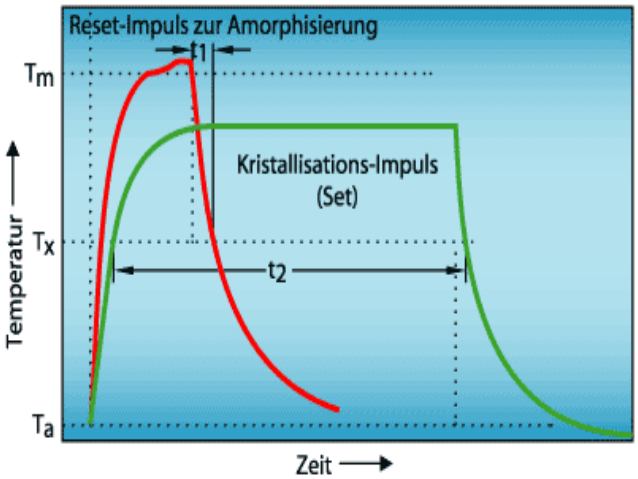


Abbildung 4.83: Die unterschiedlichen Temperaturzyklen der Chalkogenide für Kristallisation (grüne Kurve) und Amorphisierung (rote-Kurve)

Durch diese Stromzufuhr lassen sich die Chalkogenide quasi zwischen kristallinem und amorphen Zustand hin- und herschalten.

Die speichernde Schicht aus einer Ge2Sb2Te5-Legierung wird innerhalb von 10 ns auf über 600 °C erhitzt in den amorphen Zustand (hoher Widerstand) oder durch langsame Erhitzung bis unterhalb des Schmelzpunkts in den polykristallinen Zustand (niedriger Widerstand) versetzt.

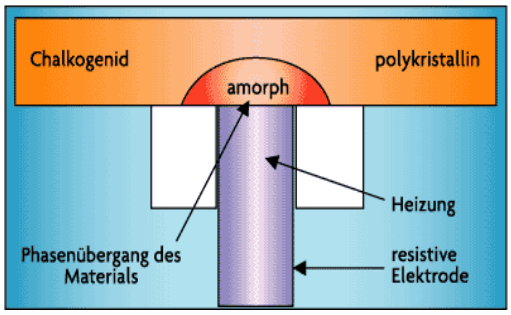


Abbildung 4.84: Zellaufbau eines OUM unter Nutzung von Chalkogeniden

Unter dem Einfluss der langsamen Erhitzung kann die Kristallstruktur wieder ausheilen. Die beiden Zustände unterscheiden sich durch einen um mehr als eine Größenordnung veränderten ohmschen Widerstand, der dann durch eine elektronische Schaltung ausgelesen werden kann.

Der Wechsel ist deutlich schneller als bei Flash und kann mit einer Spannung von einem Volt erzeugt werden. Das passt zur 3-Volt-CMOS-Technik und vermeidet die bei Flash-Speichern benötigten hohen Spannungen. Darüber hinaus müssen OUM's nicht blockweise gelöscht werden. Als Speicherelemente für die Ovonic-Zellen kommen Dioden und nicht Transistoren zum Einsatz, die rund zwei Drittel kleiner und damit preiswerter als Flash-Speicher sind.

Flash-Chips sind teuer und relativ langsam. Sie können zudem nur etwa eine Million Mal beschrieben werden, OUMs hingegen eine Billion (10^{12}) Mal.

Das Überschreiben – in einem ersten Prototyp von vier Megapixel - von Daten geschieht hier in einem einzigen Schreibvorgang innerhalb von 50 Nanosekunden, während ein Flashspeicher zuerst gelöscht und dann neu beschrieben werden muss.

Diese OUM-Technologie nutzt die Vorgänge - die bei Umwandlung von der kristallinen zur amorphen Phase auftreten und umgekehrt - die auch schon heute bei wiederbeschreibbaren CDs und DVDs Verwendung finden. Dort wird aber nicht die Widerstandsänderung, sondern der Unterschied der Reflektion zwischen amorphem und kristallinem Material genutzt.

Weiterführende Informationen zur OUM-Technologie sind unter folgenden Adressen [50,51] zu finden.

4.5.6.3.4 TwinFlash-Technologie

Ein weiteres vielversprechendes Forschungsergebnis aus der breiten Palette an nichtflüchtigen Technologien für künftige Speicherprodukte stellte INFINEON TECHNOLOGIES auf der "VLSI Technologies and Circuits Symposium" vom 15. bis 19. Juni 2004 in Honolulu, Hawaii vor.

Nichtflüchtige Speicher als Massenspeicher sind z.Z. noch sehr kostenintensiv in der Herstellung, wie z.B die Einzelchip-Lösung der FM31XX-Familie von

Ramtron (Distributor: MSC) [52]. Eine alternative Technologie könnte Infineon Technologies Flash, ein Joint Venture zwischen Infineon Technologies und Saifun Semiconductor, darstellen.

Mit der Entwicklung der TwinFlash-Technologie wurden die Stärken beider Unternehmen kombiniert: Saifuns spezielle NROM-Technologie (Nitrid-Read-Only-Memory) und Infineons Kompetenz in der DRAM-Fertigung. Das erste Mitglied dieser

neuen Flash-Familie ist ein 512 Mbit großer NAND-kompatibler Speicherchip, er arbeitet mit 2,7 bis 3,7 V und steht in einem TSOP-Gehäuse zur Verfügung [53].

Da die NROM-Technologie zwei separate Bits in einer Zelle speichert, ist sie eine sehr attraktive Lösung für kostenoptimierte Speicherbausteine.

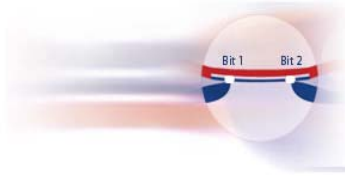


Abbildung 4.85: NROM-Zelle

Die TwinFlash-Prozess-Technologie läuft auf existierendem DRAM-Equipment, wodurch nur minimale, zusätzliche Investitionen in der Fertigungsausrüstung für die Produktion erforderlich sind. Verglichen mit konkurrierenden Floating-Gate-Bausteinen mit einer Single-Bit-per-Cell-Struktur und vergleichbaren Prozessstrukturen erreichen die TwinFlash-Bausteine dank des „Zwei-Bits-pro-Zelle"-Ansatzes eine um 40 Prozent reduzierte Chip-Größe (basierend auf der gleichen Prozess-Strukturgröße). Außerdem ergibt sich durch die geringere Anzahl der erforderlichen Masken eine sehr konkurrenzfähige Position bei den Produktionskosten. Die ersten Produkte basieren auf einer 170-nm-Technologie. Die nächste TwinFlash-Technologie mit 110-nm-Strukturen wird bereits entwickelt, um die Kostenposition weiter zu verbessern und höhere Speicherdichten mit bis zu 2 Gbit zu ermöglichen. Für zukünftige Produkte könnte eine 4-Bit/Zell-Architektur genutzt werden, mit der eine weitere Erhöhung der Datendichte erreicht werden könnte.

Die TwinFlash-Technologie eignet sich sowohl für NAND- als auch für NOR-Flash-Speicherprodukte. Basierend auf der flexiblen Technologie können die Produktionskapazitäten flexibel gemäß der Nachfrage am Markt angepasst werden.

Eine weitere reduzierte Flash-Speicherzelle konnte Infineon auf der IEDM-Tagung 2004 (International Electron Devices Meeting) in San Franzisco mit der derzeit kleinsten Flash-Speicherzelle als Labormuster vorstellen. Mit nur 20 Nanometer Gate-Länge ist sie rund 5.000-mal dünner als ein Haar. Die Herstellung von derart kleinen funktionsfähigen Speicherzellen galt bisher als unmöglich.

Das Besondere an dem neuartigen Bauelement ist die dreidimensionale Struktur mit einer Finne. Diese Form soll die elektrostatische Kontrolle gegenüber heute üblichen flachen Transistoren wesentlich verbessern. Die Elektronen werden in einem Nitrid gespeichert, das elektrisch isoliert zwischen der Finne und der Gate-Elektrode liegt (siehe Bild 4.86).

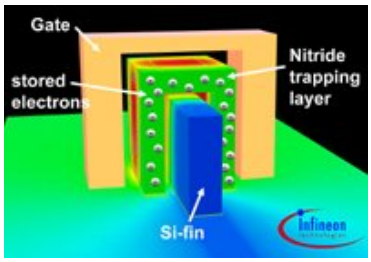


Abbildung 4.86: Flash-Speicherzelle

Die nur acht Nanometer dünne Silizium-Finne wird dabei von der 20 Nanometer langen Gate-Elektrode gesteuert. Die zurzeit modernsten Flash-Speicher verfügen über Gates mit Längen von 90 Nanometern.

Die modernsten Speicher, die derzeit erhältlich sind, brauchen rund 1.000 Elektronen, um sich ein Bit sicher für mehrere Jahre merken zu können. Der jetzt vorgestellte Speicher begnügt sich laut Infineon mit nur 100 Elektronen, dies entspricht der Anzahl der Elektronen in einem einzigen Gold-Atom. Trotz dieser verschwindend kleinen Ladungsmengen bringe das Muster sehr gute elektrische Eigenschaften mit.

Mehr noch: Die neue Speicherzelle ist „multi-level“-fähig. Das bedeutet, sie kann vier Spannungspegel unterscheiden und damit zwei Bit in einer Zelle speichern. Heute übliche 'Floating-Gate'-Speicher können das zwar auch, aber sie benötigen dafür entsprechend große Ladungsmengen, während Infineons neue Speicherzelle dafür nur weitere 100 Elektronen benötigt.

Nun gilt es allerdings einen Weg zu finden, den Speicher aus dem Labor in die Massenproduktion zu überführen. Die Hürden dafür sind, insbesondere was die Lithographie betrifft, beachtlich hoch. Sollte es gelingen, könnten nach Meinung von Infineon in wenigen Jahren nichtflüchtige Speicherchips mit einer Kapazität von 32 Gbit möglich werden. Das entspräche der achtfachen Kapazität von auf dem Markt befindlichen Chips. Die Strukturbreite von aktuellen nichtflüchtigen Speichern dieser Art liegt bei 90 nm.

Derzeit ist der so genannte Flash-Speicher der einzige nichtflüchtige Datenspeicher mit bedeutenden Marktanteilen. Dank der starken Nachfrage nach Produkten wie Digitalkameras, Camcorder, PDAs, Mobiltelefonen, USB-Sticks, MP3-Spielern, Spielekonsolen, digitalen Videos, Settop-Boxen etc. boomt der Markt für Flash-Speicher. Flash-Bausteine stellen die bevorzugte Lösung für das nichtflüchtige Speichern von Programmen und Daten in mobilen Geräten dar. Als On-Board-Speicher oder als platzsparende Speicherkarten überwinden die nichtflüchtigen Flash-Speicher viele Einschränkungen, die optische und magnetische Datenspeicher aufweisen. Gleichzeitig sind Flash-Speicher robust, haben eine niedrige Leistungsaufnahme und weisen keine beweglichen Teile auf. Das alles macht sie zur perfekten Lösung für mobile Geräte. Flash-Speicher wurden traditionell zum Speichern von Programm-Code genutzt, mittlerweile sind sie aber auch in immer mehr Anwendungen die bevorzugte Lösung zur nichtflüchtigen Datenspeicherung.

Fazit

Magnetoelektronischer Speicher, wie die beschrieben MRAM-Chips, haben das Potenzial, sowohl den Arbeitsspeicher als auch die Festplatte zu ersetzen. Das würde zu einem Speicherkonzept führen, das Daten schnell und dauerhaft in einem Arbeitsgang speichert.

Handheld-Nutzer kennen diesen Vorteil. Der kleine Arbeitsspeicher dient hier bereits als Datenspeicher. Die Entwicklung der ersten MRAM-Prototypen sind bereits sehr weit fortgeschritten, so hat Infineon auf dem VLSI Symposium 2004 in Hawaii gemeinsam mit IBM den bisher leistungsfähigsten Prototypen dieses revolutionären Speicherchips vorgestellt:

den ersten 16-Mbit-Magnetoresistive-RAM-Prototype in 0,18 Mikrometer-Technik.

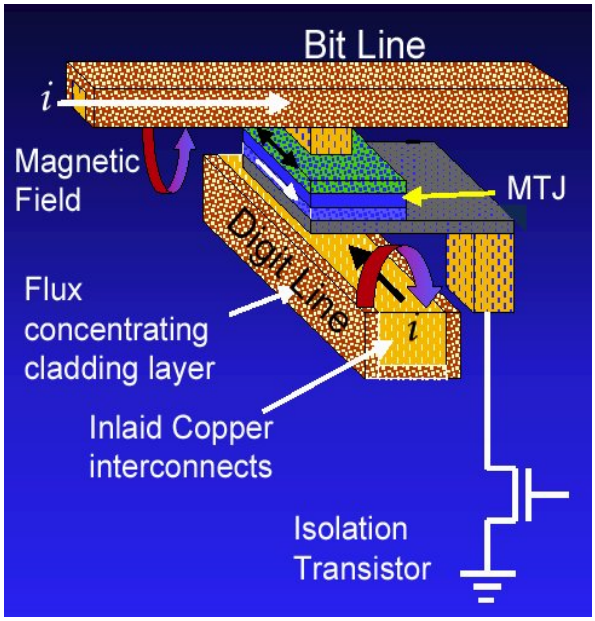


Abbildung 4.87: Speicher-Zelle aus 1T1MTJ-Zellen

Der 79 Quadratmillimeter große Chip hat drei CMOS-Kupfer-Lagen, darüber sitzt in drei Lagen der MRAM-Aufbau aus 1T1MTJ-Zellen

(1 Transistor-/1 Magnetic-Tunnel-Junction-Architektur), die jeweils 1,42 Quadratmikrometer groß sind. Als externe Schnittstelle dient ein SRAM ähnliches Interface mit 16 Datenleitungen.

Untersuchungen an dem Test-Array zeigten eine ausgezeichnete Lebensdauer – auch nach 630 Millionen Schreibzyklen konnten keine Qualitätsverluste festgestellt werden.

Die neuste Entwicklung dieser neuen Technologie – der erste 256-Mbit-MRAM-Speicherchip - soll nach Informationen von Toshiba und NEC im Jahre 2005 zur Verfügung stehen. Dafür entwickelten beide Hersteller eine neue Zellenarchitektur.

Die beiden japanischen Unternehmen haben nun eine Hochgeschwindigkeits-CP-Zellstruktur entwickelt, bei der mit einem Transistor vier Zellen gesteuert werden können. Damit entsteht eine Zelle, die nicht größer ist als eine Standard-DRAM-Zelle beziehungsweise eine herkömmliche CP-Zelle, aber wesentlich kleiner als eine MRAM-Zelle mit Transistor. Mit der neuen Architektur lassen sich die Lesezeiten auf 250 Nanosekunden verringern, viermal schneller als bei einer herkömmlichen CP-Zellenstruktur.

Auch auf dem Weg zum Gigabit MRAM konnten japanische Forscher möglicherweise einen Durchbruch erringen, mit Magnesiumoxid statt des bisher verwendeten Aluminiumoxid konnte die Speicherdichte wesentlich erhöht werden. Für die Serienfertigung kann diese Herstellungstechnologie zurzeit noch nicht genutzt werden. „Das Forscherteam hat nach eigenen Angaben einen Tunnel-Magnetwiderstands-Baustein (TMR) auf einem 8-Zoll-Silizium-Wafer mit einer Tunnel-Sperrschicht aus Magnesiumoxid geschaffen [54]. Der Baustein soll ein Magnetwiderstands-Verhältnis (MR) von 230 Prozent besitzen. Das sei hoch genug, um Magnetwiderstands-RAM mit einer Speicherdichte im Gigabit-Bereich herzustellen.

Dem Team gehören Wissenschaftler des National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) und des Chip-Herstellers Anelva an“ [YosHa 04].

4.5.6.4 Weitere Speichertechniken

4.5.6.4.1 Magnetische Datenspeicher

Ein weiteres Anwendungsgebiet für Kohlenstoff-Röhrchen entdeckten Wissenschaftler des Leibniz-Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW). Ihnen ist es gelungen, winzigen Kohlenstoff-Röhrchen von nur ca. 10 nm Durchmesser mit ferromagnetischen Werkstoffen (Fe, Co, Ni) zu füllen und kontrolliert auf strukturierten Siliziumscheiben aufwachsen zu lassen.

Wenn man einzelne Dots dieser Nanotubes eng strukturiert wachsen lassen kann, hat man kleinste magnetische "Bits" mit bisher nicht erreichten Abmessungen. Seit der Entdeckung der "dritten Dimension" der Kohlenstoffstruktur in Form der Fullerene und Nanoröhren (Durchmesser 1-100 nm, Länge bis mehrere µm) wird an diesen für die Nanotechnologie hoffnungsvollen neuartigen Werkstoffen gearbeitet.

Diese gefüllten Kohlenstoff-Nanoröhren sind damit sehr gut als magnetische Datenspeicher geeignet, außerdem ergeben sich daraus neue Ansätze in der Entwicklung magnetischer Datenspeicher für den "Nanocomputer" von morgen.

Für die Funktionalität und Zuverlässigkeit möglicher Bauelemente ist es dabei von großem Vorteil, dass diese oxidationsfreudigen Metalle in dem Kohlenstoffmantel dauerhaft und wirksam vor chemischen und elektrischen Einflüssen geschützt werden können.

Eine neue Herausforderung haben sich die Dresdner Wissenschaftler mit dem Ziel, kleinste Strukturen auf Wafer herzustellen, gestellt [WPfei].

4.5.7 Polymerelektronik

Ein **Polymer** (griech.: *poly*, viel; *meros*, Teil) ist eine chemische Verbindung, die aus Molekülketten oder stark verzweigten Molekülen (Makromoleküle) besteht [55].

Nach der Entdeckung der Polymere – durch den deutschen Chemiker Karl Ziegler 1953 am Max-Planck-Institut für Kohleforschung in Mühlheim - und ihrer technischen Anwendungsmöglichkeiten nahm man zunächst an, dass alle Kunststoffe gute Isolatoren gegenüber elektrischem Strom darstellen. Die Geschichte der Polymere sollte jedoch einen anderen Weg nehmen.

Im Jahre 1976 entwickelten drei Chemiker Hideki Shirakawa, Alan Heeger und Alan MacDiarmid an der Universität in Pennsylvania/USA elektrisch leitfähige Polymere und leiteten damit ein völlig neues Kapitel in der Geschichte der Kunststoffe ein. Die drei Forscher erhielten für diese revolutionäre Entdeckung im Jahre 2000 den Nobelpreis für Chemie.

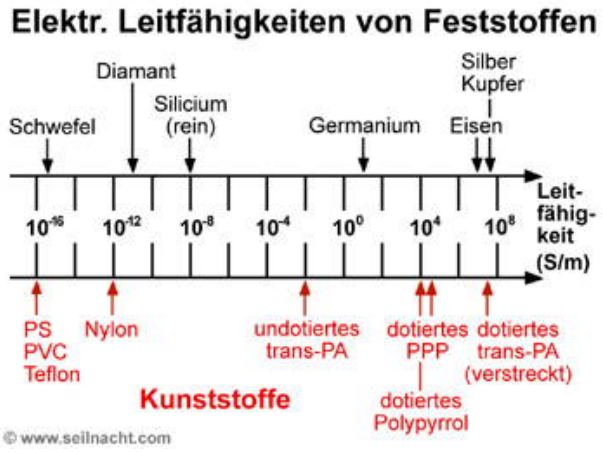


Abbildung 4.88: Elektrische Leitfähigkeit von Kunststoffen

Im Jahre 1986 wurde ein Feldeffekt-Transistor vorgestellt, bei dem die Halbleiterschicht aus organischen Polymeren bestand (OFET). Diese Entwicklung legte die Grundlage zur Herstellung von elektronischen Schaltungen auf der Basis organischer Polymere. Im Jahre 2001 stellten Forscher der Firma Siemens erstmals integrierte Schaltkreise vor, die vollständig aus Polymeren bestanden und somit entwickelte sich neben konventionellen elektronischen Systemen die Polymerelektronik, die ganz oder teilweise auf leitenden oder halbleitenden organischen Polymeren basiert.

Der große Vorteil der Polymerelektronik ist die kostengünstige Herstellung. Die Polymermaterialien können in geeigneten Lösungsmitteln gelöst und dann wie elektronische Tinte durch großflächige Druckverfahren strukturiert aufgebracht werden. Man benötigt für die spätere Fertigung weder komplizierte Hochtemperatur-, bzw. Vakuumprozesse noch aufwendige Lithographietechnik. Der gesamte Herstellprozess einer integrierten Schaltung aus Polymerelektronik läuft kontinuierlich in kurzer Zeit ab, ähnlich wie beim Zeitungsdruck. Die Fertigung eines Silizium-ICs besteht aus aufeinanderfolgenden Einzelprozessen und dauert dagegen einige Wochen. Durch dieses neue großflächige Herstellungsverfahren (Druckverfahren) werden die Polymerelektronikbauteile wesentlich preisgünstiger sein als die konventionellen Siliziumbauelemente.

Es ist nicht zu erwarten, dass Polymertransistoren in absehbarer Zeit die Leistungsfähigkeit von Siliziumschaltungskreisen erreichen werden. Sie können aber eine Billigelektronik möglich machen, das heißt integrierte Schaltungen, die nur wenige Cent oder sogar nur Bruchteile von Cents kosten, und damit völlig neue Märkte und Anwendungen erschließen. Ein weiterer Nachteil der Polymerelektronik, eine etwa tausendfach geringere Elektronenbeweglichkeit, lässt sich durch den konsequenten Einsatz der Dünnschichttechnik begrenzen.

Die geplanten polytronischen Anwendungen (z.B. ***Polymerspeicher***, ***MEMS***, ***OLED*** und ***RFID)*** werden in erster Linie den Markt für extrem preiswerte ubiquitäre Alltags-Elektronik [56] erschließen können. Auch als Sicherheitsmerkmal auf Banknoten sowie auf entspiegelten Brillen findet die Polymerelektronik ihre Anwendung.

Günstig produzierte Polymerelektronik könnte so ein Segment erschließen, das bislang unberücksichtigt blieb, weil die traditionelle auf Silizium basierte Elektronik, zu hohe Kosten für die Aufbau- und Verbindungstechnik verursachte.

4.5.7.1 Organische Feldeffekt-Transistoren – OFET

Wie bereits erwähnt, bilden die OFETs die Basiselemente der Polymerelektronik.

In einem organischen Feldeffekt-Transistor (OFET) besteht mindestens die aktive Schicht aus einem organischen, niedermolekularen oder polymeren Halbleitermaterial, z.B. Pentacen [57], das in den letzten Jahren aufgrund seiner hohen Ladungsträgerbeweglichkeit verstärkt Interesse für den Einsatz in organischen Dünnschichttransistoren geweckt hat.

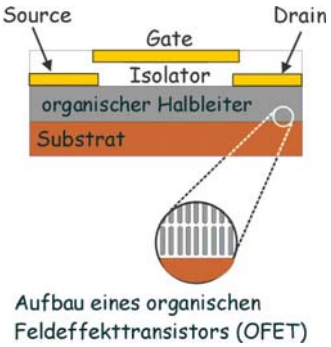


Abbildung 4.89: Organischer OFET

Mit dem halbleitenden organischen Molekülkristall Pentacen, welches aus fünf linear angeordneten Benzolringen besteht, wurden in den letzten 10 Jahren vielversprechende Fortschritte gemacht, so dass inzwischen Ladungsträger-Mobilitäten, wichtig für eine angemessene Schaltgeschwindigkeit, größer als

2 cm^2/Vs gemessen wurden.

Organische Feld-Effekt-Transistoren stellen nach zahlreichen vielversprechenden technologischen Fortschritten eine ernstzunehmende kostengünstige Alternative zur herkömmlichen Silizium-Transistor-Technologie speziell im Niederfrequenz-Bereich mit Schaltgeschwindigkeiten im kHz-Bereich dar. Mit diesen neu entwickelten OFETs werden bisher nicht realisierte Anwendungen angestrebt, die nur geringe Speicherdichten oder kurzzeitigen Einsatz erfordern, wie elektronische Wasserzeichen, Hard- und Softwarelösungen auf RFID - Basis, Barcodes, flexible smart cards, integrierte Steuerungen für Sensoren und Aktoren zur Einmalnutzung (Medizin) oder in der Photovoltaiktechnik.

Zusätzlich ist ein Einsatz organischer Halbleiter auf flexiblen und kostengünstigen Substraten wie z.B. Kunststofffilmen (PET oder ähnliches) denkbar. Somit eröffnen sich unzählige Möglichkeiten für Folienbildschirme als aufrollbare Zeitungen oder im Handy mit ausziehbarem Folienmonitor zur mobilen Internetnutzung. Zum einen kämen die organischen Halbleiter dabei in der lichtemittierenden Schicht der organischen Leuchtdioden (OLED) als aktive Substanz zum Tragen (z.B. das hocheffiziente PPV), zum anderen in der Ansteuerelektronik, die mit organischen Feldeffekt-Transistoren (OFET) integriert wird.

4.5.7.2 Polymerspeicher

Technologischer Fortschritt war und ist eng verknüpft mit der Möglichkeit Daten zu speichern und zu verarbeiten. Der Bedarf an immer leistungsfähigeren Datenspeichern wächst ebenso rasant wie die Nachfrage nach immer schnelleren Rechnern. Vor allem im Multimedia-Bereich (Bilder und Videofilme) wachsen die Anforderungen bezüglich höherer Speicherdichten exponentiell.

Weltweit arbeitet man deshalb an neuen Speichermedien, deren Kapazitäten die herkömmlicher Speicher um ein Vielfaches übertreffen und die sich zudem günstig und preiswert herstellen lassen.

Große Hoffnung setzt man dabei auf Kunststoffe, die bereits häufig in der Elektronik

für flache und leistungsfähige Displays für Mobiltelefone und andere Handheld-Geräte verwendet werden. Zahlreiche weitere Anwendungen von elektronischem Papier bis hin zu intelligenten Textilien könnten schon bald Marktreife erlangen. Doch während die Entwicklung bei vielen Bauelementen wie Transistoren, Logikgattern und LEDs bereits recht weit fortgeschritten ist, wurde ausgerechnet der Komponente, die das Informationszeitalter überhaupt erst möglich macht, noch wenig Aufmerksamkeit zuteil: dem elektronischen Speicher.

Eine Erfindung amerikanischer Forscher könnte dies bald ändern. Stephen Forrest und seine Kollegen von der Princeton University in New Jersey haben zusammen mit Ingenieuren der Hewlett-Packard Laboratories in Palo Alto/Kalifornien

einen kompakten Datenspeicher auf Kunststoff-Silizium-Basis entwickelt, welchen sie im Wissenschaftsmagazin Nature (426, 166, 169; 2003) vorstellten, damit könnte sich nun diese Lücke schließen.

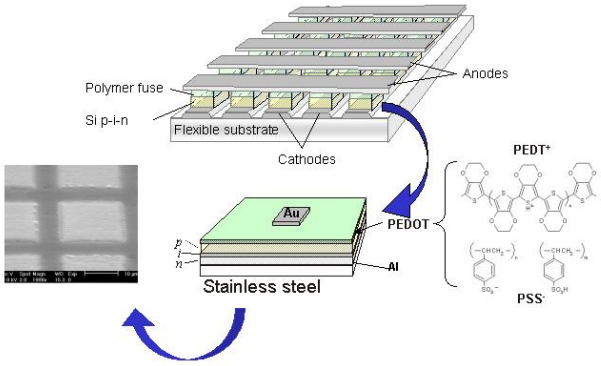


Abbildung 4.90: WORM-Speicher auf Kunststoff-Silizium-Basis mit chemischer Strukturformel

Es handelt sich dabei um einen Prototyp eines WORM-(Write-Once Read-Many-Times) Speichers, ein Speichermedium auf der Basis eines gebräuchlichen Polymers namens *PEDOT*, das nur einmal beschrieben, aber beliebig oft gelesen werden kann [SForr 03].

Das Team um Stephen Forrest experimentierte mit diesem leitfähigen Polymer PEDOT, das seit Jahren zur Beschichtung von fotografischen Filmen und seit neuestem auch für Solarzellen und Video-Displays eingesetzt wird.

Im undotierten Zustand ist PEDOT ein Halbleiter. Das Polymer wird durch oxidative Polymerisation von Ethylendioxythiophen hergestellt. Die Polymerisation wird z.B. elektrochemisch in Gegenwart von Eisen(III)-Tosylat als Oxidationsmittel durchgeführt, wobei das Polymer bereits in dotierter Form anfällt. Das entstehende leitfähige PEDOT ist transparent bis bläulich, seine Leitfähigkeit kann bis zu 30 S/cm erreichen [58].

Diese Polyethylen-Polystyren-Verbindung hat die besondere Eigenschaft, dass sie bei vergleichsweise niedrigen Spannungen den Strom gut leitet. Von etwa zehn Volt an verwandelt sich das Polymer in einen Isolator.

Dadurch kann man das Material gewissermaßen als Schalter nutzen, der je nach Spannung entweder „geschlossen“ oder „offen“ ist. Das brachte die Forscher um Stephen R. Forrest auf die Idee, mit dem Kunststoff einen elektrischen

Datenspeicher herzustellen, bei dem der Schaltzustand „geschlossen“ der binären „Null“ und der Zustand „offen“ der binären „Eins“ entspricht.

Mit Pedot-Schaltern allein lässt sich allerdings noch kein funktionsfähiges Speichermodul bauen. Die Forscher um Forrest griffen deshalb auf unzählige Dünnschichtdioden zurück, die sie jeweils mit einem 60 nm dünnen Kunststoff-Film überzogen und in Form einer Matrix auf eine flexible Metallfolie aufbrachten. Mit entsprechenden Elektroden versehen, stellte jedes Dioden-Pedot-Element einen winzigen Schaltkreis dar. Mit speziellen Spannungspulsen, die man an die Kontakte legte, ließ sich nun jeder Schaltkreis öffnen oder schließen. Somit konnte man binäre „Einsen“ beziehungsweise „Nullen“ in den Speicher schreiben.

Die Autoren sind überzeugt, dass ihr WORM-Datenspeicher eine robuste, Energie sparende und kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Speichertechnologien wie CD’s, DVD’s und magnetischen Festplatten darstellt, welche für die schnelle Datenarchivierung genutzt werden könnte.

Die Ergebnisse sollen in einigen Jahren in Form einer einmal beschreibbaren Speicherkarte auf den Markt kommen, die große Mengen an Daten schnell, einfach und kostengünstig aufnimmt. Mit dieser Technik können rund eine Million Bits (Megabit) pro Quadratmillimeter gespeichert werden.

Zwar lassen sich bei den besten magnetischen Datenspeichern auf gleicher Fläche rund hundertmal so viele Bits unterbringen. Aber der Polymerspeicher ist dafür wesentlich kompakter und benötigt keinerlei bewegliche Teile wie einen Antriebsmotor oder einen Schreib-Lese-Kopf, geschweige denn einen Abtastlaser wie bei einem CD-ROM-Laufwerk. Ein weiterer Vorteil besteht in der Langzeitstabilität und der Unempfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern.

Der so genannte organische Speicher auf Basis von Polymeren könnte den Computermarkt in mehrerer Hinsicht revolutionieren und das Ende der Silizium-Ära bedeuten. Zum einen verspricht Stephen Forrest einen wesentlich günstigeren Preis, zum anderen braucht der Polymerspeicher als nichtflüchtiger Speicher nach der Initialisierung nicht aufgefrischt zu werden. Damit verringern sich im Vergleich zum siliziumbasierten Speicher der Energieverbrauch und die Wärmeentwicklung entscheidend.

Außerdem sind die Speicherfilme ultradünn. Ein aus Polymeren gefertigtes voll funktionsfähiges Speichersandwich soll dünner als ein Mikron sein und die Kapazität von fünf CD-ROMs pro Quadratzentimeter fassen. Eine Revolution würde die Serienreife des organischen Speichers aber auch für alle anderen Speichermedien und Peripheriegeräte bedeuten. 170 Terabyte sollen im Labor mit einem Polymerspeichermodul in Größe einer Kreditkarte erreicht worden sein. Für die ersten Serienmodelle ist eine solche Kapazität allerdings noch unrealistisch, da für eine Massenproduktion noch einige technische Probleme zu lösen sind.

4.5.7.3 Micro Electro Mechanical Systems – MEMS

Mikroelektromechanische Systeme sind integrierte Mikrosysteme, welche aus elektrischen und mechanischen Komponenten bestehen. Sensoren, Aktoren und Steuerelektronik können so auf einem einzigen Chip integriert werden. MEMS eröffnen in den Anwendungsbereichen der Automobilelektronik, Kommunikations- und Datentechnik sowie der Medizinelektronik vielfältige Möglichkeiten.

Ob eine neue Speichertechnik „ Millipede (Tausendfüßler)“, die integrierte Kamera im Handy, der „intelligente“ Scheinwerfer im Automobil, Bio Chips für die Lebensmittelüberwachung, der klassische Beschleunigungssensor des Airbags oder

Mini-Beschleunigungssensoren in Herzschrittmachern - die Anwendungsfelder für MEMS weiten sich immer stärker aus.

Millipede

Das bereits im Jahr 2002 vorgestellte nanomechanische Speicherkonzept Millipede [59] von IBM nähert sich der Marktreife. Seit November 2004 existieren die ersten Prototypen, sorgfältig behütet im Labor K062, auf denen alle nötigen Systemkomponenten integriert sind.

Auf der diesjährigen CeBIT hat IBM ihren ersten Speicher erstmals einer breiten Öffentlichkeit vorgeführt. Dies berichtet unter anderem Technology Review [60] in seiner März Ausgabe 2005.

Das Konzept (Abbildung 4.91) für Millipede [61] stammt vom Nobelpreisträger Gerd Binnig und seinem Kollegen Peter Vettiger. Dabei werden Bits mit Hilfe winziger erhitzter Spitzen (grün) als Krater in einen dünnen Film aus organischem Material (gelb) in Kontakt gebracht und beim Lesen und Schreiben in x- und y- Richtung hin und her bewegt. Ein Multiplexer (rot) ermöglicht die Ansteuerung jeder einzelnen Spitze.

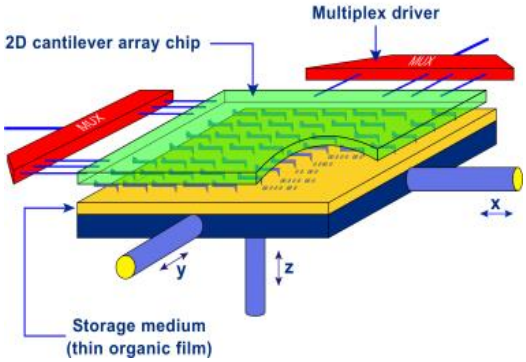


Abbildung 4.91: Nanomechanisches Speicherkonzept Millipede

Bisher wurden damit Datendichten von bis zu 641 Gigabit pro Quadratzoll erreicht. IBM sieht das erst als Startpunkt der weiteren Entwicklung: Ob und in welcher Form Millipede aber tatsächlich auf den Markt kommt, hängt von künftigen Verhandlungen mit Partnern und Kunden ab, die derzeit geführt werden.

Weitere Informationen zu diesem neuartigen Speicher wurden bereits im Kapitel 4.2 beschrieben.

4.5.7.4 Organic Light-Emitting Diode - OLED

Geschichtliche Entwicklung

Entdeckt wurde das Phänomen der Elektrolumineszenz, welche die Grundlage für die OLED's darstellt, erstmals im Jahre 1907 von H.J. Round unter dem Kontakt an einem Siliziumkarbid-Kristall (SiC), der zur Detektion von Radiowellen bestimmt war.

Dabei erkannte er bereits, dass es sich um kaltes Licht handelte, denn die Emission erfolgte ohne erkennbare Erwärmung des Kristalls. Diese Beobachtung wurde allgemein zunächst nicht beachtet, da das primäre Ziel der Forscher in dieser Zeit der Radioempfang mittels Detektor-Empfänger darstellte.

Für Rundfunkgeräte galt in den Anfangstagen noch das Prinzip des Geradeaus-Empfängers (Antenne, Kristall-Detektor oder Audion, Verstärker, Lautsprecher, Stromversorgung).

Erst 1921 entdeckte O.V. Lossew diese Lichtemission wieder. Lossew untersuchte das Phänomen in den Jahren nach 1927 genauer, da er die neuartige Lichtquelle mit einem Drehspiegel modulieren konnte und sie daher für die Nachrichtenübertragung einsetzen wollte.

1936 wurde von G. Destriau im Labor der Kernphysikerin Marie Curie in Paris an Zinksulfid (ZnS) ein ähnlicher Leuchteffekt entdeckt und von ihm als Lossew-Licht bezeichnet. Es dauerte lange, bis sich Lossews Beobachtung in das theoretische Schema des Festkörperwissens einordnen ließ. Erst 1951 konnte die Lichtemission befriedigend erklärt werden. Hierzu war der ganze mit der Entdeckung und Entwicklung des Transistors eingeleitete wissenschaftliche Fortschritt in der Halbleiterphysik notwendig. Nun setzte von 1952 bis 1961 zuerst die Erforschung und Weiterentwicklung des Destriau-Effektes ein, womit man unter Verwendung von ZnS-Pulverphosphoren flache Bildschirme erzielen wollte, um die Kathodenstrahlröhre zu ersetzen.

Während der entsprechende Erfolg mit ZnS ausblieb, brachten die 1952 als Halbleiter erkannten III-V-Verbindungen den erhofften Durchbruch. Diese Materialien entstehen aus den Elementhalbleitern, die mit drei- und fünfwertigen Elementen dotiert werden. Etwa 1957 begann man mit intensiven grundsätzlichen Untersuchungen der Lichterzeugung mit den neuen Halbleitern und mit der Entwicklung einer geeigneten Technologie zur Herstellung von Kristallen und Bauelementen. Von besonderer Bedeutung – im Jahre 1962 - war die Lichtemission im sichtbaren Bereich auf der Basis eines direkten Mischkristalls aus Galliumarsenid (GaAs) und Galliumphosphid (GaP). Mit dieser Arbeit kam nun endlich – 55 Jahre nach der ersten Entdeckung von H.J. Round – die LED Entwicklung voll in Gang. Erst in den sechziger Jahren, d.h. 1963 nahmen sich Pope [MPOP 63] und Helfrich [WHel 65] dieser Entdeckung im Rahmen von Untersuchungen an Anthracen-Einkristallen wieder an, wobei allerdings Grundlagenfragen im Vordergrund standen. Alle Untersuchungen an organischen Materialien ergaben aber noch keinen nennenswerten Erfolg, da sich die Intensität der Lumineszenz als zu gering und die Ansteuerspannung als sehr hoch erwies.

Der Grundstein für die Entwicklung von elektrisch leitfähigem Kunststoff fällt in das Jahr 1974, als Hideki Shirakawa erkannte, dass die elektrische Leitfähigkeit von Polyacetylen um mehrere Größenordnungen ansteigt, wenn das Material oxidativ oder reduktiv behandelt wird. Er fand heraus, dass ein Polyacetylen-Film, ein Prototyp aller leitenden Polymere, durch chemische Behandlung mit Chlor, Brom oder Jod elektrisch leitfähig gemacht werden kann. Für diese richtungsweisende Erfindung erhielt er im Jahre 2000 zusammen mit Alan J. Heeger und Alan G. Mac Diarmind den Chemie-Nobelpreis.

Ergänzende Informationen zu der Leitfähigkeit von Polymeren finden Sie unter [JShi 96].

Es dauerte nochmals mehr als ein Jahrzehnt, bis sich C. W. Tang und S. A. Van Slyke [CWTa 87] sowie S. Saito und T. Tsutsui [CAda 88] den Anwendungsaspekten der organischen Elektrolumineszenz zuwandten.

Die weltweiten Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet wurden nun ausgelöst durch die Pionierarbeiten von C. W. Tang und S. A. van Slyke, die bei Eastman Kodak in den USA 1987 erstmals eine Leuchtdiode aus ***niedermolekularen organischen Materialien*** mit relativ hoher Effizienz herstellten, und von D. D. C. Bradley, R. H. Friend und Mitarbeitern, die im Cavendish Laboratory in Cambridge (UK) 1990 die erste Leuchtdiode aus ***organischen Polymeren*** [PPV] herstellten. Ihre

bahnbrechenden Konzepte beruhten auf der Verwendung organischer Halbleiterschichten mit Schichtdicken von ca. 100nm.

Mittlerweile arbeiten weltweit mehr als 60 Industrieunternehmen und eine vergleichbare Zahl von Arbeitsgruppen an Universitäten und Forschungsinstituten daran, die Grundlagen dieser neuartigen Bauelemente zu erforschen, diese weiter zu entwickeln und zu kommerzialisieren. Das immense Interesse gründet einerseits auf der Erkenntnis, dass die Anfang der 80er Jahre erteilten 6562 Grundpatente für OLED-Strukturen, -Materialien und -Treiber jetzt auslaufen und andererseits weisen OLEDs auf organischer Basis entscheidende Vorteile gegenüber den LC (liquid crystal) Displays auf.

Da sie selbstleuchtend sind, benötigen sie keine Hintergrundbeleuchtung, was die energetische Effizienz erhöht und besonders bei mobilen Displays (Notebooks, Mobiltelefonen, Digitalkameras und vielen anderen portablen Anwendungen) von Vorteil ist. Sie können in allen Farben Licht emittieren und machen so Farbfilter unnötig. Eine Lambert´sche Abstrahlcharakteristik führt dazu, dass keine Abhängigkeit der Leuchtdichte oder des Bildkontrastes vom Blickwinkel besteht. Zudem macht die flache Bauweise (einige 100nm) und die Prozesstechnik äußerst dünne und sogar flexible Displays möglich. Als weitere Vorteile seien einfache und billige Herstellungsmöglichkeiten erwähnt. Im Gegensatz zu anorganischen Halbleitern, die einkristallin in sehr aufwendigen epitaktischen Verfahren hergestellt werden müssen, können organische Leuchtdioden auf nahezu beliebige Substrate thermisch aufgedampft oder auch aus einer Lösung aufgeschleudert werden (spin coating).

Die Grundpatente für OLEDs auf organischer Basis liegen zum größten Teil in der Hand des US-Konzerns Kodak, in geringerem Maße auch beim britischen Hersteller Cambridge Display Technology (CDT) aus dem Umkreis der Universität Cambridge, sowie bei USC in Südkalifornien und Motorola.

Schwerpunkt der Länder, in denen diese Patente registriert sind, bilden Japan (70%), gefolgt von den USA (57%) und Europa (29%).

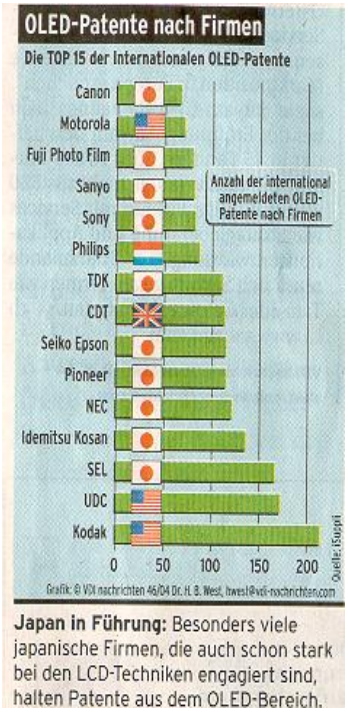


Abbildung 4.92: OLED Patente

4.5.7.4.1 Displays aus Kunststoff

Displays von morgen sind hauchdünn, biegsam und haben eine ausgezeichnete Bildqualität. Sie können einfach gerollt und in die Jackentasche gesteckt werden. Leuchtende Kunststoffe sollen dies möglich machen.
Computer, Laptop, Handy, Autoradio oder Camcorder - kaum ein elektronisches Gerät kommt ohne Display aus. Doch die heute gängigen Bildschirme haben einige Nachteile. Röhrenbildschirme sind klobig und schwer. Die Flüssigkristall- und TFT-Displays (TFT - Thin Film Transistor) sind zwar flach, brauchen aber viel Energie und bieten nur aus einem speziellen Blickwinkel ein gutes Bild.

Dies soll sich mit Monitoren aus organischen lichtemittierenden Dioden (OLEDs) ändern: Sie benötigen, wie bereits erwähnt, keine Hintergrundbeleuchtung, verbrauchen wenig Strom, können als flexible hauchdünne Folie gestaltet werden und bieten aus jedem Blickwinkel ein brillantes Bild.

Die Welt der OLED ist zweigeteilt; zwei Arten bestimmter organischer Chemikalien leuchten beim Anlegen einer Spannung (gelb, grün, rot oder blau):

konjugierte *Polymere* und kleine ***Moleküle***.

Es stehen sich zwei Architekturen gegenüber, je nach dem, wie die individuellen Bildelemente adressiert werden:

Aktiv- und **Passivmatrix**

Kodak hat bislang auf Passivmatrix-OLEDs mit "kleinen Molekülen" gesetzt, CDT auf die langkettigen Moleküle der so genannten Polymertechnologie mit Inkjet-Fertigung.

4.5.7.4.2 Aufbau und Funktionsweise einer organischen Leuchtdiode

Als Basis für den Aufbau dient ein transparentes Substrat (Glas, Quarz, Polymerfolie). Darauf wird als nächste Schicht die Anode, eine ITO-(Indium Zinn Oxid) Schicht, mit einer relativ hohen Austrittsarbeit von Φ_{ITO} = 4,8 eV und einer Dicke von 0,1 μm aufgetragen [MDeu 97].

Diese transparente Schicht ist elektrisch leitfähig und durchlässig für sichtbares Licht. (siehe Abbildung 4.93).

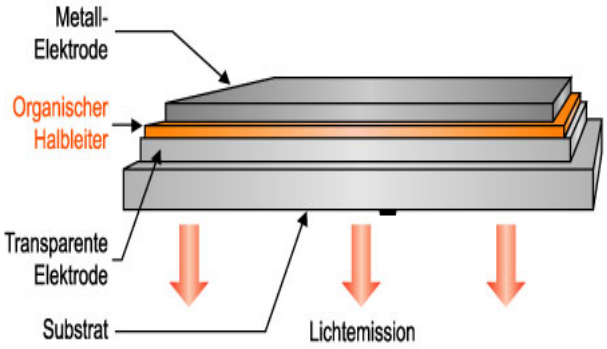


Abbildung 4.93: Schematischer Aufbau einer OLED

Auf diese ITO-Schicht wird entweder durch Aufdampfen im Falle von kleinen Molekülen oder durch Dünnfilmtechniken, wie *Spincoaten* aus einer Polymerfarblösung (z.B. amorphes Silizium (a-Si)) eine aktive, elektrolumineszierende Schicht mit Dicken von 100 nm aufgebracht, welche den Schlüssel der organischen Leuchtdiode darstellt. Schließlich wird als Kathode ein optisch nicht transparenter Metallkontakt mit niedriger Austrittsarbeit (z.B. Aluminium oder Calcium) aufgedampft.

Eine Glasplatte versiegelt diesen Aufbau anschließend, da OLED's sonst von äußeren Einflüssen (Sauerstoff, Wasserstoff) stark beeinflusst würden. Eindringende Feuchtigkeit oder ein Staubkorn könnte zu einem Kurzschluss der dünnen Schicht und damit zum kompletten Ausfall der OLED führen. Die Qualität der Verkapselung bestimmt somit wesentlich die Lebensdauer eines Displays. Gegenwärtig wird festes Glas für die vorder- und rückseitigen Wände verwendet. Spezialklebstoffe werden für die Versiegelung der Glaskanten und die Ummantelung der elektrischen Verbindungen genutzt. Da Glas nicht flexibel ist, wird zurzeit sehr intensiv an Hüllen aus Kunststoff geforscht. Für zukünftige Anwendungen suchen Forscher nach mehrschichtigen, flexiblen, transparenten Ultrabarriere-Folien, mit denen die Farbstoffe luftdicht in Kunststoff verkapselt werden können. Wenn dies gelingt, können die Displays auch aufgerollt werden.

Die prinzipielle Funktionsweise einer OLED beruht ähnlich wie die der anorganischen LED auf Injektionselektrolumineszenz. Dabei werden positive und negative Ladungsträger, die an den jeweiligen Elektroden injiziert werden, in einer Emissionsschicht zur strahlenden Rekombination gebracht.

Legt man eine Spannung von ca. 5 Volt an, werden auf der Seite der Kathode Elektronen und auf der Seite der Anode Löcher eingespeist. Die Anode saugt nun Elektronen aus der Farbschicht und wenn diese Elektronen auf die Löcher aus der Anode treffen, bildet sich ein Exziton. Das Elektron und das im Valenzband entstandene, entgegengesetzt geladene Loch ziehen sich durch die Coulomb-Kraft gegenseitig an. Das Elektron fällt in ein Loch und zerfällt dabei. Durch diese Rekombination wird ein Photon ausgesendet und Licht wird emittiert. Um die Effektivität zu erhöhen werden mehrere Schichten aufgetragen (Mehrschicht-OLEDs), weil so einfach mehr Löcher und Elektronen zur Rekombination vorhanden sind. Die Farbe des Lichtes hängt von der Energie ab, die frei wird, wenn ein Elektron und ein Loch zusammentreffen. Durch die Wahl des organischen Materials kann diese Farbe gezielt verändert werden.

Elemetare Prozesse in einer OLED

Um die Emission von Licht zu beobachten, müssen beide Ladungsträgersorten (Elektronen und Löcher) von den Elektroden in den organischen Halbleiter gelangen (Ladungsträgerinjektion), dort müssen sie sich aufeinander zu bewegen (Ladungsträgertransport) und nach Vereinigung auf einem Molekül unter Bildung eines angeregten Zustandes (Exziton) strahlend zerfallen (Ladungsträgerrekombination).

Ladungsträgerinjektion

Eine Leuchterscheinung innerhalb der aktiven Schicht kann nur erreicht werden, wenn Elektronen aus dem Kathodenmaterial in die organische Schicht wandern und auf der Anodenseite Elektronen aus der organischen Schicht in die Anode übertragen werden. Dabei muss eine Energiebarriere χ (Schottky-Barriere) überwunden werden. Die Elektronen, deren Energie etwa der Fermi-Energie der Kathode ($E_{F,\ Kathode}$) entspricht, wandern in das LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) des aktiven Materials, dass heißt, sie springen in das energetisch niedrigste noch freie Molekülorbital.

Analog werden Elektronen aus dem HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), dem höchsten besetzten Molekülorbital der organischen Verbindung, in die Anode transferiert.

Sie befindet sich energetisch auf dem Fermi-Niveau der Anode ($E_{F,\ Anode}$). Anders formuliert: Ladungslöcher werden aus der Anode in das HOMO des organischen Materials übertragen. Die Energiedifferenz zwischen der Fermi-Energie E_F und der Energie des HOMOs beziehungsweise LUMOs entspricht näherungsweise der jeweiligen Barriere χ_E bzw. χ_L. Die energetischen Verhältnisse entlang dem Querschnitt einer einfachen Einschicht-OLED ohne angelegte äußere Spannung sind in der Abbildung 4.94 dargestellt.

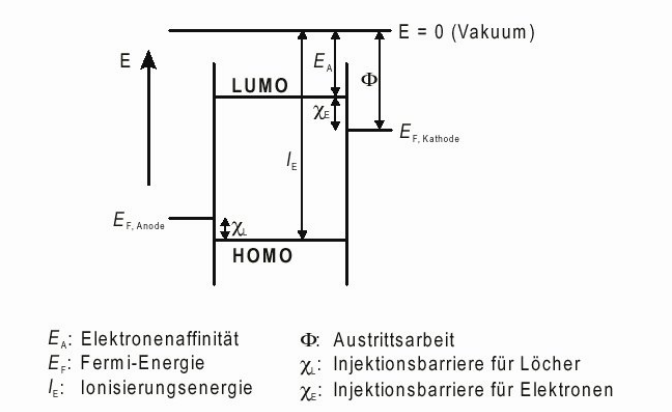


Abbildung 4.94: Energetische Verhältnisse einer OLED

Durch ein angelegtes elektrisches Feld werden die Energieniveaus des organischen Materials verzerrt [IDPar 94], [HVes 93], [MDeu 97], [DBra 91]. Aufgrund der elektrostatischen Anziehung nimmt der Energieinhalt der Ladungsträger in Richtung auf die Gegenelektrode ab.

Abhängig von der Materialauswahl von Elektrode und Emitter ist es möglich, dass die Energiebarriere χ an einer der Elektroden gegen Null geht oder sogar negativ wird. Solche Erscheinungen werden als Ohmsche Kontakte bezeichnet [EEtt 95] . In den meisten OLEDs ist die Injektionsbarriere für die Elektronen χ_E deutlich größer als die Energiebarriere für die Löcher χ_L. Das hat zur Folge, dass Löcher wesentlich schneller in das organische Material injiziert werden als Elektronen. Aus diesem Grund ist die Dichte der Ladungslöcher, die als Majoritätsladungsträger bezeichnet werden, groß gegenüber der Dichte der Elektronen, die man entsprechend als Minoritätsladungsträger bezeichnet [MAbk 86].

Ladungsträgertransport

Nach der Injektion der Ladungsträger in die organische Schicht wandern sowohl Elektronen als auch Löcher unter dem Einfluss des elektrischen Feldes, das sich zwischen beiden Elektroden aufbaut, auf die jeweilige Gegenelektrode zu. Der Ladungstransport kann als eine Reihe von Redoxreaktionen unter strukturell identischen Reaktionspartnern verstanden werden, d.h. der Transport von Ladungsträgern als Oxidation (Lochtransport) bzw. als Reduktion (Elektronentransport) des jeweils besuchten Moleküls.

Dabei betrachtet man Löcher als positiv geladene Teilchen (Radikalkationen) und negative Ladungsträger als negativ geladene Teilchen (Radikalanionen).

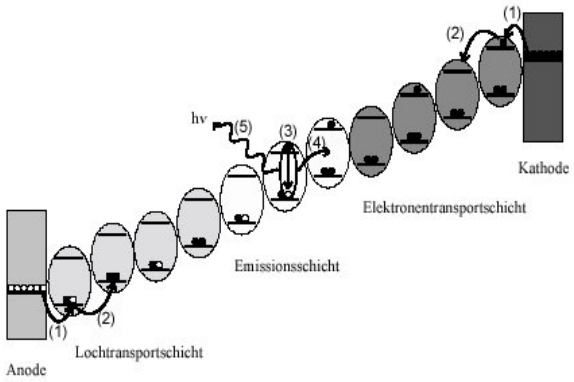


Abbildung 4.95: Prozesse in einer OLED

Beim Lochtransport wandern formal Löcher von der Anode zur Kathode, wobei allerdings Elektronen auf die Anode zu wandern (Abbildung 4.95).

Jede Ellipse in dieser Abbildung soll ein Molekül beim Ladungsträgertransport symbolisieren:

(1) Ladungsträgerinjektion
(2) Ladungsträgertransport von Molekül zu Molekül durch Hopping, wobei eine Energiebarriere überwunden werden muss
(3) angeregter Zustand in der Rekombinationszone (Exziton)
(4) Diffusion dieses Zustandes und
(5) Rekombination mit Strahlung.

Rekombination und Emission

Die Ladungsträger werden in organischen Halbleitern über ionisierte Moleküle transportiert. Treffen zwei entgegengesetzt geladene ionisierte Zustände aufeinander, kommt es zu deren Vereinigung auf einem Molekül und zur Bildung eines angeregten Zustandes (Exziton). Aufgrund von Spinauswahlregeln zerfallen nicht alle angeregten Zustände strahlend. Man erhält eine maximale interne Quanteneffizienz (erzeugte Photonen/Ladungsträgerpaare) von η=25 %.

Bevor die angeregten Zustände zerfallen, kann es zu einem Transport der Anregungsenergie durch den organischen Festkörper kommen. Aufgrund dieses Mechanismus muss ein Bauteil so ausgelegt werden, dass die Rekombination möglichst in der Mitte der Diode geschieht, da die angeregten Zustände innerhalb ihrer Lebensdauer bis an die Elektroden transportiert werden können, wo sie leicht strahlungslos zerfallen. Man spricht dann von einem Energie-„quenching“ [62].

Exciton

Durch Lichtabsorption in Ionen- oder Molekülkristallen bzw. in Halbleitern wird ein Elektron vom Valenzband oder HOMO (highest occupied molecular orbital) ins Leitungsband oder LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) verschoben. Zurück bleibt ein positiv geladenes "Loch" oder Defektelektron. Treffen ein Elektron und ein Loch zusammen, so bildet sich ein nach außen ungeladenes Elektron-Loch-Paar als angeregter Zustand. Dieses wird Exciton genannt. Es besitzt gequantelte Anregungsniveaus. In den Emissions- und Absorptionsspektren von kristallinen Halbleitern oder Isolatoren treten daher zusätzliche Linien auf. Geht das Exciton unter Emission von Licht in den Grundzustand über, spricht man von Elektrolumineszenz.

4.5.7.4.3 Adressierung der LEDs im Display

Wie bereits erwähnt, entscheidet die Art der Pixelansteuerung zwischen „passiven“ und „aktiven“ OLED-Displays.

Passivmatrix-Displays

Bei Passivmatrix-Displays bestehen Anode und Kathode aus engen, um 90 Grad versetzten Leiterbahnen, die die Polymerschicht einschließen. Die Kreuzungspunkte der Elektroden bilden die Pixel. Das Licht wird durch eine transparente Elektrode aus Indium-Zinn-Oxid nach außen abgestrahlt.

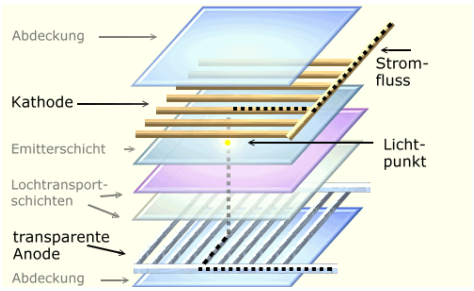


Abbildung 4.96: Passivmatrix Display

Passivmatrix-Displays sind relativ einfach herzustellen. Aufgrund von Verlusten in den elektrischen Leitungen ist ihre Größe (Zeilenanzahl 100) auf eine Bildschirmdiagonale von etwa fünf Zentimeter begrenzt, da sonst die einzelnen OLED mit zu hoher Stromstärke betrieben werden müssten, was zu Lasten der Lebensdauer gehen würde.

Da bei der passiven Ansteuerung eine recht hohe Leitungsanzahl – aufgrund der gekreuzten Anoden - und Kathodenleiterbahnen - erreicht wird, wird zur Verringerung der Leiterbahnen ein Multiplexverfahren angewandt. Dafür entwickelte das Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme einen Treiber-/Controller „IC OC2“ für die Ansteuerung von drei unterschiedlichen Passiv-Matrix OLED-Displays:

monochrome, mehrfarbige und vollfarbige Displays.

Im single-Modus Betrieb gestattet er die direkte Ansteuerung von Displays mit bis zu 64 Zeilen und 128 Spalten. Passive OLEDs finden ihren Einsatz heute bereits in Anwendungen mit niedriger Auflösung in der Mobilkommunikation und in ersten Audio-Geräten für Autos.

Aktivmatrix-Displays

Die genannte Beschränkung auf die Zeilenanzahl gilt nicht für die komplexer aufgebauten Aktivmatrix-Displays. Hier wird jedes Pixel einzeln angesteuert, was eine integrierte Schaltung mit Speicherkondensator und mindestens zwei Transistoren in der Displayebene erfordert.

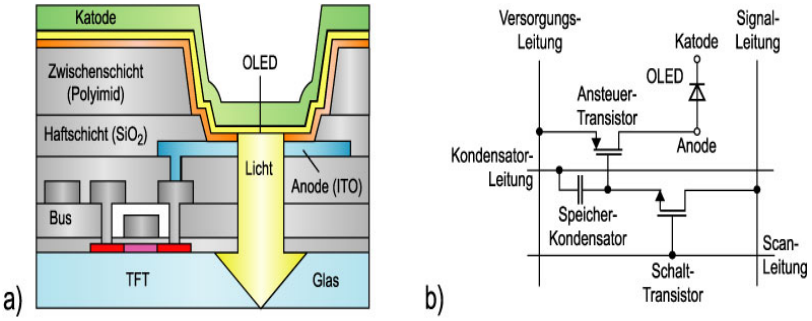


Abbildung 4.97: Aufbau und Schaltprinzip eines aktivmatrix Displays

Ideal dafür sind Dünnfilmtransistoren (TFT - Thin Film Transistor) aus polykristallinem Silizium. Ein Problem, dass bei aktivmatrix Displays auftritt, liegt in der Anzahl der Transistoren.

Während bei einem LCD (liquid crystal display) jeweils ein TFT ein Pixel ansteuert, benötigt ein OLED mindestens zwei TFTs pro Pixel, um eine stabile Ausgangsspannung sicher zu stellen. Um eine gleichmäßige Helligkeit zu erreichen, arbeiten einige Hersteller sogar mit vier Transistoren pro Pixel. Das Problem: Je mehr TFTs, desto komplexer das Herstellungsverfahren, desto geringer die Ausbeute. Hinzu kommt, dass das Display mit der steigenden Zahl an Transistoren immer dunkler wird, weil das Licht durch den Schichtaufbau hindurchtreten muss und nur dort leuchtet, wo sich kein Transistor befindet. Um die Effizienz des Panels zu steigern, arbeiten einige Hersteller an der Entwicklung von „topemittierenden“ OLEDs. Hier nimmt das Licht den umgekehrten Weg, nicht durch das Substrat, sondern vom Substrat weg. Die volle Pixelfläche steht damit zur Abstrahlung zur Verfügung.

Die Vorteile der Aktivmatrix-OLED-Displays sind eine niedrige Spannung und damit ein geringer Stromverbrauch. Weiterhin können hohe Auflösungen für Grafiken und schnelle Bildwiederholungsraten für Videos erzielt werden. Die Bildgröße ist nicht limitiert. Als Wegbereiter für eine Revolution der Display-Technologien werden moleklare OLED-Displays schon bald zahlreiche Flüssigkristallanzeigen (LCD) in digitalen Videokameras, TFT-Monitore und Personal Digital Assistants (PDA) ersetzen.

Auf der weltgrößten Fachkonferenz über Displays, veranstaltet von der SID (Society for Information Display; 2004 in Seattle) waren schon von unzähligen Firmen erste Prototypen von großflächigen, vollfarbigen OLED-Displays zu sehen.

Den Größenrekord hält Seiko-Epson mit einem 40-Zoll-Polymer-Display (Auflösung 1280 x 768 Pixel, 18 bit Farbtiefe).

Abbildung 4.98: Großflächiges 15 Zoll Display

Neben dem Einsatz in Handys, PDAs oder MP3 Playern sehen die Forscher weitere Einsatzgebiete im Bereich der Beleuchtungstechnik, wo derzeit herkömmliche LED eingesetzt werden, hier sollen OLEDs einige Vorteile bringen. Da die Energieeffizienz

der OLEDs um den Faktor 2 - 4 besser ist, kann der Stromverbrauch der Beleuchtungen deutlich gesenkt werden. Osram Semiconductors arbeitet schon an Konzepten, OLEDs zur Beleuchtung in Autos einzusetzen.

4.5.7.4.4 Vergleich eines LCD- mit einem OLED-Display

Die anspruchsvolle Visualisierung digitaler Informationen wird immer wichtiger - sowohl in der Berufswelt als auch im Privatleben. Display-Technologien haben in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung genommen. Handys, PDA's, Beamer und künftig auch Datenbrillen erobern sich durch Miniaturisierung und bessere Performance neue Anwendungsgebiete und Märkte.

Die OLED Technologie steht in Konkurrenz zu allen anderen Display Technologien. Um sich aber auf dem Markt durchzusetzen, müssen OLED Displays einige Vorteile gegenüber der heute vorherrschenden LCD/TFT Technologie besitzen.

	OLED 102 x 65 Sichtfläche ca 560 mm^2	LCD/TFT 112x64 mit LED Sichtfläche ca. 750 mm^2
Kontrast	> 100:1	3:1
Helligkeit	100 cdm^{-2}	8 cdm^{-2}
Ablesewinkel	> 160°	60°
Schaltzeit	ca. 10 µs	200 ms
Stromaufnahme	10 mA (alle Pixel an)	80 mA (Backlight)
Betriebsspannung	2,5V	3,3V
Leistungsaufnahme	135 mW	160 mW
Dicke	1,5 mm	3,7 mm
T-Bereich (Betrieb)	0 °C - 50 °C	0 °C - 50 °C
Lebensdauer (Betrieb)	10000 h	50000 h
Stückkosten	15 US$	8 US$
Entwicklungskosten	20000 US$	7000 US$

Abbildung 4.99: Vergleich zwischen OLED und LCD/TFT

Das OLED leuchtet, ein LCD nicht: Der grundlegende Unterschied zu Flüssigkristall-Displays (LCDs) besteht darin, dass OLEDs selbst eine Lichtquelle sind.

Im LCD ändert sich je nach angelegter Spannung die Orientierung der winzigen Flüssigkristalle. Sie lassen das von einer Hintergrundbeleuchtung ausgesandte weiße Licht entweder durch oder nicht. Dieses Prinzip schränkt den Blickwinkel ein, bei seitlicher Betrachtung ist das Bild nur noch schlecht oder gar nicht mehr zu erkennen. Während Pixelfehler beim LCD durch leuchtende Fehlfarben deutlich zu erkennen sind, fallen dunkel bleibende Defekte beim OLED kaum auf.

Vorteile:

OLEDs sind leicht, haltbar, energiesparsam und ideal für tragbare Anwendungen. Damit sind sie fähig, die gegenwärtige Technologie in vielen Anwendungen zu ersetzen, denn sie haben gegenüber LCDs einigen Vorsprung aufzuweisen:

- selbstleuchtend, d.h. Blickwinkel bis fast 180°
- schneller Bildaufbau (100 - 1000 Mal schnellerer Bildwechsel als bei LCDs)
- größere Helligkeit
- niedriges Gewicht

- bessere Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen (z.B. Erschütterungen)
- geringerer Stromverbrauch, vor allem gut für mobile Geräte
- breiterer Betriebstemperaturbereich
- geringere Produktionskosten

Samsung-Forscher haben in diesen Tagen entdeckt, dass sich die Lebenszeit einer OLED von 700 auf 1400 Stunden verdoppelt lässt, wenn man Kohlenstoffmoleküle in die Schichten einlagert [63].

Nachteile:

- Langzeitbetrieb noch nicht gegeben
- Lebensdauer bei hoher Spannung abnehmend

4.5.7.4.5 Herstellung der OLED-Displays

Die Herstellung von OLEDs stellt derzeit noch viele Herausforderungen an die Industrie. Das Hauptproblem liegt in der hohen Empfindlichkeit der Polymere. Feuchtigkeit oder Sauerstoff führen zu Oxidation der Kontaktelektroden und damit zum Verlust der Leitfähigkeit bzw. zum kompletten Ausfall der OLEDs. Aber auch Verunreinigungen, wie Staubkörner, würden die nur ca. 100 nm dicke Polymerschicht empfindlich stören. Auch lassen sich bereits verwendete Prozesse, wie das Ätzen von Mikrostrukturen in die Grundsubstrate, nicht anwenden, weil die organischen Polymere angegriffen würden.

Grundsätzlich haben sich drei Verfahren zur Herstellung gleichmäßiger, dünner organischer Schichten herauskristallisiert:

- **Vakuumverdampfung**:

  Besonders geeignet für „kleine Moleküle“ (SM-OLED) mit geringen Diagonalen. (PM-OLED) würden bei der Verdampfung zerstört und sich bei der Abscheidung auf dem Substrat nicht regenerieren.

  Anzeigen mit größerem Durchmesser würden große Vakuumkammern benötigt, die sehr aufwändig sind.

  Die weltweit erste Anlage zur Inline-Fertigung von OLED-Displays (SM-OLEDs) befindet sich im Reinraum des Fraunhofer-Institutes (IMS) in Dresden. Mit dieser Anlage können erstmals Displays in einer großserientauglichen Herstellungstechnologie gefertigt werden. Die Produktionsanlage des Frauenhofer Instituts ist aus mehreren Modulen aufgebaut, in denen die einzelnen Produktionsschritte bearbeitet werden können. Die Anlage ist für die Produktion von SM-OLED Displays mit einer Größe von 300mm x 400mm für herkömmliche und invertierte Strukturen geeignet.

- **Spin-Coating:**

  Bei diesem Verfahren wird das Substrat in Rotation versetzt und mittig ein Tropfen der Polymerlösung aufgetragen. Durch die Rotation der Scheibe wird die Lösung nun gleichmäßig auf dem Substrat verteilt, wobei überschüssiges Material nach außen hin abtropft. Problematisch wird diese Technik bei größeren Flächen und Strukturierungen.

- **Ink Jet Printing**:
  Diese Technologie setzt spätestens dort ein, wo Spin-Coating versagt. Große Flächen z.B. Vollfarbdisplays können strukturiert beschichtet werden. Das Verfahren entspricht dem eines Tintendruckers mit vier Druckköpfen, die jeweils 256 Piezo-Druckdüsen enthalten. Hier werden langkettige Polymermoleküle – komplette RGB-Struktur – in mehreren Schichten auf das Grundsubstrat gedruckt. Epson soll bereits diese Technologie zur Verfügung stellen, um Displays bis zu 40 Zoll Diagonale zu fertigen [FhFMik 03].

4.5.7.4.6 Lebensdauer

Die Lebensdauer der OLEDs stellt noch einige Probleme an die Materialforscher, denn die roten, grünen und blauen Pixel altern unterschiedlich schnell. Die organischen Polymere haben nämlich die allgemeine Eigenschaft, mit der Zeit zu zerfallen. Die größten Probleme bereitet derzeit das blaue Licht, welches für eine Vollfarbdarstellung notwendig ist. Derzeit verwendete Polymere (z.B. Polypyrol), die blaues Licht emittieren, besitzen eine

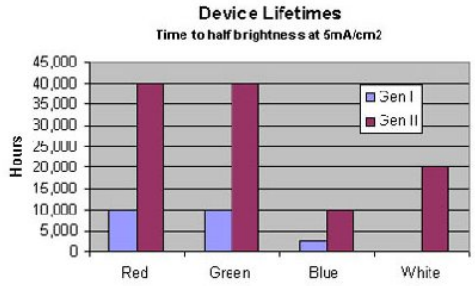


Abbildung 4.100: Lebensdauer der OLEDs

Lebensdauer von ca. 10.000 Betriebsstunden, was ungefähr einem Jahr entspricht.

Durch dieses unregelmäßige Altern der Einzelfarben kommt es zu Farbverzerrungen des Gesamtbildes.

Um die Technologie von organischen Leuchtdioden weiter zu entwickeln

haben mehr als 20 europäische Unternehmen und Forschungsinstitute das Projekt „OLLA“ ins Leben gerufen. Der Forschungsgruppe gehören europäische Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie Industrieunternehmen wie Osram, Philips und Siemens an. Das angestrebte Ziel ist die Weiterentwicklung der Leuchtdioden zu einer Lichtquelle mit langer Lebensdauer und hoher Energieeffizienz. Es ist eine Lebensdauer von 10.000 Stunden - das ist zehnmal länger als die einer normalen Glühbirne - und eine Lichtausbeute von 50 Lumen pro Watt geplant. Ursache für die noch recht geringe Lebensdauer ist unter anderem die Tatsache, dass Sauerstoff und Luftfeuchte Gift für die organischen LED darstellen. Hierbei stellt die dauerhafte Versiegelung des Materials noch ein großes Problem dar. Weitere Probleme sind eine Art Selbstzerstörung während des Betriebes, hervorgerufen durch überschüssige Energie, die nicht in Licht umgesetzt wird. Diese Phänomene sind jedoch noch weitgehend ungeklärt.

4.5.7.4.7 Blick in die Zukunft

Osram und Infinion sehen in der OLED Technologie durchaus mehr Potential, als heutige Produkte erkennen lassen. In dem Webmagazin Forschung und „Innovation“

der Siemens AG spricht man von OLEDs in Tapeten. Durch sie wäre es möglich, ganze Räume ohne zusätzliche Glühlampen beleuchten zu können.

Aber auch Displays für Fernseher oder für die Tageszeitung würden auf der Wand dargestellt werden und könnten somit der Raumgestaltung ganz neue Möglichkeiten bieten. Ebenso könnten großflächige Bildschirme als flache Folien realisiert werden, die man zum Transport wie Papier zusammenrollt. Auch der elektronischen Zeitung, die an jedem Ort lesbar wäre, stände nichts mehr im Weg. Mit Hilfe eines kleinen Sende- und Empfangsmoduls könnten tagesaktuelle Nachrichten direkt auf einer OLED - Folie dargestellt werden.

Andere Einsatzmöglichkeiten sind z.B. Chipkarten, die mit Hilfe einer sparsamen OLED Anzeige den aktuellen Kontostand darstellen.

Abbildung 4.101: Chipkarte mit OLED Display

Marktentwicklung für OLED's

Nach Angaben des Marktforschungsunternehmens iSuppli wird der Umsatz von OLEDs bis zum Jahre 2011 bis auf 2,9 Milliarden Dollar wachsen.

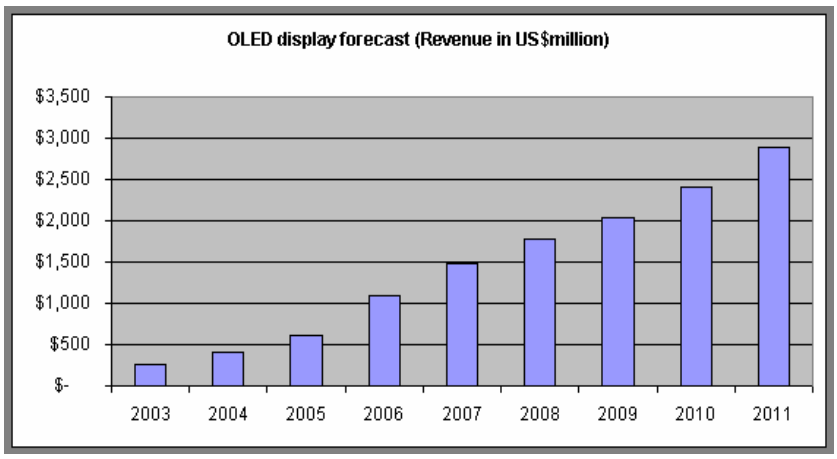


Abbildung 4.102: Marktentwicklung von OLEDs

Den größten Marktanteil im Jahr 2004 hatte Samsung mit ca. 44% erreicht und damit Pioneer, der noch 2003 der Marktführer war, überholt. Die größten Abnehmer für OLED-Displays waren und sind die Mobiltelefon-Hersteller. Von ihnen werden 89% aller produzierten Displays abgenommen. Andere Endkundenprodukte wie z.B. MP3-Player, werden in den kommenden Jahren von 3% auf 15% etwas aufholen.

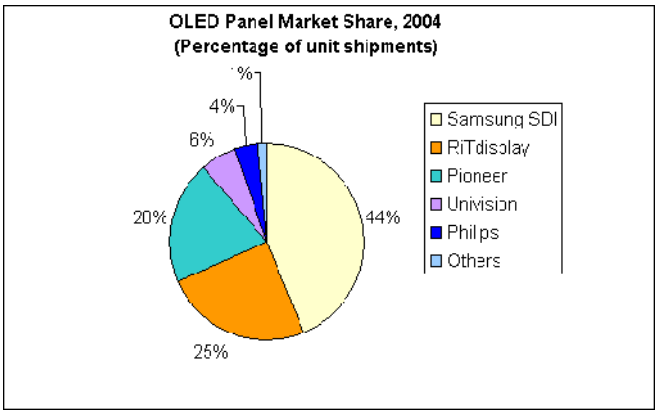


Abbildung 4.103: OLED-Hersteller-Ranking nach Umsatz

Ein weiteres zukunftsträchtiges Anwendungsfeld der organischen Polymere sehen Forscher in photovoltaischen Zellen.

Eine Optimierung organischer Solarzellen ist zum einen durch Verbesserung der verwendeten Polymere, zum anderen durch Veränderung der Struktur der Solarzellen möglich.

Voraussetzungen für eine erfolgreiche Produktentwicklung organischer Solarzellen sind:

- Kostengünstige Produktion mit einer etablierten Dünnfilmtechnologie (z. B. Drucken)
- Effizienzen 5 –10%
- Ausreichende Lebenszeit der Solarzelle (Produktlebenszyklus)

Jeder dieser Punkte ist derzeit Gegenstand intensiver Forschungen an verschiedenen Universitäten, Forschungseinrichtungen sowie kleinen Start-up Firmen. Es besteht die berechtigte Hoffnung, dass in einiger Zeit organische Solarzellen und/oder Polymersolarzellen, zumindest in einigen Marktsegmenten, eine wirkliche Konkurrenz zu den derzeit verwendeten PV-Technologien darstellen werden [VDyak 03].

4.5.7.5 Radio Frequency Identification - RFID

"Radio Frequency Identification" -Automatische Identifikationstechnologie, zur berührungslosen Identifikation von Gegenständen, Waren, Personen, Tieren etc. kommt in der Prozesssteuerung, der Verfolgung von Waren oder Güterströmen, bei der Zutrittskontrolle, oder vielen weiteren Aufgabengebieten – wie den Diebstahl- und Kopierschutz oder einer sicheren Patientenidentifikation in Krankenhäusern - zum Einsatz [Inside].

Weitere Informationen zu den RFID finden Sie unter [Bsi 05].

Eine Studie - „Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen“ -

des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) und der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA).

4.5.8 Display – Techniken

4.5.8.1 Nanoröhrchendisplays mit hoher Auflösung

Eine Gruppe koreanischer Wissenschaftler des Elektronikkonzern Samsung konnte einen qualitativ sehr hochwertigen extrem dünnen und hochbrillanten Flachbildschirm herstellen.

Dieser Prototyp besitzt sowohl die Qualität von LCD-Bildschirmen als auch die von Kathodenstrahlröhren (CRT).

Bei dieser Neuentwicklung setzen die Forscher auf eine besondere elektronische Eigenschaft der Röhrchen; eine geringe Stromstärke ist ausreichend, um die Nanoröhrchen zum Aussenden von Elektronen zu bewegen.

Aus den Spitzen der Nanotubes werden Elektronen gesprüht und diese erzeugen auf einem mit Leuchtstoffen beschichteten Schirm ein Bild.

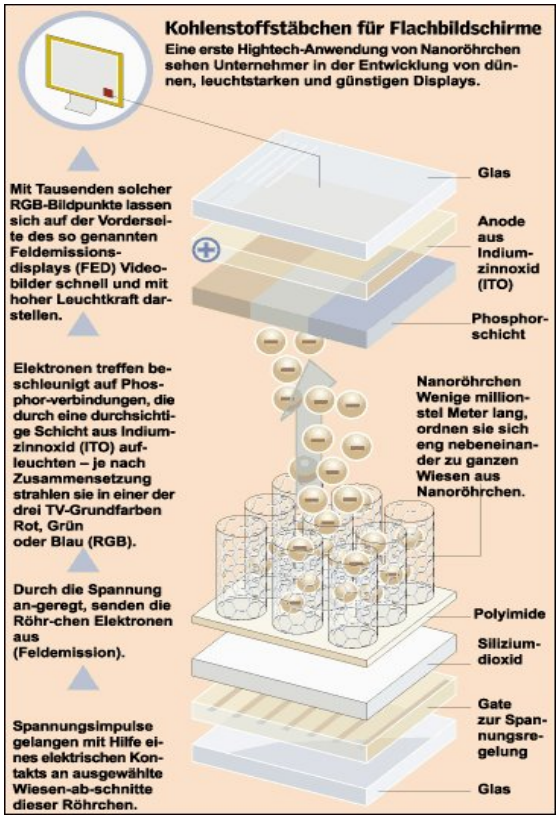


Abbildung 4.104: Nanoröhrchen für Flachbildschirme

4.5.8.2 Lichtventile

Ein Lichtventil für brillante Bilder stellte kürzlich Jason Heikenfeld von der University of Cincinnati im Fachblatt Applied Physics Letters vor.

Sein Prototyp für eine neue Bildschirmtechnologie besteht aus einem feingliedrigen Feld aus winzigen Öltröpfchen, mit welchem brillante, helle Bilder günstiger und stromsparender angezeigt werden können.

Im Unterschied zu Flüssigkristall-Bildschirmen lassen die Ventile, durch welche mehr oder weniger Hintergrundlicht durch eine farbige Flüssigkeit dringt, Licht unter jedem Blickwinkel erkennen. Über den Effekt der elektrischen Benetzung zieht sich der Öltropfen dabei mehr oder weniger zusammen und lässt bis zu 80 Prozent des Lichts aus der Hintergrundbeleuchtung hindurch.

Herzstück jedes einzelnen farbigen Bildpunkts ist ein Behälter gefüllt mit Wasser und Öl, in das transparente Farbstoffe gemischt werden. Jede dieser Zellen kann mit einem Strom zwischen null und dreißig Volt angesteuert werden.

Mit Schaltgeschwindigkeiten von rund zehn Millisekunden für eine einen Quadratmillimeter kleine Zelle ist das Modul im Prinzip schnell genug, um Videosequenzen ohne Nachziehen anzuzeigen.

Heikenfeld sieht den wesentlichen Vorteil dieses Bildschirms aus Lichtventilen in seinen günstigen Herstellungskosten. Erste Bildschirme, die nach dem Prinzip der steuerbaren Benetzung mit Öl arbeiten, sollen in schätzungsweise im Jahr 2010 auf dem Markt kommen.

Dieses Prinzip ist nicht neu, so haben Forscher bei Philips eine neue Generation von Linsen mit variabler Brennweite entwickelt, die ohne mechanische Teile auskommen. Diese lichtstarken und vor allem extrem kleinen Fotolinsen, deren Optik statt auf Glaslinsen auf flüssigen Linsen (FluidFocus System) aus Öl und Wasser beruhen, sollen sich für den Einsatz in Digital-Kameras, Kamera-Handys, Endoskopen, Sicherheitssystemen und auch in optischen Laufwerken eignen.

Die FluidFocus-Linse von Philips besteht aus zwei sich nicht miteinander vermischenden Flüssigkeiten mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften in einem mit Elektroden versehenen Glaszylinder - einer polaren, leitfähigen und wässrigen Lösung sowie einem nicht leitfähigen Öl. Die Wände des Zylinders sind mit einem hydrophoben Material beschichtet, das im Grundzustand bewirkt, dass die wässrige Flüssigkeit einen sphärischen Tropfen bildet. Legt man jedoch eine geeignete Spannung an, dann ändert sich die Form bis hin zu einer konkav gewölbten Fläche, so dass die Linse das Licht bündelt. Das Prinzip des so genannten Electrowetting hatte Philips im Magazin Nature, Ausgabe vom 25. September 2003 bereits für die Konstruktion einer neuen Art von Display genutzt.

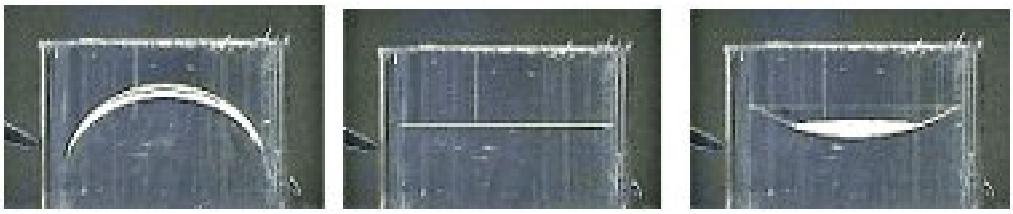


Abbildung 4.105: Fluid Focuslinse

Der Prototyp der Linse, den Philips auf der CeBit 2004 in Hannover vorstellte, hat einen Durchmesser von 2,2 mm und eine Dicke von 2 mm. Die Fokussierung soll extrem schnell erfolgen, so schaltet die Linse in weniger als 10 Millisekunden durch einen Brennweitenbereich von fünf Zentimetern bis Unendlich.

4.5.8.3 Papier oder Display

Die von Varioptic in Europa, den USA und Asien in den Jahren 1997 und 1999 patentierte "Electrowetting"-Technologie basiert auf der Fertigung elektrisch gesteuerter flüssiger optischer Linsen für optische Produkte.

Wissenschaftler von Philips haben auf Grundlage dieser Technologie im Magazin Nature, Ausgabe vom 25. September 2003, reflektierende, papierartige Displays vorgestellt, die auf Steuerung räumlich begrenzter Wasser-Öl-Schnittstellen durch Stromzufuhr basieren.

Wenn keine Spannung anliegt, bildet das (farbige) Öl einen dünnen Film zwischen dem Wasser und der hydrophobisch, isolierenden Beschichtung einer Elektrode, und es entsteht ein farbiger Bildpunkt.

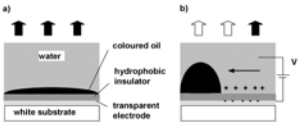


Abbildung 4.106: Pinzipdarstellung der E-Paper-Technik

Durch Anlegen einer Spannung (Abbildung 4.106) zwischen der Flüssigkeitskammer und der Elektrode ändert sich die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Beschichtung. Der Zustand dieser Schichten ist folglich nicht mehr stabil, und das Öl wird durch das Wasser verdrängt. Dadurch schaltet der Bildpunkt von schwarz (a) auf einen teilweise transparenten Bildpunkt oder, wenn unter dem Schaltelement eine reflektierende weiße Schicht liegt, ein weißer Bildpunkt (b). Da der Bildpunkt sehr klein ist, nimmt der Nutzer nur die Durchschnittsreflexion wahr. Somit entsteht ein sehr helles und kontrastreiches Schaltelement, das die Grundlage für das reflektierende Display bildet.

Darüber hinaus zeichnet sich diese Technologie durch niedrigen Energieverbrauch und geringe Leistungsaufnahme aus, so dass Displays, die diesen Effekt nutzen, flach und sehr dünn ausgeführt werden können.

Im Vergleich zu anderen reflektierenden Displays sind Reflexionsvermögen und Kontrast besser oder gleichwertig und erreichen fast die Werte für Papier [64].

Außerdem bietet diese Technologie überragende Möglichkeiten im Hinblick auf reflektierende vierfarbige Displays mit großer Helligkeit. Nach Auffassung von Philips werden Displays zur Verfügung stehen, die viermal so hell sind wie reflektierende LCD-Displays und doppelt so hell wie andere aufstrebende Technologien. Statt Filter in Rot, Grün und Blau (RGB) oder wechselnde Segmente der drei Primärfarben zu verwenden, wodurch praktisch nur auf einem Drittel des Displays Licht in der gewünschten Farbe reflektiert werde, mache die Electrowetting-Technologie von einem System Gebrauch, bei dem ein Unter-Bildpunkt zwei verschiedene Farben selbstständig schalten kann. Auf diese Weise werden zwei Drittel der Displayfläche für die Reflexion von Licht in jeder gewünschten Farbe nutzbar gemacht. Dieser Effekt wird dadurch erzielt, dass ein Bildpunkt mit Hilfe einer Schichtung von zwei unabhängig voneinander steuerbaren Farbölfilmen sowie einem Farbfilter aufgebaut wird. Als Farben werden Cyan-Blau, Magenta-Rot und Gelb in einem Dreifarben-system verwendet, das beispielsweise dem bei Tintenstrahldruckern verwendeten Prinzip entspricht

Das Electrowetting, also das Benetzen einer Oberfläche durch einen Elektrolyten unter dem Einfluss elektrischer Felder, bietet neben der Display-Technologie zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten. So können aufgrund der ausreichend hohen Schaltgeschwindigkeit zwischen der weißen und der farbigen Reflexion Videoinhalte angezeigt werden. Weiterhin bestehen Bestrebungen, diesen Effekt zur Manipulation kleinster Flüssigkeitsmengen zu verwenden ("Lab on a Chip"), aber auch für variabel fokussierbare flüssige Linsen - bei Mobiltelefonen mit integrierter Kamera optischem Zoom- und Autofokus - bieten sich hier einige Möglichkeiten [65].

4.5.8.4 Gitter-Lichtventil

Sony setzt in der Display-Technik auf die Gitter - Lichtventile. Dafür haben sie eine Exklusivlizenz für die GLV-Technik der US-amerikanischen Firma Silicon Light erworben.

Kleine Lichtventile, so genannte Grating Light Valves, sollen Projektoren und Monitore von Sony zum Bild verhelfen. Bereits seit dem Jahr 2004 sind Laserbilder in Japan und Europa nach Sony-Art auf dem Markt verfügbar. Allerdings nicht als

Projektor für zu Hause, sondern als hochpreisige Projektoren für Digitalkinos und Simulationssysteme. Erst wenn die Halbleiterlaser in den drei Grundfarben (rot, grün und blau) zur Verfügung stehen, will Sony damit in die Consumer-Schiene gehen.

Bei einem Grating Light Valve handelt es sich um ein elektrisch steuerbares Beugungsgitter, das direkt auf einem herkömmlichen Siliziumchip sitzt. Das Gitter selbst besteht aus dünnen Bändern aus keramikähnlichem Material (Siliziumnitrid) und diese sind mit Aluminium beschichtet. Eine zwischen Gitter und Siliziumsubstrat anliegende Spannung ändert den Abstand der einzelnen Gitterlinien zueinander. Trifft ein Laserstrahl auf das Gitter, wird er je nach Spannung beziehungsweise Gitterabstand reflektiert oder aber gebeugt.

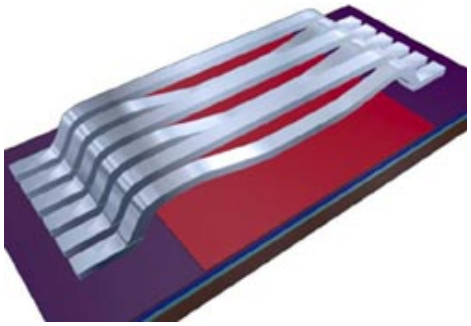


Abbildung 4.107: Gitter-Lichtventil

Dabei wird das Intensitätsmaximum des Lichtes in eine bestimmte Richtung gelenkt. Eine Schlieren-Optik schirmt das senkrecht reflektierte Licht ab und leitet das gebeugte Licht über ein Linsensystem auf die Projektionsfläche.

Ohne Spannung wird das Licht reflektiert, das Bild bleibt dunkel. Bei maximaler Spannung bewegen sich die GLV-Bänder nach unten und rufen so in einer definierten Richtung die maximale Beugung des Lichtes hervor – das Bild ist weiß. Graustufen werden durch eine Gitterbewegung zwischen diesen beiden Extremzuständen erzeugt. Da sich die adressierbaren Keramikbänder nur sehr wenig durchbiegen müssen, um den maximalen Hellzustand des Bildes hervorzurufen, können sie extrem schnell schalten. Die erzeugten Bilder sind weder winkelabhängig wie bei Flüssigkristallanzeigen, noch ist ihre Auflösung durch die Lochmaske beziehungsweise durch die minimale Größe der Phosphorpixel eines Röhrenmonitors oder Plasmadisplays begrenzt.

4.5.8.5 Autofokus-Kameramodul

Samsung Electro-Mechanics Co. (SEMCO), führender Anbieter von Elektronikkomponenten, und Varioptic vereinbarten eine Zusammenarbeit zur gemeinsamen Weiterentwicklung der flüssigen Linsen auf Grundlage der patentierten Technologie von Varioptic (Abbildung 4.108).

Ziel dieser Kooperation ist der Einsatz der flüssigen Linse in den Autofokus-Kameramodulen von SEMCO.

SEMCO hat sich an Varioptic als Technologielieferant für die flüssige Linse gewandt, um die einzigartigen Vorteile für die Autofokus-Funktion des hochauflösenden Kameramoduls in mobilen Anwendungen zu nutzen. Die Flüssiglinse im Modell besteht aus einem kleinen konischen Gehäuse mit einem Wasser- sowie einem Öltropfen.

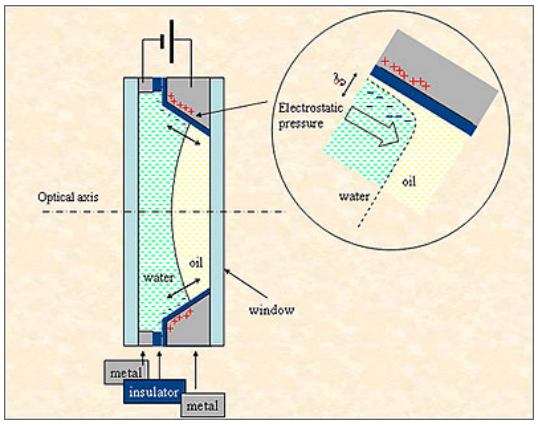


Abbildung 4.108: Autofokus-Kameramodul

Wird eine Spannung angelegt, verformt sich der Wassertropfen und verdrängt das Öl teilweise - der Brechungsindex ändert sich (elektrischer Kapillareffekt bzw. Electrowetting-Effekt). Laut Varioptic sind die Linsenflüssigkeiten bis –40°C frostsicher und der Siedepunkt liegt bei +130 °C.

Es ist geplant, mit dieser Technologie Kameramodule für Mobiltelefone und PDAs von führenden Mobiltelefon-Herstellern zu entwickeln.

Eine Demo-Version eines derartigen, komplett ausgestatteten Autofokus-Kameramoduls mit flüssigen Linsen und Electrowetting-Treiber-IC ist auf der CeBIT 2005 auf dem Stand von SEMCO vorgestellt worden.

Die demonstrierten Zoom-Fähigkeiten kombinieren mehrere flüssige Linsen mit einem Antrieb, einem Sensor und einem Bildprozessor, um Vergrößerungen zu ermöglichen, den Fokus zu verändern und Abweichungen kontrollieren zu können. Beide Lösungen für Zoom und Autofokus zeichnen sich durch ihre Platz sparende Größe und kostengünstige Herstellung sowie durch hohe Geschwindigkeit, niedrigen Energieverbrauch, Langlebigkeit und hohe Qualität aus.

Erste Modelle sollen Ende des Jahres ausschließlich in den Handy-Bereich asiatischer Staaten vertrieben werden. Über den Preis kann vorerst nur spekuliert werden, da die Materialkosten zur Herstellung der Flüssig-Linse weit unter denen, die aktuell für konventionelle Linsen anfallen, liegen.

4.5.8.6 Display mit Kohlenstoff-Nanoröhren

Den Protypen eines 4,7-Zoll-Farbdisplays auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren hat Motorola auf der vom 22. bis 27. Mai 2005 „Society for Information Display Conference“ in Boston präsentiert. Durch diese Technik sollen künftig große Flatscreens mit überragender Bildqualität, längerer Lebensdauer und geringeren Herstellungskosten hergestellt werden.

Um "Nano Emissive Displays" (NED) herstellen zu können, verwendet Motorola ein Verfahren, das es erlaubt, Kohlenstoff-Nanoröhren direkt auf Glas wachsen zu lassen, was ein besonders energieeffizientes Design ermöglichen soll. Hierbei wurden die lichtaussendenden Nanotubes als geordnete Bündel direkt auf die gläserne Rückseite des Monitors aufgedampft und nicht wie bei bisherigen Ansätzen (von Samsung) als Paste aufgetragen. Ein Bildpunkt ist aus drei Nanotube-Bündel zusammengesetzt, welche die drei Grundfarben darstellen. Durch diese neue Technologie konnte die Bildqualität wesentlich verbessert werden.

Nach Aussage von Jim O'Connor, bei Motorola als Vice President für „Technologie-Inkubation und Kommerzialisierung“ verantwortlich, hat die Technik das Potenzial, als Basis für die nächste Generation von Flachbildschirmen zu dienen.

Das vorgestellte 4,7-Zoll-Display ist Teil eines 42-Zoll großen HDTV-Bildschirmes, der über eine Auflösung von 1.280 x 720 Pixeln verfügt. Motorola schätzt, dass ein Fernsehbildschirm mit einer Diagonale von 42 Zoll eine elektrische Leistung von 75 Watt verbrauchen würde. Zum Vergleich: Ein herkömmlicher Flachbildschirm aus Flüssigkristallen kommt einschließlich der Hintergrundbeleuchtung auf 240 Watt.

Das Panel bietet weiterhin eine hohe Helligkeit, so dass selbst bei Tageslichteinfall ein unproblematisches Ablesen möglich ist. Ebenfalls weist das 1/8 Zoll dicke Display zu den Konkurrenzdisplays (LCD/TFT, Plasma) kaum erkennbare Unterschiede in Farbkraft und –intensivität auf. Das NED funktioniert auf Basis von Phosphor und bietet daher wie Kathodenstrahl-Monitore (CRT) schnelle Reaktionszeiten und einen großen Betrachtungswinkel.

Zusammen mit Display-Herstellern will Motorola nun auf Basis dieser Technik kommerziell verfügbare Produkte entwickeln. Dabei sollen die Herstellungskosten für ein 40-Zoll-Display bei etwa 400 US-Dollar liegen [66].

4.5.9 Ausblick

Europa soll in die Lage versetzt werden, die künftige Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik (IuK) zu beherrschen und mit zu gestalten, so dass die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Anforderungen erfüllt werden können. Künftige Maßnahmen sollen Europas wissenschaftliche und technologische Grundlagen auf dem Gebiet der IuK stärken, durch Nutzung der IuK die Innovation anregen und sicherstellen, dass sich die Fortschritte der IuK rasch durch Vorteile für Europas Bürger, Unternehmen, Industrie und Regierungen bemerkbar machen. Um dies zu erreichen, hat Europa jetzt die Weichen für ein gemeinsames Forschungsprogramm gestellt.

Den Anstoß hat die EU-Kommission mit dem Report **„Vision 2020: Nanoelectronics at the Centre of Change“** gegeben. Im Rahmen dieser neuen europäischen Initiative wurde eine „Technology Platform Group“ namens ENIAC (European Nanoelectronics Initiative Advisory Council) gebildet, die durch Pasquale Pistorio – zurzeit Präsident und CEO (Chief Executive Officer) von ST- Microelectronics - geleitet wird [67]. Diese Initiative wird durch eine „High Level Group“ – in welcher führende Halbleiter- und Forschungsinstitute aus Europa, wie Infineon, ST-Microelectronics, Nokia, IMEC, CEA-Leti, Unaxis und die Fraunhofer Gesellschaft (FhG) Mitglied sind – tatkräftig unterstützt.

Der Bericht enthält eine Reihe von Empfehlungen und Initiativen zur Verstärkung der europäischen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Nanoelektronik. Er postuliert, dass der Fortschritt der Nanoelektronik noch mindestens 15 weitere Jahre anhalten und eine neue Revolution anstoßen werde, was die Zahl der von dieser Technologie ermöglichten Applikationen angehe.

Weiterhin geht aus dem Report hervor, dass die Beiträge, die für dieses Forschungsprogramm veranschlagt werden, deutlich höher sind als bei den vorhergehenden. Für den Fünf-Jahres-Zeitraum von 2004 bis 2008 sind 6 Milliarden Euro eingeplant, was mehr als eine Verdopplung gegenüber dem ***MEDEA* – Projekt** 1996 gleichkommt. Mit dieser Initiative lässt P. Pistorio keinen Zweifel an der Notwendigkeit aufkommen, dass die Europäer sich zusammenschließen müssen,

wenn sie die langfristigen Herausforderungen eines neuen Nanotechnologie-Zeitalters bestehen wollen.

Die Europäer schaffen mit dieser Kooperation ein strategisches Gerüst, um die Position Europas - gegenüber den anderen Nationen, wie Japan, USA und China (siehe Abbildung 4.109) - als maßgeblicher Akteur der Weltwirtschaft zu festigen.

	Nanotech-Finanzierung 2003 (in Millionen Dollar)	Anteil öffentlicher Mittel (Prozent)
Japan	1610	50
USA	1524	51
China	480	58
Südkorea	280	71
Deutschland	218	54
Australien	193	48
Großbritannien	160	56
Taiwan	115	35
Frankreich	90	56
Israel	50	40
Indien	45	44
Finnland	33	55
Kanada	31	52
Singapur	30	50
andere	685	50
weltweit	5544	52

Abbildung 4.109: Investitionen der Nanotechnologie

Mit dieser Zusammenarbeit kann Europa sein Engagement deutlich steigern, damit es im Wettbewerb um Forschung, Entwicklung und marktreife Anwendungen im Rennen bleiben kann.

Um diese hochgesteckten Ziele zu erreichen, bedürfe es neben ausgefeilten Forschungs- und Produktionsstätten auch einer besseren Koordinierung zwischen vorindustrieller Forschung und Grundlagenforschung.

Mit der Umsetzung dieser Ziele wurde in Deutschland bereits begonnen. Der Senat der Fraunhofer-Gesellschaft hat die Errichtung des Fraunhofer-Zentrums für Nanoelektronische Technologien CNT (Center for Nanoelectronic Technologies) in Dresden unter der Leitung von Dr. Peter Kücher mit Wirkung ab 1.12.2004 beschlossen. Grundlage ist das mit den Industriepartnern Infineon Technologies AG und Advanced Micro Devices AMD sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und der sächsischen Landesregierung unterzeichnete Memorandum of Understanding vom 30.08.2004. Damit wird Dresden zu einem der wichtigsten Standorte der europäischen Spitzenforschung auf dem Gebiet der Nanoelektronik. Am 31. Mai 2005 konnte das Fraunhofer CNT den Betrieb aufnehmen und somit wurde es auch ein Teil der europäischen Initiative im Rahmen von ENIAC zur Stärkung der Nanoelektronik.

Eine gewisse Nähe zu ähnlich gelagerten Projekten der US-Kooperative Sematech in Austin (Texas) bzw. Albany (New York) ist nicht zu verkennen, obwohl dort keine Produktionslinien von Chipherstellern an die Labors angrenzen. Dass heisst, hier besteht keine enge räumliche Verzahnung zwischen Forschung und Fertigung. Dies ist jedoch notwendig, damit alle Komponenten - Anlagen, Materialien, Prozesse - gleichzeitig einsatzbereit sind, um Neuentwicklungen schnell in die Serienfertigung zu bringen.

In Deutschland soll durch die Zusammenarbeit von CEA-Leti, IMEC und zukünftig dem CNT etwas Gleichwertiges geschaffen werden, ohne die notwendigen

wissenschaftlichen Kontakte zu Sematech bzw. dem japanischen Selete-Projekt versanden zu lassen. Diese benötigt man schon deshalb, weil die Herausforderungen zur Lösung der Probleme in der Technologie-Roadmap für Strukturen unter 50 nm nicht mehr allein durch einzelne Firmen oder nationale Organisationen zu lösen sind. Zusätzlich sollen einheitliche Normen für Anlagen und Materialien die Effizienz der Entwicklung und Fertigung beschleunigen.

5 Nanotechnologie – Chance oder Risiko ?

Dazu wurde eine repräsentative Studie „ Wissen und Einstellung zur Nanotechnologie“ im Auftrag der komm.passion GmbH im

- Befragungszeitraum: 10.09.2004-19.09.2004
- Auswertung: 1019 Menschen ab dem 14 Lebensjahr, verteilt auf alle Bundesländer

durchgeführt.

Das Ergebnis dieser Umfrage zeigt, dass der Wissensstand in der Bevölkerung über dieses Thema „Nanotechnologie“ noch sehr gering ist. Dies hängt zum einen sicherlich mit der **Neuheit** dieser Technologie zusammen, zum anderen aber auch mit der **inhaltlichen Komplexität**.

Bei der Diskussion um die Chancen und Risiken einer neuen Technologie ist es nahe liegend, Vergleiche mit anderen Technologien anzustellen. Es stellt sich die Frage, ob sich bei der Nanotechnologie eine ähnliche Risikodiskussion wiederholen wird, wie bei der Atom- und der Gentechnik. Der Fokus neuer Technologien liegt in der Zukunft. Mit der Betonung der Chancen werden Hoffnungen und Erwartungen geweckt, beispielsweise auf eine mögliche Heilung von schweren Krankheiten. Spekulationen dagegen fördern gleichzeitig auch Ängste. Um diese auszuschalten ist es vor allem wichtig, die Bevölkerung über die Möglichkeiten und Grenzen der Nanotechnologie zu informieren und damit eine realistische Einschätzung dieser Technologie und auch eine Trennung zwischen Fiktion und Realität abzugeben.

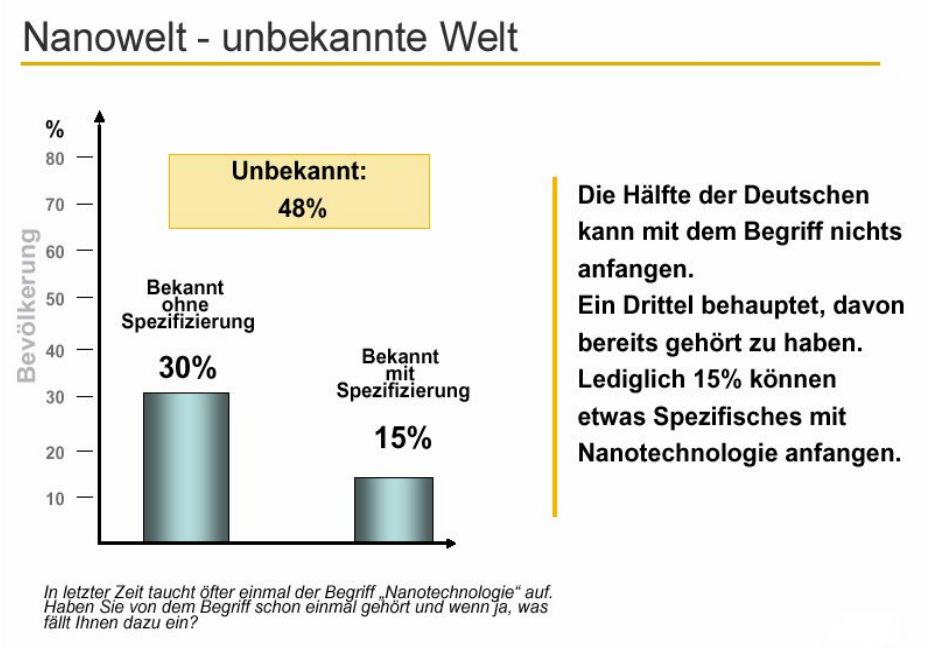


Abbildung 5.1: Bekanntheitsgrad der Nanowelt

5.1 Nanotechnologie im Dialog

Der technologische Fortschritt stellt keinen Selbstzweck dar. Er erhält seine Bedeutung aus dem praktischen Nutzen, den er uns als Menschen bescheren kann. Mit intelligenten Technologien können wir nicht nur unsere Fähigkeiten erweitern,

sondern auch Werkzeuge und Arbeitsmethoden entwickeln, die an unsere Bedürfnisse angepasst werden.

Der naturwissenschaftliche Erkenntnisfortschritt in den Nanowissenschaften wirft eine Reihe von Fragen auf, die weit über die rein naturwissenschaftlichen Zusammenhänge hinausreichen und dabei ethische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte berühren. Entgegen landläufigen Vorurteilen gibt es in den letzten Jahren in Deutschland keine wachsende Technikfeindlichkeit (neues Gentechnik-Gesetz, Veröffentlichung im Bundesgesetzblatt am 03.02.2005). So dürfen allerdings weitreichende Anwendungen in der Gentechnik nicht gegen den Willen der Mehrheit der Verbraucherinnen und Verbraucher durchgesetzt werden. Dieses Prinzip sollte auch auf die Nanotechnologie übertragen werden. Der Dialog mit der Öffentlichkeit trägt daher grundlegend zu einer sachgerechten Entscheidungsfindung in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft bei, denn Menschen durchlaufen meist drei Stufen, wenn sie die Wirkung einer Zukunftstechnologie untersuchen: Erst staunen sie ehrfürchtig über das Potenzial; dann bekommen sie Angst vor den Gefahren, die diese neuen Technologien begleiten könnten; und schließlich können sie realisieren, dass der einzig gangbare und verantwortliche Weg darin besteht, zu untersuchen, wie die Chancen zu nutzen sind und man mit den Risiken fertig wird.

Die Nanotechnologie wird vor allem in jenen Bereichen positiv eingeschätzt, wo ein tatsächlicher Nutzen – z.B. für die Wirtschaft, Gesundheit und die Umwelt – unmittelbar ersichtlich und die Wahlfreiheit der Verbraucherinnen und Verbraucher sichergestellt ist.

5.2 Chancen der Nanotechnologie

5.2.1 Wirtschaftliche Potenziale - Fakten statt unrealistische Visionen

Die Nanotechnologie wird vielfach als Basisinnovation bezeichnet, d. h. es wird erwartet, dass von ihr zahlreiche innovative Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen, gesellschaftlichen Anwendungsfeldern und ökonomischen Branchen ausgehen. Die technologische Dimension fokussiert somit auf weit reichenden Veränderungen, die uns Möglichkeiten bieten, Materialeigenschaften gezielt zu beeinflussen und zu nutzen und damit aller Voraussicht nach erheblich zu erweitern. Für viele Branchen in Deutschland wie Automobilbau, Chemie, Pharmaindustrie, Informations- und Kommunikationstechnik oder Optik hängt die künftige Wettbewerbsfähigkeit ihrer Produkte wesentlich auch von der Erschließung des Nanokosmos ab. Die Nanotechnologie eröffnet uns Marktchancen durch die Entwicklung kleinerer, leistungsfähigerer und „intelligenterer “ Systemkomponenten für Produkte mit verbesserten und zum Teil neuen Funktionalitäten; sie steht vor dem schwierigen Aufbruch der Transformation von überzeugenden wissenschaftlichen Erfolgen hin zu erfolgreichen Produkten auf dem Markt, also von den Nanowissenschaften hin zur Nanotechnologie. Obwohl bereits heute einige Produkte mit nanoskalaren Komponenten auf dem Markt verfügbar sind, wird wahrscheinlich der größte Teil der wissenschaftlichen Erkenntnisse erst in einigen Jahren, teilweise erst in Jahrzehnten in Produkte umgesetzt werden können [WLuth]. Die folgende Abbildung zeigt verschiedene nanoskalare Anwendungen vom Konzept bis zur Markeinführung.

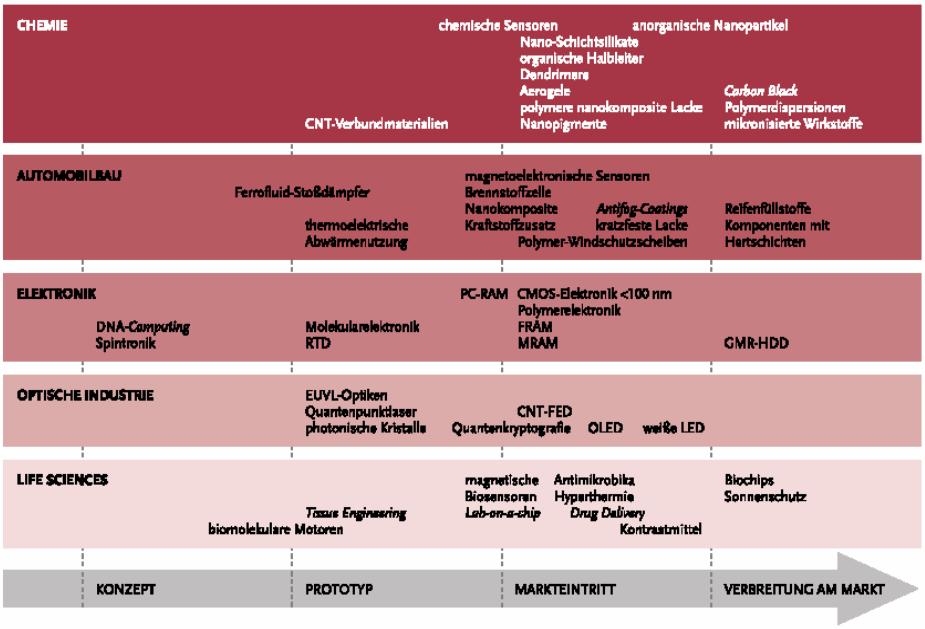


Abbildung 5.2: Anwendungen der Nanotechnologie

Das wirtschaftliche Potenzial der Nanotechnologie lässt sich heute nur schwer quantifizieren. Probleme bereiten vor allem die fehlende Standardisierung, die Heterogenität des Technologiefeldes, die Vielschichtigkeit der adressierten Märkte sowie die schlechte Vorhersagbarkeit des Markterfolges nanotechnologischer Entwicklungen, deren Reifegrad oft noch recht gering ist und für deren Umsetzung zum Teil noch erhebliche technologische Barrieren überwunden werden müssen. Doch schon heute bestimmen nanostrukturierte Materialien/Komponenten die Wettbewerbsfähigkeit einiger Produkte in den verschiedensten Massenmärkten.

Dies gilt unter anderem für die

- **Informations- und Kommunikationstechnik:**

  Speicherchips wie FeRAM, MRAM,

  Leseköpfe von Festplattenlaufwerken oder CD/DVD-Playern.

- **Pharma- und Medizintechnik**:

  Feuchtigkeitscremes, Sonnenschutzcremes (sie enthalten 20 nm große Titanoxid-Partikel als UV-Filter) oder Biochips für die medizinische Diagnostik (Lab on a Chip) zur Früherkennung und Behandlung von Krebs, Herzkreislauf Erkrankungen und viralen Infektionen.

- **Chemie**:

  Zusatzstoffe für Kosmetika, Klebstoffe und Lacke (sie arbeiten mit einer Nanokomposit-Bindung als Haftvermittlungsschicht), Legierungen mit drastisch verringerten Korngrößen von Materialien - wie Nickel oder Kobalt - machen diese Metalle extrem fest und hart, oder

  Ruß (der seine Anwendung als schwarzes Pigment in der Druckerschwärze und im Toner von Kopierern findet). Weiterhin wird Ruß bei der Produktion von Automobilreifen zugegeben, um die Abriebfestigkeit zu erhöhen.

- **Photovoltaik:**

  Solarzellen: Je nach Kristallart unterscheidet man drei Zelltypen: monokristallin, polykristallin und amorph

Material	Wirkungsgrad in % Labor	Wirkungsgrad in % Produktion
Monokristallines Silizium	etwa 24	14 bis 17
Polykristallines Silizium	etwa 18	13 bis 15
Amorphes Silizium	etwa 13	5 bis 7

Abbildung 5.3: Wirkungsgrad der Solarzellen

Farbstoffsensibilisierte Solarzellen erzeugen elektrische Energie durch

fotochemische Reaktionen von lichtempfindlichen Farbstoffen. Dieser Farbstoff wird auf nanokristallinem Titandioxid adsorbiert. Dadurch wird der Wirkungsmechanismus dieser Solarzellen deutlich erhöht und die neue Technologie verspricht eine deutliche Kosteneinsparung gegenüber konventionell siliziumbeschichteten Solarzellen. Die nanokristallin beschichteten Zellen können bis zu 46% der Sonnenenergie in elektrische Energie umwandeln.

Diese verschiedensten Teilmärkte von nanotechnologischen Produkten, Verfahren und Dienstleistungen weisen gegenwärtig einen Umfang von ca.100 Millionen Dollar auf.

Prognosen verschiedener Marktforschungsinstitute sagen im Mittel eine exponentielle Steigerung des „Nanotech-Marktes“ in den nächsten zehn Jahren bis zu 1 Billion U.S.-Dollar voraus [68].

Eine exakte Darstellung des „Nanotechnologieweltmarktes“ ist auf Basis von öffentlich zugänglichen Studien kaum möglich, da einerseits nur für einen Teil nanotechnologischer Produkte Marktzahlen verfügbar sind und andererseits die Marktprognosen sich zum Teil auf unterschiedliche Zeithorizonte beziehen (z.B. Marktstudie über keramische Nanopulver [69]).

Eine Schätzung des jährlichen Weltmarktvolumens nanotechnologischer Produkte konnte aufgrund einer vielseitigen Unternehmensbefragung erfolgen, sie ist unter [70] zu finden. Ein Auszug daraus zeigt folgende Abbildung:

Automobilbau	
Magnetoelektronische Sensoren	600 MillionenUSD (2006)
Antifog-Coatings für Scheinwerfer	50-250 MillionenEUR (2003)
Lacke	50-250 MillionenEUR (2006)
Automobilreifen	7 Milliarden EUR (2006)
Komponenten mit Hartschichten	0,5 -1 Milliarden EUR (2006)
Elektronik	
CMOS-Elektronik <100 nm	20 Milliarden USD (2006)
GMR-HDD	26,6 Milliarden USD (2006)
MRAM	30-50 Milliarden USD (2010) , (DRAM-Ersatz)
Optische Industrie	
Ultrapräzisionsoptiken, Lithografieoptiken	1-5 Milliarden EUR (2006) 0,5 - 1 Milliarden EUR (2006)
Lithografie-Stepper	7,7 Milliarden USD (2006)
LED	1-5 Milliarden EUR (2006) 10-50 MillionenEUR (2006)
Diodenlaser, Hochleistungs-Diodenlaser	1-5 Milliarden EUR (2006) 50-250 MillionenEUR (2006)
OLED-Displays	0,1 Milliarden USD (2002), 2,5 Milliarden USD (2006)
CNT-FED	0,01 Milliarden USD (2002), 0,05 Milliarden USD (2006)
Optische Sensorik	1-5 Milliarden EUR (2006)
Laserinterferometer	10-50 MillionenEUR (2006)
Optische Dünnfilm-Messtechnik	250-500 MillionenEUR (2006)

Abbildung 5.4: Jährliches Weltmarktvolumen nanotechnologischer Produkte

Das Ergebnis dieser Befragung widerlegt eindeutig die vielfach verbreitete Aussage, dass Nanotechnologie lediglich einen „Hype“ darstellt. Die Ergebnisse der Unternehmensbefragung haben ferner gezeigt, dass der Bereich Chemie (einschließlich Materialien) eindeutig an der Spitze der Nanotechnologiefirmen und -anwendungen in Deutschland steht, gefolgt von den Life Sciences und IuK.

Ableitend aus diesen Schätzungungen kann die Bedeutung der Nanotechnologie für die Sicherung und Stärkung des Wirtschafts- und Forschungsstandortes Deutschland und damit für die Schaffung und den Erhalt von Arbeitsplätzen eingeschätzt werden. Schätzungen lassen in Deutschland bis 2006 allein durch die etwa 450 existierenden Nanotechnologie-Unternehmen 10.000 neue Arbeitsplätze erwarten [71].

Die Mehrzahl der deutschen Firmen sehen die Nanotechnologie als einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor; 17% von ihnen gehen davon aus, dass sie 2006 einen Personalzuwachs von 100% oder mehr zu verzeichnen hat. Bereits heute existieren schätzungsweise 60.000 Arbeitsplätze, die direkt oder indirekt von der Nanotechnologie abhängig sind [72]. Aufgrund exzellenter Forschungsleistungen in den verschiedenen Nanokompetenzzentren und Universitäten hat Deutschland im internationalen Vergleich eine gute Ausgangsbasis für die wirtschaftliche Umsetzung der Nanotechnologie.

In der Patentanmeldung für nanoskalare Anwendungen und in der tatsächlichen wirtschaftlichen Umsetzung sind die USA und Japan Deutschland aber bisher überlegen.

Am 21.05.2005 hat das amerikanische Foresight Nanotech Institute zusammen mit dem Battelle-Institut eine „Technology Roadmap“ für „Forschung, Entwicklung und Anwendungen der Nanotechnologie“ initiiert [73]. Das angestrebte Ziel der Roadmap

besteht darin, einen Rahmen für die Erforschung, Entwicklung und die Einsatzmöglichkeiten von Nanotechnologieprodukten zu bieten. Zusätzlich soll sie als Grundlage dienen, die Anforderungen für die Anwendungen und kommerzielle Verwertung der Nano-Produkte zu formulieren.

In Zukunft ist ein noch stärkerer internationaler Wettbewerb zu erwarten, da weltweit Investitionen und staatliche Förderungen im Bereich der Nanotechnologie erheblich zugenommen haben (siehe auch Kap 3.3 „Stand der Nanotechnologieforschung“).

5.2.2 Ökologische Potenziale

Ressourcenschonende, energiesparende und damit emissionsarme Produkte durch die Nanotechnologie eröffnen vielfältige Perspektiven für ein nachhaltiges Wirtschaften. Beispiele für mögliche nanotechnologische Anwendungen mit unmittelbaren Umweltentlastungseffekten sind

- effizientere, regenerative Energieerzeugung
  (nanokristallin beschichtete und optimierte Solarzellen, Brennstoffzellen, Thermoelektrik mit verbesserten Wirkungsgraden)
- Energieeinsparungen in der Gebäudetechnik
  (Klimatisierung, Wärmedämmung, energieeffiziente Beleuchtungstechnik mit organischen Leuchtdioden)
- verbesserte Katalysatoren für umweltfreundlichere Produktionsverfahren
- sensitive Umweltsensorik zur besseren Erkennung von Schadstoffen
- länger haltbare, korrosionsbeständige oder leicht zu reinigende Haushalts- und Industrieprodukte sowie Wasserspeicher, Membrane und Filtersysteme zur Reinigung von Abwässern und Abgasen. Die letztgenannten Systeme werden vor allem einen großen Einfluss auf die Verbesserung des Lebensstandards von Millionen Menschen in der „Dritten Welt“ ausüben.

So lieferte z.B. die Firma Siemens nach der Tsunami-Katastophe am 26.Dezember 2004 mehrere mobile Wasseraufbereitungsanlagen in das Unglücksgebiet. Dabei handelt es sich um Membranfiltermodule, die bis zu 100 Kubikmeter Wasser pro Tag produzieren. Die Poren des Membranfilters haben einen Durchmesser von 100 nm.

Abbildung 5.5: Büschel von Membranfasern

Eine Quantifizierung der ökologischen Vorteile ist schwierig. Erste Ansätze zeigt eine vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) beauftragte Studie aus dem Jahre 2004, bei der unter anderem mit Hilfe der Ökobilanzierung versucht wurde, die Umweltwirkungen nanotechnologischer Produkte und Verfahren zu quantifizieren und mit konventionellen Produkten und Verfahren zu vergleichen [MStein 04]. Im Ergebnis dieser Studie erreichten einige Fallbeispiele bemerkenswerte Ökoeffizienzpotenziale für Anwendungen der Nanotechnologie.

- Bei der Untersuchung von neuen nanobasierenden Beschichtungsverfahren wurde eine mögliche Beschichtung von Aluminium durch einen neuartigen

Nanolack auf Basis der Sol-Gel-Technologie betrachtet und mit anderen Lacksystemen, wie Wasserlacken, Lacken auf Lösungsmittelbasis und Pulverlacken verglichen.

Durch die geringe notwendige Beschichtungsdicke bei gleicher Funktionalität wurde eine fünfmal höhere Ressourceneffizienz gegenüber konventionellen Produkten ermittelt.

Zusätzlich positiv wirkt sich die Substitution umweltgefährdender Stoffe wie Lösungsmittel oder Chrom aus.

- Auch im OLED-Displaybereich konnten Umweltentlastungseffekte wie eine 20%ige Energieeinsparung gegenüber den LCDs nachgewiesen werden.

Nanotechnologie verspricht also Beiträge zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung. Allerdings sind die Umweltentlastungspotenziale der Nanotechnologie bislang erst ansatzweise realisiert und die Haupteffekte werden eher mittel bis langfristig zu erwarten sein.

Weitere Anwendungspotenziale und Anwendungsfelder der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie sind in der im März 2005 erschienenen Studie „Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie“ vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung aufgezeigt [74].

5.3 Potenzielle Gefahren der Nanotechnologie

Nach den bereits beschriebenen Chancen der Nanotechnologie mit dem enormen wirtschaftlichen Potenzial birgt jede neue Technologie auch Risiken. Dies gilt für die Nuklear-, Gentechnik, den Mobilfunk wie auch für die Nanotechnologie. Für die einen stellt sie die Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert dar, für die anderen eine neue technologische Bedrohung mit ungeahnten möglichen Risiken für Mensch und Umwelt.

Die öffentlich kontrovers geführte Debatte um die Chancen und Risiken der ultrafein strukturierten Nanomaterialien, insbesondere den *Nanopartikeln*, läuft im englischsprachigen Raum bereits einige Zeit; im deutschsprachigen Raum steht sie noch ganz am Anfang.

So werden die möglichen Gefahren der Nanotechnologie mittlerweile nicht nur in Science-Fiction Romanen thematisiert –

wie z.B. von **Bill Joy „Gray Goo“,** handelt im Magazin Wired auf das "Gray Goo"-Szenario hinwies. Die Horrorvision von falsch programmierten - oder in die falschen Hände gelangten - sich selbst replizierenden Nanorobotern, die eine breite Spur der Verwüstung in Form grauer Schmiere hinterlassen, nachdem sie alles Lebende binnen Tagen in Nanosubstanzen umgewandelt haben. Oder durch **Michael Crichton** in seinem Roman **„Prey“,** dort beschreibt er mutierte Mikroroboter, die im Schwarm über ähnliche Eigenschaften verfügen wie staatenbildende Insekten, die Spionagebilder liefern sollen. Doch die Laborversuche geraten außer Kontrolle. Tausende unsichtbar kleine Killerroboter entweichen in die Wüste, vermehren sich blitzartig und in immer neuen Kampfformationen machen sie zunächst nur auf Kaninchen und Kojoten, schließlich auch auf Menschen Jagd. Sie töten ihre Opfer oder – schlimmer noch – sie leben in ihnen weiter und ersetzen nach und nach all ihre Zellen.

> In Verbindung mit einer Selbstreproduktionsfähigkeit entwickeln diese Mikroroboter unvorhersehbare Anpassungsstrategien und damit ein Gefährdungspotenzial für jede biologische Lebensform.

sondern auch von verschiedenen Interessengruppen problematisiert. Zu Recht, lautet hier die Frage? Wirtschaftliche und wissenschaftliche Innovationen sind ohne jedes Risiko nicht realisierbar. Entscheidend sind jedoch die Kenntnis und zufrieden stellende Beherrschung der Risiken sowie eine Risiko/Nutzenabwägung, die sich an den Interessen der Gesellschaft und der einzelnen Individuen orientiert. Im Zusammenhang mit der Nanotechnologie und dem Umgang mit Nanomaterialien stehen momentan vor allem mögliche gesundheitliche Risiken im Vordergrund. Ist ein solches Gefährdungspotenzial vorhanden und ist es derzeit kalkulierbar?

Können die Risiken soweit aufgeklärt werden, dass diese tatsächlich von der Gesellschaft akzeptierbar und beherrschbar sind?

Neben den Gesundheitsgefahren (**Nanotoxizität**) werden auch Umweltverschmutzungen (**Nanopollution**) diskutiert [TRen 03].

Im Gesundheitsbereich sind es vor allem Nanoteilchen, die als ultrafeine Teilchen eingeatmet oder über Verletzungen direkt durch die Haut in den Körper gelangen können. Durch die Winzigkeit der Nanopartikel kann es zu toxischen Reaktionen kommen, denn durch die im Verhältnis zum Volumen sehr große Oberfläche sind Nanopartikel sehr reaktionsfreudig, was die Bildung von hochreaktiven Molekülen, sogenannte freie Radikale, begünstigen kann. Von diesen ist bekannt, dass sie die Erbsubstanz sowie die Moleküle in den Zellen und somit das Körpergewebe schädigen und u.a. auch an der Entstehung von Tumoren beteiligt sein können.

Nanopartikel verfügen zudem über eine hohe Mobilität und könnten über die Haut oder via Lunge oder Magen-Darm-Trakt in den Körper eindringen und sich über die Blutbahn oder das Lymphsystem ausbreiten.

Je länger sie sich in der Blutbahn aufhalten, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie in andere Organe wie Herz, Nieren, Muskelgewebe, Knochenmark oder Hirn eindringen können. Letzteres verlangt deshalb besondere Aufmerksamkeit, weil die Blut-Hirn-Schranke als sehr undurchlässig gilt, aber die Gefahr besteht, dass Nanopartikel trotzdem das Gehirn erreichen, sich dort akkumulieren und möglicherweise toxisch wirken können. Neuere Untersuchungen weisen zusätzlich daraufhin, dass Nanoteilchen in der Luft nach dem Einatmen direkt von der Nase ins Gehirn gelangen können. Welche Chancen dies für die Überwindung der Blut-Hirn-Schranke und damit für den Medikamententransport hat und welche Gefahren möglicherweise für den menschlichen Organismus daraus entstehen, ist derzeit noch völlig offen [JGil 04].

Wenig bekannt ist ebenfalls über die Auswirkungen von Nanoteilchen auf Tiere und Umwelt. Amerikanische Forscher haben kürzlich herausgefunden, dass Buckminsterfullerene (Buckyballs) [MSim 00], fußballähnliche Nano-Moleküle, eine erhöhte Toxizität gegenüber Fischen [NIVC 04], Flohkrebsen und Bakterien zeigen. Diese Moleküle können anscheinend leicht die Bodenmatrix durchdringen und so möglicherweise ins Grundwasser gelangen.

Demgegenüber gibt es aber auch vielfältige Bemühungen, Nanopartikel zum Schutz der Umwelt einzusetzen. In Nordamerika laufen Forschungsarbeiten, bei denen Nanopartikel zur Sanierung von großflächigen Umweltverschmutzungen – wie verschmutztes Grundwasser – eingesetzt werden.

Ähnliche Reinigungsmethoden werden auch im Zusammenhang mit Verschmutzung durch industrielle Herstellungsverfahren diskutiert. Man geht davon aus, dass diese Art der Nanotechnologie umweltgerechte, industrielle Herstellungsprozesse begünstigt, indem toxische Abgase und andere prozessbedingte Nebenprodukte durch Nanopartikel entgiftet würden.

Ob und inwiefern Nanopartikel oder damit hergestellte Produkte eine konkrete Gefahr für den menschlichen Körper darstellen, ist zurzeit reine Spekulation und lässt sich ohne fundierte Studien schwer belegen, da Langzeit- oder toxikologische Studien kaum vorhanden sind. Anfängliche Untersuchungen wurden jetzt seitens der Allianz-Versicherung in Zusammenarbeit mit der OECD durchgeführt [HMüc 05].

Sie veröffentlichten eine gemeinsame Studie über „Chancen und Risiken von Nanotechnologien“. Die Versicherungsbranche ist für das Thema Nanoteilchen und Feinstaub sensibilisiert, weil sie jahrzehntelang die Gefahr von Asbest unterschätzt hatte und hohe Summen an Geschädigte zahlen musste.

Ziemlich genau ein Jahrhundert dauerte es, bis nach den ersten Warnungen ein europaweites Asbest-Verbot durchgesetzt werden konnte. Im Jahre 1898 warnte die britische Fabrikinspektorin Lucy Deane vor den schädlichen Wirkungen von Asbeststaub. In den Jahren 1998-1999 wurden von der EU alle Formen von Asbest verboten.

Eine weitere von der britischen Regierung in Auftrag gegebene und Ende Juli 2004 veröffentlichte Studie [ADow 05] beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Nanotechnologie auf Gesundheit, Sicherheit, Umwelt, Ethik und Sozialwesen.

Die Studie lehnt sich eng an das von der ETC Group geforderte Moratorium für Nanotechnologie an [75], lehnt es jedoch ab, fordert dafür aber strenge Regel:

- genauere Untersuchung von Life-Cycle-Aspekten industrieller Anwendungen der Nanotechnologie in Hinblick auf Ressourcenverbrauch und Entsorgung
- weitere Erforschung der toxikologischen und epidemiologischen Aspekte von Nanopartikeln
- Gründung eines interdisziplinären Forschungszentrums zur Untersuchung der Risiken der Nanotechnologien; dieses unabhängige Zentrum soll im nationalen und internationalen Kontext eingebettet sein und den Dialog mit den Regulierungsbehörden suchen
- Prüfung des gesetzgeberischen Handlungsbedarfs und gegebenenfalls Nachbesserungen bei den Regelungen im Bereich des Arbeits- und Verbraucherschutzes, des Chemikalienrechts und des Emissionsschutzes
- frühzeitige Berücksichtigung von Nanotechnologien und deren Anwendungen bei künftigen Gesetzes- und Regulierungsvorhaben
- Annahme von höherer Toxizität von Materialien in Form von Nanopartikeln und Nanoröhrchen, solange deren Wirkung auf Umwelt und Gesundheit noch unzureichend erforscht sind
- Behandlung von Nanopartikeln und Nanoröhrchen als neue chemische Substanzen unter geltendem Chemikalienrecht
- Finanzierung interdisziplinärer Forschung in Bezug auf ethische und gesellschaftliche Aspekte der Nanotechnologie
- stärkere Berücksichtigung ethischer und gesellschaftlicher Aspekte neuer Technologien bei der Ausbildung von Wissenschaftlern und Ingenieuren

- Durchführung weiterer Studien zur Akzeptanz sowie die Förderung eines breiten Dialogs über die Chancen und Risiken der Nanotechnologien
- Einrichtung einer Expertengruppe mit Vertretern von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft, welche die verantwortungsvolle Förderung und Entwicklung neuer Technologien begleitet und der britischen Regierung beratend zur Seite steht

Auch die EU-Kommission hat sich in diesem Jahr dieser Thematik gewidmet und drei Studien in Auftrag gegeben [CSHa 05]

- NanoDerm
  untersucht die Haut als Barriere für ultrafeine Teilchen
- NanoSafe
  analysiert die Produktionsrisiken und
- NanoTox
  erforscht die toxikologische Wirkung von Nanoteilchen auf die Gesundheit und die Umwelt

5.4 Handlungsbedarf

Der Stand der Forschung im Hinblick auf potenzielle Umwelt- und Gesundheitswirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte sollte weiter verbessert werden. Die dafür notwendigen Forschungsanstrengungen sind dringend erforderlich, da sich aus dem fehlenden Wissen um die Umwelt- und Gesundheitsfolgen Hemmnisse für die Markteinführung von nanoskalaren Produkten ergeben könnten. Aus diesem Grund schlägt die Europäischen Kommission in der Sonderausgabe des IPTS-Report (Institute for Prospective Technological Studies) vor, ein interdisziplinäres, unabhängiges Fachgremium zur laufenden Beurteilung und zur frühzeitigen Abschätzung möglicher Folgen der Nanotechnologie einzurichten. So sollte sich dieses Gremium der Förderung der Risikoforschung und der permanenten Begleitforschung betreffend Akzeptanz, Missbrauchspotenzialen, ethisch-moralischen, sicherheitsbezogenen und sozialen Fragen, Fragen des Datenschutzes (insbesondere im medizinischen Bereich) und des Schutzes der Privatsphäre annehmen und darüber öffentlich diskutieren. Zusätzlich hat dieses Gremium einen permanenten Verständigungsprozess zwischen Forschung, Unternehmen, Politik und Öffentlichkeit einzuleiten, um die viel diskutierte Frage, ob eine umfassende Regulierung der Nanotechnologie (Nanotechnologiegesetz) notwendig ist, zu klären. Das Spannungsfeld liegt zwischen der Forderung nach einem weltweiten Moratorium für synthetische Nanopartikel als Begrenzung von Forschung und Anwendungen der Nanotechnologie (ETC-Group 2002, Action Group on Erosion, Technology and Concentration) und der Argumentation, dass entsprechende Maßnahmen kontraproduktiv für die weitere Entwicklung der Nanotechnologie seien (Glen Harlan Reynolds 2002) [76,77].

Diese politische Entscheidung über die Notwendigkeit nanotechnologie-spezifischer Regulierungen wird in absehbarer Zeit getroffen werden müssen. Für solche Entscheidungen sind sachliche Grundlagen zu schaffen. Dazu gehört – neben einer wesentlich verbesserten Datenbasis zu den Auswirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte auf Umwelt und menschliche Gesundheit – eine systematische und umfassende Analyse des derzeitigen für Anwendungen der Nanotechnologie relevanten Rechtsrahmens. In diesem Sinne ist eine weltweite Standardisierung zwingend notwendig. Grundlage hierfür müssten demnach

international gültige Standardisierungsrichtlinien der nanotechnologischen Substanzen und Stoffe sowie eine einheitliche Nomenklatur sein. Nur wenn die entsprechenden Substanzklassen genau definiert sind und alle vom „Gleichen“ reden, lassen sich die Resultate der Risikoabschätzung verschiedener Institute oder Länder miteinander vergleichen.

Um dies zu erreichen, hat die europäische Normungsorganisation Comité Européen de Normalisation (CEN) vor kurzem eine Arbeitsgruppe (CEN/BT/WG166, Nanotechnologie) eingerichtet, die eine Strategie für die Normung der Nanotechnologie in Europa entwickeln soll.

Auch beim englischen Normungsinstitut British Standards Institution wurde bereits ein Arbeitsausschuss Nanotechnologie gegründet. Es wird erwartet, dass bei der Internationalen Organisation für Normung die Einrichtung eines ISO-Komitees für Nanotechnologie vorschlagen wird. Zur Wahrung der deutschen Interessen beabsichtigt das DIN, entsprechende Maßnahmen zur Standardisierung von Nanotechnologie einzurichten.

Die umfassende Information der Öffentlichkeit ist Voraussetzung für eine rationale gesellschaftliche Auseinandersetzung mit der Nanotechnologie. Dabei könnte auf Informationsangebote der einzelnen Kompetenzzentren und auf andere nationale, europäische und außereuropäische Informationsportale und Studien (z.B. „Auf dem Wege einer europäischen Strategie für Nanotechnologie“ [78], „ Nanoscience and nanotechnologies: opportunies and uncertainties“ [79], „The national nanotechnology initiative at five years“) [80] zurückgegriffen werden. Zusätzlich sollte ein offener Dialog in Form einer umfangreichen Risikokommunikation zwischen den Verfechtern der Nanotechnologie und den verschiedenen Stakeholdern [81] durchgeführt werden.

Der Bereich der Risikokommunikation ist weitläufig, er umfasst vier Aspekte, die von besonderem Interesse sind: öffentliche Haltungen, öffentliche Wahrnehmungen, die Rolle der Medien und zuletzt das Vertrauen in diese neue Technologie. All diese Faktoren hängen eng miteinander zusammen und tragen wahrscheinlich zur öffentlichen Meinungsbildung und Akzeptanz der Nanotechnologie bei.

Sollte die umfassende öffentlich durchgeführte Diskussion vermieden werden, könnte dies zu negativen Konsequenzen führen. Wenn aus den vergangenen kontroversen Diskussionen über genetisch modifizierte Nahrungsmittel eine Lehre zu ziehen ist, dann folgende: Das Versäumnis, die Öffentlichkeit an der strategischen Entwicklung neuer Technologien zu beteiligen und die Sorgen der Öffentlichkeit zu berücksichtigen - ganz gleich, ob sie Wissenschaftlern oder politischen Entscheidungsträgern begründet erscheinen oder nicht -, führt zu Misstrauen gegenüber öffentlichen Institutionen. Das Vertrauen anschließend wiederzu-gewinnen, ist sehr schwierig. Zwar wirft die Beteiligung der Öffentlichkeit einige berechtigte Bedenken auf, dafür ist der Preis für das Ausschließen der Öffentlichkeit von der Entscheidungsfindung im Bereich der Nanotechnologie unter Umständen wesentlich höher: Das öffentliche Vertrauen in die wissenschaftlichen und öffentlichen Institutionen kann Schaden nehmen und öffentlichen Widerstand auslösen, was wiederum die Weiterentwicklung und somit die Nutzung der umfangreichen Chancen der Nanotechnologie beeinträchtigen könnte.

6 Ausblick und Detailuntersuchungen im Hinblick auf Verwendung in öffentlichen Projekten

Der Siegeszug der nanostrukturierten Materialien ist unaufhaltsam. Um dies zu behaupten, braucht man kein Prophet zu sein. Die Frage, die sich allein stellt, ist vielmehr: Wann kann man unter welchem Aufwand mit welchen Ergebnissen rechnen?

Wie bereits aus den umfangreichen Informationen dieser Studie zu erkennen ist, verlässt die Nanotechnik allmählich die Forschungslabore. Natürlich bestehen für die Forscher auf dem breiten Feld der Nanotechnologie zukünftig weitere umfassende Forschungsaufgaben, um auch Anwendungen z.B. nach dem „Bottom Up“ - Prinzip (also gezielt komplexe Moleküle bis hin zu makromolekularen Einheiten) herzustellen.

Ziel wird es sein, durch die Nanotechnologie einerseits bestehende Verfahren zu verbessern und andererseits neue Produkte mit verbesserten Sicherheitseigenschaften zu realisieren.

So wird die Forschung und Entwicklung von **Sicherheitstechnologien**, voran die Informations- und Kommunikationstechnologien einen wichtigen Beitrag für die Umsetzung von Geräten/Anlagen auf Basis der Nanotechnologie liefern.

Die derzeitigen Anwendungen der Nanotechnologie liegen in vielen Branchen – von der Luftfahrt und Weltraumforschung, vom Automobilbau über Optik, Elektronik und Medizintechnik, vom Energie- über Umweltsektor bis hin zum Bauwesen. Viele von uns haben ihre Produkte schon am eigenen Leib erfahren, denn Nanopartikel stecken bereits in Sonnencremes oder werden als Nanobeschichtungen – beispielsweise für Fenster, Autos, Motorräder oder Keramikfliesen, die sich selber reinigen, oder für Algen, Bakterien oder Pilze unangreifbar sind - angeboten.

Für den Bereich der Elektronik prognostiziert der Markforscher Dr. Henning Wicht (Wicht Technologie Consulting – WTC) vor allem drei wesentliche Einsatzgebiete:

- Massenspeicher
- Logik ICs und
- Displays

Hier werden große Veränderungen, die sich aus den neuen Möglichkeiten der Nanotechnologie für die Industrie und den Markt ergeben, erwartet.

So sieht Dr. Wicht die größten Chancen für den erfolgreichen Einsatz der Nanoelektronik vor allem im Bereich der Massenspeicher durch die Flash-Technik. „Das Hauptmerkmal richtet sich dabei auf MRAMs und FeRAMs.“ Eine weitere Möglichkeit der Datenspeicherung (1TByte/cm^2) auf nanotechnologischer Basis stellt der Speicherchip „Millipede“ dar.

Im Bereich der Logik ICs erwartet er zwei spezielle Anwendungsbereiche, die Polymerelektonik (z.B. Displays auf Basis von OLEDs) und strahlungstolerante Mikroprozessoren und –controller, die unter Nutzung der Quantentechnik oder mittels Carbon-Nanotubes (CNTs) zur Herstellung gelangen.

Für „Produkt- und Anwendungsbereiche, die, unterstützt vom Einsatz der Nanotechnologie, in Zukunft gewaltige Entwicklungs- und Performanceschritte machen werden, erwartet Dr. Wicht ein breites Anwendungsspektrum. So wird die Nanotechnologie mobile **Supercomputing-Möglichkeiten** kreieren. Diese zukünftigen Entwicklungen, die heute aus Gründen der Größe des benötigten

Equipments und der damit verbundenen Kosten einfach nicht realisierbar sind, werden breit vertreten sein. Daneben spielen **Ubiquitous Electronics, Sensorik und Kommunikationsnetzwerke** eine wichtige Rolle. Neue nanotechnologisch basierte nichtflüchtige RAMs, so Dr. Wicht, werden etwa den Bereich Laptops, Server, Spielkonsolen und Desktop-Anwendungen für ein bisher nicht gekanntes Maß an Leistungsfähigkeit und Bedienkomfort sorgen." Auch im Bereich der Sprach- und Bildverarbeitung sieht er völlig neue Möglichkeiten. „Nanotechnologieoptimierte Elektronik wird nach Überzeugung von Dr. Wicht in Zukunft nicht nur Produkte wie den Universalübersetzer ermöglichen, sondern auch sprachgesteuerte Elektronikgeräte wie etwa Handys". „Im Automotiv-Bereich könnten Bildverarbeitungssysteme auf Nanotechnologie-Basis in Zukunft auch dazu beitragen, Autos in der Spur zu halten."[M&T 05]

Im folgendem sollen weitere aktuelle Anwendungen anderer Bereiche hervorgehoben werden.

- Ein Beispiel für Nanotechnologie in der Medizin stellt die Analyse von **Gewebeproben** dar. Während früher Gewebe unter dem Mikroskop oder chemisch analysiert wurde, kann man jetzt sehen, welche Gene ihn ihm aktiv sind, welche Eiweiße in welchen Mengen vorhanden sind. Das ist ein entscheidender Fortschritt für die Diagnose von Krankheiten und somit für die Beurteilung des Therapieerfolgs. Dies ist möglich geworden mit einem Laborsatz Quantenpunkte oder Kleinstkristalle, der für rund 400 Tests ausreichend ist. Die mit einer patentierten Methode in Reagenzgläsern gezüchteten Kristalle leuchten je nach Größe in fünf verschiedenen Farben auf, wenn sie von einer Lichtquelle angestrahlt werden – von Grün bei zwei Nanometer Durchmesser, bis zu Sattrot-Violett bei fünf bis sechs Nanometer Durchmesser.

  Labors an Universitäten und großen Pharmafirmen nutzen diese Quantenpunkte, um Gewebeproben auf bestimmte Marker zu untersuchen. Je nach ihrer biochemischen Programmierung lagern sich einzelne Nanokristalle an Proteine, Krebszellen oder Moleküle an. Damit sind Schnelltests auf Prostatakrebs oder auf einen drohenden Herzinfarkt möglich.

- Eine weitere Anwendung stellen **Sensoren auf Basis der Nanotechnologie** dar.

  Sie sollen **kritische Infrastrukturen** vor Angriffen durch Terroristen, vor Naturkatastrophen und Epidemien schützen und damit eine wesentliche Schlüsselrolle als **Früherkennungssystem** einnehmen.

  Um diese Aufgaben zuverlässig zu lösen, ist ein möglichst ausgedehntes Netz solcher Nanosensoren notwendig; denken wir nur an Metalldetektoren am Flughafen, oder auch Sprengstoffdetektoren, mit denen das Gepäck der Fluggäste untersucht wird, aber auch Biosensoren, die die Luft in öffentlichen Gebäuden oder die Qualität des Trinkwassers überwachen. Diese Art von Sensoren ist natürlich schon vorhanden, aber diese sind entweder nicht empfindlich genug, oder noch zu teuer, um breit eingesetzt zu werden. Hier soll nun die Nanotechnologie Abhilfe schaffen und Messfühler empfindlicher, kleiner, billiger und präziser machen.

  Auf der nanoSecurity 2005 in Halle wurden in einem Symposium unter dem Titel „detection of hazards" diese Gefahrensensoren vorgestellt.
  Ein Mitarbeiter des Lawrence Livermore Labors, der renommierten US-Militärforschungseinrichtung, berichtete zum Beispiel auf dieser Veranstaltung von einem neuartigen **Neutronendetektor** auf Nanobasis. Diese

Neutronendetektoren werden benötigt, um den Schmuggel von radioaktivem Material besser kontrollieren zu können. Die bisherigen Detektoren müssen gekühlt werden, sind zu sperrig oder zu kompliziert, um sie an jedem Bahnhof oder Hafen aufstellen zu können, und deshalb haben die Amerikaner jetzt auf der Basis dreidimensionaler Silizium-Nanostrukturen den Prototyp solch eines Neutronendetektors entwickelt, der bei Raumtemperatur funktioniert und auftreffende Neutronen mit deutlich höherer Effizienz als bisher registriert. Die Nachweiseffizienz dieses Detektors konnte von zwei bis fünf Prozent auf 85 Prozent erhöht werden.

Die Forscher vom Fraunhofer-Institut für chemische Technologie in Pfinztal konnten ein weiteres Anwendungsgebiet für Gefahrensensoren vorstellen. Sie arbeiten an einem Prototyp für empfindliche **Sprengstoffdetektoren**, die feinste Spuren von Gasen detektieren können. Dazu verwenden sie biegsame Halme aus Gold und Zink, deren elektrischer Widerstand sich ändert, wenn Sprengstoffmoleküle in der Luft detektiert werden.

- Eine weitere aktuelle Anwendung stellt eine eindeutige und fälschungssichere Beschichtung mit einem „**Nano-Wasserzeichen**“ zum Schutz von Chipkarten dar. Diese Schutzmöglichkeit ergibt sich aus dem Spektral-Code von nanobehandelten Oberflächenstrukturen. In dem Spektral-Code markieren fehlende Teile des Spektrums eine Art Fingerabdruck, der nur von der erzeugenden Anlage selbst reproduziert werden kann und damit als fälschungssicher gilt. Millionen von Möglichkeiten in diesem Code, inklusive der changierenden Farbwirkung (vom Winkel des Lichteinfalls abhängende Farbwirkung) machen diese Technologie zur **fälschungssicheren Kennzeichnung** von Chipkarten oder Produkt-Siegeln so interessant. Erzeugt wird der Code von einem Effekt, der mit Oberflächenplasmonen-Resonanz bezeichnet wird. Die Reflexion bzw. Absorption bestimmter Lichtfrequenzen wird durch ein feines Metallpulver, sogenannter Nanostaub, erreicht.

  Infineon Technologies und das Erlanger Biotechnologie-Unternehmen november AG haben ein Verfahren entwickelt, mit dem die goldene Kontaktfläche auf Chipkarten - unter der der Sicherheits-Controller liegt - mit einem eindeutigen und fälschungssicheren Erkennungsmerkmal versehen werden kann. Das Kodierprinzip basiert auf einer veränderten Absorption und Reflexion von Lichtstrahlen durch winzig kleine Metallteilchen. Hierzu sind in einer Mehrschichtenstruktur Metall-Cluster mit 15 Nanometer Durchmesser eingelassen, die auf das einfallende Licht reagieren. Für den Beobachter schlägt sich dies, je nach Betrachtungswinkel und Lichteinfall, in unterschiedlich schillernden Farben nieder. Die Farbgebung ist von 15 Parametern - wie Art oder Größe des Metalls oder der Schichtdicke - abhängig, wobei jeder Parameter selbst noch einmal in dreierlei Hinsicht veränderbar ist. Hieraus resultiert eine Kodierkapazität von 3^{15}, also mehr als 14 Millionen Kombinationsmöglichkeiten. Schon das bloße Auge des Betrachters kann die optischen Auswirkungen der Clusterkodierung wahrnehmen. Auf Kundenwunsch können sogar Produkt- und Firmenlogos „eingebrannt“ werden. Ein spezielles Lesegerät ermittelt die optischen Eigenschaften der Beschichtung und verifiziert die Echtheit des Chipkarten-Moduls. Die gegen Missbrauch geschützten Chipgehäuse finden vor allem dort Verwendung, wo hochwertige Controller zum Einsatz kommen und vertrauliche Informationen ausgelesen, verändert und neu gespeichert werden. Die Beschichtung mit dem „Nano-Wasserzeichen“ ist gegen Abrieb besonders

geschützt, so dass auch Tausende von Transaktionen mit der Chipkarte den Sicherheitsmerkmalen nichts anhaben können.

Kreditkarten, Kundenkarten, digitale Ausweispapiere und elektronische Fahrscheine sind nur ein kleiner Teil der möglichen Anwendungsgebiete, in denen die gegen Fälschung abgesicherten Chip-Gehäuse zum Einsatz kommen können. So gibt es bereits im Europäischen Parlament intensive Diskussionen einer weiteren Anwendung für dieses „Nano-Wasserzeichen“, einen elektronischen Führerschein im Chipkartenformat einzuführen.

Der schwedische Elektronikexperte Fred Goldberg hat bereits eine Chipkarte entwickelt, die zugleich als Zündschlüssel dient. Steckt der Autofahrer die Karte in das Lesegerät am Armaturenbrett, werden seine gespeicherten Daten zu einer Polizeidienststelle gesendet und auf Gültigkeit geprüft. Sind diese in Ordnung, erscheint auf dem Display die Nachricht: Bitte starten.
Danach kann der Autofahrer den Anlasserknopf drücken. Eine weitere Funktion dieser Chipkarte könnte die Kombination mit einem Alkoholtest-Gerät sein. Wer wegen Trunkenheit am Steuer verurteilt wurde, erhält zur Bewährungsauflage einen Alkotester in sein Fahrzeug. Erst wenn der Sensor Null-Promille erfasst hat und dies anschließend angezeigt wird, lässt sich der Motor starten.

Dieser elektronische Führerschein könnte die offizielle Unfallstatistik in Anbetracht dessen, das jährlich etwa 7000 Autofahrer auf deutschen Straßen in Unfälle verwickelt sind, obwohl sie keinen Pkw-Führerschein besitzen, verbessern. Die Dunkelziffer zu dieser Statistik wird wohl um ein Vielfaches höher liegen.

- Eine weitere sehr aktuelle Anwendung stellen Sicherheitstechnologien für **Produktschutzlösungen** wie
  - Nano-optische Siegel
  - Molekularer Fingerabdruck oder
  - Color-spectra Film

  dar. Die **Markierungen aus thermochromen Farben** beinhalten Kodierungen, die mit bloßem Auge erkennbar oder maschinell lesbar sind und als sicherer **Schutz vor Fälschungen auf Verpackungen, Etiketten und Oberflächen** hochwertiger Produkte aufgebrachten werden können. Diese nano-dünnen Schichten sind so gestaltet, dass sie bestimmte Wellenlängen des Lichtes reflektieren, jedoch andere absorbieren. Je nach Nanostruktur erstrahlt die Schicht in einer anderen leuchtenden Farbe.

  Diese metallisch glänzenden Farben eröffnen ungeahnte Möglichkeiten, da sie bei Wärmeeinwirkung unsichtbar werden und erkennbar ist, ob z.B. die Kühlkette unterbrochen und der Inhalt damit unbrauchbar geworden ist.

  Während herkömmliche Systeme wie z.B. Hologramme entweder nicht maschinenlesbar oder wie Strichcodes problemlos zu kopieren sind, erfüllen diese Sicherheitstechnologien alle Kriterien der geforderten gesetzlichen Rückverfolgbarkeit (Traceability) und verbinden damit eine effiziente Kontrolle der Vertriebswege.

  Des weiteren ist es möglich, diese **optischen Siegel** zur wirksamen Bekämpfung weltweiter Produktfälschungen, wie z.B. Fälschungen von Kosmetika, Uhren und Designerbekleidung vor allem aus Asien und Osteuropa einzusetzen. Darüber hinaus könnten die dringend notwendigen weltweiten Gesetze zum Schutz vor

gefälschten Arzneimitteln oder technischen Ersatzteilen (Automobil-, Werkzeug- und Flugzeugbau), die Menschenleben gefährden können, in die Praxis umgesetzt werden.

- Ein weiteres sehr aktuelles Thema stellen bundesweit einheitliche **Rücknahmessysteme** für Einweg-Verpackungen - Dosen, Glas- und Plastikflaschen - dar.

  Am 7. Januar 2006 ist die Vierte Änderungsverordnung zur Verpackungsverordnung in Kraft getreten (Bundesgesetzblatt Teil I vom 06.01.2006, S. 2). Damit wird die Europäische Richtlinie 2004/12/EG in nationales Recht umgesetzt.

  Um diese europäischen Vorgaben zu erreichen, ist eine einheitliche Kennzeichnung sinnvoll und muss insbesondere fälschungssicher und maschinenlesbar sein.

  Die Anonymität der automatisierten Rückgabe der Pfandgebinde verlockt bei den in Aussicht gestellten Pfandwerten (bis zu 1,5 Liter Flüssigkeit beträgt das Pfand 25 Cent und über 1,5 Litern 50 Cent) zur Fälschung. Wenn nur fünf Prozent der Rückgaben Fälschungen sind, erreicht der Fälschungsverlust schon ca. 250 Millionen Euro jährlich. Neben einzelnen Betrügern oder organisierten Banden sind Fälschungen auch durch falsch oder nicht bepfandete Gebinde möglich, die schwarz in den Markt gebracht werden. Auch schwarze Schafe unter den Betreibern von Rücknahmeautomaten sind nicht auszuschließen. Bei einem Preis einer Halbliterdose Bier von 79 Cent und einem Pfand von 25 Cent ist Betrug, z.B. durch Mehrfachrückgabe oder „Überlisten“ des Automaten, durchaus attraktiv. Nano-optische Siegel könnten auch hier helfen, dieses allgemeine Problem der Maschinelesbarkeit und Fälschungssicherheit zu lösen.

- Abschließend soll ein weiteres Beispiel für den möglichen Einsatz von OLEDs im Umfeld vom Deutschen **Personalausweis** (dPA) behandelt werden.

  Das Bundeskabinett hat Eckpunkte für eine gemeinsame eCard-Strategie der Bundesregierung beschlossen, um die flächendeckende Einführung von elektronischen Karten zu unterstützen. Die Eckpunkte sehen vor, dass die geplanten Projekte der Bundesverwaltung wie die **Elektronische Gesundheitskarte**, der Digitale Personalausweis, das JobCard-Verfahren und die Elektronische Steuererklärung eng aufeinander abgestimmt werden. Gleiche Standards und die breite Verwendbarkeit der Chipkarten für den elektronischen Geschäftsverkehr sollen Effizienzgewinne und Kosteneinsparungen zum Nutzen von Bürgerinnen und Bürgern, Wirtschaft und Verwaltung ermöglichen.

  Nach der Ankündigung des ehemaligen Bundesinnenministers Otto Schily auf der CeBIT 2005 in Hannover soll die nächste Generation des Personalausweises digitalisiert werden.

  Als zusätzlichen Schutz im Vergleich zum „**Basic Access Control**“ könnte auf dem digitalen Personalausweis ein organisches Display (OLED) aufgebracht werden, auf welchem eine dynamisch erzeugte Ziffernfolge optisch sichtbar sein soll. Diese Ziffernfolge und die MRZ (machine readable zone) bilden dann gemeinsam eine Zeichenfolge, aus der der geheime Zugriffsschlüssel auf den RFID-Chip und die verschlüsselte Datenübertragung berechnet werden könnte.

Dies sind nur einige wenige spezielle Anwendungen, die mittels der Nanotechnologie im Entstehen bzw. entstanden sind. Zukünftig werden die Bereiche **Nanomaterialien** und **Nanoelektronik** weitere ungeahnte Anwendungsmöglichkeiten eröffnen und ein enormes wirtschaftliches Potential für die deutsche Industrie bieten, allein dadurch, dass diese Materialien die Grundlage für zahlreiche Industrieprodukte darstellen und weil der Bedarf an **Informations- und Kommunikationstechnologien** in Bezug auf Speicher- und Rechenkapazitäten immer weiter zunehmen wird. Des weiteren wird die neue Generation von **mobilen Supercomputern** Einzug in weitere Bereiche der Forschung und Wirtschaft nehmen:

- Kryptographie
- Numerische Simulation technischer Vorgänge
- Wetter- und Klimavorhersage
- Pharmaforschung
- Materialwissenschaften - Analyse und Entwurf
- Exploration in der Seismik (Finden von Wasser- oder Öllagern)
- Crash-Simulation
- Large-Eddy-Simulation (Strömungsberechnungen)
- Strukturanalyse und -optimierung, Festigkeitsberechnungen

Durch die allgegenwärtige Informationsverarbeitung auf Grund mobiler Vernetzung von Supercomputern und anderer elektronischer Geräte, verbunden mit der Verfügbarkeit von Informationen überall, zu jeder Zeit und an jedem Ort, entwickelt sich die Nanotechnologie als neue technologische Basis und ermöglicht neue Systemarchitekturen (auf der Basis neuer elektronischer Bauelemente im Sub-Nanometerbereich) und Sicherheitsaspekte zur Wahrung der Privatsphäre eines jeden von uns.

Mit der rasanten Fortentwicklung vor allem im Bereich der Nanoelektronik entstehen neue leistungsfähigere Anwendungen, aber es werden dadurch auch immer neue Sicherheitsprobleme in der weltweiten IT-Landschaft auftreten. Nur mit einem aktuellen Wissensstand auf dem Gebiet der Nanotechnologie wird es dem BSI möglich sein, seine hoheitlichen Aufgaben, die Förderung der Sicherheit in der Informationstechnik, auch zukünftig wahrzunehmen und somit über **neue Risiken und Gefahren** beim Einsatz der Informations- und Kommunikationstechnik Hersteller, Vertreiber und Anwender von IT-Systemen kompetent informieren zu können.

„Das Wissen ist das einzige Gut, das sich vermehrt, wenn man es teilt“

Marie von Ebner- Eschenbach

7 Abkürzungsverzeichnis

ATP	Adenosintriphosphat
AFM	Atomic Force Microscope
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
cDNA	Complementary DNA
CNT	Carbon Nano Tubes, Kohlenstoffnanoröhren
CNT-FET	Carbon Nano Tube Field- Effect Transistor
CRT	Cathode Ray Tube
CT	Computertomographie
CP	Cross Point
DNA	Desoxyribonukleinsäure-Acid
EUV	Extremes Ultraviolett-Licht
EUVL	Extrem-Ultraviolett-Lithographie
FED	Feldemissionsdisplays
FOLED	Flexible Organic Light Emitting Display
FRAM	Ferroelektrische Speicher
GMR-HDD	Festplattenspeicher mit magneto-elektronischem Lesekopfsensor
HUGO	Human Genom Organisation
IC	Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors
LCD	Liquid Crystal Display
Life Sciences	Lebens- und Biowissenschaften
LOC	Lab-on-a-Chip
MELARI	Microelectronics Advanced Research Initiative
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
MIT	Massachussetts Institute of Technology
MOST	Ministry of Science and Technology
MRAM	Magnetoelektronische Speicher
MST	Mikrosystemtechnik
MTJ	magnetic tunnel junctions (magnetoresistives Tunnelelement)
NED	Nano Emissive Displays
NID	Nanotechnology Information Devices
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
NNI	National Nanotechnology Initiative
NSET	Nanoscale Science, Engineering, and Technology
NSTC	National Science and Technology Council
OLED	Organic Light-Emitting Diode
OUM	Ovonic Unified Memory

PC-RAM	Phase Change RAM
PET	Polyethylenterephthalat
PNAS	Proceedings of the National Academy of Sciences
RKM	Rasterkraftmikroskop
RKKY	Ruderman Kittel Kasuya Yosida
RNA	Ribonucleic Acid
RTD	Resonante Tunneldioden
RTM	Raster-Tunnelmikroskop
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International
SIA	Semiconductor Industry Association
SNOM	Scanning Field Optical Microscope
STI	Shallow Trench Isolation
STM	Scanning Tunneling Microscope
Tissue Engineering	Gewebekultivierung, künstliche Organe
TMR	magneto tunneling resistance (Tunnelmagnetwiderstand)

8 Index

Abgasemissionen 49
Abgas-Katalysatoren 49
Autofokus-Kameramodul 153, 229
Automobilindustrie 45, 46, 47, 48, 49
B92-Protokoll 106, 188
Basic Access Control 173
BB84-Protokoll 188, 189
Beschlagfreie Scheiben 49
Bill Joy 19, 164
Bio2Nano 44, 45
Biochips 51, 53, 54, 57, 160, 224
Bonding-Wafer-Verfahren 86
Bottom-Up 16
Brennstoffzellen 49, 163
BSI 13, 14, 174
Buckminsterfulleren 18, 189
Buckyball 39, 189
Carbon Nanoröhren 19
Chipkarte 172, 228
CNTs 23, 89, 91, 92, 93, 94
Cochlea-Implant 62
Crossbar Latch 23, 98, 99, 226
DeBroglie-Wellenlänge 79
Dekohärenz 190, 211, 212
Dendrimere 23, 70, 71, 190, 224
Diagnose 45, 46, 55, 57, 58, 62, 64, 66, 69, 170, 191
Digitalen Personalausweis 173
Digitalen Signaturen 24
Dirac-Gleichung 110, 221
Displays 22, 26, 134, 138, 139, 140, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 151, 152, 154, 162, 228
DNA 15, 19, 35, 40, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 71, 72, 73, 81, 96, 189, 191, 192, 199, 201, 202, 203, 209, 212, 215, 218, 224
DNA-Chip 54
DNA-Computer 191
DNA–Feldeffekttransistor 96
DNS 23
DNS-Stränge 23, 40
eCard-Strategie 173
Ein-Elektron-Transistor 18, 82
Einzelelektronen-Transistoren 81
Electrowetting 151, 152, 154, 193
Elektronische Gesundheitskarte 173
Elektronische Wasserzeichen 133

Elektronischen Zeitung 148
Emission 46, 49, 103, 136, 140, 142
Eric Drexler 18, 64
Eukaryoten 193, 211
Europäischen Kommission 22, 27, 167
EUV-Lithografie 38, 216
Evolution 44
Exciton 142
Expressionsprofile 54
Extreme Ultraviolett-Lithographie 80
Extremes Ultraviolett-Licht 38
Fälschungsschutz 24
Fermi-Kante 111, 194
Fermi-Niveau 141, 194, 196
Flash Memory 43
Flash-Speicherzelle 128, 228
FluidFocus-Linse 151
FOLED 21
Früherkennungssystem 170
Fulleren 89
Fullerene 23, 39, 64, 84, 89, 90, 131, 194, 217
Funktionswerkstoffe 48
Genoms 52, 53
Gerd Binnig 18, 37, 136
Gewebeproben 54, 58, 59, 170
Giant Magneto Resistance 118, 124
Gitter - Lichtventile 152
GMR-Effekt 109, 124
Halbleiterlaser 104, 105, 107, 153, 213
Halbleiterlasertechnologie 100
Heinrich Rohrer 18, 37
Hochenergie-Ionenimplantation 97
Humangenom-Projekt 52
Hybriden Grätzel Solarzelle 50
Hybridisierung 37, 40, 55, 59, 89
Hybridstrukturen 111, 118
III-V-Halbleiter 102, 104
Informations- und Kommunikationstechnologien 22, 28, 45, 174
Ink Jet Printing 147
Ionenfalle 205, 206, 207
IPTS-Report 167
Kantilever 40, 41, 42, 223
Kernspinresonanz 205, 206
Kohlenstoff 18, 20, 21, 22, 39, 76, 80, 81, 84, 89, 91, 92, 93, 96, 131, 154, 189, 197, 200, 204, 226
Kohlenstoffmolekül 39, 84, 93, 200

Kompetenzzentren 19, 29, 30, 168
Kontaktierung 94
Kontaminationslithografie 94
Krebsdiagnostik 53
Krebszellen 68, 69, 70, 170, 198
Kryptographie 24, 110, 174, 192
Lab on a Chip 54, 68, 152, 160, 193
Ladungsträgerinjektion 140, 142
Ladungsträgertransport 140, 141, 142, 193
Lichtventil 150, 152, 229
Life Science 162
Lithografischen Herstellungsverfahren 79, 102
Lotus Effekt 49
Magnetische Arbeitsspeicher 115
Magnetischer Tunnelkontakt 118
Magnetresonanztomographie 62
MEDEA – Projekt 155
Medizin .. 26, 27, 29, 45, 46, 50, 52, 54, 56, 61, 62, 64, 65, 66, 68, 69, 72, 133, 170, 188, 215, 218, 219, 223, 224
MEMS 15, 42, 81, 132, 135, 136, 199
Mikroarray 54, 58
Millipede 19, 22, 35, 41, 43, 135, 136, 169, 199, 223, 228
Molekularchip 112
Molekulare Maschine 44
Molekularelektronische Speichermedien 81
Molekularer Fingerabdruck 172
Molekulargenetik 68
Molekularstrahlepitaxie 82, 102, 103, 104
Molekültransistor 93, 226
Mooresches Gesetz 75
MRAM-Speicherzelle 117, 227
Naniten 65, 66, 200, 217
Nano for Life 31
Nano2Bio 45
Nanoanalytik 19, 36
Nanoassembler 44
Nanobatterie 24
Nanobiopharma 11
Nanobiotechnologie 11, 15, 27, 31, 35, 43, 44, 45, 46, 50, 51, 217, 223
Nanobots 19
NanoChance 31
Nanochemie 19, 36
Nanodrähte 23, 76, 94, 95, 96, 97, 215, 217
Nanoelektronik 22, 26, 31, 33, 35, 73, 74, 76, 79, 80, 81, 83, 92, 97, 155, 156, 174, 196, 215, 225

NanoFab....31
Nano-Fähren....67
Nano-Feldeffekt-Transistors....20
Nanoinseln....100
Nanokomposite....48
NanoLux....31
Nanomaterialien....15, 22, 23, 33, 34, 36, 47, 164, 165, 174
Nanomechanik....35, 39, 41
Nanomedizin....11, 35, 61, 64, 65, 66, 70, 72
Nanometermaßstab....44
Nanometerskala....11, 41, 51, 74, 200, 223
NanoMikroChem....31
NanoMobil....31
Nanooptik....35
Nano-optische Siegel....172, 173
Nanophotonik....24
Nanopinzette....17
Nanopollution....165
Nano-Robotern....40
Nanoröhrchen....11, 19, 64, 76, 84, 89, 96, 150, 166, 229
Nanoröhrchendisplays....150
Nanoröhren-Transistor....22
Nanoröllchen....94
Nanosensoren....26, 170
Nanospeicher-Produkte....26
Nanostrukturen....15, 17, 19, 35, 40, 48, 60, 69, 76, 100, 102, 103, 108, 171, 189, 225
Nanotechnologie....11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 51, 64, 65, 66, 67, 76, 93, 97, 108, 131, 156, 158, 159, 160, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 174, 196, 200, 216, 218, 219, 223, 224, 225, 229
Nanotechnologieforschung....25, 27, 29, 31, 32, 163
Nanotoxizität....165
Nanotransistoren....19, 94
Nanotubes....11, 18, 35, 39, 40, 80, 89, 90, 91, 92, 98, 131, 150, 154, 194, 197, 200
Nanotube-Transistor....19
Nano-Wasserzeichen....171, 172
Nanowissenschaften....25, 28, 29, 66, 107, 159
Nervengiften....20
Nichtflüchtige Speicher....26, 88, 110, 115
Norio Taniguchi....18
OLED....22, 23, 132, 133, 136, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 162, 164, 169, 173, 203, 215, 221, 228, 229
OLED....23
One-Time-Pad....106
Optische Schaltkreise....23
Organische Feldeffekt-Transistoren....132

Organische Solarzellen 22, 149
Organische Toxikologie 60
Originalitätsnachweis 24
Passivmatrix Display 228
Peptide 71, 203
Pharmabereich 45
Photolithographie 16, 59, 193, 212
Photonik 103, 107, 110
Photonischen Schaltkreisen 108
Photonischer Kristall 227
Photovoltaik 35, 161, 229
Plasmide 71
Polymere 20, 60, 125, 131, 132, 137, 139, 146, 147, 149, 190, 203, 227
Polymerelektronik 131, 132
Polymerspeicher 132, 133, 135
Prionen 65, 97, 203
Produktschutzlösungen 172
Protein-Chip 54, 55, 57, 218
Proteine 44, 55, 56, 57, 59, 71, 97, 170, 187, 194, 198, 201, 203, 204, 224
Proteinforschung 60
Quantenbits 101, 110
Quantencomputer 35, 81, 112, 205
Quantendots 100
Quanteneffekte 16, 79, 84
Quantenfilm 101
Quantengrabenlaser 104, 105
Quanteninformationsverarbeitung 106, 110, 112
Quantenkryptographie 106
Quantenpunkt-Bauelemente 81, 102
Quantenpunkte 20, 23, 99, 100, 101, 102, 103, 108, 110, 170, 208, 226
Quantenpunktlaser 101, 103, 104, 105, 106, 107
Quantensprung 47, 79, 80, 225
Quantentunneln 79
QuBit 112, 204
Radio Frequency Identification 149
Rahmenprogramm 22, 27
Rasterkraftmikroskop 17, 209
Rastersondenverfahren 16, 36, 37, 38
Raster-Tunnelmikroskop 17, 18, 69, 100, 200, 209, 224
Rekombination 140, 142, 193
Resonanz-Tunnel-Diode 82
Resonanztunnelelemente 81
Resonanz-Tunnel-Transitoren 83
Retina Implantat 51, 63
Richard Feynman 17

Richard Smalley 18, 19, 64, 69, 91
Riesenmagnetwiderstands-Effekt 124
Rücknahmessysteme 173
Sarin 20
Schalktreise 97
SD-Cards 43
Selbstorganisation 16, 17, 23, 96, 102, 189, 210
Selbstorganisiertes Wachstum 102
Sicherheit 28, 44, 46, 47, 48, 49, 61, 74, 75, 149, 166, 174, 197
Sicherheitstechnologien 169
Silicon-on-Insulator 86
SIMOX -Verfahren 86
Smart-Cut-Verfahren 86, 87
Spin-Coating 146, 147
Spin-down 110, 192
Spin-Feldeffekt-Transistor 112, 227
Spin-Injektion 110
Spin-LEDs 110
Spinpolarisation 21, 111
Spin-Transistor 110, 112
Spintronik 76, 81, 109, 110, 111, 112
Spin-up 110, 192
Spin-Ventil-Sensoren 115
Sprengstoffdetektoren 170, 171
Superposition 204, 205, 207, 211
Symbiose 12
Synergie 12
Therapie 41, 45, 46, 50, 52, 54, 58, 61, 66, 68, 70, 191, 224
Top-Down 16, 212
Triple-Gate-Transistor 85
Tumor-Targeting 70
TwinFlash-Technologie 127, 128
Umweltschutz 47
Vakuumverdampfung 146
WORM-Datenspeicher 135
Zellanalyse 60
Zell-Chip 54

9 Glossar

A 187

ALUMINIUM-GALLIUM-ARSENID 187
AMINOSÄUREN (AMINOCARBONSÄUREN) 187
ANGSTRÖ 187
ANISOTROPER MAGNETWIDERSTAND 187
ATOM 187
ATP 188
ATPASE 188
AT 188
ANGSTRÖM 188
ASSEMBLER 188
AVIONIK 188

B 188

BANDLÜCKE 188
B92 188
BOTTOM-UP 189
BUCKYBALL 189

C 189

CDNA 189
CANTILEVER 189
CARBON BLACK 189
CEA-LETI 189
CLUSTER 189
COULOMB-BLOCKADE 190
CROSSBAR-LATCH 190

D 190

DEKOHÄRENZ 190
DENDRIMER 190
DIE COULOMB-BLOCKADE 190
DIAGNOSTIK 191
DNA 191
DNA-COMPUTER 191
DNA-METHYLIERUNG 192
DOTIERUNG 192

E 192

ELEKTRON 192
ELEKTRONENGAS 192
ELEKTRONENSPIN 192
ELEKTROLUMINESZENZ 193
ELECTROWETTING-TECHNOLOGIE 193
EUKARYOTEN 193
EUV-LITHOGRAPHIE 193

F 193

FELDEFFEKTTRANSISTOR 193
FERAM 193
FERMI-DIRAC-STATISTIK FERMI-DIRAC-STATISTIK 193
FERMI-ENERGIE 193
FERMI-KANTE 194
FERMENTATION 194
FESTKÖRPER 194
FULLEREN 194

G 194

GEN 194
GENOM 195
GRÄTZEL-ZELLE 195

H 195

HALBLEITER 195
HALL-EFFEKT 195
HALLSENSOREN 195
HYDROPHIL 195
HYDROPHOB 195

I 195

INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS (ITRS) 195
INTRINSISCHE HALBLEITER 196
IMEC 196
IMMOBILISIERUNG 196
IONENIMPLANTATION 196

K 197

KAPILLARELEKTROPHORESE 197
KATALYSATOR 197
KLINISCHEN PRÜFPHASEN 197
KRAFTMIKROSKOP 197
KOERZITIVFELD 197
KOHLENSTOFF 197
KOLLOIDE STOFFE 197
KOLLOIDOSMOTISCHER DRUCK 198

L 198

LAB-ON-A-CHIP 198
LEUKOZYTEN 198
LIGAND 198
LITHOGRAPHIE 198
LIFE-SCIENCES 198
LOTUS-EFFEKT 198
LOW- K MATERIALIEN 198

M 199

MAGNETISCHE HYSTERESE 199
MASKE 199
MEDEA 199
MEMS 199
MILLIPEDE 199
MITOCHONDRIEN 199
MRNA 199
MOLEKÜL 199
MOLEKULARMÄNNCHEN 200
MONOMERE 200
MOORES GESETZ 200

N 200

NANITEN 200
NANOBEREICH 200
NANODOTS 200
NANOMETER 200
NANOPARTIKEL 200
NANOTECHNOLOGIE 200
NANORÖHRE 200
NANOTUBES 200
NICHTFLÜCHTIGER DATENSPEICHER 201

NUCLEINSÄUREN 201

O 201

OBERFLÄCHENPLASMONEN-RESONANZ 201
OLIGONUCLEOTIDE 201
ONKOTISCHER DRUCK 201

P 202

PEDOT 202
PELTIERELEMENT 202
PEPTID 202
PEPTID-NUKLEINSÄURE 202
PHARMAKA SCREENING 202
PHOTON 202
PHOTONISCHER KRISTALL 202
PHOTO-LITHOGRAPHIE 202
POLYMER 203
POLYESTER- FOLIE 203
POLYMERASE-KETTENREAKTION 203
POLY(PARA-PHENYLENVINYLEN) 203
POLYETHYLENTEREPHTHALAT 203
PRÄZESSION 203
PRIONEN 203
PROTEASEN 203
PROTEIN 203
PROTEIN-LIGAND-INTERAKTIONEN 204
PROTEOM-ANALYSE 204

Q 204

QUBIT 204
QUANT 205
QUANTENCOMPUTER 205
QUANTENEFFEKT 207
QUANTEN-HALL-EFFEKT 208
QUANTENMECHANIK 208
QUANTENPUNKT 208

R 209

RASTERELEKTRONENMIKROSKOP 209
RASTERKRAFTMIKROSKOP 209
RASTER-TUNNELMIKROSKOP 209
REPLIKATOR 209
RIBOSOMEN 209
RNS 210
ROTAXANE 210
RÖNTGENSTRAHLUNG 210
RUDERMAN KITTEL KASUYA YOSIDA 210

S 210

SELBSTORGANISATION 210
SELF-ASSEMBLY 210
SHALLOW TRENCH ISOLATION 210
SPIN 210
SPIN COATING 210
SPININJEKTION 211

T 212

TARGET 212
TISSUE ENGINERING 212
TOP-DOWN 212
TRANSKRIPTION 212

TREIBERFÄHIGKEIT 212
TUNNELEFFEKT 212
TUNNELMAGNETWIDERSTAND - TMR 212
EUKARYOTEN 213
TUNNELSTROM 213
U 213
UV-STRAHLUNG 213
V 213
VALENZBAND 213
VAN-DER-WAALS-BINDUNG 213
VERBINDUNGSHALBLEITER 213
W 214
WAFER 214
WÄRMELEITFÄHIGKEIT 214

A

Aluminium-Gallium-Arsenid

Aluminium-Gallium-Arsenid ($Al_xGa_{1-x}As$) ist ein Halbleiter mit nahezu der gleichen Gitterkonstante wie GaAs, aber einer größeren Bandlücke. Beim $Al_xGa_{1-x}As$ nimmt die Größe der Energielücke zwischen Leitungs- und Valenzband mit zunehmendem x zu.

Das "x" in der obigen Formel kann zwischen 0 und 1 variieren, wodurch die Bandlücke zwischen 1.42 eV (GaAs) und 2.16 eV (AlAs) eingestellt werden kann.

Da es sich bei GaAs um einen direkten, bei AlAs um einen indirekten Halbleiter

handelt, wandelt sich auch die Legierung bei $x < 0,4$ vom direkten zum indirekten Halbleiter. Von einem direkten Halbleiter spricht man, wenn an der Energielücke ein direkter Übergang stattfinden kann, d.h. wenn eine optische Anregung ohne Beteiligung von Photonen möglich ist. Im Gegensatz dazu muss bei einem indirekten Halbleiter ein zusätzliches Photon den fehlenden Impuls aufgrund der Verschiebung im k-Raum liefern.

Die Möglichkeit die Bandlücke in verschiedenen Bereichen unterschiedlich zu gestalten, bildet die Grundlage für HEMT Transistoren.

Weiterführende Ergänzungen zu diesem Thema findet sich unter

„Elektronen an Halbleitergrenzflächen, Schnelle elektronische Prozesse in Halbleiter-Heterostrukturen zur Erzeugung von THz-Strahlung“ von Gerhard Hermanns“

Aminosäuren (Aminocarbonsäuren)

Organisches Molekül, Grundbaustein aller Proteine. Sie bilden die chemischen Bausteine von Peptiden und Proteinen (Eiweißen) und sind neben den Nukleinsäuren Grundbausteine des Lebens

Angström

Ein Angström ist der 10milliardste Teil eines Meters oder 1/10 eines Nanometers. Abkürzung: Å
Typische Größenordnung von Atomen. Das Wasserstoffatom hat einen Durchmesser von ungefähr einem Angström. Benannt nach dem schwedischen Physiker Anders Jonas Ångström (1814 - 1874). Das Angström gehört nicht zu den SI-Einheiten (internationaler Einheitenstandard von frz: Système International d'unités).

Anisotroper Magnetwiderstand

Als Magnetowiderstand bezeichnet man die Änderung des elektrischen Widerstandes durch Einfluss eines Magnetfeldes.

In ferromagnetischen Metallen ist der elektrische Widerstand vom Winkel zwischen Stromfluss- und Magnetisierungsrichtung abhängig. Dabei ist der Widerstand bei paralleler Ausrichtung von Strompfad und Magnetisierung normalerweise größer als

bei senkrechter Ausrichtung. Ursache für diese Anisotropie des Widerstands ist die Spin-Bahn Kopplung.

Atom

Kleinste Einheit eines chemischen Elements, welches aus Atomkern und Elektronen besteht. Der Atomkern wiederum ist aus Protonen und Neutronen aufgebaut. Das leichteste Atom ist das Wasserstoffatom

ATP (Adenosintriphosphat)

ist die universelle Form unmittelbar verfügbarer Energie in jeder Zelle, gleichzeitig ein wichtiger Regulator energieliefernder Prozesse. ATP kann aus Energiespeichern (Glykogen, Kreatin-Phosphat) bei Bedarf freigesetzt werden

ATPasen

sind Enzyme des Energiestoffwechsels, die den Aufbau oder den Abbau von ATP gekoppelt mit dem Transport von Ionen von einer Seite der Zell- oder Organell-Membran zur anderen katalysieren

ATP-Synthese

Der deutsche Chemiker Karl Lohmann entdeckte ATP im Jahr 1929. Nach der Aufklärung der Struktur synthetisierte der Schotte Alexander Todd (Nobelpreis 1957) 1949 ATP. In den Jahren 1939-41 konnte Fritz Lipmann (Medizin-Nobelpreis 1953) zeigen, dass ATP der universelle Träger der chemischen Energie in der Zelle ist, und prägte den Ausdruck "energiereiche Phosphatbindungen". ATP fungiert als Energiespeicher in allen lebenden Organismen von den Bakterien und Pilzen bis zu Pflanzen und Tieren, den Menschen eingeschlossen. ATP speichert die bei der Verbrennung von Nahrung freiwerdende Energie und stellt sie beim Aufbau von Zellbestandteilen, bei der Muskelkontraktion, der Übertragung von Nervensignalen und anderen Funktionen zur Verfügung. ATP wurde "energetisches Kleingeld" der Zelle genannt.

ATP besteht aus dem Nukleotid Adenosin gebunden an drei Phosphatgruppen. Bei der Entfernung der äußersten Phosphatgruppe entsteht Adenosindiphosphat (ADP), während die gleichzeitig freigesetzte Energie für andere Reaktionen verfügbar ist. Umgekehrt kann unter Energieaufwand eine anorganische Phosphatgruppe an ADP gebunden werden, wodurch ATP entsteht. Beträchtliche Mengen von ATP werden gebildet und umgesetzt. In Ruhe setzt ein Erwachsener täglich ATP

entsprechend seinem halben Körpergewicht um, während bei harter Arbeit dies bis zu einer Tonne zunehmen kann. Ein Großteil der ATP-Synthese wird durch das Enzym ATP-Synthase bewirkt. In Ruhe verbraucht die Na + ,K + -ATPase ein Drittel des gebildeten ATP

Aufschleudern („Spincoaten“)

Lang-muir- Blodgett-Techniken – so benannt nach ihren Erfindern – für sehr dünne Schichtdicken, oder durch die so genannte Doctors-Blade-Technik zur Herstellung von sehr großflächigen und homogenen Filmen

Assembler

hypothetische Nanomaschine, die Atome und Moleküle in beliebiger Struktur zusammenbauen kann

Avionik

ein Begriff aus der Luft- und Raumfahrttechnik, eine Bezeichnung für die Gesamtheit der elektrischen Geräte an Bord eines Flugzeuges

B

Bandlücke

Energiebarriere in Halbleiterkristallen, die Elektronen überwinden müssen, um als elektrischer Strom durch den Kristall zu fließen

B92-Protokoll

Die Quantentheorie ermöglicht den sicheren Austausch eines Schlüssels, falls es gelingt einzelne Quanten zu separieren und zu übertragen. Das erste Protokoll zur Quantenkryptographie, das BB84-Protokoll war das weltweit erste, das hier seine Anwendung fand. Es wurde von Charles H. Benett von IBM-New York und Gilles Brassard von der University of Montreal vorgeschlagen und im Jahre 1984 auf einer Konferenz in Indien präsentiert. Seine Sicherheit beruht darauf, dass ein Lauscher den Zustand eines gesendeten Photons durch eine Messung zerstört und dadurch entdeckt werden könnte.

Das Protokoll verwendet vier Quantenzustände aus zwei unterschiedlichen Basen, um die Information zu codieren. Grundsätzlich kann zur Codierung jedes quantenmechanische System verwendet werden, das diese Anforderungen erfüllt. Es gibt weitere Variationen des BB84-Protokolls, das 2-State-Protokoll und das EPR-Protokoll, die sich in der Anzahl der Quantenzustände (zwei Zustände) unterscheiden. Den ersten Prototyp, basierend auf dem BB84-Protokoll, bauten Benett und Brassard im Jahre 1989 auf, hiermit wurden die Photonen über 30 cm in der Luft übertragen.

Das Prinzip baut grundsätzlich erst einmal auf den verschiedenen Polarisationszuständen des Lichtes auf und nutzt diese, um wie in der Informatik üblich Binärzahlen, Folgen von Nullen und Einsen, zu übertragen. Der Sender und Empfänger einigten sich darauf, dass die „0“ in der einen Basis mit horizontal polarisiertem Licht und in der anderen Basis das Licht mit einer Polarisationsrichtung von -45° übertragen wird.

Für die „1“ verwendet man vertikal polarisiertes Licht und respektive Licht mit einer Polarisationsrichtung von +45° (siehe Tabelle).

Wert	Basis A	Basis B
0	horizontal	-45°
1	vertikal	+45°

Codierung der Binärzahlen in zwei Basen

Eine vereinfachte Variante des BB84-Protokolls, stellt das 1992 von Bennet entwickelte BB92-Protokoll dar, es nutzt nur zwei nichtorthogonale Quantenzustände (90 °und 135°). Dabei liegt auch wie beim BB84-Protokoll die theoretische Konzeption der Quantenschlüsselübertragung von Einzelphotonenzuständen zugrunde.

Da dieses Protokoll nur zwei Zustände nutzt, hat es auch den praktischen Vorteil, dass ein Kommunikationsschritt zwischen Sender und Empfänger weniger benötigt wird. Allerdings kann nur jedes vierte Bit verwendet werden, beim BB84-Protokoll dagegen jedes zweite Bit.

Bottom-up

Allgemeiner Begriff für den Aufbau komplexerer Strukturen aus kleineren Bausteinen. Durch kontrollierte Manipulation einzelner Atome oder Moleküle entstehen Nanostrukturen.

Aus der Sicht der Lithographie ist "bottum up" das Gegenteil eines "top down" Verfahrens. Die Bausteine können dabei z.B. Moleküle sein, die sich durch Selbstorganisation zu komplexeren Strukturen zusammenfügen lassen. Ein typisches Beispiel eines "bottom-up" Prozesses findet man in der Natur in biologischen Strukturen: Aus vielen nanoskopischen Bausteinen entstehen durch Selbstorganisationsprozesse mikroskopische Zellen.

Buckyball, Buckminsterfulleren

1986 entdeckte Art von Kohlenstoffmolekülen, die kugelförmig oder ein Ellipsoid sind. Die Kohlenstoffatome sind darin zu Fünf- und Sechsecken angeordnet

C

cDNA

(*complementary DNA*) ist eine DNA-Sequenz, welche mit Hilfe der reversen Transkriptase aus einer mRNA gewonnen wird

Cantilever

Als Cantilever wird die Messnadel von Rasterkraftmikroskopen (AFM) bezeichnet. Diese besteht typischerweise aus einer ca. 3,4 mm langen und 1,6 mm breiten Substratfläche, an der sich eine durch Ätztechnik hergestellte Biegefeder von 100 bis 300 µm Länge, 20 bis 80 µm Breite und 1 bis 3 µm Dicke befindet. Die Fläche dient dabei nur zum Einspannen in den AFM-Messkopf. Als Ausgangsmaterial zur Herstellung werden üblicherweise Silizium-Wafer verwendet wie sie aus der Halbleiterindustrie bekannt sind. Neben Silizium dient auch das sehr harte Siliziumnitrid (Si3N4) als Material für Cantilever.

Die eigentliche Messnadel hat an ihrem vordersten Ende den so genannten Tip - eine Spitze, die idealerweise auf eine Breite von nur wenigen Atomen zuläuft. Die Spitzenradien betragen bei gewöhnlichen Spitzen 10 bis 15 nm, bei besonders scharfen Spitzen 5 nm und weniger. Cantilever werden - bedingt durch ihre Geometrie - mit einer Resonanzfrequenz von wenigen KiloHertz (kHz) bis hin zu 300 kHz und Federkonstanten zwischen 0,01 und 40 N/m hergestellt.

Für einzelne Messmodi, die unter dem Begriff Rasterkraftmikroskop genauer beschrieben sind, kann es z.B. nötig sein, dass der Cantilever elektrisch leitend ist. Zu diesem Zweck werden mit Platin oder Gold besputterte oder bedampfte Messnadeln angeboten. Weiterhin gibt es auch AFM-Tips mit magnetisierbaren Oberflächen, auf die ferromagnetische Substanzen aufgebracht sind. Die dabei verwendeten Schichten sind nur wenige 10 nm dick, um nicht den Spitzenradius und damit letztlich die Auflösung des Geräts zu verschlechtern. Teilweise wird auch die Rückseite mit Aluminium bedampft, damit sie den Laserstrahl besser reflektieren, mit dem ihre Auslenkung vom AFM detektiert wird.

Carbon Black

Engl. für Industrie-Ruß. Pulverförmiger Feststoff, der zu 80 bis 99,5 % aus Kohlenstoff besteht

CEA-Leti

Das Laboratoire d'Electronique de Technologie de l'Information Leti ist ein Labor des Commissariat à l'Energie Atomique CEA in Grenoble. In der Forschung über Mikroelektronik und Mikrotechnologien ist es in Europa führend. Leti beschäftigt rund 800 Mitarbeiter. Mit mehr als 120 Patenten pro Jahr und 30 Start-up-Gründungen gehört es zu den führenden Institutionen weltweit.

Die 1945 gegründete Dachorganisation CEA betrieb ursprünglich wissenschaftliche und technologische Forschung im Sektor der zivilen und militärischen Atomkraft. Hinzu kamen unter anderem Astrophysik, neue Energietechnologien, Informations- und Kommunikationssysteme sowie Toxikologie und Biotechnik. Mit der Fähigkeit, Grundlagenforschung und industrielle Wirtschaftlichkeit zu verbinden, ist CEA bei Innovationen national führend. Etwa 15 000 CEA-Mitarbeiter arbeiten an zehn französischen Standorten

Cluster

Häufchen von kleinen Teilchen, hier von Atomen. Cluster haben meist andere Eigenschaften als der ausgedehnte Festkörper des gleichen Materials, u.a. weil Cluster viele Oberflächenatome enthalten

Coulomb-Blockade

Die durch Abstoßung gleicher Ladungen bedingte Blockierung von Umladeprozessen.

Bei Metallkontakten, die nur wenige Nanometer groß sind, kann dies u.a. dazu führen, dass ein Tunnelstrom über diese Kontakte vollständig unterdrückt wird

Crossbar-Latch

Von Hewlett-Packard entwickelter Prozessor, der aus einem gekreuzten Gitter von Nanodrähten besteht

D

deBroglie-Wellenlänge

Der französische Prinz Louis de Broglie stellte in seiner Dissertation "Recherche sur la theorie de quanta" im Jahre 1924 die These auf, dass nicht nur Licht Teilchen- und Wellenaspekte aufweist, sondern auch Elektronen und andere Objekte mit einer von Null verschiedenen Ruhemasse. Diese zunächst sehr spekulative Vermutung – jedes Teilchen ist auch gleichzeitig eine Welle - konnte 1927 durch Davisson und Germer experimentell bestätigt werden.

Mit einer Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{p}$

h= Planck'sches Wirkungsquantum

p= Teilchenimpuls

Zusätzlich gilt $p = \sqrt{2mE}$

Somit erhält man eine Beziehung zwischen Wellenlänge und Energie. Je größer die Energie, desto kleiner können die noch abzubildenden Strukturen sein

Dekohärenz

Unter Dekohärenz versteht man die teilweise oder vollständige Unterdrückung der Kohärenzeigenschaften quantenmechanischer Zustände durch den Einfluss einer Umgebung. Die Untersuchungen auf diesem Gebiet stellen ein sehr aktuelles Forschungsgebiet dar mit wichtigen physikalischen Konsequenzen, die von Grundlagenproblemen der Quantenmechanik bis hin zur praktischen Anwendung, zum Beispiel im Bereich der Quanteninformationsverarbeitung, reichen.

Dekohärenz beschreibt die ständigen, flüchtigen Interaktionen zwischen einem Objekt und seiner Umwelt, die es dem Objekt erlauben, aus der Menge gleichzeitiger Möglichkeiten, die die Quantentheorie erlaubt, einen konkreten Zustand auszuwählen.

Nach der Quantentheorie befindet sich ein Objekt in einer Überlagerung mehrerer möglicher Zustände. Erst durch eine Messung durch einen äußeren Beobachter nimmt es einen definitiven Zustand an - ein Elektron zeigt beispielsweise, ob sein Spinvektor nach oben oder nach unten zeigt. In der Realität gibt es zwar keinen ständigen Beobachter, der alle Objekte in eindeutige Zustände zwingt. Auf diese Weise werden bestimmte erlaubte Zustände ausgewählt.

Die Dekohärenz-Deutung versucht das Problem mit Schrödingers Katze zu lösen, indem sie eine Grenze zwischen kleinen Quantensystemen und großen Systemen wie einer Katze zieht.

Danach kommt es nur in (kleinen) Quantensystemen zu Quanten-Überlagerungen. In großen Systemen hingegen sorgen Wechselwirkungen mit dem restlichen Universum dafür, dass die Überlagerungen von Quantenzuständen gestört werden. Im Falle von Schrödingers Katze sorgen diese Störungen dafür, dass das Tier immer entweder tot oder lebendig ist. Ein dazwischen gibt es nicht.

Dendrimer

Verzweigtes Molekül, von griechisch dendra = Baum.
Künstlich hergestellte Klasse von Molekülen, die durch die verzweigte und wiederholte Anordnung von Monomeren ein baumähnliches Aussehen erhalten, was auch ihren vom griechischen abgeleiteten Namen bestimmt. Dendrimere sind Polymere mit einer symmetrisch fraktalen, räumlichen Struktur. Ihr Name ist aus "dendritische Polymere" (dentritic polymer), abgeleitet worden, was soviel bedeutet wie baumähnliche Polymere. Vom mathematischen Standpunkt sind Dendrite Fraktale, die eine räumliche symmetry aufweisen, wie beispielsweise eine Schneeflocke. Sie werden schrittweise synthetisiert, wobei ein schalenweiser Aufbau erfolgt. Die innerste Schale wird 0. Generation genannt, die zweite entsprechend 1.Generation usw.. Durch diese aufwendige Synthese werden monodisperse, supramolekulare Strukturen hergestellt.

Die Coulomb-Blockade

beruht auf der Abstoßung gleichnamiger Ladungsträger auf der Insel. Die Coulomb-Kraft kann in nm-Strukturen so groß werden, dass die Präsenz eines einzelnen Elektrons an exponierter Stelle den Stromtransport durch einen ansonsten leitfähigen Kanal verhindert.

Diagnostik

Mittel zur Erkennung und Beurteilung von Erkrankungen. Je exakter die Diagnose ist, desto Ziel gerichteter

kann in den meisten Fällen die Therapie erfolgen

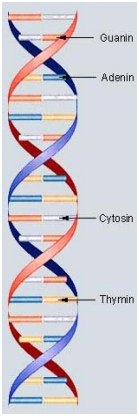
DNA

Die DNA (Desoxyribonukleinsäure-Acid) eines jeden Chromosoms trägt Tausende von Informationseinheiten, die sogenannten Gene, welche Träger der Erbinformationen in der Zelle sind und durch Reproduktion an die Nachkommen weiter gegeben werden können.

Ein Gen ist ein Abschnitt auf dem DNA-Strang der eine spezielle Eigenschaft kodiert. Dies kann die Haarfarbe sein, aber auch wie anfällig das Lebewesen für eine bestimmte Krankheit ist.

Die DNA ist ein Kettenmolekül, das aus vielen einzelnen Bausteinen, den Nukleotiden, besteht. Jedes Nukleotid besteht aus drei Komponenten, einer Base, einem Zucker (Desoxyribose) und einer Phosphatgruppe.

Die Base eines Nukleotids kann aus vier verschiedenen Grundbausteinen aufgebaut sein: Adenin (A), Thymin (T), Guanin (G) oder Cytosin (C).



Grundbausteine einer Zelle

DNA-Computer

Neben dem Quantencomputer werden weltweit in den letzten Jahren verschiedene Ideen zur Entwicklung unkonventioneller Rechenmodelle verfolgt und realisiert. Die Initiativen kommen hierbei aus unterschiedlichen Disziplinen, von der Informatik über die Physik bis hin zur Biologie. Alternativ zum klassischen „Neumann-Computer“ basieren einige dieser Entwicklungen auf der Abstraktion biologischer Prozesse (Rekombination) für eine Nutzung in der Mathematik bzw. Informatik. DNA-Computing stellt in diesem Zusammenhang eine spezielle Form für das Rechnen mit Molekülen dar. Das Erbmolekül DNA (Desoxyribonukleinsäure) dient hier als Speicher- und Verarbeitungsmedium und die Rechenoperationen werden durch geeignete molekularbiologische und biochemische Prozesse durchgeführt.

Die Entwicklung dieser speziellen Art der Biocomputer, die DNA-Computer, befindet sich allerdings noch in der Entwicklungsphase. Die ersten theoretischen Anstöße, dass Datenverarbeitung auf der Basis biologischer Moleküle möglich sein muss, lieferte der Nobelpreisträger für Physik Richard Feynman, der Begründer der Nanotechnologie, in einem Vortrag bereits Ende der 1950er Jahre. Im Jahr 1994 präsentierte Leonard Adleman, Computerwissenschaftler der University of Southern California, mit seinem TT-100 den ersten Prototyp eines DNA-Computers in Form eines Reagenzglases mit 100 Mikrolitern DNA-Lösung. Mit Hilfe dieses Gerätes konnte er durch freie Reaktion der DNA einfache mathematische Probleme lösen, so berichtete er in der „Science“ über die Lösung des Hamilton Path- Problems: welchen Weg nimmt ein Handelsvertreter, wenn er sieben Städte auf kürzestem Weg aufsuchen will, ohne eine Stadt ein zweites Mal zu passieren?

Die Organisation und Komplexität aller Lebewesen basiert auf einer Codierung mit vier verschiedenen Basen (Thymin, Adenin, Guanin und Cytosin) im DNA-Molekül. Dadurch stellt die DNA ein Medium dar, welches für die Datenverarbeitung perfekt geeignet ist. Nach verschiedenen Berechnungen würde ein DNA-Computer mit einer Flüssigkeitsmenge von einem Liter und darin enthaltenen sechs Gramm DNA eine theoretische Speicherkapazität von drei Milliarden Terabyte ergeben. Auch die theoretisch erreichbare Geschwindigkeit wäre enorm, so würden sich pro Sekunde etwa 1 Millionen Tera-Operationen ergeben, während die leistungsfähigsten Computer heute gerade mal eine Tera-Operation pro Sekunde erreichen. Insgesamt schätzen die Wissenschaftler, dass biologische Operationen auf DNA-Basis gegenüber elektronischen Basisoperationen etwa um den Faktor 109 energieeffizienter sind, um den Faktor 1012 mehr Speicherkapazität aufweisen und um den Faktor 1015 mehr Prozessoren ermöglichen. Einen weiteren Vorteil der DNA stellt ihre Stabilität dar; Lebewesen können sie mehrere Jahrzehnte mit äußerster Genauigkeit ablesen und kopieren.

Der Grundgedanke beim DNA-Computer besteht darin, Rechenoperationen auf einer sehr kleinen Nanoskala durchzuführen, so dass man durch gleichzeitige parallele Nutzung mehrerer Rechenelemente eine sehr große Anzahl von Berechnungen in kürzester Zeit durchführen kann. Als Rechenelement kommt dabei eine bestimmte Anzahl von DNA-Einzelmolekülsträngen zum Einsatz. Diese Stränge bestehen aus einer zufälligen Abfolge von insgesamt vier verschiedenen chemischen Verbindungen, den Basen Thymin, Adenin, Guanin und Cytosin.

Für eine Rechnung würden gezielt solche Einzelstränge (Thymin/Adenin und Guanin/Cytosin bilden ein Basenpaar) synthetisiert werden, die sich nur auf – eine dem Algorithmus des Problems - entsprechende Weise zu einem Doppelstrang verbinden lassen. Die dabei entstehenden Doppelstränge werden dann anhand weiterer physikalischer Eigenschaften, die mit konkreten

abstrakten Inhalten des zu bearbeitenden Problems im Zusammenhang stehen, mittels nasschemischer Verfahren selektiert. Die zuletzt übrig gebliebenen DNA-Doppelstränge enthalten die Lösung der gestellten Aufgabe.

Die Realisierung des DNA-Computers scheiterte bisher vor allem an technischen Problemen. Das Ziel der heutigen Forschung besteht darin, ein Hybridsystem zu schaffen, bei dem der DNA-Technologie elektronische Baugruppen vorgeschaltet werden können.

So berichtete z.B. Michal Soreni, ein Wissenschaftler vom Technion-Institut in Haifa, in der Fachzeitschrift Journal of the American Chemical Society (Bd. 127, S. 3935, 2005) von einem leistungsfähigen Computer, der ausschließlich aus der Erbsubstanz DNA und zwei Enzymen besteht. Die Rechengeschwindigkeit des DNA-Rechners soll etwa bei einer Million Zyklen liegen und ist damit mehr als 1000-mal schneller als die bisherigen Versionen solcher Biocomputer.

Dieser Art von DNA-Computern wird vorausgesagt, dass sie vor allem dort neue Lösungen liefern können, wo sie sich von „traditionellen Computern“ unterscheiden: In der Speicherkapazität und in der Parallelisierung. Ein Anwendungsfeld könnte damit z.B. die Kryptographie, indem massiv parallel alle möglichen Schlüssel gleichzeitig ausprobiert werden, sein.

DNA-Methylierung

ist eine Möglichkeit, mit der Gene in den meisten Lebewesen gewöhnlich reguliert werden. Dabei hängt ein Enzym, die DNA-Methyltransferase, eine Methylgruppe ($-CH_3$) an einen Baustein der DNA, und zwar an das Cytosin (C). Dies geschieht in bestimmten Abschnitten vor dem zu regulierenden Gen. Diese Abschnitte sind als CpG-Inseln bekannt, weil in ihnen die DNA-Bausteinfolge CpG besonders häufig vorkommt als anderswo im Genom. Vor jedem aktiven Gene sind diese Abschnitte nicht methyliert. Die Methylierung macht also die Gene "stumm", wie die Gentechniker sagen. Vor allem bei Krebs ist der Grad der DNA-Methylierung verändert. Entsprechend groß ist bei Krebsforschern das Interesse an dieser Genregulierung. Es gibt inzwischen sogar eine öffentliche Datenbank zur DNA-Methylierung. Eine gezielte Demethylierung, also das Entfernen der CH_3-Gruppe, reaktiviert stummgeschaltete Gene.

Dotierung

Gezielter Einbau von Verunreinigungen in ein Material, oft in nur geringen Konzentrationen. Vor allem in der Halbleitertechnologie genutzt zur Einstellung der elektrischen Eigenschaften (Leitfähigkeit) von Halbleitern.

E

Elektron

Negativ geladenes Elementarteilchen. Elektronen bilden die Hülle der Atome. Der Name kommt vom griechischen Wort Elektron und bedeutet Bernstein (an dem Elektrizität erstmals beobachtet wurde

Elektronengas

Das Elektronengas ist kein Gas im chemischen Sinn sondern eine Modellvorstellung für die frei beweglichen Elektronen im Leitungsband von Metallen oder Halbleitern. Man nennt diese Elektronen auch delokalisiert, da sie nicht zu einem lokalisierten Gitteratom zuzuordnen sind. (Streng genommen sind aber im Festkörper alle Elektronen delokalisiert.) Jedes dieser Elektronen besitzt eine (kinetische) Energie E und einen (quantenmechanischen) Wellenvektor $\vec{k}$, die über die sog. Dispersionsrelation

$$E = \frac{h^2 \vec{k}^2}{2m}$$

zusammenhängen. Relationen dieser Art bestimmen die Bandstruktur im Wellenvektorenraum.

Elektronenspin

Der Spin des Elektrons entspricht dem Eigendrehimpuls oder inneren Drehimpuls des Elektrons. Der Spin eines Elektrons kann bezüglich einer beliebig gewählten Vorzugsrichtung im Raum nur zwei Ausrichtungen annehmen, deren Projektion auf die vorgegebene Achse durch die Spinquantenzahl s=1/2 festgelegt ist.

Elektronen, Protonen und Neutronen besitzen alle einen halbzahligen Spin, s=1/2, dagegen weisen die Photonen einen ganzzahligen Spin, s=1 auf.

In Abwesenheit äußerer Magnetfelder sind die beiden Zustände energetisch gleich. Die beiden Spinzustände werden gekennzeichnet mit der magnetischen Spinquantenzahl ms, welche die Werte +1/2 bzw. –1/2 einnehmen kann (auch α - bzw. β -Spin genannt, häufig symbolisiert durch ↑ (spin-up) bzw. ↓ (spin-down)). Vereinfacht dargestellt, verhalten sich die Elektronen im Magnetfeld oder in magnetischer Materie wie winzige magnetische Kompassnadeln, die sich in zwei Quantenzuständen - Spin-up und Spin-down - ausrichten.

Der Elektronenspin ist die Grundlage des Magnetismus. Der Magnetismus ist eine makroskopisch beobachtbare Konsequenz der Quantenmechanik. Einzelne Atome, Ionen oder Moleküle mit ungepaarten Valenzelektronen (H, Li, Na, K, ..., Cu, Ag, Au) verhalten sich auf Grund ihres Spins wie elementare kleine Magnete und werden von einem äußeren Magnetfeld beeinflusst.

In einem homogenen äußeren Magnetfeld orientieren sich die Elektronen mit
ms = +1/2 in Feldrichtung, diejenigen mit ms = -1/2 entgegen der Feldrichtung (Grundlage der Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie).

In einem inhomogenen äußeren Magnetfeld werden Teilchen mit ms=+1/2 bzw. –1/2 in bzw. entgegen der Feldrichtung beschleunigt (Grundlage des Stern-Gerlach-Versuchs) [51].

Elektrolumineszenz

Bei einer elektrischen Vorspannung wird aufgenommene Energie als Strahlung bestimmter Wellenlänge abgegeben.

Für die Erscheinung der Elektrolumineszenz spielen folgende vier physikalisch-chemische Vorgänge eine wesentliche Rolle:

Injektion der Ladungsträger in das aktive Material

Ladungsträgertransport

Rekombination von Elektronen und sogenannten Löchern unter Excitonenbildung

Zerfall des angeregten Zustandes in den Grundzustand unter Lichtemission

Electrowetting-Technologie

Das Electrowetting (elektrischer Kapillareffekt), also das Benetzen einer Oberfläche durch einen Elektrolyten unter dem Einfluss elektrischer Felder, bietet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten. So gibt es bereits Bestrebungen, diesen Effekt in der Display-Technologie, für variabel fokussierbare Linsen aber auch zur Manipulation kleinster Flüssigkeitsmengen zu verwenden ("Lab on a Chip"

Eukaryoten

Sind eine der drei großen Organismengruppen (neben Bakterien und Archaeen), die sich im Verlauf der Evolution bildeten.

Charakteristisches Kennzeichen der Eukaryoten sind komplex zusammengebaute Zellen mit Zellkern und verschiedenen Zellorganellen. Einige dieser Organellen (insbesondere Mitochondrien und Chloroplasten) entstanden durch Endosymbiosen der Vorläufer der Eukaryoten mit bestimmten Bakterien. Zu den Eukaryoten gehören alle mehrzelligen Organismen (also alle Tiere und Pflanzen) sowie einige Mikroorganismen (zum Beispiel die Hefe). Zur Unterscheidung gegenüber den Eukaryoten werden alle Organismen mit einfachen Zellen als Prokaryoten bezeichnet.

EUV-Lithographie

Photolithographie-Verfahren, das äußerst kurzwelliges UV-Licht verwendet (engl.: Extreme Ultraviolet)

F

Feldeffekttransistor (FET)

Bei FET’s kann die Leitfähigkeit eines halbleitenden Kanals durch ein elektrisches

Feld, das auf den Kanal wirkt, verändert werden. FET’s haben drei Anschlüsse.

Diese werden als Source "S" (für Quelle), als Drain "D" (für Senke) und als Gate "G" (Tor) bezeichnet.

Source und Drain sind die beiden Enden des Kanals, während Gate die Steuerelektrode ist, die die Leitfähigkeit des

Kanals reguliert

FeRAM

Als Ferroelectric Random Access Memory (FeRAM) bezeichnet man einen elektronischen Speichertyp auf der Basis von Kristallen mit ferroelektrischen Eigenschaften (ferroelektrische Kristalle ähneln in ihrem Verhalten Ferromagneten).

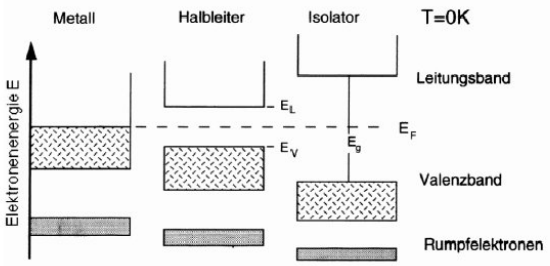
Der Aufbau entspricht der einer DRAM-Zelle, aber kein flüchtiger Speicher, basiert anstelle eines „normalen“ Kondensators auf ferroelektrischen Eigenschaften des im Kondensator verwendeten Dielektrikums (ferroelektrischer Kondensator). Ferroelektrische Materialien können analog zu ferromagnetischen Materialien eine permanente Polarisation auch ohne externes Feld besitzen. Durch ein externes Feld kann diese Polarisation in eine andere Richtung „umgeschaltet“ werden, worauf auch der Speicher-Mechanismus beruht.

Fermi-Dirac-Statistik [48]

nach E. Fermi [49] ist eine neue Art von Statistik, mit der man das Verhalten von Elektronen erklären kann. Sie ist eine Form einer Quantenstatistik, die für Teilchen mit halbzahligem Spin (Fermionen) gültig ist. Kernpunkt der Fermi-Dirac-Statistik ist, dass die Wellenfunktion (oder der „Zustandsvektor“) eines Vielteilchensystems bei Vertauschen zweier Teilchen einen Vorzeichenwechsel erleidet. Als Konsequenz davon ergibt sich das Pauli-Prinzip [50], demzufolge zwei gleiche Fermionen niemals im gleichen Zustand sein können. Da in diesem Fall die Vertauschung der Teilchen nämlich offenbar keine Auswirkungen hätte, folgt aus der Forderung nach Vorzeichenwechsel, dass die Wellenfunktion insgesamt verschwinden muss. Ebenso ergibt sich daraus die Fermiverteilung als Besetzungsstatistik für Fermionen. Die Tatsache, dass gerade Teilchen mit halbzahligem Spin der Fermi-Dirac-Statistik folgen, bezeichnet man als Spin-Statistik-Theorem.

Fermi-Energie

In der folgenden Abbildung sind typische Bandstrukturen für Metalle, Halbleiter und Isolatoren bei der Temperatur von T=0K dargestellt.



Bandstrukturen für Metalle, Halbleiter und Isolatoren

Die Einteilung von Festkörpern in Metalle, Halbleiter und Isolatoren erfolgt über die Lage der Fermi-Energie bezüglich der Energiebänder:

- Bei Metallen liegt die Fermi-Energie innerhalb des *Valenzbandes*. Da es freie Zustände unmittelbar oberhalb der Fermi-Grenze im Energieband gibt, können Elektronen im elektrischen Feld Impuls aufnehmen (=Geschwindigkeit) und tragen so als Leitungselektronen den elektrischen Strom.
- In Isolatoren ist das Valenzband vollständig gefüllt und das energetisch höhere Leitungsband vollständig leer. Da die Elektronen im Valenzband keine unbesetzten Zustände finden, können sie keinen Impuls aufnehmen und Stromfluss ist nicht möglich.
- Halbleiter sind Isolatoren ähnlich. Bei ihnen ist jedoch der energetische Abstand zwischen gefülltem Valenzband und leerem Leitungsband relativ klein (Größenordnung 1 ± 0,5eV), so dass hier aufgrund der Fermi-Verteilung (bei T>0) einige Elektronen vom Valenzband über die Lücke in das Leitungsband gelangen können. Dies ist möglich, da die Bandlücke bei Halbleitern im Gegensatz zu Isolatoren relativ klein ist (InAs: ~0,4 eV, Ge: ~0,7 eV, Si: ~1,2 eV, GaAs: ~1,5 eV, Diamant: ~5,5eV). Es können Elektronen vom vollbesetzten Valenzband ins Leitungsband - aufgrund der Energie der Wärmeschwingungen oder durch Absorption von Licht - angeregt werden.

  Durch die entstehenden freien Zustände im Valenzband (Löcher) und durch die Elektronen im Leitungsband ist Stromfluss möglich.

Die Fermi-Energie liegt bei intrinsischen Halbleitern (HL) in der Mitte der Bandlücke. Durch Dotierung (die sehr geringe Beimischung bestimmter Elemente) kann die Fermi-Energie innerhalb der Bandlücke verschoben werden. Dadurch kann die Anzahl und Sorte der elektrischen Ladungsträger vorgegeben werden. Insbesondere ist damit n- und p-Dotierung möglich, wodurch die eigentliche Halbleiterelektronik (Dioden, Transistoren, ICs) erst realisiert werden kann.

Fermi-Kante

Der Begriff „Fermi-Kante“ stammt aus der Fermi-Dirac-Statistik, die für Fermionen, zu denen die Elektronen zählen, gilt. Jeder Zustand kann nur mit einem Elektron besetzt werden (Pauli-Prinzip).

Bei T=0 sind alle Zustände bis zur Fermi-Energie (von der Unterkante des Valenzbandes aus gerechnet) besetzt. Nimmt man die Vakuumenergie als Bezugsgröße, spricht man von „Fermi-Kante“ oder „Fermi-Niveau“.

Fermentation

Chemische Umwandlung von Stoffen durch Bakterien u. Enzyme (Gärung).

Festkörper

In der Physik ein ausgedehnter (makroskopischer) Körper, der aus vielen Atomen besteht

Fulleren

Klasse von käfigartigen Kohlenstoffmolekülen.
Allgemeiner Name von Kohlenstoffmolekülen wie "Bucky Balls" und "Carbon Nanotubes". Der Name Fullerene basiert auf dem Aussehen der fußballähnlichen "Bucky Balls". Diese häufig aus 60 Kohlenstoffatomen aufgebauten Moleküle mit ihrer fünf- und sechszähligen Symmetrie ähneln einer geodätischen Kuppel (geodesic dome). Diese spezielle Architektur wurde von dem Architekten Buckminster Fuller (1895-1983) erschaffen und gab den Fullerenen ihren Namen. Daher heissen sie auch manchmal Buckminsterfullerene. Eine weitere Klasse der Fullerene bilden die Nanotubes.

G

Gen

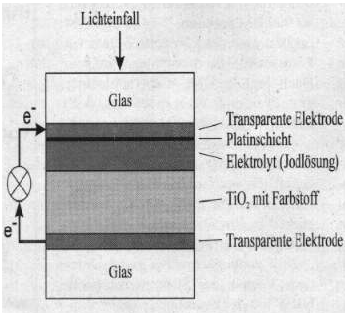
Abschnitt im Erbgut aller Lebewesen (in der DNS), der die Information für den Aufbau eines oder mehrerer Proteine enthält

Genom

Gesamtheit aller Gene

Grätzel-Zelle

Die Grätzel-Zelle (auch Farbstoffsolarzelle) dient der Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Es handelt sich um eine Anwendung aus der Bionik, die ihrer Funktion nach auch elektrochemische Farbstoff-Solarzelle genannt wird. Diese Solarzelle ist nach Michael Grätzel (EPFL, Lausanne, Schweiz) benannt, der sie Anfang der 1990er Jahre entdeckte und 1992 patentieren ließ. Die elektrochemische Farbstoff-Solarzelle verwendet zur Absorption von Licht nicht ein Halbleitermaterial sondern organische Farbstoffe, zum Beispiel den Blattfarbstoff Chlorophyll.



Zellaufbau

Die Farbstoffzelle (auch Nanosolarzelle genannt) ist vollkommen anders aufgebaut als herkömmliche, auf einem Halbleiter-p/n-Übergang basierende Solarzellen (siehe Abbildung). Wichtigstes Grundmaterial ist hier der Halbleiter Titandioxid (TiO2). Dieser wird auf eine mit einer durchsichtigen Elektrode versehene Glasplatte im Siebdruck-Verfahren aufgebracht. Die TiO2-Paste wird durch eine Feuerung bei 450 Grad Celsius versintert und somit zu einem festen Film gebacken. Durch die Strukturierung des Films in extrem kleine (10-30 nm) Teilchen wird eine große aktive Oberfläche erreicht. So hat eine solche nanostrukturierte Schicht von 10 Mikrometern Dicke eine 1000 fach größere Oberfläche als ein glatter Film. Im nächsten Arbeitsschritt wird der Titandioxid-Film in eine Farbstofflösung getaucht. Hierdurch legt sich jedes TiO2-Teilchen um eine monomolekulare Farbstoffschicht an (sogenannte Sensibilisierung). Anschließend gießt man eine Jod-Jodid-lösung über den sensibilisierten Halbleiter und verschließt das Solarsandwich nach oben wiederum mit einer Glasplatte samt Elektrode.

H

Halbleiter

Material, dessen elektrische Leitfähigkeit zwischen der eines Metalls und der eines Isolators liegt

Hall-Effekt

Dieser Effekt wurde 1879 von Edwin Hall entdeckt, ist das Auftreten einer elektrischen Spannung in einem stromdurchflossenen Leiter, welcher sich in einem stationären Magnetfeld befindet. Die Spannung fällt dabei senkrecht sowohl zur Stromfluss- als auch Magnetfeldrichtung am Leiter ab und wird *Hallspannung* U_H genannt.

Die Größe der Spannung kann mit der Hilfe der weiter unten hergeleiteten Formel

$$U_\mathrm{H} = A_H \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

aus Stromstärke I, magnetischer Flussdichte B, Dicke der Probe d (parallel zu B) und einer Materialkonstanten – der sogenannten Hallkonstanten A_H – berechnet werden.

Hallsensoren

Auch Hallsonden (nach Edwin Hall) genannt, nutzen den Hall-Effekt zur Messung von Magnetfeldern und Strömen.

Wird ein Hallsensor einer gegebenen Bauform in einem Magnetfeld angeordnet und von einem Strom durchflossen, so liefert er eine Ausgangsspannung die proportional zum Produkt aus magnetischer Feldstärke und Strom ist. Ist der Strom bekannt, kann man die magnetische Feldstärke messen. Wenn das Magnetfeld bekannt ist, kann man die Stromstärke messen. Sind Stromstärke und Magnetfeldstärke bekannt, dann kann der Hallsensor auch als Metalldetektor verwendet werden

Hydrophil

Wasser liebend“; hydrophile Substanzen sind wasserlösliche Stoffe. Hydrophile Oberflächen werden von Wasser besonders gut benetzt

Hydrophob

Stoffe, die als hydrophob („Wasser feindlich“) bezeichnet werden, lösen sich schlecht oder gar nicht in Wasser auf. Hydrophobe Oberflächen sind Wasser abweisend

I

International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)

Zur Aufrechterhaltung neuer Technologiegenerationen auf dem Gebiet der Mikroelektronik legt die International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), die alle zwei Jahre durch ein Gremium neu erarbeitet werden, für die Halbleiterindustrie

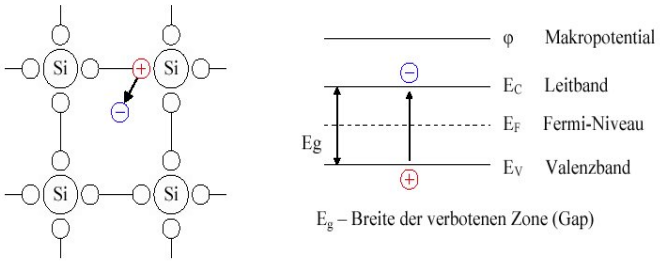
entsprechende Spezifikationen und Meilensteine fest. Ursprünglich 1992 als National Technology Roadmap for Semiconductors der amerikanischen Semiconductor Industry Association (SIA) entstanden, wurden im Jahr 1998 die wichtigen Entwicklungsregionen Europa, Japan, Korea und Taiwan mit einbezogen, so dass die ITRS heute die weltweite Entwicklung der Mikroelektronik vorgibt.

Intrinsische Halbleiter

Ein Halbleiter, der keinerlei Unreinheiten aufweist, wird intrinsischer Halbleiter genannt. Bei ihm beruht der Stromtransport allein auf Elektronen im Valenzband und den von ihnen zurückgelassen Löchern. Man spricht auch vom idealen Halbleiter oder undotierten Halbleiter.

Durch Hinzufügen von geringen Verunreinigungen kann man die Art der Leitfähigkeit bestimmen. Dieses Hinzufügen von Verunreinigungsatomen, die innerhalb und zwischen den erlaubten Energiebändern zusätzliche Energieniveaus schaffen, nennt man Dotierung. Die entstehenden Halbleiter heißen extrinsiche Halbleiter.

Undotierte Halbleiter



Elektronen können in einem Atom nur bestimmte Energiewerte annehmen. Im periodischen Potenzial der Atome eines Halbleiterkristalls sind diese diskreten Energien zu Bändern aufgeweitet.

Undotierter Si-Halbleiter

Das äußerste besetzte Band ist dabei für die Bindungen zuständig und heißt Valenzband. Durch Energiezufuhr können Elektronen vom Valenzband aus die energetisch verbotene Zone, die auch als Gap bezeichnet wird, überwinden und in dem so erreichten nächsten, noch unbesetzten Band zu einem Stromfluss beitragen. Dieses Band wird deshalb Leitband genannt.

Auch in einem undotierten Halbleiter besteht stets eine kleine Leitfähigkeit, da einige Elektronen bereits durch ihre thermische Energie die Bindungen verlassen und somit gleichzeitig ein Loch im Valenzband und ein Elektron im Leitband erzeugen können. Dargestellt werden kann dies, wie im rechten Teil der Abbildung geschehen, mit Hilfe des Banddiagramms. Das Banddiagramm ist ein wichtiges Hilfsmittel für das Verständnis der Funktion elektronischer Bauelemente. Es zeigt das

Makropotenzial φ, die Unterkante des Leitbandes, die Oberkante des Valenzbandes und das Fermi-Niveau. Letzteres ist die Energie, für die die Besetzungswahrscheinlichkeit gerade 0,5 ist.

Die Besetzungswahrscheinlichkeit beträgt für einen Zustand mit der Energie E

$$Fn = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-EF}{kT}}}$$

wobei kT die mittlere thermische Energie ist und bei Raumtemperatur ca. 25 meV beträgt.

IMEC

Interuniversity Microelectronics Center, Belgien

IMEC ist ein weltweit führendes, unabhängiges Forschungszentrum speziell fokussiert auf Nanoelektronik und Nanotechnologie. IMECs Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf integrierte Halbleiterbauelemente der nächsten Generation sowie Schlüsseltechnologien für künstliche Intelligenz.

Immobilisierung

Als immobilisiert werden solche Biokatalysatoren bezeichnet, die durch physikalische oder chemische Methoden in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt sind. Es können Enzyme (mit und ohne Kofaktorregulierung), ganze Zellen (meist mikrobieller aber auch pflanzlicher oder tierischer Herkunft), oder auch Zellorganellen (z.B. Mitochondrien oder Chloroplasten) immobilisiert werden.

Ionenimplantation

Ionenstrahlverfahren, Einbau von hochenergetischen Teilchen (keV bis MeV) durch Beschuß der Substratoberfläche. Insbesondere eingesetzt in der Mikroelektronik zur Dotierung von Halbleitern, aber auch in einigen Fällen zum Verschleißschutz

K

Kapillarelektrophorese

Die Elektrophorese ist die Trennung von geladenen Molekülen im Elektrischen Feld. Die Kapillarelektrophorese ist ein elektrophoretisches Trennverfahren, bei dem die Trennung in mit Puffer gefüllten Kapillaren erfolgt. Durch Anlegen von Hochspannung (2 - 35 kV) werden geladene Moleküle auf Grund unterschiedlicher Ladungszahl und Mobilität getrennt

Katalysator

Substanz, die einen Prozess ermöglicht, verbessert, intensiviert oder beschleunigt ablaufen lässt, ohne selbst wesentlich von diesem Prozess betroffen zu sein

Klinischen Prüfphasen

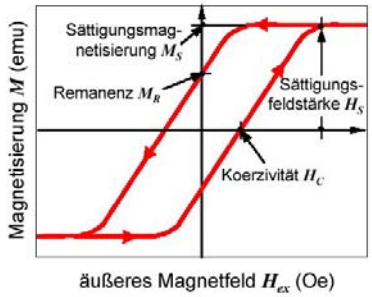
Bevor ein Medikament auf den Markt kommt, müssen seine Qualität, Wirksamkeit und Sicherheit nachgewiesen werden. Für jedes neue Anwendungsgebiet muss dieser Nachweis neu erbracht werden. In den vergangenen Jahren haben sich die Anforderungen deutlich verschärft. Für klinische Studien ist die Zusammenarbeit von Arzneimittelherstellern und Ärzten mit ihren Patienten auf der Basis international anerkannter Richtlinien unerlässlich.

Die amerikanische Zulassungsbehörde Food and Drug Administration (FDA) veröffentlichte kürzlich Zahlen, nach denen nur noch acht Prozent aller Medikamentenkandidaten, die die klinische Prüf-Phase I (z.B. die Erprobung eines Krebsmittels an Gesunden) begonnen hatten, zugelassen wurden. Die FDA vermutet, dass die Arzneimittelhersteller aus wirtschaftlichen Gründen immer häufiger die kostenintensiven Phasen II (z.B. die Erprobung eines Krebsmedikamentes am Patienten) und III (z.B. einige hundert Patienten testen das Medikament) scheuen, wenn bereits die vorläufigen Ergebnisse der Phase I gegen eine Vermarktung sprechen.

Kraftmikroskop

Mikroskop, bei dem das Abbild einer Oberfläche oder eines Moleküls aus der Wechselwirkung einer feinen Spitze an einem Hebel mit einem Atom errechnet wird. Krzform, AFM (atomic force microscope).

Koerzitivfeld



Magnetische Hysteresekurve

Eine magnetische Hysteresekurve ist die Darstellung der Magnetisierung „M“ eines Ferromagneten in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeldes H_{ex}.

Ferromagnete können teilweise oder vollständig ihre Magnetisierung in Richtung des äußeren Magnetfeldes beibehalten, auch nachdem das Magnetfeld abgeschaltet wurde. Der Betrag von M, wenn kein äußeres Feld mehr anliegt, wird als Remanenz M_R bezeichnet (Abbildung). Das maximale magnetische Moment, welches ein magnetisches Objekt erreichen kann, ist die Sättigungsmagnetisierung M_S . M_S ist abhängig von der Temperatur des Ferromagneten. Das **Koerzitivfeld** (Koerzivität, Gegenfeld) H_C eines Ferromagneten ist das angelegte Magnetfeld, bei dem das mittlere magnetische Moment, bzw. Die Magnetisierung M in Feldrichtung verschwindet (Abbildung). Als Sättigungsfeldstärke H_S wird der Betrag des äußeren Magnetfeldes bezeichnet, welches zur vollständigen Magnetisierung (M_S) des Ferromagneten notwendig ist.

Kohlenstoff

viertes chemisches Element im Periodensystem mit vier Elektronen. Kohlenstoff kommt als Festkörper (Diamant, Graphit) oder in Form großer Moleküle (Buckminsterfullerene, Nanotubes).

Kolloide Stoffe

Kolloide (griech. kolla = Leim)

Kolloide sind sehr kleine Partikel, die sich fein verteilt im Wasser befinden. Die Teilchen dieser so genannten kolloid-dispersen Phase weisen in der Regel Größenordnung von 1 bis 100 nm in mindestens einer Dimension auf. Das Medium selbst bezeichnet man als Dispersionsmedium, den Bereich der Chemie, der sich mit Kolloiden befasst, ist die Kolloidchemie.

Diese Partikel können nicht durch Sedimentation oder Flotation entfernt werden. Deshalb werden Koagulation, Flockung und nachfolgende Fällung zur Reinigung von kolloidhaltigem Wasser verwendet. Feste, flüssige oder gasförmige Stoffe, die in anderen Stoffen eingebettet sind (Dispersion). Kolloidale Flüssigkeiten heißen Sole. Durch Ausflockung entstehen Gele.

Kolloide Lösungen sind klar, bei schräger Beleuchtung erscheinen sie jedoch trübe (Tyndall-Phänomen).

Kolloide Stoffe werden für alle Kopierverfahren benötigt. In Verbindung mit einem Sensibilisator lassen sich diese Schichten durch geeignetes Licht härten, sie verlieren dadurch ihre Quellfähigkeit in Wasser. Die natürlichen kolloidalen Stoffe, Eiweiß, Gummiarabicum, Fischleim, Gelatine u. a. wurden in der Offsetkopie weitgehend durch das synthetische Kolloid Polyvinylalkohol ersetzt.

Kolloidosmotischer Druck

Den Anteil des osmotischen Drucks, der durch Proteine hervorgerufen wird, bezeichnet man als kolloidosmotischen oder onkotischen Druck. Obwohl er wegen der geringen molekularen Konzentration der Proteine nur relativ klein ist, spielt er trotzdem für die Flüssigkeitsverteilung im Organismus eine grosse Rolle, da die Proteine nicht einfach durch die Gefässwand diffundieren können. In den Blutgefässen ist der Proteingehalt höher als in der interstitiellen Flüssigkeit. Sinkt die Proteinkonzentration im Plasma, so tritt vermehrt Wasser aus dem Gefässsystem in den interstitiellen Raum.

Der kolloidosmotische Druck beschreibt die osmotische Wirksamkeit gelöster Teilchen, insbesondere der Plasmaproteine. Er ist damit ein einfach zu erfassender Parameter zur Abschätzung der Plasma- bzw. Serumproteinkonzetration.

L

Lab-on-a-Chip

Laborfreier Soforttest. Ein nur wenige Quadratmikrometer großer Chip, der der schnellen Analyse von z.B. Proteinen dient. Auf einem Chip befindet sich ein Gitter aus Nano-Drähten. Diese sind mit biologischen Molekülen beschichtet, wie etwa Antikörper. Über dem Gitter befindet sich eine Siliziumschicht mit zahlreichen Poren. Über die Poren werden die zu analysierenden Körperzellen gelegt. Wird ein Protein ausgeschieden, gelangt dies durch die Pore auf den Antikörper. Reagiert es damit, ändert sich die Leitfähigkeit des Nano-Drahtes. Das wiederum ist messbar. Auf diese Weise können mit einem Durchgang viele Zellen auf einmal untersucht werden

Leukozyten

Weiße Blutkörperchen, verteidigen den Körper, indem sie im Blut Fremdkörper wie Viren und Bakterien, aber auch Zelltrümmer oder Krebszellen in sich aufnehmen oder, als Lymphozyten, Antikörper produzieren. Antikörper sind sehr zielgerichtete Klebemoleküle

Ligand

Die Bezeichnung Ligand (lat. ligare = binden) stammt aus der Komplexchemie und bezeichnet ein (meist negativ) geladenes oder ungeladenes Molekül oder Ion, das über eine sogenannte koordinative Bindung an ein Zentralteilchen (meist ein Metallkation) gebunden ist

Lithographie

Die Lithographie (aus dem griechischen lithos = Stein und graphein = schreiben) ist ein handwerkliches Druckverfahren

Der wichtigste und teuerste Schritt in der Fertigung eines ICs. Um die kleinen Strukturbreiten auf die Wafer zu bringen, wird der Wafer mit einem lichtempfindlichen Film beschichtet, dann in den Strahlengang einer Optik gebracht, in der eine Maske sitzt. Die Strukturen auf der Maske entsprechen den Strukturen, die in diesem Schritt auf die ICs gebracht werden sollen. Dort, wo die Maske kein Licht durchläßt, wird der lichtempfindliche Film nicht belichtet, durch die anderen Bereiche der Maske geht das Licht und belichtet die Schicht. Anschließend wird der Film auf dem Wafer entwickelt, und da sich die belichteten und unbelichteten Stellen chemisch unterscheiden, können sie selektiv entfernt werden. Nun gibt es es winzige offene Fenster, durch die beispielsweise Fremdatome in das freiliegende Silizium eindringen können (dort wo der Film noch vorhanden ist, können sie das nicht) und so die ersten Teilstücke für einen Transistor bilden. Wie klein die Strukturen hergestellt werden können, hängt vor allem von der Wellenlänge des verwendeten Lichts ab. Heute verwendet man sehr kurzwelliges ultraviolettes Licht, um Strukturen von 0,18 µm zu realisieren. Die optische Lithografie läßt sich wohl noch bis zu Sturkturbreiten von 0,1 µm und etwas darunter verwenden. Die Lithografimaschinen heißen Stepper, da sie den Wafer Schritt für Schritt belichten, für jedes IC auf dem Wafer ist ein Belichtungsschritt erforderlich. Die Lithografie ist der einzige Schritt in der IC Fertigung, bei dem nicht alle ICs auf einem Wafer gleichzeitig einen Prozeß durchlaufen, sondern hintereinander

Life-Sciences

Lebenswissenschaften; eine Gruppe naturwissenschaftlicher Forschungsrichtungen, die sich, zwar nicht ausschließlich aber vor allem, mit der Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse der modernen Biologie, der Chemie und anderen Gebieten beschäftigen, also gezielt marktwirtschaftlich orientiert arbeiten

Lotus-Effekt

Der Lotus-Effekt hat seinen Namen von der Eigenschaft der Lotusblüte und Lotusblätter, immer makellos sauber zu sein. Selbst extrem gut haftendes Farbpulver wird vom Wasser einfach weggespült und nicht einmal Klebstoff bleibt an der Oberfläche haften. Der Grund liegt in der Chemie und Struktur der Oberfläche

Low- k Materialien

Materialien mit Dielektrizitätskonstanten kleiner 4,2.

Low-k Materialien können in folgende Gruppen eingeteilt werden: Dotierte Oxide, organische Materialien, hochfluorinierte Materialien und poröse Materialien. Die Gruppe der porösen Materialien kombiniert Mikroporen mit den anderen aufgezählten Materialien. Herkömmlich eingesetztes Siliciumdioxid besitzt eine Dielektrizitätskonstante von 4,2. Luft wird als idealer Isolator angesehen und besitzt eine Dielektrizitätskonstante von 1. Poröse Materialien können daher generell niedrigere Dielektrizitätskonstanten erreichen als die entsprechenden massiven Stoffe. Diese neuen Materialien werden für ICs mit

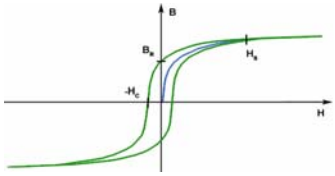
Strukturen <0,10 µm entwickelt. Dielektrizitätskonstanten von 2-3 können erreicht werden. Oxide, dotierte Oxide, organische Materialien sowie hochfluorinierte Materialien werden künftig alle mit Mikroporen kombiniert werden.

Low-k Material kann in modernen Halbleiterfabriken für mehrschichtige Verbindungen, für Zwischenschichtdielektrika (ILDs), Passivierungsschichten, Isolation flacher Gräben und Maskierung tiefer Gräben eingesetzt werden. Low-k Material kann entweder mit traditionellen Aluminiumbahnen oder mit modernen Doppel-Damaszen Kupferprozessen eingesetzt werden.

M

Magnetische Hysterese

Magnetische Hysterese tritt bei Ferromagnetischen Stoffen wie Eisen, Kobalt und Nickel auf. Der Hysteresevorgang lässt sich gut am Verlauf der Hysteresiskurve oder Hysteresisschleife verdeutlichen. In dieser Kurve wird die magnetische Induktion (B) in einem ferromagnetischen Stoff über der Stärke eines den Stoff umgebenden Magnetfeldes (H) aufgetragen. Zu Beginn sind sowohl die Magnetisierung des Stoffes als auch die Feldstärke des Magnetfeldes Null. Wird jetzt H erhöht, so steigt B entlang der Neukurve (in der Darstellung blau) stark an, bis die sogenannte Sättigungsfeldstärke H_S erreicht ist. Wird H weiter erhöht, steigt B nur noch linear mit der Permeabilität des Vakuums μ_0 an.



Hysteresiskurve eines Transformatorkerns

Wird das Magnetfeld H nun wieder auf Null zurückgefahren, geht B nicht auf Null zurück, sondern verläuft entlang des oberen Astes der (grün dargestellten) Hysteresiskurve bis zur sogenannten Remanenz B_R. Um den Stoff wieder vollständig zu entmagnetisieren, muss ein dem zur Magnetisierung verwendeten Feld entgegengesetztes Magnetfeld mit der Koerzitivfeldstärke $-H_C$ aufgebaut werden. Wird die Feldstärke des entgegengesetzten Magnetfeldes weiter erhöht, wird der Stoff entsprechend mit entgegengesetzter Polung magnetisiert, bis wieder Sättigung erreicht wird. Ein erneutes Umkehren der Feldstärke von H führt dann dazu, dass der untere Ast der Hysteresiskurve durchlaufen wird. Ein vollständiges Durchlaufen der Hysteresiskurve wird als Hysteresezyklus bezeichnet.

Maske

Eine Art Dia, das die Strukturen für einen Computerchip enthält, die dann photolithographisch auf Wafer übertragen werden

MEDEA

Das Gründungsdokument „MEDEA Frame Agreement“ (MFA) wurde 1996 von folgenden europäischen Halbleiter-Firmen unterzeichnet: Alcatel, ARM, Ericsson, Infineon, Intracom, Italtel, Mentor Graphics, Nokia, Philips, ST- Microelectronics, VSI-Alliance. Daneben wurden eine ganze Reihe von Instituten und Universitäten als „Corporate Members“ angebunden.

Als geeigneter Rahmen für ein öffentlich gefördertes, europäisches Verbundprojekt bot sich das EUREKA-Programm an, in das MEDEA im Jahre 1996 unter Projektnummer 1535 integriert wurde.

Ein wesentliches Ziel von MEDEA war u.a., durch öffentliche Förderung und Kooperation aller beteiligten Firmen in horizontaler und vertikaler Richtung die vermuteten Wettbewerbsnachteile der europäischen Halbleiterindustrie gegenüber der U.S. amerikanischen und fernöstlichen auszugleichen.

MEMS

ist die Kombination aus mechanischen Elementen, Sensoren, Aktoren und elektronischen Schaltungen auf einem Substrat bzw Chip; siehe auch System on Chip (SoC)

Millipede

Speicherchip von IBM, der mit den Hebeln eines Kraftmikroskops arbeitet. Diese stanzen Löcher in eine Polymerschicht, die dann Bits repräsentieren. Millipede erlaubt eine Speicherdichte von ca. 150 Gigabit pro Quadratzentimeter

Mitochondrien

Produzent von ATP, die Stoffwechselenergie aller Lebensvorgänge

mRNA

die mRNA (Boten-RNA, messenger-RNA) ist eine direkte RNA-Kopie eines zu einem Gen gehörigen Teilabschnitts der DNA

Molekül

Ein Molekül ist ein Teilchen, das aus mindestens zwei zusammenhängenden Atomen besteht

Molekularmännchen

der „carbon monoxide man“ besteht aus 28 Kohlenmonoxid-Molekülen, die auf einem Platinkristall mit der Spitze eines Raster-Tunnelmikroskops zusammengefügt wurden. Der Abstand zwischen zwei Molekülen beträgt jeweils 4,8 Angström, das Molekularmännchen hat eine Größe von rund 50 Angström (5 Millionstelmillimeter). Mehr als 20000 solcher Männchen müssten aneinander gereiht werden, um das Querschnittsmaß eines menschlichen Haares zu erreichen.

Monomere

(griech. mono "ein, einzel" meros "Teil") sind niedermolekulare, reaktionsfähige Moleküle, die sich zu molekularen Ketten oder Netzen, zu unverzweigten oder verzweigten Polymeren, zusammenschließen können

Moores Gesetz

Streng genommen ist es kein Gesetz, sondern ein Erfahrungswert, der allerdings so gut abgesichert ist, dass man ihm eine gewisse Gesetzmäßigkeit nicht absprechen kann. Moore hatte vor 40 Jahren einen Artikel im Electronics Magazine veröffentlicht, in dem er erstmals die Prognose äußerte, dass sich die Transistorzahl pro Chip jährlich verdoppeln werde. Später korrigierte er die Vorhersage auf alle 18 Monate. Gordon Moore bemerkte 1965, also nur wenige Jahre nach der Erfindung der Integrierten Schaltung (IC) im September 1958, dass die Dichte der Transistoren auf einer Integrierten Schaltung mit der Zeit exponentiell ansteigt. Als Folge daraus wächst auch die Rechenleistung der Computer exponentiell. Die Presse, die diese Prognose aufgriff, nannte diese Regelmäßigkeit dann das Mooresche Gesetz.

N

Naniten

Unter Naniten, die einen Gedächtnisspeicher von einem Gigabyte besitzen, verstehen wir submikroskopische Miniroboter, die einerseits entwickelt wurden, um bei medizinischen Operationen in der Blutbahn von Patienten intrazellulare Operationen durchzuführen, individuelle Krankheitszellen wie Viren zu erkennen und zu vernichten oder auch geronnenes Material in den Blutgefäßen zu entfernen.

Nanobereich

Forscher konnten mit neuen Untersuchungsmethoden wie dem Raster-Tunnelmikroskop die Materie in allerkleinsten, atomaren Abmessungen betrachten und bearbeiten. Ein Nanometer ist der millionste Teil eines Millimeters, was einer Kette von fünf bis 10 Atomen entspricht.

Nanodots

Winzige kugelförmige Partikel aus anorganischen Materialien (z.B. Silizium) die <100 Atome sind.

Nanometer

ein milliardstel Meter oder 10^{-9} Meter

Nanopartikel

kleinste Festkörper, die aus einigen hundert bis mehreren zehntausend Atomen bestehen.

Nanotechnologie

(griech. nãnos = Zwerg) ist ein Sammelbegriff für eine weite Palette von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen im Größenbereich der Nanometerskala befassen. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter (10^{-9} m) und bezeichnet einen Grenzbereich, in dem die Oberflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften der Materialien eine immer größere Rolle spielen und zunehmend quantenphysikalische Effekte berücksichtigt werden müssen. Es ist eine konsequente Fortsetzung und Erweiterung der Mikrotechnik mit meist völlig unkonventionellen neuen Ansätzen. Die Nanotechnologie beschäftigt sich damit, Werkstoffe im Nanometer-Bereich, also im Bereich von ein bis zehn Atom-Durchmessern, zu formen und zu bearbeiten. Dafür werden auch gleichzeitig die nötigen Werkzeuge erforscht, um auf einzelne Atome und Moleküle direkt zugreifen und diese manipulieren zu können.

Nanoröhre (Carbon Nanotubes, CNT)

Kohlenstoffmolekül, das die Form einer langen Röhre hat. Der Durchmesser beträgt einen bis mehrere Nanometer. In mehrwandigen Nanotubes sind mehrere Röhren ineinander geschachtelt.

Nanotubes

Nanotubes oder Kohlenstoff-Nanotubes bestehen aus einer oder mehreren Graphitschichten, die nahtlos zu einem Zylinder gerollt sind und offene oder geschlossene Enden besitzen können. Kohlenstoff-Nanotubes gehören zu den Fullerenen und weisen einen Durchmesser von nur wenigen Nanometern auf. Im Falle einer einzigen Graphitschicht spricht man von single walled nanotubes (SWNT), bei mehreren konzentrisch angeordneten Zylindern von multiwalled nanotubes (MWNT). Nanotubes

können makroskopische Längen von bis zu einem Millimeter erreichen und weisen damit ein extrem großes Aspektverhältnis auf. (Länge zu Breite).

Nichtflüchtiger Datenspeicher

Nichtflüchtige Datenspeicher (Non Volatile Memory, NVM) garantieren, dass gespeicherte Informationen auch ohne Stromversorgung erhalten bleiben.

Nucleinsäuren

sehr komplexe Moleküle in lebenden Zellen und Viren. Sie sind nach dem Zellkern (Nucleus) benannt, in dem sie zuerst nachgewiesen wurden. Einige Nucleinsäuren befinden sich aber auch im Cytoplasma der Zelle. Nucleinsäuren haben mindestens zwei Funktionen: Zum einen codieren sie die Erbinformation und geben sie durch Keimzellen an die nächste Generation weiter. Zum anderen dienen sie als Mittler zwischen Zellkern und Organellen im Cytoplasma, an denen die Proteinsynthese stattfindet. Wie die Nucleinsäuren diese komplexen Funktionen bewerkstelligen, ist momentan eines der intensivsten Forschungsgebiete. Nucleinsäuren haben sich als grundlegende Moleküle des ersten Lebens vor wahrscheinlich drei Milliarden Jahren entwickelt. Die Entstehung des genetischen Codes, den sie tragen, fällt wahrscheinlich zeitlich eng zusammen mit der Entstehung des Lebens. Biochemiker konnten den genetischen Code entziffern, der die Information für den Bau von Proteinen liefert.
Es gibt zwei Sorten von Nucleinsäuren: die Desoxyribonucleinsäure (DNA oder DNS) und die Ribonucleinsäure (RNA oder RNS). Das Gerüst beider Moleküle hat die Form einer Doppelhelix. Ihr Molekulargewicht geht in die Millionen. An dieses Gerüst sind vier verschiedene Molekülsorten (Basen) in einer ganz bestimmten Folge gekoppelt (Aminosäuren). Der Code einer Nucleinsäure ist als Reihenfolge dieser Basen verschlüsselt. Über diesen Code wird sowohl die Zellvermehrung als auch die Proteinsynthese gesteuert.
DNA kommt in allen lebenden Zellen vor. In Bakterien kann die DNA aus nur einem Strang bestehen; sie enthält aber genau wie bei jeder höheren Zelle alle Informationen, um sich selbst reproduzieren zu können. Bei allen höheren Zellen (das sind Zellen, die einen Zellkern besitzen) ist die DNA in einer speziellen Struktur eingelagert, die sich im mikroskopischen Präparat anfärben lässt; daher nennt man diese Struktur Chromosom (färbbares Körperchen). Bakterien und Viren haben keinen Zellkern. Dort liegt die DNA meist als Ringmolekül vor. Einige Viren (Retroviren) besitzen nur RNA. Da Viren keinen eigenen Stoffwechsel aufweisen und sich nicht eigenständig vermehren können, rechnet man sie nicht zu den Lebewesen.

O

Oberflächenplasmonen-Resonanz

ist eine Methode zur Untersuchung von Prozessen an Metall/Luft- bzw. Metall/Flüssigkeit-Grenzflächen. Erfasst werden Änderungen des Brechungsindex bis zu einer Tiefe von einigen 100 nm über dem Metallfilm. Mit Hilfe einer Erkennungsstruktur kann so ein Analyt nachgewiesen werden.

Prinzip

Totalreflexion von parallel zur Einfallsebene polarisiertem Licht an einer auf ein Prisma aufgebrachten Metallschicht.

Anregung eines Plasmons auf der dem Prisma abgewandten Metalloberfläche.

Wellenlängen- oder winkelabhängige Detektion der Intensität des reflektierten Lichtes.

Kollektive Anregungen von freien Elektronen in Metallen zu Plasmaschwingungen gegen die Ionenrümpfe werden in der Festkörperphysik als Plasmonen bezeichnet. Oberflächenplasmonen sind Oberflächenwellen (evaneszente Wellen), bei denen die longitudinalen elektronischen Schwingungen parallel zur Oberfläche eines Metalls angeregt werden. Die resultierende Feldstärke ist im Raum über der metallischen Oberfläche verstärkt

Plasmonen sind Dichteschwankungen von Ladungsträgern in Halbleitern oder Metallen und werden quantenmechanisch als Quasiteilchen behandelt. Der Begriff ist eine gebräuchliche Abkürzung für Plasmaschwingungsquant. Was das Photon für elektromagnetische Wellen darstellt, ist das Plasmon für Schwingungen im Fermigas von Metallen. Man unterscheidet:

- Oberflächenplasmon
- Volumenplasmon
- Plasmon-Polariton

Oligonucleotide

kurze einsträngige Nucleinsäure-Moleküle, die aus wenigen bis zu einigen hundert Nucleotiden aufgebaut sind. Sie dienen als Primer z.B. bei der Polymerase-Kettenreaktion und als Gensonden.

Onkotischer Druck

Druckdifferenz zwischen zwei - durch eine Membran voneinander getrennten - Kompartimenten. Die Membran ist dabei für Wasser und Ionen, nicht aber für Proteine (Kolloide) durchlässig. Der onkotische Druck wird hervorgerufen durch den unterschiedlichen Gehalt an Kolloiden (kolloidosmotischer Druck). Einheit: Pascal (Pa). Nicht diffundierbare Proteine bewirken eine Diffusion von Flüssigkeit in das kolloidreichere Kompartiment bis zum Ausgleich der Konzentration gelöster Teilchen oder bis zum Ausgleich des onkotischen und des auswärtsgerichteten hydrostatischen Drucks. Bsp.: An Kapillaren übersteigt der hydrostatische Druck im Gefäß (Blutdruck) den Gewebsdruck außerhalb des Gefäßes. Daher werden Wasser und darin gelöste, durch die Kapillarwände diffundierbare Teilchen aus dem Blut in den Extrazellularraum abgepreßt und ein überschießender

Anteil als Lymphe dem Kreislaufsystem wieder zugeführt. Die Flüssigkeit wird allerdings nicht vollständig abgepreßt, da die in der Kapillare verbleibenden, nicht diffundierbaren Proteine einen onkotisch bedingten "Sog" aufbauen, der dem hydrostatischen Druck entgegenwirkt und so Wasser zurückhält. Bei einem überhöhten hydrostatischen Druck gelangt zuviel Wasser in den Extrazellularraum. Bei Proteinmangel wird zuwenig Wasser im Gefäßsystem zurückgehalten. In beiden Fällen kommt es zu Ödembildung.

P

PEDOT

Poly(3,4-ethylenedioxythiopene).

Peltierelement

Peltier Kühlsystem oder auch thermoelektrisches Kühlsystem.
Der Peltier-Effekt, nach dem frz. Physiker J.C.A. Peltier (1785 - 1845) benannter thermoelektrischer Effekt:
Im Jahr 1834 beobachtete Peltier, das die von Gleichstrom durchflossene Berührungsstelle zweier unterschiedlicher Metalle sich je nach Richtung des Stromes entweder erwärmt oder abkühlt. Vor allem die letztgenannte Erscheinung ist recht bemerkenswert, denn auf elektrischem Weg Wärme zu erzeugen, war damals schon hinreichend bekannt, dass man jedoch auch einem Körper Wärme entziehen kann, war grundsätzlich neu. Weitere Untersuchungen ergaben, dass die mit Gleichstrom erzielbare Temperatur eine Materialfrage ist. Lange Zeit galt eine Werkstoffpaarung Wismut-Antimon als diejenige Kombination, welche bei einem gegebenen Strom den weitaus grössten Effekt zeigt. Dennoch war auch die hiermit erzielbare Temperaturerniedrigung so gering, dass an eine praktische Nutzung des Peltier-Effektes lange Zeit überhaupt nicht gedacht werden konnte. Seine Nutzung konnte erst vor etwa 40 Jahren durch die Entwicklung geeigneter Halbleiterwerkstoffe und eine befriedigende Lösung des Kontaktierungsproblems ermöglicht werden.

Quelle: http://www.12v-kuehlgeraete.de/Peltierprinzip.htm

Peptid

Kürzere Kette von Aminosäuren.

Peptid-Nukleinsäure (PNA, peptide nucleic acid)

ist ein organisches Polymer, das chemische Gemeinsamkeiten mit RNA und DNA besitzt. Unterschiede bestehen im Grundgerüst, das bei RNA und DNA aus Zuckermolekülen besteht, während die PNA ein peptidisches Rückgrat besitzt. An dieses Grundgerüst sind die vier kanonischen Basen (Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin) angebunden.

Pharmaka Screening

- Entwicklung von Zellmodellen für mit minutenschnellem High-Throughout-Screening-Sensor (Cholinesterase-Inhibitoren, Anti-Enzündungspräparate)
- Testung und Entwicklung von Gentherapien im Bereich Morbus Alzheimer, Morbus Parkinson, Neurotrauma
- Testung von Gentherapien
- Screening von Pharmaka (Plaquebildung - Inhibition)

Von „Reihenuntersuchung“ (screening) leitet sich auch der Begriff "Screening Unit" ab.

Nur durch die effiziente und erfolgreiche Wirkstoffsuche (Screening) ist es möglich, neue Wirkstoffe am Markt zu platzieren und so langfristiges Wachstum zu sichern. Als Wirkstoffe kommen prinzipiell chemisch synthetisierte Substanzen oder Naturstoffe bzw. aus Naturstoffen abgeleitete Verbindungen aus mikrobiellen und pflanzlichen Ressourcen in Frage. Einen besonderen Stellenwert besitzen hierbei die Naturstoffe wegen ihrer Komplexität, die nicht oder nur schwer durch chemische Synthese erreichbar ist. Darum wird weltweit intensiv nach neuen Naturstoffen aus den verschiedensten biologischen Quellen gesucht. Dieses Bemühen ist jedoch zeit- und kostenintensiv.

Photon

"Elementarteilchen" des Lichts und aller anderen elektromagnetischen Wellen. Es bewegt sich immer mit Lichtgeschwindigkeit, hat keine Ruhemasse

Photonischer Kristall

Photonische Kristalle bestehen aus einer regelmäßigen Gitterstruktur eines Materials, das in ein anderes Material mit stark unterschiedlichen Lichtbrechungseigenschaften eingebettet ist. Photonische Kristalle verbieten die Lichtausbreitung für bestimmte Lichtwellenlängen (Bandlücke). Diese Eigenschaft ähnelt der von Halbleitern, wie sie in Computerchips eingesetzt werden. In Halbleitern sind Elektronen ebenfalls durch eine Bandlücke in ihrer Bewegung eingeschränkt. Dies macht aber gerade das enorme Potenzial der Halbleiter für die Elektronik aus

Photo-Lithographie

Die Photo-Lithographie ist ein lithographisches Reproduktionsverfahren bei dem mittels Belichtung Muster auf Materialien aufgebracht werden. Sie ist in der Drucktechnik und der Halbleitertechnik von sehr großer Bedeutung

Polymer

Ein Polymer ist eine chemische Verbindung, die aus einer Abfolge von einfachen Grundbausteinen (Monomeren) besteht. Die meisten Kunststoffe sind Polymere

Polyester- Folie (PET)

Hochwertige synthetische Folie mit sehr guter Beständigkeit gegen Lösungsmittel, Öle und viele Chemikalien. Im allgemeinen transparent, kann aber eingefärbt oder silber- bzw. goldfarben aluminiumbedampft werden.

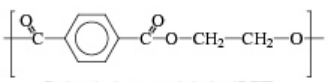
Polymerase-Kettenreaktion (Polymerase Chain Reaction, PCR)

ist eine Methode, um die Erbsubstanz DNA zu vervielfältigen, ohne einen lebenden Organismus, wie z. B. das Bakterium Escherichia coli oder die Bäckerhefe Saccharomyces cerevisiae zu benutzen. Die PCR wird in biologischen und medizinischen Laboratorien für eine Vielzahl verschiedener Aufgaben verwendet, zum Beispiel für die Erkennung von Erbkrankheiten, für das Erstellen und Überprüfen genetischer Fingerabdrücke, für das Klonieren von Genen und für Vaterschaftstests

Poly(para-phenylenvinylen) - PPV

werden gewöhnlich als Polymer-Farbstoffe in OLEDs verwendet. Indium-Zinn-Oxid, kurz ITO, ist eine gewöhnliche Anode. Andere Materialien werden zwischen Kathode, Anode und die Farbstoffschicht hinzugefügt, um die Effizienz zu erhöhen.

Polyethylenterephthalat



Polyethylenterephthalat (PET)

PET ist ein durch Polykondensation hergestellter thermoplastischer Kunststoff aus der Familie der Polyester. Die Monomere, aus denen PET hergestellt wird, sind Terephthalsäure (1,4-Benzoldicarbonsäure) und Ethylenglykol (1,2-Dihydroxyethan).

PET wird in vielen Formen verarbeitet und vielfältig eingesetzt; zu den bekanntesten Verwendungszwecken zählt die Herstellung von Kunststoffflaschen aller Art und die Verarbeitung zu Textilfasern. Auch zur Herstellung von Filmmaterial, wie es im Kino verwendet wird, wird PET verwendet. Weiterhin findet bevorzugt bei feinmechanischen Bauteilen im Gerätebau Anwendung und stellt eine Alternative zum Polyacetal (POM) dar, denn:

- PET hat eine sehr hohe Maßbeständigkeit, deutlich besser als die von POM.
- PET bietet einen niedrigen Gleitwiderstand.
- PET besitzt eine hohe Festigkeit und Steifigkeit (jedoch schlechter als POM).
- PET ist sehr abriebfest.
- PET wird zu feinmechanischen Zahnrädern, Steuerscheiben, Nocken, Führungen oder Spulenkörpern verarbeitet.
- PET ist polar gebaut, dadurch entstehen starke zwischenmolekulare Kräfte. Das Molekül ist zudem linear aufgebaut ohne Vernetzungen. Beides sind Voraussetzungen für teilkristalline Bereiche und Fasern. Durch diese Bereiche ergibt sich auch eine hohe Bruchfestigkeit und Formbeständigkeit bei einer Temperatur unter 80°C. Die Schlagzähigkeit ist jedoch gering, das Gleit- und Verschleißverhalten gut. Als Textilfaser (Polyester) wird PET auch wegen weiterer nützlicher Eigenschaften eingesetzt. Es ist knitterfrei, reißfest, witterungsbeständig und nimmt nur sehr wenig Wasser auf.

Präzession

Präzession ist allgemein die Lageveränderung der Achse eines rotierenden Kreisels, wenn äußere Kräfte auf ihn einwirken.

Prionen

Proteinaceous Infectious Particle) handelt es sich um infektiöse Eiweiße, die für Krankheiten wie Creutzfeldt-Jakob-Krankheit (CJD) beim Menschen oder Rinderwahnsinn (BSE) beim Rind verantwortlich sind. Sie sind grundsätzlich verschieden von anderen Krankheitserregern wie Viren oder Bakterien, da sie kein eigenes Erbmaterial enthalten.

Proteasen

[griechisch, *Peptidasen*]

Enzyme, die Eiweiße und Peptide abbauen, indem sie die Peptidbindung aufspalten:

$$\ldots NH\text{-}CO \ldots + H_2O \rightarrow NH_2 + COOH \ldots.$$

Bekannte Proteasen sind das in der Magenschleimhaut gebildete Pepsin sowie das Trypsin und das Chymotrypsin, die beide aus der Bauchspeicheldrüse stammen.

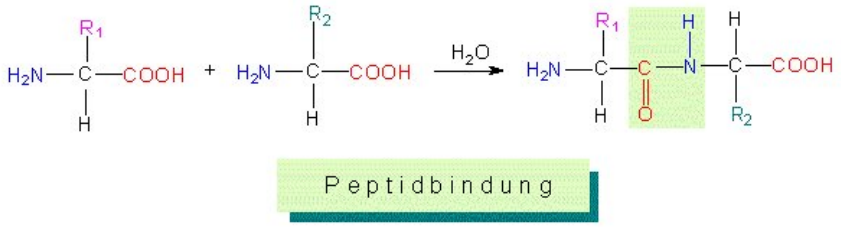
Protein

Der Begriff Protein wurde 1838 von dem schwedischen Chemiker Jöns Jakob Berzelius geprägt (griechisch protos: erstrangig).

Proteine, auch Eiweiße genannt, sind hochpolymere Verbindungen, die neben Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff auch manchmal Schwefel enthalten. Mit fast 50 Prozent bilden sie einerseits den Hauptbestandteil einer jeden Zelle, andererseits erfüllen sie eine Vielzahl von lebensnotwendigen Funktionen in jedem Lebewesen.

Sie zeichnen sich durch eine enorme Vielfalt in Struktur und Funktionen aus. Der menschliche Organismus enthält Tausende von Proteinen, welche die verschiedensten Aufgaben erfüllen. Proteine bestimmen u.a. die Form und Struktur von Zellen, dienen der molekularen Erkennung, übernehmen Transportfunktionen, sorgen für den kolloidosmotischen Druck und steuern als Enzyme den Stoffwechsel. Proteine werden von den Ribosomen durch Verknüpfung von Aminosäuren synthetisiert.

Die Bindung zwischen den Aminosäuren wird als Peptidbindung bezeichnet.



Verknüpfung von Aminosäuren durch Peptidbindung

Bei der Peptidbindung handelt es sich um eine Amidbindung zwischen dem Aminoterminus (-NH_2) der einen Aminosäure und dem Carboxyterminus (-COOH) der nächsten Aminosäure [19].

Die Anzahl und die Reihenfolge, in der die Aminosäuren aufeinander folgen (Aminosäuresequenz), ist in der Erbsubstanz festgelegt.

Am Aufbau von Proteinen sind regelmäßig unterschiedliche Kombinationen von 20 verschiedenen Aminosäuren beteiligt. Diese verschiedenen Kombinationen ergeben Eiweißkörper, die so unterschiedlich aufgebaut sind wie das Hämoglobin, der rote Blutfarbstoff, und das Keratin der Haare.

Die Kettenlänge ist außerordentlich variabel, sie reicht von drei bis zu mehr als 1000 Aminosäuren. Durch anschließende Faltung der Aminosäurenketten entstehen zum Teil sehr komplizierte dreidimensionale Strukturen.

Man unterscheidet zwei Hauptgruppen von Proteinen:

- die **globulären Proteine**, deren Tertiär- oder Quartärstruktur annähernd kugel- oder birnenförmig aussieht und die meist in Wasser oder Salzlösungen gut löslich sind (Beispiel: das Protein des Eiklars, *Ov-Albumin* genannt)
- die **Skleroproteine** (fibrillären Proteine), die eine fadenförmige oder faserige Struktur besitzen, meist unlöslich sind und zu den Stütz- und Gerüstsubstanzen gehören (Beispiel: die Keratine in den Haaren und Fingernägeln).

Protein-Ligand-Interaktionen

Die Untersuchung von Bindungsereignissen zwischen Proteinen und Liganden ist ein wichtiges Arbeitsgebiet der Biochemie. Solche Interaktionen sind in allen Bereichen der modernen biochemischen Forschung von besonderem Interesse. So sind Protein-Ligand-Wechselwirkungen wichtige Prozesse im Rahmen von Signaltransduktion, Proteinsynthese und -faltung sowie der Immunreaktion. Unter den etablierten Methoden zur Interaktionsanalyse haben elektrophoretische Verfahren als Methoden der klassischen biochemischen Analyse eine vielfältige Bedeutung. In der letzten Zeit hat die Kapillarelektrophorese (CE) als Weiterentwicklung von Flachbettelektrophorese-Methoden an Interesse gewonnen. Neben der hohen Trennleistung zeichnet sich die CE auf Grund der großen Variabilität der Trennbedingungen durch eine hervorragende Adaptierbarkeit an vielfältige Analysenprobleme aus. Die Affinitätskapillarelektrophorese (ACE) wurde als Methode zur Interaktionsanalyse bei minimiertem Materialaufwand entwickelt.

Proteom-Analyse

Unter Proteom-Analyse versteht man die Erforschung des gesamten Proteinprofils einer Zelle. Die Proteom-Analyse kann man in zwei Bereiche unterteilen, in die funktionelle und die klassische Proteom-Analyse.

Für die medizinische Diagnostik sind Proteom-Analysen erst sinnvoll, wenn man die Proteine mehrerer Zellen miteinander vergleicht – zum Beispiel jener von verschiedenen Spendern. Dazu müsste es gelingen, die Unterschiede von möglichst vielen Proteinen gleichzeitig zu erfassen. In bisherigen Versuchen sind auf so genannten „Protein-Chips“ erst 20 bis 30 parallele Tests möglich. Aber auch diese eher bescheidene Zahl könnte für bestimmte Anwendungen interessant werden, zum Beispiel in der Allergiediagnostik.

Q

QuBit

Jeder Computer speichert seine Daten in der kleinsten Einheit, dem sogenannten Bit. Dieses kann entweder den Zustand 0 oder 1 annehmen. Ein Quantenbit („Qubit“) kann sich aber, wenn es sich in einer Superposition befindet, in den beiden Zuständen gleichzeitig befinden. Es ist ein beliebig manipulierbares Zweizustands-Quantensystem.

Man könnte sich z.B. als Qubit einen Atomkern vorstellen, dessen Spin +1/2 und -1/2 die Zustände 1 und 0 darstellen. Eine Superposition wäre dann quasi +-1/2. Durch eine Messung nimmt das Qubit dann einen klassischen Wert an, also +1/2 oder -1/2.

Prinzipiell kann jedes quantenmechanische Zweizustandssystem als Qubit verwendet werden. Beispiele sind:

- Spin-1/2-Teilchen (|0> = |Spin up>, |1> = |Spin down> in einer ausgewählten Richtung)
- Photonen (z.B. |0> = |horizontal polarisiert>, |1> = |vertikal polarisiert>)
- Grundzustand (n=1) oder angeregter Zustand (n=2) eines Elektrons im Wasserstoffatom
- Grundzustand (|0> = |Spin up>) und angeregter Zustand (|1> = |Spin down>) eines Ions in einer Falle

In der Praxis ist jedoch auch wichtig, dass die Systeme gut manipulierbar sind. Photonen eignen sich z.B. sehr gut zur Übertragung von Qubits (weshalb sie in der Quantenkryptographie und für die Quantenteleportation gerne benutzt werden), aber nicht besonders gut zur Informationsverarbeitung (Quantencomputer). Für solche Zwecke werden z.B. Schwingungszustände in Ionenfallen oder Zustände in Quantenpunkten benutzt.

Quant

Das Wort Quant bezeichnet, abgeleitet aus dem Wort Quantum (von lat. quantus 'wie viel'), eine kleine Menge. In der Physik wird dieser Terminus verwendet, wenn eine makroskopisch kontinuierlich erscheinende physikalische Größe nur in bestimmten, nicht weiter unterteilbaren Mengen auftritt. Es existieren etwa Größen, die nur in ganzzahligen Vielfachen einer bestimmten, kleinsten Menge auftreten. Zugleich wird durch den Begriff Quant der Teilchencharakter der betrachteten Größe impliziert.

Quantencomputer

David Deutsch, 1953 in Haifa-Israel geboren, studierte Mathematik und Physik in Oxford und Austin und ist derzeit Inhaber eines Lehrstuhls an der Universität Oxford. Er veröffentlichte 1985 einen Aufsatz, der die Vision eines Computers beschrieb, der nach den Gesetzen der Quantenphysik arbeitet. Er erhielt den Dirac-Preis 1998 für seine Arbeiten zum Quantencomputer, u. a. wie diese Maschinen durch Quantenlogikgatter realisiert werden können. Zusammen mit Roger Penrose und John Wheeler veröffentlichte er darüber mehrere Arbeiten.

David Deutsch lieferte bahnbrechende theoretische Arbeiten zur Quanteninformationstheorie und entwickelte das Konzept des Quantencomputers (QC). Ebenfalls von ihm stammt der erste Algorithmus für den Quantencomputer, der dem klassischen Algorithmus weit überlegen ist.

Nehmen wir an, wir hätten zwei Versionen einer Frage (z.B. eine Rechnung mit unterschiedlichen Variablen), dann müsste ein herkömmlicher Turing-Computer zuerst die erste Frage, dann die zweite durcharbeiten. Bei einem Quantencomputer jedoch könnten die beiden Fragen als Überlagerung von Zuständen zusammengefasst und gleichzeitig eingegeben werden. Die Maschine selbst würde dann für jede Frage in einen anderen Zustand übergehen und sie gleichzeitig beantworten. Ein Quantencomputer arbeitet also wie ein gigantischer Parallelrechner.

Für die Implementierung eines Quantencomputers ist es notwendig, ein physikalisches System

zu präparieren, das es erlaubt, Quantenzustände verlässlich zu speichern sowie mit Quantenoperationen gezielt und präzise manipulieren zu können. In der Praxis gibt es bisher nur wenige Kandidaten, die diese Voraussetzungen erfüllen. Zur Realisierung eines Quantencomputers muss eine Reihe von Bedingungen gewährleistet sein:

- Identifikation einzelner Qubits,
- Adressierbarkeit und Auslesen der Bits,
- Implementierung von Quantengattern,
- schwache Dekohärenz,
- effiziente Fehlerkorrekturen,
- Skalierbarkeit, d.h. dass sich die Zahl der Qubits mit wachsenden Problemen auch beliebig vergrößern lässt

Das Hauptproblem der experimentellen Realisierung ist die Forderung nach guter Manipulierbarkeit

der Information einerseits und möglichst guter Abschirmung störender Einflüsse andererseits.

Dazu müssen die Qubits für die Informationsverarbeitung selektiv transformiert oder ausgelesen werden (Ein-Qubitoperationen) und Idealerweise auch zwei beliebige Qubits miteinander verknüpft werden können (Zwei-Qubitoperationen). Des weiteren soll der Kohärenzverlust minimiert werden, so dass die Qubitzustände möglichst lange ihre quantenmechanische Verschränkung beibehalten. Jede unkontrollierte Wechselwirkung erzeugt eine Verschränkung des Quantencomputers mit der Umgebung, welche die Zustände so beeinflusst, dass die Voraussetzungen zur Ausführung von Quantenrechnungen nicht mehr erfüllt sind. Diese ungewollten Effekte fasst man unter den Begriff der Dekohärenz zusammen. Kurz gesagt erfordert die Manipulierbarkeit der Information einen gewissen Einfluss der Umgebung, die Speicherung der Information jedoch ein möglichst von der Umwelt isoliertes System. Benötigt wird infolgedessen ein gezielt an- und ausschaltbarer Einfluss der Umgebung.

Für die Realisation eines Quantencomputers gibt es vier Ansätze:

- Ionenfalle
- Kernspinresonanz
- Optische Gitter

- Quantenpunkte

Zwei davon wollen wir hier kurz vorstellen.

Ionenfalle

Eines der vielversprechendsten Konzepte zur praktischen Realisierung eines Quantencomputers ist das der Ionenfalle. In einer solchen „Falle“ werden Ionen durch geschickt angeordnete elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder an ihrem Ort festgehalten. Für einen praktisch anwendbaren QC müssen die Geometrie der Falle und der eingefangenen elektrischen und elektromagnetischen Felder so beschaffen sein, dass die Möglichkeit besteht, mehrere Ionen in symmetrischer Weise anzuordnen. Diese Eigenschaften besitzen lineare Ionenfallen. Die ersten erfolgreichen Versuche zur Präparation verschränkter ionischer Zustände bis zu 3 Qubits wurden mit elliptischen Ionenfallen durchgeführt.

Die zur Anwendung kommenden Ionen müssen bestimmten Grundanforderungen hinsichtlich der praktischen Anwendung für unterschiedliche Kühltechniken, wie auch im Hinblick auf den laseroptischen Präparations- und Ausleseprozess der für die Quantenrechnung in Frage kommenden Zustände erfüllen. Zusätzlich müssen die quantenmechanischen Zustände auf deren Basis die Quantenrechnungen durchgeführt werden, eine genügend hohe Lebensdauer aufweisen, damit die Kohärenz während der Dauer der Rechnung erhalten bleibt. Hinsichtlich der Lebensdauer können z.B. Hg^+, Ba^+, Ca^+ Ionen verwendet werden.

Dagegen ist die klassische Paul-Falle mit Ringelektroden für die Speicherung von mehreren Ionen kaum geeignet, da sich die Ionen aufgrund ihrer elektrostatischen Abstoßung an Orten befinden, an denen sie durch das dort existierende Wechselfeld aufgeheizt werden.

Eine wesentliche Vorrausetzung ist, dass die Ionen, die das Herz des QC bilden, vollständig von der Umwelt abgeschirmt sind. Es wird daher für diese Falle ein Ultrahochvakuum benötigt, die Ionen werden auf ca. null Kelvin abgekühlt. Diese Abkühlung ist z.B. mit einem schmalbandigen Laser bei 729 nm Wellenlänge möglich.

Für die Adressierung der Ionen wurde neben der räumlichen Fokussierung eines Laserstrahls bereits eine Vielzahl von Alternativmethoden (z.B. quantenoptische Systeme) vorgeschlagen, von denen sich einige als besonders geeignet für den Umgang mit Ionenpaaren erwiesen haben. Hingegen ist die Anwendung auf Register von Ionenpaaren aus zahlreichen Ionen noch mit erheblichen Problemen verbunden.

Jedes Ion in der Falle entspricht zunächst einem Qubit, bestehend aus einem elektronischem grund- und einem energetisch höher liegenden Zustand, sowie der Superposition dieser Zustände.

Es wird nun noch eine Art von Datenbus benötigt, der die Verschränkung, d.h. den quantenmechanischen Datenaustausch der Ionen untereinander, ermöglicht. Hierzu nutzt man den kollektiven Vibrationsgrundzustand der eingefangenen Ionen. Zum Kollektiv wird die Vibration jedes Ions aufgrund der elektrostatischen Abstoßung zwischen den Ionen, die dazu führt, dass diese sich nicht unabhängig im Raum bewegen können.

Zum Auslesen des Endzustandes und damit zum Ergebnis einer Rechnung zu gelangen bedient man sich einer Streumethode, der sogenannten Raman-Steuung.

Die wesentlichste fundamentale Einschränkung beim Versuch einen Quantencomputer herzustellen, ist die Dekohärenz. Sogar wenn alle störenden äußeren Einflüsse, wie die Fluktuation im eingefangenen Feld sowie unstabile Laser erfolgreich abgeschirmt wurden, kann ein quantenmechanischer Zustand immer noch durch spontane Übergänge zerstört werden.

Die Dekohärenzzeiten der bisherigen Systeme liegen derzeit im Bereich von Millisekunden. Dies ist zur Durchführung von einfachen Rechenoperationen, basierend auf der Verwendung von weniger als 10 Qubits, ausreichend. Um jedoch in ernste Konkurrenz zu klassischen Computern treten zu können, sind wenigstens 100 Qubits notwendig.

Einer Wissenschaftlergruppe aus Innsbruck ist mit der Erzeugung eines „**Quantenbytes**“ ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum Quantencomputer gelungen. Über diesen jüngsten Erfolg des Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften sowie des Instituts für Experimentalphysik und des Instituts für Theoretische Physik der Universität Innsbruck berichtet das Wissenschaftsmagazin Nature in der Ausgabe vom 01.12.2005.

An Konzepten für Quantencomputer, deren Realisierung bisher noch in den Kinderschuhen steckt, wird weltweit eifrig geforscht. In enger Zusammenarbeit mit den Theoretikern Otfried Gühne und Wolfgang Dür von der Universität Innsbruck sowie den IQOQI-Wissenschaftler Rainer Blatt und Hartmut Häffner haben sie gemeinsam gezeigt, dass sie vier, fünf, sechs, sieben oder acht Ionen auf kontrollierte Art und Weise verschränken können. Dazu fangen sie Kalziumionen mit elektromagnetischen Feldern in einer Ionenfalle ein, ordnen sie in einer Reihe nebeneinander an und verschränken sie mit ausgeklügelter Lasertechnologie in so genannten W-Zuständen. Im Fall des Quantenbytes mit acht Ionen erreichten sie damit einen Rechenraum aus 65.536 zum Großteil unabhängigen Elementen.

Einem Forscherteam aus dem IBM „Almaden Research Center“ist es gelungen, die bisher komplexeste Rechenaufgabe mit einem speziellen Quantencomputer auszuführen. Dafür lösten sie mit sieben Qubits eine stark vereinfachte mathematische Aufgabe, die den Grundstock moderner Verschlüsselungsmethoden darstellt.

Kernspinresonanz

Zu den jüngsten Techniken, die eine mögliche Realisierung eines Quantencomputers versprechen, zählt die Kernspinresonanz (NMR, nuclear magnetic resonance).

Diese Methode beruht auf der Kernspinresonanz, die in der Chemie schon lange bekannt ist und in der Medizin z.B. für die Tomographie angewandt wird.

Im Jahre 1996 entstand erstmals die Idee, Kernspinresonanz zur Realisierung elementarer Rechenoperationen mittels eines Quantencomputers heranzuziehen. Der Unterschied zur „Ionenfalle“ besteht bei dieser Technik darin, dass nicht ein einzelnes Quantengatter manipuliert wird, sondern jedes Molekül einer flüssigen Probe als ein solches Register fungiert.

Man wählt hier eine geeignete Flüssigkeit aus, deren Moleküle aus Atomen mit den gewünschten

Kernspins bestehen. Da Moleküle an sich nicht geändert werden können, stellt jedes Molekül

einen einzelnen Quantencomputer dar, der mit genau so vielen Qubits arbeitet, wie das

Molekül Atome besitzt.

Bei der Nutzung der NMR für eine Quantenrechnung bedient man sich der quantisierten Energiezustände der Kernspins im externen Magnetfeld und der Superposition dieser Zustände. Zwei magnetische Niveaus eines Kerns definieren in diesem Fall ein Qubit. Eine Verschränkung mehrerer Qubits erfolgt innerhalb eines Moleküls über eine direkte magnetische Wechselwirkung zwischen den Atomkernen dieses Moleküls. Die Anzahl der Qubits für den Quantenprozessor wird durch die Zahl der NMR-tauglichen Atome z.B. im Trichloräthylen-Molekül festgelegt.

Durch die unterschiedliche Position der Atome im Molekül und die daraus resultierende unterschiedliche Beeinflussung der Kernspins durch die Umgebung, können über eine feinabgestimmte Radiostrahlung gezielt bestimmte Atome im Molekül adressiert und somit für eine Quantenrechnung genutzt werden. Die Frequenzabstimmung ersetzt hier die räumliche Fokussierung der eingestrahlten Wellen. Im Unterschied zur Ionenfalle läuft der Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Kernspins im Molekül über eine direkte Wechselwirkung der Spins; hier wird kein zusätzlicher quantenmechanischer Zustand als Datenbus benötigt.

Für das Auslesen misst man das Absorptionsverhalten der Moleküle, wodurch man

Rückschlüsse auf die Ausrichtung der Kernspins ziehen kann und damit das Ergebnis der

Rechnung erhält.

Quantencomputer, die auf dieser Methode basieren, haben drei Vorteile:

- sie arbeiten bei Normaltemperatur und brauchen damit keine komplizierte Laserkühlung, wie das bei der Ionenfalle der Fall ist
- es steht aus der Medizin bereits eine ausgereifte Technik zur Verfügung, welche nur noch weiterentwickelt werden muss
- es lassen sich Quantencomputer mit sehr vielen Qubits realisieren

Ausblick

Wohin die Reise geht, kann niemand sagen - die Meinungen sind geteilt. Es ist nicht klar, ob es jemals einen Quantencomputer mit einer großen Anzahl von Qubits geben wird.

Klar ist aber, dass die ersten Quantencomputer natürlich nicht unsere PCs ersetzen werden, sondern für spezielle Anwendungen in der Wissenschaft, Forschung und Kryptologie eingesetzt werden. Die Zukunft ist aber schwer vorherzusagen: Wer hätte schon vor 50 Jahren an die Omnipräsenz des Computers gedacht, wie wir sie heute kennen?

Quanteneffekt

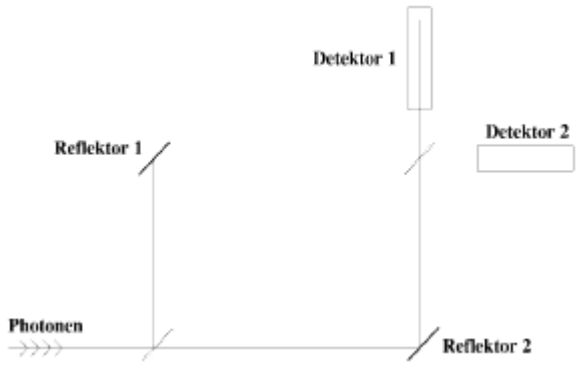
Das folgende sehr populäre Beispiel soll dies verdeutlichen. Es sei vorausgeschickt, dass man intuitiv Hemmungen haben wird, diesen Effekt als Realität hinzunehmen. Er ist aber durch nachprüfbare Experimente einwandfrei nachgewiesen.

Sendet man Photonen auf einen im 45-Grad-Winkel aufgestellten halb durchlässigen Spiegel, so kann man in zwei Detektoren, die hinter dem Spiegel geradlinig bzw. im rechten Winkel aufgestellt sind, jeweils etwa 50 Prozent der abgesendeten Photonen messen. Führt man dagegen durch zwei voll reflektierende Spiegel beide Wege wieder zusammen und stellt am Treffpunkt einen weiteren halb durchlässigen Spiegel auf, so erreichen alle Photonen Detektor 1 und keines Detektor 2 (Abb. 1)

Das könnte man nun so interpretieren, dass es einfach eine Eigenschaft der Photonen ist, durch halbdurchlässige Spiegel durchzugehen (d.h. immer) oder nicht (d.h. nie). Dass diese Interpretation falsch ist, zeigt folgender überraschender Effekt: Blockiert man einen der Wege (z.B. durch eine absorbierende Fläche), dann werden in beiden Detektoren etwa gleich viele Photonen registriert. Dieses Experiment kann nur durch die Folgerung erklärt werden, dass die Photonen generell gleichzeitig beide Wege verfolgen, d.h., jedes Photon befindet sich in einer sog. „kohärenten Superposition" zweier möglicher Zustände. Die Zustände sind hier:

- oberen Weg oder unteren Weg nehmend.

Die Tatsache, dass sich ein System gleichzeitig in zwei Zuständen befinden kann, ist die Neuigkeit, die man auszunutzen versucht, um einen sog. Quantenrechner zu bauen. Während ein Bit im klassischen Computer immer einen der Werte 0 oder 1 annimmt, kann man, auf Quanteneffekten aufbauend, ein Qubit definieren, das eine gewichtete Überlagerung dieser zwei Basiszustände als aktuellen Wert annehmen kann. Die jeweiligen Gewichte, mit denen die Basiszustände in der Überlagerung vorkommen, nennt man Amplituden. Aus ihnen berechnet sich die Wahrscheinlichkeit, im Falle einer Messung den entsprechenden Basiszustand zu erhalten.



Anordnung zum Nachweis des Quanteneffekts

Quanten-Hall-Effekt

Der klassische Hall-Effekt (1879 von dem amerikanischen Physiker Edwin Hall entdeckt) tritt auf, wenn eine Platte, durch die ein Strom fließt, zusätzlich in ein Magnetfeld gebracht wird. Unter dem Einfluß des Magnetfeldes driftet ein Teil der durch die Platte fließenden Elektronen zur Seite, und an den Seitenkanten der Platte wird eine Spannung gemessen, die sogenannte Hall-Spannung.

Den Hall-Effekt nutzten Physiker schon frühzeitig zur Untersuchung von Halbleitermaterialien aus, weil man erkannte hatte, daß Hall-Spannungsmessungen zur Bestimmung der Beweglichkeit, Driftgeschwindigkeit und Konzentration der Ladungsträger dienen können. Bei Messungen, die im Hochmagnetfeldlaboratorium in Grenoble durchgeführt wurden, entdeckte Klaus v. Klitzing 1980 den Quanten-Hall-Effekt.

Er untersuchte die Hall-Spannung von MOS-Feldeffekttransistoren bei tiefen Temperaturen (4 Kelvin = -269°C) sowie in hohen Magnetfeldern (14 Tesla). Zur Erzeugung dieser tiefen Temperaturen benötigt man flüssiges Helium. Um hohe Magnetflussdichten von 10 bis 20 Tesla zur Verfügung zu haben, musste von Klitzing noch an das europäische Speziallabor zur Erzeugung hoher Magnetfelder in Grenoble fahren. Heute können derartig hohe Magnetfelder auch mit supraleitenden Spulen erzeugt werden, wie sie in vielen Laboratorien zur Verfügung stehen. Im Jahre 1985 erhielt von Klitzing für seine Entdeckung den Nobelpreis.

Beim Quanten-Hall-Effekt (QHE) besteht die Probe aus einer mikroskopisch dünnen Schicht, in der die Elektronen sich wie in der Ebene eines Blatts Papier nur in zwei Dimensionen bewegen können. Wirkt nun ein starkes Magnetfeld senkrecht auf diese Ebene ein und mißt man die Hall-Spannung an den Seitenkanten, so zeigt die Hall-Spannung nicht, wie klassisch zu erwarten wäre, einen linearen Verlauf als Funktion des Magnetfeldes, sondern es treten Sprünge und Plateaus auf. Die Plateaus dieser Quantensprünge hängen erstaunlicherweise nicht, wie der klassische Hall-Effekt, vom Material oder der Geometrie der Probe ab, sondern stellten sich als das Vielfache immer derselben Zahl h/e^2 heraus.

Von Klitzing deutete sie als Quantisierung des Hall-Widerstandes. Der Hall-Widerstand, der Quotient aus Hall-Spannung und Probenstrom, betrug Bruchteile von h/e^2 (h Planck-Konstante, e Elementarladung). Besonders ausgeprägt waren die Werte, wenn die Konstante h/e^2 durch eine ganze Zahl, z.B. durch 2 oder durch 4 dividiert wurde.

Diese Zahl, die Von-Klitzing-Konstante $Rk=h/e^2=25812{,}8070\ \Omega$, ist demnach eine universelle Naturkonstante wie das Plancksche Wirkungsquantum und die Ladung des Elektrons; d.h. eine räumlich und zeitlich unveränderliche Größe.

Bedeutung dieser Grundlagenforschung

Mit dieser Konstante hat man seither eine universelle Bezugsgröße für die Messung von Widerständen, die überall auf der Welt gleich ist. Damit wurde es erstmals möglich, die Einheit Ohm des elektrischen Widerstandes mit hoher, jederzeit reproduzierbarer Genauigkeit an einem Halbleiter zu messen - viel exakter, als das bislang mit den Draht-Normalwiderständen der Eichämter gelang, deren Drähte im Lauf der Zeit ihre Eigenschaften ändern. Seit 1990 ist daher durch internationale Übereinkunft die elektrische Maßeinheit Ohm durch die Von-Klitzing-Konstante festgelegt.

Mit der Entdeckung des Quanten-Hall-Effekts wurde ein völlig neues Arbeitsgebiet der Physik eröffnet. Mit zunehmender Verbesserung der Eigenschaften künstlich hergestellter Halbleiterkristalle wurden weitere, theoretisch nicht vorhergesagte Effekte entdeckt. Bereits 1983, nur drei Jahre nach von Klitzings Arbeiten, fand eine Gruppe um den in Amerika arbeitenden deutschen Physiker Horst L. Störmer auch dann Abweichungen vom "glatten" Kurvenverlauf, wenn h/e^2 nicht durch eine ganze, sondern durch eine Bruchzahl dividiert wurde. Dafür waren, neben den verbesserten Halbleiterkristallen, nochmals höhere magnetische Felder und noch tiefere Temperaturen erforderlich.

Quantenmechanik

Ein Feld der modernen Physik, das in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts begründet wurde. Es beschreibt das Verhalten von Materie und Energie in kleinen Dimensionen

Quantenpunkt

Anordnung von Atomen, die wenige Nanometer Ausdehnung aufweist. Quantenpunkte können freie Partikel oder in Halbleiter eingebettete Inseln sein, die sich wie künstliche Atome verhalten

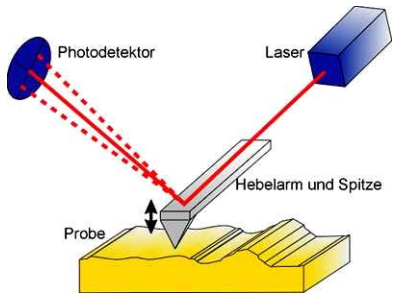
R

Rasterelektronenmikroskop

Das Rasterelektronen-Mikroskop tastet eine Probe mit einem gebündelten Elektronenstrahl ab. Die Wechselwirkungen zwischen Strahl und Probe werden erfasst und dreidimensional dargestellt. Das Verfahren erreicht eine Auflösung im Nanometer-Bereich, kann also einzelne große Moleküle erkennen. Da die Probe Strom leiten muss, wird zum Beispiel auf biologisches Material ein dünner Metallfilm aufgedampft

Rasterkraftmikroskop

Das Rasterkraftmikroskop beruht auf der lokalen Messung von Kräften, die im Bereich von Nanonewton und darunter liegen.



Rasterkraftmikroskop

Diese Kräfte sind vergleichbar mit denen, die zwischen Atomen wirken, die in einem Festkörper angeordnet sind. Hieraus ergibt sich auch der Name Atomic Force Microscopy (AFM), der synonym mit "SFM" verwendet wird. Die Kräfte werden über die Verbiegung einer miniaturisierten Blattfeder (Cantilever), an deren Unterseite sich die Sonde bzw. Messspitze (Durchmesser ca. 10nm bis 15nm) befindet, gemessen. Dazu wird häufig das Lichtzeigerprinzip angewendet. Dabei wird ein Laser von der Oberseite des Cantilevers reflektiert und auf einen positionsempfindlichen Detektor gelenkt. Je länger der Lichtweg ist, desto empfindlicher ist die Messung. So lassen sich Verbiegungen im Subnanometerbereich erfassen. Die Verbiegung des Cantilevers kann direkt als Topographie dargestellt werden, indem die Sonde Zeilenweise über die Oberfläche gerastert wird und die Größe der Verbiegung über ein Farbschema als Bild dargestellt wird (constant height mode).

Hell wird beispielsweise als "hoch" und dunkel als "tief" codiert. Die Kraftkonstante des Cantilevers muss klein genug sein, um die Oberfläche nicht zu beschädigen (typ. Millinewton pro Meter). Für raue Oberflächen kann die Auslenkung des Cantilevers als Regelsignal benutzt werden, wobei eine konstante Verbiegung durch eine Höhenregelung beibehalten wird. Die Stärke der Nachregelung wird dann zur Bildgewinnung genutzt (constant force mode). Dynamische Betriebsmodi beruhen auf einem vertikal oszillierenden Cantilever. Dieser wird so nah an die Oberfläche herangeführt, dass eine Dämpfung der Oszillation erfolgt. Die Größe der Dämpfung wird dann als Topographiesignal oder als Regelsignal verwendet. Dynamische Betriebsmodi gestatten die lokale Erfassung verschiedener physikalischer Eigenschaften (elastische, magnetische, elektrische) und erlauben die zerstörungsfreie Untersuchung weicher Systeme, wie z.B. DNA.

Der Scanbereich eines Rasterkraftmikroskops liegt bei ca. 100x100 µm. Die Scangeschwindigkeit - bei einer Zeile hin und wieder zurück - liegt bei ca. 1 Hz pro Sekunde.

Raster-Tunnelmikroskop

Mikroskop, mit dem elektrisch leitende Materialien untersucht werden. Zwischen der metallischen Spitze des Mikroskops und der Probe tritt ein quantenmechanischer Effekt auf: Obwohl Mikroskopspitze und Probe durch einen winzigen Abstand getrennt sind, fließt ein messbarer Strom – einige Elektronen „tunneln“ durch diese elektrisch isolierende Barriere. Je nach Abstand ist der Tunnelstrom größer oder kleiner. Bei sehr geringem Abstand zwischen Spitze und Probe ergibt sich eine sehr hohe Auflösung. Kurzform STM (scanning tunneling mikroscope)

Replikator

Unter einem Replikator versteht man eine Maschine, welche in der Lage ist Materie in einen gewünschten Stoff umzuwandeln.

Er wird auch als "Nanoreplikator" bzw. Nanobot oder hypothetischer Assembler " bezeichnet, der Kopien seiner selbst herstellen kann.

Die Funktionsweise:

Auf Nanoebene werden die einzelnen Moleküle analysiert, zerlegt und anschließend wie gewünscht zusammensetzt. Dazu nimmt der Replikator die Moleküle z.B. aus der Luft. Jedoch hat man auch die Möglichkeit andere Moleküle zu verändern und neue Stoffe herzustellen. Um einen Replikator zu realisieren bräuchte man jedoch Nanoroboter, welche in der Lage sein müssten dies schnell und präzise zu tun.

Heutzutage ist es jedoch schon möglich, diesen Prozess per Hand zu erledigen. Dazu benötigt man ein Rastertunnelmikroskop mit dem man diese Moleküle sehr genau beobachten und auch verändern kann. Um mehr als Experimente auf diese Art und Weise durchzuführen ist die Methode allerdings um Größenordnungen zu langsam.

Somit ist die Idee eines Replikators eigentlich gar nicht so "fiktional" wie man denkt.

Replikatoren sind metallische, sich selbst reproduzierende Lebensformen. Sie handeln rein instinktiv und greifen jedes Wesen an, das eine Bedrohung darstellt.

Replikatoren sind käferartige Maschinenwesen, die ein kollektives aber auch eigenständiges Bewusstsein aufweisen. Ihr einziges Ziel ist, sich selbst zu reproduzieren. Dazu eignen sie sich fremde Technologie an, indem sie sie „verspeisen“.

Ribosomen

Molekulare „Fabrik“, die - von einem molekularen Band mit Informationen der Erbsubstanz DNA gesteuert - eine Unzahl von Proteinen produzieren können.

RNS (RNA)

Kurzform für Ribonukleinsäure (engl.: *Ribonucleic Acid*).

Rotaxane

Rotaxane bestehen aus einem Linearmolekül auf das Ringmoleküle aufgefädelt sind. An den Enden der Kette befinden sich große Stoppermoleküle, die das „Herunterrutschen“ der Ringe verhindert. Die Bausteine der Rotaxane werden nicht durch kovalente Bindungen, sondern durch eine „mechanische Bindung“ zusammengehalten. Damit ist keine Auftrennung in Ringe und Linearmolekül möglich.

Röntgenstrahlung

Elektromagnetische Wellen, deren Energie höher ist als die von ultraviolettem Licht. Röntgenstrahlen haben Wellenlängen zwischen 0,001 und 10 Nanometer

Ruderman Kittel Kasuya Yosida (RKKY)

Diese Wechselwirkung beschreibt den indirekten Austausch zwischen den lokalisierten magnetischen Momenten der Atome eines Metalles. Die Kopplung der magnetischen Momente erfolgt über die Polarisation des Spins der Leitungselektronen.

Da der Kopplungsmechanismus (die Spinpolarisation) oszillatorisches Verhalten zeigt, ordnet der Festkörper je nach Abstand der Atome ferromagnetisch oder paramagnetisch.

Vereinfacht könnte man sich dies etwa folgendermaßen vorstellen: Ein Elektron fliegt an einem magnetischen Atom vorbei, was Auswirkungen auf seinen Spin hat. Die Spinpolarisation des Elektrons verursacht daraufhin wieder eine Ausrichtung des magnetischen Momentes des nächsten Atoms, welches das Elektron sieht.

S

Selbstorganisation

thermodynamischer Prozess, bei dem Ordnung scheinbar von selbst durch Energiezufuhr entsteht

Self-Assembly

Spezialfall der Selbstorganisation, bei dem sich Moleküle zu klaren Strukturen anordnen

Shallow Trench Isolation

Isolationsstrukturen nutzen die sogenannte „Shallow Trench Isolation“ (STI). Dies bedeutet, dass „seichte Gräben“ die leitenden Elemente - die Transistoren - auf dem Chip trennen. Dies wird dadurch erreicht, indem man anstatt einfach Oxidschichten an den weggeätzten Stellen der Nitridmaske wachsen lässt, Gräben ins Substrat zu ätzt und diese danach mit Oxid ausfüllt

Spin

quantenmechanische Eigenschaft aller Elementarteilchen, die der Grund für ein vorhandenes magnetisches Moment ist. Der Spin wird häufig auch als Eigendrehimpuls beschreiben

Spin Coating

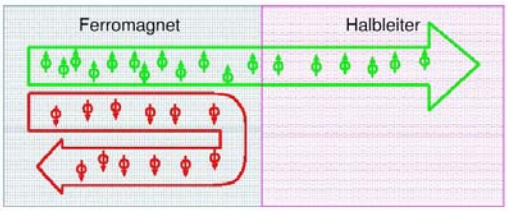
Polymerlösung wird auf das Substrat gebracht und durch rasche Rotation gleichmäßig verteilt. Vor allem in der Mikroelektronik eingesetzt zum Aufbringen des Photoresists auf Si-Wafern.

Spininjektion

Die Spininjektion von einem Ferromagneten in einen Halbleiter ist eine wichtige Vorraussetzung für die Verwirklichung einer auf Halbleiter basierenden Spinelektronik.

Unter der Spininjektion verstehen wir die Injektion eines spinpolarisierten Stroms von Elektronen aus einem Ferromagneten in einen nichtmagnetischen Halbleiter. Erst im Jahr 2004 ist es im Forschungszentrum Jülich gelungen, experimentell eine Spininjektion am System Fe/GaAs nachzuweisen.

Erste Ergebnisse zeigten, dass die (001) Grenzflächen von Fe/GaAs und Fe/ZnSe wie ideale Spinfilter wirken, sie weisen eine Spinpolarisationen von fast 100% auf. Die Majoritätselektronen von Fe können die Grenzfläche mehr oder weniger ungehindert durchdringen, während die Minoritätselektronen fast vollständig reflektiert werden.



Spinabhängiger Transport von Elektronen

Den spinabhängigen Transport von Elektronen durch die Grenzfläche (Spin „auf“ Elektronen können (fast) ungehindert in den Halbleiter eindringen, Spin „ab“ werden an der Grenzfläche (fast) vollständig reflektiert) zeigt die nebenstehende schematische Abbildung.

Spininjektion von Ferromagneten in Halbleiter

Sputtern

PVD-Verfahren, Zerstäubung des Targets durch hochenergetische Teilchen, typischerweise mit Energien im Bereich keV. Die aus dem Target herausgelösten Teilchen schlagen sich am Substrat nieder und bilden die Schicht. Erzeugung dichter, glatter Schichten, relativ niedrige Beschichtungsrate möglich. Genutzt z.B. in der Mikroelektronik, der Optik und der Werkzeugbeschichtung.

Stakeholder

fasst alle Gruppen zusammen, die Ansprüche an das Unternehmen stellen, z.B.Mitarbeiter, Kunden, Lieferanten, Kreditgeber, Mitglieder, Verbände, Medien, Öffentlichkeit, Fiskus

Superposition

Unter Superposition (lat. super = über; positio = Lage, Setzung, Stellung) versteht man eine Überlagerung.

- In der Quantenphysik bedeutet Superposition (Quantensuperposition) die Überlagerung von zwei oder mehreren Zuständen eines Objekts. Aufgrund der heisenbergschen Unschärferelation können die Zustände einer aktuellen Superposition nicht gleichzeitig beobachtet werden. Die Quantensuperposition wird für die theoretische Konzeption von Quantencomputern herangezogen.
- In der Informationstheorie bedeutet Superposition die Überlagerung von Informationen auf einem physischen Informationsträger. Dadurch wird eine maximale Informationsdichte erreicht.
- In der Genetik versteht man unter Superposition die Codierung mehrerer Eiweiße durch denselben DNA-Abschnitt bei Eukaryoten. Diese Superposition genetischer Information in Form von Introns und Exons wird durch das alternative Splicing der mRNA im Rahmen der Proteinbiosynthese aufgelöst.
- In der Statik versteht man unter Superposition die Überlagerung gleichartiger mechanischer Spannungen. Das Superpositionsgesetz besagt, dass gleichartige Spannungen aus 2 oder mehreren Schnittkräften unter Berücksichtigung ihres jeweiligen Vorzeichens in denselben Punkten addiert werden.
- Astronomie: Eine Superposition ist der Zustand des Sonnensystems, bei dem sich alle Planeten (angenähert durch Ignorieren der Ekliptik) in einer Geraden befinden.
- In der Elektrotechnik ist das Superpositionsverfahren die Anwendung des Helmholtzüberlagerungssatzes.

Ein klassisches Teilchen kann sich also nur in einem bestimmten Zustand befinden. Ein Photon kann z.B. verschiedene Polarisationen aufweisen, aber immer nur eine in einem bestimmten Augenblick. In der Quantenphysik kann sich aber ein Teilchen in einem Zwischenzustand zwischen mehreren Zuständen befinden, der sogenannten Superposition.

Jede „Messung“ an einer Superposition führt dazu, dass das Teilchen wieder einen eindeutigen Zustand annimmt, und zwar zufällig einen der Zustände, die in der Superposition enthalten sind. Eine Messung ist jede Interaktion mit der Umwelt, z.B. bereits das Auftreffen von Photonen.

Die Dekohärenz macht auch ein „Klonen“, also die Verdoppelung eines beliebigen Quantenzustandes unmöglich, da eine Messung eine Superposition zerstören würde.

Die Dekohärenz ist die irreversible und unkontrollierbare Dislokalisation von quantenmechanischen Superpositionen durch ihre (gewöhnlich durch Wechselwirkung induzierte) Verschränkung mit der Umgebung. Im reversiblen Fall kann man nur von virtueller Dekohärenz sprechen. Durch die unvermeidbare Dekohärenz bestimmter (makroskopischer) Superpositionen

erscheinen die verbleibenden Zustände dem lokalen Beobachter klassisch (d.h. nicht dem Superpositionsprinzip unterworfen), so dass keine eigenständigen klassischen Begriffe vorausgesetzt werden müssen; die Quantentheorie gilt universell. Bei konsequenter Anwendung führt diese Hypothese zur Everett-Interpretation (s.a. Viele-Welten-Interpretation -- oft verwechselt mit many-minds), während die Kopenhagener Interpretation die quantenmechanische Beschreibung beim Einsetzen von Dekohärenz zu Gunsten klassischer Begriffe abbricht und die orthodoxe Interpretation von Neumann einen Kollaps der Wellenfunktion im Gegensatz zur Schrödinger-Gleichung annimmt.

Häufig wird Dekohärenz fälschlich als Störung durch die Umgebung oder als Phasenmittelung in einem Ensemble missverstanden. Insbesondere bei einer (kontrollierbaren) Verschränkung in bipartiten Systemen bedeutet deren scheinbarer Verlust durch Dekohärenz aber vielmehr gerade eine Ausweitung der Verschränkung auf die (unkontrollierbare) Umgebung.

Die Dekohärenz ist aber auch von praktischer Bedeutung, da sie für die Konstruktion von Quantencomputern ein großes Problem darstellt.

T

Target

Zielort, eines Wirkstoffes z.B: Enzym, Rezeptor, oder DNA

Tissue Enginering

Züchtung von künstlichem Gewebe

Top-Down

Von oben nach unten“; die Erzeugung kleiner Strukturen und Objekte durch fortschreitende Miniaturisierung bis zur gewünschten Größe

"Top down" ist das Gegenteil eines "bottom up" Verfahrens. Typisches Beispiel ist die Photolithographie und andere lithografische Verfahren, wie beispielsweise die Elektronenstrahllithographie (EBL).

Transkription

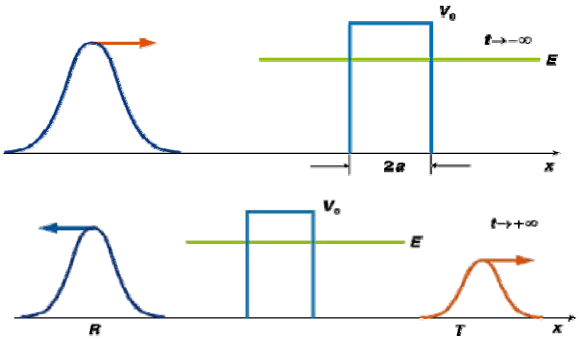
(v. lat. trans = jenseits, hinüber + scribere = schreiben) ist in der Biologie der erste Schritt der Proteinbiosynthese sowie die Synthese der tRNA und der rRNA. Bei der Transkription wird ein Gen abgelesen und als mRNA Molekül vervielfältigt, d.h. ein spezifischer DNA Abschnitt dient als Vorlage zur Synthese eines neuen RNA Strangs

Treiberfähigkeit

Eine weitere zur Charakterisierung eines Gatters sehr wichtige Größe ist seine Treiberfähigkeit, d.h. der maximale Ausgangsstrom, der zur An-steuerung nachgeschalteter Gattereingänge zur Verfügung steht. Als Maß für diese Treiberfähigkeit wird das Fan-Out definiert. Diese dimensionslose Größe gibt an, wie viele normierte Gattereingänge (Lasteinheiten) von einem Gatterausgang gespeist werden können, ohne dass die Vorgaben für die Pegelwerte verletzt werden

Tunneleffekt

Der Tunneleffekt ist ein Phänomen der Quantenmechanik, das die Physik der kleinsten Teilchen beschreibt. Danach ist es möglich, dass ein Teilchen eine Potenzialbarriere der Höhe V_0 und der Breite 2 a überwinden kann, obwohl es eigentlich nicht ausreichend Energie besitzt ($E < V_0$), um dies zu schaffen (es "tunnelt" durch diese Barriere).



Tunneleffekt

Tunnelmagnetwiderstand - TMR

Drei Formen des Magnetwiderstands sind relevant. Der Gigantische Magnetwiderstand (GMR) tritt in künstlich hergestellten Übergittern aus magnetischen und unmagnetischen metallischen Schichten auf und wird durch spinabhängige Streuprozesse der Ladungsträger hervorgerufen.

Beim Kolossalen Magnetwiderstand (CMR) wird der vom Magnetfeld abhängige Metall-Isolator-Übergang in Manganoxiden ausgenutzt. Letztendlich führt beim Tunnel-Magnetwiderstand (TMR) das vom Magnetfeld abhängige spinpolarisierte Tunneln von Ladungsträgern über isolierende Barrieren zum Magnetwiderstand. Der TMR beruht auf der Tatsache, dass der Tunnelstrom von der relativen Orientierung der Magnetisierungsrichtung in den beiden Ferromagnet (FM)-Elektroden abhängt.

Definition für den TMR-Effekt:

$$TMR = \frac{Ra - Rp}{Rp}$$

TMR = magneto tunneling resistance

Ra =Widerstand bei antiparalleler Magnetisierungsrichtung der FM-Elektroden

Rp =Widerstand bei paralleler Magnetisierungsrichtung

Tunnelstrom

Als Tunnelstrom bezeichnet man einen elektrischen Strom, der durch den quantenmechanischen Tunneleffekt zustande kommt und keinen Leiter benötigt. Bei diesem Effekt gelangen Elementarteilchen durch eine Energiebarriere hindurch („tunneln“)

U

UV-Strahlung

Elektromagnetische Wellen, deren Wellenlängen unter 400 Nanometer liegen. Ultraviolettes Licht ist unsichtbar und grenzt an das Violett des sichtbaren Lichts

V

Valenzband

Energiebereich in Halbleitern oder Metallen, in dem Elektronen unbeweglich sind und nicht zum elektrischen Strom beitragen können

Van-der-Waals-Bindung

Van der Waals Kräfte sind elektromagnetischer Natur. Sie sind verantwortlich für die schwache attraktive Wechselwirkung aller Moleküle und Atome. Diesen Beitrag zur van der Waals Wechselwirkung nennt man Londonsche Dispersionskräfte. Sie enstehen durch fluktuierende Dipolmomente der Elektronen (Quantenmechanik) und wirken immer anziehend. Sie bewirken beispielsweise das Kondensationsvermögen von Edelgasen, die auf Grund ihrer abgesättigten elektronischen Konfiguration keine chemischen Bindungen eingehen können. Darüber hinaus existieren Dipol-Dipol und Dipol-induzierter Dipol Wechselwirkungen die sowohl attraktiv als auch repulsiv sein können, je nach relativer Orientierung der wechselwirkenden Dipole.

Verbindungshalbleiter

III-V-Verbindungshalbleiter setzen sich aus Atomen der Gruppe III (beispielsweise Gallium) des Periodensystems der Elemente und Atomen der Gruppe V (etwa Arsen) zusammen.

Typische Beispiele sind Galliumarsenid (GaAs), Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs), Indiumgalliumarsenid (InGaAs) und Galliumindiumnitridarsenid (GaInNAs).

Durch dieses Legieren ändert sich nur wenig an den Kristallgittern, so dass Schichten unterschiedlicher Verbindungshalbleiter gut aufeinander aufwachsen können. Dabei lassen sich die Lücken zwischen den Energiebändern des resultierenden Halbleiters und damit seine elektrischen und optischen Eigenschaften variieren und sehr genau einstellen. Auf diese Weise lassen sich gezielt, durch Wahl der richtigen Mischung, die gewünschten physikalischen Eigenschaften erzielen.

Diese Verbindungshalbleiter haben gegenüber dem Silizium den Vorteil, dass sie extrem effizient elektrischen Strom in Licht umwandeln können. Aus diesen Materialien werden Halbleiterlaser, Halbleiterleuchtdioden und Fotodioden hergestellt, und sie lassen sich inzwischen in nahezu jedem Haushalt finden: so werden Halbleiterlaser genutzt, um die Information auf einer CD oder einer DVD auszulesen, und Halbleiterleuchtdioden finden sich als rote, gelbe oder grüne Lämpchen an vielen elektronischen Geräten, und sogar in Verkehrsampeln und Rücklichtern von Autos wieder

W

Wafer

Als Wafer wird in der Halbleiterindustrie die kreisrunde Scheibe bezeichnet, auf der integrierte Schaltkreise durch verschiedene technische Verfahren hergestellt werden

Wärmeleitfähigkeit

gibt die Wärmemenge an, die in einer Sekunde durch eine 1 m² große und 1 m dicke Schicht eines Stoffes hindurch geleitet wird, wenn der Temperaturunterschied der beiden Oberflächen 1K beträgt und durch die restlichen 4 Flächen kein Wärmeaustausch stattfindet. Formelzeichen: λ (Klein Lambda). Maßeinheit: W / (m × K)

10 Literaturverzeichnis

[ADow 05] Prof Ann Dowling, Prof Roland, u.a. “Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties” <http://www.royalsoc.ac.uk/policy>, <http://www.raeng.org.uk>, <http://www.nanotec.org.uk/report/summary.pdf> <http://www.britischebotschaft.de/en/embassy/r&t/notes/rt-ft-notiz04.022_nanotechnologie.htm>

[AMey 05] „Direkte elektronische Kontakte zum lebenden Subjekt“, Angela Meyer, c't 12/05, Seite 48

[BBescho] Bernd Beschoten, Gernot Güntherodt, Marcus Heidkamp, Georg Richter, Lars Schreiber, „Rechnen mit Spins - eine moderne Allianz von Magnetismus und Halbleitern“ <http://www.rwth-aachen.de/zentral/dez3_themen_themen1_04.htm>

[Biegl 05] „Tissue Arrayer Analyseplattform“, <http://www.biegler.com/index.de.html>

[BLeit] Bernd Leitenberger „Die Entwicklung der Intel Prozessoren“, < http://www.bernd-leitenberger.de/text/intel-prozessoren.html>

[BSI 05] <http://www.bsi.bund.de/fachthem/rfid/studie.htm>

[BundFor 04] „Bundesbericht Forschung 2004“; <http://www.bmbf.de/de/2303.php>

[BWiss 00] Bild der Wissenschaft online vom 13.12.2000 „Nano-„Krankenschwester“ entwickelt!“

[CAda 88] C. Adachi, S. Tokito, T. Tsutsui, S. Saito, *Jpn. J. Appl. Phys.* 1988, *2*8, L269

[CSHa 05] Christiane Schulzki-Haddouti, „Technik-Feinstaub: Nanoteilchen - so schädlich wie Asbest?“ <http://www.sicherheit-heute.de/index.php?cccpage=Medizin>

[CWTa 87] C. W. Tang, S. A. Van Slyke, *Appl. Phys. Lett.* 1987, *5*1, 913

[DBra 91] D. Braun, A. J. Heeger, Appl. Phys. Lett. 58, 1982, 1991

[Diag 03] „Diagnostik im Gespräch 1/2003“; <http://www.vdgh.de/>

[DLamm 04] „Halbleiter-Roadmap verlangsamt Innovationszyklen“, David Lammers, EE Times , January 26, 2004 (5:23 a.m. EST) <http://www.eetimes.de/printableArticle/;jsessionid=RBZ4XDJU3DRWYQSNDBCSKH0CJUMEKJVN?articleID=19502502&article_path=/semi/news>

[DSchoMDel] Daniel Schober, Max Delbrück, „ DNA-Arrays und Genexpressionsanalyse“, <http://www.bioinf.mdc-berlin.de/~schober/Microarray.doc>

[EEtt 95] E. Ettedgui, H. Razafitrimo, Y. Gao, B. R. Hsieh, Appl. Phys. Lett., 67, 2705, 1995

[FhFMik 03] Fraunhofer Institut Photonische Mikrosysteme, 10/2003, „Die OLED Revolution“, <http://www.ipms.fraunhofer.de/publications/y2003/txt_031112de.shtml>

[FM Kolb 04] Florian M. Kolb “ Halbleiter-Nanodrähte”

[FKreu] Dr. Franz Kreupl, „Nanoelektronik ist in Zukunft ganz Groß“, Infineon Technologies, Corporate research, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München

[FOKUS 04] Fokus, 30.01.2004, <http://www.focus.de/D/DG/DGA/DGA16/DGA16H/dga16h.htm>

[GTLiu 99] G. T. Liu, A. Stintz, H. Li, K. J. Malloy, L. F. Lester, Electron. Lett. 35, 1163, 1999

[Heion 04] Heise online; „ Intel nimmt die weltweit erste EUV-Lithografie-Anlage in Betrieb“, 02.08.2004

[Heionnew 00] Heise online news 14.04.2000

[HMüc 05] Dr. Helge Mücke, “Opportunities and risks of Nanotechnologies” <http://www.allianz-azt.de/azt.allianz.de/Industrietechnik/Content/Downloads/Files/Nanotech_dotcom3mb.pdf> <http://www.daswipoblog.de/2005/06/risiko_nanotech.html>

[HVes 93] H. Vestweber, J. Oberski, A. Greiner, W. Heitz, R. F. Mahrt, H. Bässler, Adv. Mat. Opt. Electr. 2, 197, 1993

[IDPar 94] I. D. Parker, J. Appl. Phys. 75, 1656, 1994

[Inside] <http://www.inside-handy.de/lexikon/R/572/RFID/>

[JGil 04] Jim Giles, “Nanoparticles in the brain”, Nature Science Update vom 09.01.2004,
G. Oberdörster et al.: "Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain." In: Inhalation Toxicology, 2004
<http://nano.ivcon.net/modules.php?name=News&file=article&sid=399>

[JShi 96] J. Shi, C. H. Chen, S. A. Van Slyke, C. W. Tang, US 5,554,450 (1996) -- “Organic Electroluminescent Devices with High Thermal Stability”
J. Shi, C. W. Tang, C. H. Chen, US 5,645,948 (1997) -- “Blue Organic Electroluminescent Devices”.
<http://www.e13.physik.tu-muenchen.de/Muellerb/Uebung/polymerv05neu.pdf>;
<http://www.uni-ulm.de/oc3/studies/mat/PolMat/Paper%20Elektrisch%20leitende%20Polymere.pdf>

[KHof 00] Karl Hofmann, Bernd Spangenberg, „Der „ultimative“ Transistor- Traum oder Wirklichkeit?, Physikalische Blätter 56 (2000) Nr. 9

[KOM 04] Mitteilung der Kommission, „ Auf dem Weg zu einer europäischen Strategie für Nanotechnologie“, Brüssel 12.05.2004

[MAbk 86] M. Abkowitz, D. M. Pai, Philos. Mag. B53, 193, 1986
<http://www.vs-c.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/neu/oled/oled.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/neu/oled/ladungstraeger.vscml.html>

[MDeu 97] M. Deußen, H. Bässler, Chem. Unserer Zeit 31, 76, 1997

[MDeu 97] M. Deußen, H. Bässler, „Organische Leuchtdioden“, Chem. Unserer Zeit, 31 (2): 76-86, 1997

[MDeub 04] Markus Deubel, Georg von Freymann, Martin Wegener, Suresh Pereira, Kurt Busch, Costaa M. Soukoulis: "Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications." In: *Nature Materials*, Bd. 3, Nr. 7, Juli 2004, S. 444-447 (DOI:10.1038/nmat1155)
<http://dx.doi.org/10.1038/nmat1155>

[MJohn 00] Johnson, M.: Magnetoelectronic memories last and last ... IEEE Spectrum February 2000, Vol. 37, No. 2.
<http://www.nano.cc.gatech.edu/documents/Johnson%20%20Magnetoelectronic%20Memories%20Last%20and%20Last.pdf>
<http://www.weltderphysik.de/themen/stoffe/phaenomene/exotisch/quantenhall/index.html>
<http://www.markt-technik.de/topics/bauelemente/fachthemen/2002/02023/>

[MPOP 63] M. Pope, H. Kallmann, P. Magnante, *J. Chem. Phys.* 1963, *38*, 2042

[MSim 00] Michaela Simon, „Kleiner geht's nicht“, 02.11.2000
<http://www.heise.de/tp/r4/artikel/4/4166/1.html>

[MStein 04] Michael Steinfeldt, „Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte“, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung,

2004,
<http://www.itas.fzk.de/tatup/042/stei04a.htm>

[M&T 05] Markt&Technik, 2.12.2005 S. 20-24; „Alles hängt vom erfolgreichen Technologietransfer ab“

[MWev 02] VDI-Technologiezentrum, zukünftige Technologien Nr. 38, Dr. M. Wevers; Dr. Dr. D. Wechsler; Juli 2002

[myrese05] Nanobiotechnologie Diskussionsboard

<http://www.myresearch.de/genboard.php?cmd=f_thread&scmd=show&company=675&btype=7>

[MZach] Dr. Margit Zacharias, Prof. Dr. Andreas Greiner, “Nanodrähte und Nanoröhren:von kontrollierter Synthese zur Funktion”, Nature 425: 274-278 (2003) „Ein Dünnfilmtransistor aus Nanodrähten“
<http://www.wissenschaft-online.de/abo/ticker/649548>
<http://www.wissenschaft-online.de/abo/ticker/649548&template=d_sdi_artikel_druck>

[Nanit] Science-Fiction „Die Naniten beherrschen die Welt“;
<http://www.yarpg.de/archiv/science_tech/naniten.htm>

[Nature 03] [Nature, Bd.424 (2003), Nr. 6947, 24.07.2003]

[Nature 03] Nature 425: 274-278 (2003) „Ein Dünnfilmtransistor aus Nanodrähten“
<http://www.wissenschaft-online.de/abo/ticker/649548 >
<http://www.wissenschaft-online.de/abo/ticker/649548&template=d_sdi_artikel_druck>

[NIVC 04] nano.ivcon, „Fullerene schädigen Fische“
Treffen der "American Chemical Society" in Anaheim, Kalifornien, USA; Vortrag am 28.03.2004 auf dem Symposium "Nanotechnology and the Environment" IEC 21, "Toxicity of nC60 fullerenes to two aquatic species: Daphnia and largemouth bass": www.smu.edu
<http://nano.ivcon.net/modules.php?name=News&file=article&sid=659>

[NKirst 94] N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V. M. Ustinov, S. S. Ruvimov, M. V. Maximov, P. S. Kop’ev, Zh. I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. G Osele, J. Heydenreich, Electron. Lett. 30, 1416 (1994)

[NMarkets 04] Report: "Emerging Nanoelectronics Markets, The Next Opportunity for the Semiconductor and Advanced Materials Industries"; Oktober 2004;
<http:// www.nanomarkets.net>
<http://nano.ivcon.net/modules.php?name=Print&art=Artikel&sid=1262>

[NNanoIn 05] “The National Nanotechnology Initiative at Five Years: Assessment and Recommendations of the National Nanotechnology Advisory Panel, May 2005”
<http://www.nano.gov/html/res/IntlFundingRoco.htm>
<http://www.ostp.gov/PCAST/PCASTreportFINAL5-17-05.pdf>

[OMar 05] Othmar Marti, Alfred Plettl, Vorlesungsskript Physikalische Elektronik und Messtechnik, Universität Ulm, 3. Juni 2005, „Feldeffekt-Transistoren (Unipolare Transistoren)“
<http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/PhysikalischeElektronik/Phys_Elektr/node97.html>

[PPiet 03] Peter Pietschmann Universität Ulm, „Stimulation auf der Einzelzellebene“, 06.10.2003
<http://www.idw-online.de/pages/de/news69982>

[RBoeck 02] Rainer Böckmann, Helmut Grubmüller, „Nanoseconds molecular dynamics simulation of primary mechanical energy transfer steps in F_1-ATP synthase, Nature Structural Biology, 9,198-202 (März 2002).

[RCJoh 04] R. Colin Johson, „Chips kühlen sich selbst“, EETIMES March 30, 2004 http://www.eetimes.de/showArticle.jhtml?articleID=19502664

[RSiet 04] Robert Sietmann, „MRAM-Bausteine am Start“, 11.04.2004, <http://www.heise.de/newsticker/meldung/print/46438>, „IBM und Infineon demonstrieren MRAM-Speicherchip“, 10.06.2003, <http://www.eetimes.de/printableArticle/;jsessionid=43HFPSP5R14FKQSNDBGCKHSCJUMEKJVN?articleID=19503418&article_path=/semi/news>, „Neuer Meilenstein in der MRAM-Entwicklung“, 07.02.2001, <http://www.heise.de/newsticker/meldung/print/15074>

[RSiet 04] Richard Sietmann, „Aufschwung mit Nano: Forschungspolitik: Nanotechnologie für die Innovationsinitiative“, <http://www.heise.de/ct/04/07/032/>

[R-UBonn 03] Text Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn; idw-online, 25.06.2003 <http://idw-online.de/pages/de/news65646>

[Scien 03] DNA-Templated Carbon Nanotube Field-Effect Transistor, *Science* 2003 302: 1380-1382 <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/302/5649/1380?etoc>, <http://nano.ivcon.org/modules.php?name=News&file=print&sid=278>

[SDat 00] S. Data and B. Das, Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990)

[SDatBDas 00] S. Datta and B. Das: Electronic Analog of the Electro-Optic Modulator, Applied Physics Letters 56, 665, 1990

[SEch 05] Saar Echo, „Gesundheitsausgaben 2003 erneut gestiegen“, 15.03.2005

[SForr 03] Stephen Forrest, “Data storage made easy”, Nature 426, 166–169; 2003 <http://physicsweb.org/articles/news/7/11/5/1>
U.S. Pat. Nos. 5,035,926 and 5,391,472
U.S. Pat. Nos. 5,681,885, 5,572,086, 5,652,477 and 5,523,469.
<http://www.macwelt.de/news/vermischtes/23746/>

[Shan 02] „Shangai: Protein-Chip testet auf zehn Krebsarten“ <http://www.pte.at/pte.mc?pte=020111016> <http://www.health-digit.com>

[SPerk] Perkin, S.: Magnetic Tunnel Junctions. IBM Research, <http://www.almaden.ibm.com/st/projects/magneto/mtj>
Perkin, S.: MagRAM. IBM Research, <http://www.almaden.ibm.com/st/projects/magneto/mram>
<http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/rsc.mramimages.html>
<http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/rscd.mramimages-picb.html>

[SpDirekt 05] „Molekulare Injektionsnadeln“, spektrumdirekt, 21.09.2005 <http://www.wissenschaft-online.de/abo/ticker/789043>

[SWISS 03] TA-SWISS, Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung, „Nanotechnologie in der Medizin“, November 2003

[TRen 03] Tilman Renz, „Heikler Weg zur Akzeptanz der Nanoforschung“, Basler Zeitung**,** 09.12.2003 <http://www.nccr-nano.org/nccr/media/press_coverage_data/press_coverage_items/press_item_034/press_item_034.htm>

[TTeep] H W Ch Postma, T.Teepen, Z. Yao, M. Grifoni und C. Dekker, Science 293, 76 (2001)

[UBakow 03] „Nanopartikel als Wirkstoffträger“; Udo Bakowsky, Marburg, Claus-Michale Lehr; <http://www.pharmazeutische-zeitung.de/pza/2003-47/titel.htm>
Vison-Rundschau Nr. 74/August 2002; „Technische Revolution in der

Medizin“; <http://www.ams.or.at/wien/biz/index.htm>
Wissen 09/2002;
<http://www.zeit.de/2002/09/Wissen/print_200209_m-nanomedizin.html>

[UOe 04] Udo Oels, „Die Bayer Innovationsperspektive 2004“, 30. Juni 2004, Leverkusen <http://www.baynews.bayer.de/baynews/baynews.nsf/id/02DADA2A4F25944DC1256EC20064289A>

[VDE 01] VDE dialog Nr. 3, Mai/Juni 2001

[VDyak 03] V.Dyakonov, Organische Solarzellen – Einführung“, Universität Oldenburg; M.Pfeiffer, Technische Universität Dresden <http://www.pv-uni-netz.de/img/Jahrestagung2003/uv_4_organische_01.pdf>

[VWag 04] Zukünftige Technologien Nr. 50;nanobiotechnologie II; Anwendungen in der Medizin und der Pharmazie, V. Wagner, D.Wechsler, 2004

[WHel 65] W. Helfrich, W. G. Schneider, *Phys. Rev. Lett.* 1965, *1*4, 229

[WLuth] Luther, Wolfgang; Malanowski, Norbert; Zweck, Axel „Potentiale der Nanotechnologie für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft“, <http://www.ingentaconnect.com/search/article;jsessionid=1b4i4b2pdlpxb.victoria?title=Nanotechnologie&title_type=tka&year_from=1997&year_to=2005&database=1&pageSize=20&index=1>

[WLut 04] W. Luther, N. Malanowski u.a., „Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt Innovations- und Technikanalyse“, 2004

[WPfei] Wilfried Pfeiffer, IFW Dresden, Postfach 27 01 16 D-01171 Dresden, w.pfeiffer@ifw-dresden.de

[YArak 82] Y. Arakawa, H. Sakaki, Appl. Phys. Lett. 40, 939, 1982

[YChen 03] Yong Chen et al., Nanoscale molecular-switch crossbar circuits, Nanotechnology 14, 462 (2003)

[YosHa 04] Yoshiko Hara, „Japanische Forscher auf dem Weg zum Gigabit-MRAM“, September 15, 2004 <http://www.eetimes.de/semi/news/showArticle.jhtml?articleID=47207640>

[YuHua 01] Yu Huang et al., Logic Gates and Computation from Assembled Nanowire Building Blocks, Science 294, 1313 (2001)

[3Sat 05] U-Boote im Blut?
<http://www.3sat.de/nano/vision/09818/>

[1] <http://nano.ivcon.net/modules.php?name=Search&topic=28>

[2] <http://www.nano.gov/html/res/IntStratDevRoco.htm>,
<http://www.nsf.gov/start.htm>

[3] <http://www.subventionsberater.de/dorf2000/fuenffrp.html>
<http://www.welcomeurope.com/default.asp?id=1101&idpgm=11435>

[4] <http://www.cordis.lu/fp6/nmp.htm>
<http://www.cordis.lu/nmp/national-research.htm>

[5] <http://www.forschungsrahmenprogramm.de/inhalte/rp7/rp7dokumente/Download/dat_/fil_1086>

[6] <http://www.cordis.lu/fp7/breakdown.htm>

[7] <http://www.nano-polis.de/nanotechnologiepolitik.htm>
<http://www.nano-polis.de/links.htm>

[8] <http://www.rgit-usa.com/archive/No46_2003.pdf>

[9] <http://www.evibase.de/texte/sz/texte/launische_motoren.htm>

[10] <www.ibm.com/news/de/2002/06/11.html>
<www.heise.de/newsticker/data/as-11.06.02-000>
<http://www.physorg.com/news3361.html>

[11] <http://www.bmwi.de/Navigation/Wirtschaft/Branchenfokus/Industrie/automobilindustrie.html>

[12] <http://www.destatis.de/basis/d/gesu/gesutab5.php>

[13] <http://www.trillium.de/files/Sep04_Neurochips.pdf >,

[14] <http://www.innovations-report.de/html/berichte/biowissenschaften_chemie/bericht-17379.html>

[15] <http://www.innovations-report.de/html/berichte/biowissenschaften_chemie/bericht-17375.html>

[16] <http://www.aerztezeitung.de/docs/2001/07/20/abc-pharmakokinetik.asp>

[17 <http://www.stern.de/wissenschaft/forschung/index.html?id=522942&nv=pr&pr=1>

[18] <http://www.genomics.uni-freiburg.de/index-Dateien/technologie.htm>, <http://dbs.unileipzig.de/en/seminararbeiten/semWS0102/arbeit6/microarray_html.htm>

[19] <http://www.bioinformatik-wegweiser.de/Proteomanalyse.html>

[20] <http://www.myresearch.de/genboard.php?cmd=f_thread&scmd=show&company=675&btype=7>

[21] <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,327494,00.html>

[22] <http://www.sn.schule.de/~reimegym/hporg/fach/inf/12_cyborg.txt>

[23] <http://www.ams.or.at/wien/biz/vision/rund74.htm>

[24] <http://www.bitkom.org/de/markt_statistik/8477_27225.aspx>

[25] <http://www.heise.de/newsticker/meldung/40343>

[26] <http://www.heise.de/newsticker/meldung/64073>

[27] <http://www.fernschule-weber.de/lehrgang/afu/afuprobe1.htm#s3>

[28] <http://www.intel.com/cd/corporate/pressroom/emea/deu/224995.htm>

[29] <http://www.uni-duisburg.de/THP/publikationen/forum/forum99/02tech/0205/fram9.htm>

[31] <http://www.fz-juelich.de/isg/mbe/diploma.html>

[32] <http://www.fz-juelich.de/isg/mbe/diploma.html>

[33] <http://www.wissenschaft.de/wissen/news/drucken/224943.html>

[34] <http://www.helmholz.de>; „Ein Gramm zwischen Erde und Sonne“

[35] <http://pressetext.at/pte.mc?pte=030401011>, <http://www.pnas.org/>

[36] <http://www.idw-online.de/pages/de/news95131>

[37] <http://www.silicon.de/cpo/news-csh/detail.php?nr=13664>

[38] <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,druck-339715,00.html>

[39] <http://www.at-mix.de/crossbar_latch.htm>
(US-Patent Nr. 6,586,965)

[40] <http://de.wikipedia.org/wiki/Laser>

[41] <http://pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA95/Matischek/laser.html>

[42] <http://pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA00/mayerhofer/>

[43] <http://infos.aus-germanien.de/Gallium-Arsenid>

[44] <http://www.12v-kuehlgeraete.de/Peltierprinzip.htm>

[45] <http://www.pro-physik.de/Phy/External/PhyH/1,,2-10-0-0-1-display_in_frame-0-0-,00.html?recordId=2610&table=NEWS>

[46] <http://de.wikipedia.org/wiki/Spin>

[47] <http://www.lexikon-definition.de/Dirac-Gleichung.html>

[48] <http://www.lexikon-definition.de/Fermi-Dirac-Statistik.html>, <http://de.wikipedia.org/wiki/Fermi-Dirac-Statistik>

[49] <http://rzserv2.fh-lueneburg.de/u1/gym03/expo/jonatur/umwelt/eingriff/gorleben/atom/fermi.htm>

[50] <http://pauli.uni-muenster.de/Lehre/quant-skript/node86.html>

[51] <http://www.dcb.unibe.ch/groups/leutwyler/vorlesungen/pdf/AllgChemI/Elektronenspin.pdf#search='Elektronenspin>

[52] <http://www.wmi.badw.de/E23/lehre/skript/ME/ME_Kapitel12.pdf>

[53] <http://www.mitstanfordberkeleynano.org/events_past/0402 - Bits/2 - nano bits sri feb 2004.pdf>
<http://www.thompson.ece.ufl.edu/Fall2004/lecture19-20.pdf>
<http://www.tomshardware.de/news/20010712_094700.html>
<http://www.planet-rcs.de/de/article/ram4/>

[54] <http://www.uniterra.de/rutherford/hg6.htm>

[55] <http://www.seilnacht.com/Lexikon/52Tellur.htm>

[56] <ftp://download.intel.com/research/silicon/Ovonyx_pres.pdf>

[57] <ftp://download.intel.com/research/silicon/OUM_pres.pdf>

[58] <http://www.msc.de/download/presse/ramtron/Ramtron-Appl-Note.pdf>

[59] <http://www.heise.de/newsticker/meldung/print/43445>

[60] <http://www.eetimes.de/printableArticle/;jsessionid=2UYUNAHHQBSOAQSNDBGCKH0CJUMEKJVN?articleID=47207640&article_path>

[61] <http://polymer.adlexikon.de/Polymer.shtml>

[62] <http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/UbiqGell.pdf>

[63] <http://www.bunsen.de/jdc/woche33/pentacen.html>

[64] <http://www.vs-c.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/neu/leitpoly/leitpoly.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/neu/leitpoly/pedt.vscml.html>

[65] <http://www.heise.de/newsticker/meldung/43218 >

[66] <http://www.heise.de/tr/artikel/56525/>

[67] <http://www.zurich.ibm.com/st/storage/millipede.html >

[68] <http://www.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/em/OLED.pdf>

[69] <http://www.netigator.de/netigator/live/fachartikelarchiv/ha_artikel/powerslave,id,30419801,obj,,np,,ng,stories,thes,9303,ps_alayout,l_2.inc.html>
<http://w4.siemens.de/FuI/de/archiv/pof/heft2_03/artikel18/index.html>

[70] http://tommy-magazin.de/print.asp?id=58

[71] <http://www.innovations-report.de/html/berichte/innovative_produkte/bericht-41508.html>

[72] <http://www.golem.de/0505/37936.html>

[73] <http://www.cordis.lu/ist/eniac>

[74] <http://nanobusiness.org/stories/pcastreport>

[75] <http://www.transnanopowder.com/marktstudie.html>

[76] <http://www.itas.fzk.de/tatup/042/luma04a.htm>

[77] <http://www.chemlin.de/news/jan05/2005010402.htm>

[78] <http://www.innovations-report.de/html/berichte/biowissenschaften_chemie/bericht-38709.html>

[79] <http://www.foresight.org/cms/press_center/128>

[80] <http://www.iuk.fraunhofer.de/index2.html?Dok_ID=53&STID=38&Sp=1>

[81] <http://www.vdi.de/vdi/news/index.php?ID=1015058>
<http://www.blauen-institut.ch/Tx/tF/tfNanotech.html>

Quellenverzeichnis der Abbildungen

Deckblatt
Quelle: <http://www.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/nanotubes/omake/fullerenes/C60.jpg>

1.1 Nanometerskala
Quelle: <http://www.nano.gov/html/facts/The_scale_of_things.html>

3.1 Molekularmännchen
Quelle: <http://www.mannometer-nanometer.de/manno_nano/panel_1234/2_rtm/index_con.htm>

3.2 Entwicklungsstand und Marktreife einzelner Nanotechnologieanwendungen
Quelle: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, „Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie“

3.3 Budgetaufteilung des 7. Forschungsrahmenprogramms der EU
Quelle: <http://www.rp6.de/inhalte/rp7>

3.4 Nanotechnologie - Finanzierungsmöglichkeiten

3.5 Öffentliche Förderung von Nanotechnologie in Millionen Euro
Quelle: deutsches Forschungsministerium, Grafik: R. Hackl

3.6 Investitionshöhen der wichtigsten Drittländer
Quelle: <http://www.mwk-bw.de/Ministerium/Europa/KOM_2004_338.pdf>

3.7 CAS Institute
Quelle: <http://english.cas.ac.cn/Eng2003/page/home.asp>

4.1 Rubinrote Farbe im Fensterglas
Quelle: <http://www.zm-online.de/zm/24_03/pages2/titel1.htm>

4.2 EUV Mikroskop
Quelle: © Fraunhofer-IWS; ILT und IOF

4.3 Nanometer-Motor
Quelle: Lawrence Berkeley National Laboratory

4.4 Kantilever
Quelle: heise online news 14.04.2000,
<http://monet.physik.unibas.ch/nose/biosensor/biofull_d.htm>

4.5 Schematische Darstellung des Experiments
Quelle: <http://monet.physik.unibas.ch/nose/biosensor/biofull_d.htm>

4.6 Millipede
Quelle: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/28149>

4.7 Millipede Chip
Quelle: <http://www.wcm.at/story.php?id=7832>

4.8 Anwendungsgebiete der Nanobiotechnologie
Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH, „Nanobiotechnologie: Wenn Moleküle zu Werkzeugen werden“,<http://www.fz-juelich.de/ptj>

4.9 Anwendungsfelder der Nanobiotechnologie in der Medizin
Quelle: TA_SWISS Studie, TA 47/2003 „Nanotechnologie in der Medizin“

4.10 Therapiepotenziale der Nanotechnologie
Quelle: TA_SWISS Studie, TA 47/2003 „Nanotechnologie in der Medizin“

4.11 Sensoren im modernen Automobil
Quelle: mstnews No.1/03, February 2003
“Microsystems –where are we heading”, Sven Krueger, Florian Solzbacher

4.12 Priorisierung nanotechnologischer Komponenten/Systemen und deren Anwendungsfelder im Automobilbau
Quelle: W. Luther, N. Malanowski u.a., „Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt Innovations- unTechnikanalyse“, 2004

4.13 Nanotechnologische Komponenten im Automobil
Quelle: <http://www.nanotruck.de/set_themen/nanomobil.htm>

4.14 Bevölkerung Deutschlands bis 2050
Quelle: Statistisches Bundesamt im Juni 2003
<http://allpr.de/autoren/s/Statistisches+Bundesamt.html>

4.15 Biochip für die Massenanalyse von Erbmolekülen
Quelle: <http://www.innovations-report.de/html/berichte/biowissenschaften_chemie/bericht-17375.html>

4.16 Ausschnitt der Doppelhelix-Struktur der menschlichen DNA
Quelle:
<http://www.stern.de/wissenschaft/forschung/index.html?id=522942&nv=pr&pr=1>

4.17 Internationaler Umsatz an medizinischen Geräten
Quelle: VDI Nachrichten, „Läuft's in Deutschland läuft's auch woanders";
<http://www.vdinachrichten.com/vdi_nachrichten/aktuelle_ausgabe/akt_ausg_detail.asp?source=paging&cat=1&id=18784&cp=1>

4.18 Testsystem für DNA, RNA und Proteine
Quelle: Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut Tübingen;
Grafik: Ärztezeitung; <http://www.aerztezeitung.de/docs/2002/11/21/2m0801.asp>

4.19 Labor in Chipgröße
Quelle: <http://www.manager-magazin.de/it/artikel/0,2828,327525,00.html>

4.20 Einzelzell- und 3D-Gewebe-Mikrokapillar-Biochips für funktionelle Proteomik und Biomonitoring
Quelle: <http://idw-online.de/pages/de/image6623>

4.21 Mikrofluidische Lab-on-a-Chip-Struktur
Quelle: <http://idw-online.de/pages/de/news61823>

4.22 Cochlea Implantat
Quelle: „Taube hören Blinde sehen"; Trillium-Report 2004
<http://trillium.de/files/Sep04_Neurochips.pdf#search='Nano%20CochlearImplant>
<http://www.bbcig.de/ci.html>
<http://www.cochleaimplant.info/forschung/grundlagenforschung_en.htm>

4.23 Retina-Implantat
Quelle:BMBF-Aktuell vom 26.04.2000, „Elektronisches Netzhaut-Implantat für Blinde NMI-Reutlingen – Projekt Retina-Implantat,
<http://www.nmi.de/deutsch/showprj.php3?id=3&bereich=2&u_breich=1&typ=1>

4.24 Der gläserne Mensch
Quelle: <http://www.3sat.de/nano/vision/09818/>

5.25 Bedeutung der Nanotechnologie in der Medizin
Quelle: TA-SWISS, Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung, „Nanotechnologie in der Medizin", November 2003

4.26 Nanoroboter
Quelle: A. Jordan, Nanotechnologie - ein neues Konzept für Diagnostik und Therapie maligner Tumoren,
<http://www.nanoscience.de/hansenanonet/archiv/2003-01-28/onkologe_7_2001.pdf>

4.27 Prinzip des Raster-Tunnelmikroskop
Quelle: <http://www.deutsches-museum.de/ausstell/meister/rtm.htm>

4.28 Computermodell eines harnstoffhaltigen Dendrimers
Quelle: „Dendrimere in der Diagnostik und Therapie", Forschungszentrum Rossendorf
<http://www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pNid=333>

4.29 Eingekapselte Radionuklide
Quelle: „Dendrimere in der Diagnostik und Therapie", Forschungszentrum

Rossendorf
<http://www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pNid=333>

4.30 Zelle eines bösartigen Gehirntumors
Quelle: Forschungszentrum Jülich, „Wenn Moleküle zu Werkzeugen werden“
<http://www.fz-juelich.de/ptj/datapool/page/494/NanoBiotech.pdf>

4.31 Zwei verschiedene Ansätze der Nanoelektronik
Quelle:<http://www.initiative-biotechnologie.de/uni/nano/NanoMIT-21.pdf>

4.32 Westeuropäischer ITK-Markt
Quelle: <http://www.systems-world.de/index.php?view=print&id=6554&CMEntries_ID=41390&>

4.33 Entwicklung der Mikroprozessoren
Quelle: “Einführung in die Nanotechnologie” Prof. O. Ambacher, TU Ilmenau, Institut für Festkörperelektronik, Fachgebiet Nanotechnologie

4.34 Moorsche Gesetz
Quelle: „Chips an der Grenze“, <http://www.quarks.de/quanten/0604.htm>

4.35 Extrapolierte Kurve der moorschen Gesetzmäßigkeit
Quelle: Klaus von Klitzing, „Der Quantensprung von der Mikro- zur Nanoelektronik“
<http://www.forum.mpg.de/archiv/20030708/docs/komplsyst_klitzing.pdf>

4.36 Strukturgrößen in Abhängigkeit zu den Chipkosten
Quelle: VDI-Nachrichten, „Nanostrukturen treiben Kosten“

4.37 Zukunft der Nanoelektronik
Quelle: Klaus von Klitzing, „Der Quantensprung von der Mikro-zur Nanoelektronik“
<http://www.forum.mpg.de/archiv/20030708/docs/komplsyst_klitzing.pdf>

4.38 Schematischer Aufbau einer RTD
Quelle: <http://www.uni-duisburg.de/THP/publikationen/forum/forum99/02tech/0205/fram9.htm>

4.39 Strom-Spannungs-Kennlinie einer RTD
Quelle: „Resonanz-Tunneldioden und Heterobipolartransistoren in dynamischen Digitalschaltungen hoher Funktionsdichte“, Dipl.-Ing. Peter Glösekötter, Dortmund, Juli 2002

4.40 Schematischer Aufbau eines Resonanz-Tunnel-Transistors
Quelle: http://www.fz-juelich.de/isg/mbe/diploma.html

4.41 SET-Transistor aus AL-AL_2O_3-AL mit Winkel-Schrägschattenbedampfung
Quelle: Publikationen INFOPHYSTECH Nr. 22 SET-Einzelelektronentunneln
<http://www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/techno/arbeitsgebiete/fue/physik/08445/index.php; VDI - 2005-01-11>

4.42 Triple Gate Transistor
Quelle: <http://www.amo.de/tri_gate_mosfet.html>

4.43 REM-Aufnahme eines Triple-Gate-Transistors
Quelle: <http://www.amo.de/tri_gate_mosfet.html>

4.44 5000-fache REM-Vergrößerung eines Triple-Gate-Transistors
Quelle: <http://www.amo.de/tri_gate_mosfet.html>

4.45 Elektronenmikroskopische Querschnittsabbildung an der Kontaktfläche zweier direkt gebondeter und getemperter Saphir-Wafer
Quelle:
<http://www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/techno/arbeitsgebiete/fue/physik/08370/index.php>

4.46 Querschnitt eines Floating-Dot- Speichertransistors aus Silizium Nanodots
Quelle: /O. Winkler, M. Baus, M. Lemme, B. Spangenberg, H. Kurz, "Floating Dot Memory Transistors on Silicon On Insulator Substrate", European Congress on Advanced Materials and Processes, EUROMAT 2003, Lausanne/Switzerland, September 2003

4.47 Kohlenstoffnanoröhre
Quelle:
<http://www.myresearch.de/genboard.php?cmd=f_thread&scmd=show&company=530&btype=7>

4.48 Hybridisierungsablauf zu 3 Bindungspartnern des Kohlenstoffs
Quelle: <http://www.fbv.fh-frankfurt.de/mhwww/Erlaeuterungen/15Hybridisierung-sp2.htm>

4.49 Ein- und mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen
Quelle:
<http://www.elektroniknet.de/topics/bauelemente/fachthemen/2004/0015/index.htm>

4.50 Modell eines "Buckyballs" mit 60 Kohlenstoffatomen
Quelle: <http://buckminster.physics.sunysb.edu>,
<http://www.ethlife.ethz.ch/articles/tages/Batlogg.html>

4.51 Nanoröhren als Metall und Halbleiter
Quelle: <http://www.lti.uni-karlsruhe.de/lehre/Halbleiterbauelemente/script/2004-02-02.pdf>

4.52 Versuchsanordnung zur Trennung von Nanoröhren
Quelle:
<http://www.helmholtz.de/de/Forschung/Schluesseltechnologien/EINBLICK.html;jsessionid=22B2BDE70AD07919F46585065876F6AA>

4.53 Molekültransistor
Quelle: Dresdner neuste Nachrichten, 25.02.2002
<http://www.lancs.ac.uk/depts/physics/staff/schomerus/research/dnn/2002_02_25_dnn.php>

4.54 Kohlenstoff-Nanotransistor
Quelle: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/27509>

4.55 Dünnfilmtransistor aus Nanodrähten
Quelle: <http://www.wissenschaft-online.de/abo/ticker/649548>

4.56 Proteinfasern ohne Überzug ("bare fiber") und mit Metall-Überzug ("labeled fiber)
Quelle: <http://www.pnas.org>

4.57 Crossbar Latch
Quelle: Computer Zeitung Nr. 6, 7. Februar 2005

4.58 Schematischer Aufbau eines Crossbar Latch
Quelle: <http://www.at-mix.de/crossbar_latch.htm>

4.59 Einschränkung der Ladungsträgerbewegungsfreiheit durch Reduzierung der räumlichen Dimension
Quelle: Mark Rossi, Ladungsträger-Relaxations- und Rekombinationsmechanismen in Halbleiterquantenpunkte, Dezember 2002
<http://www.physik.uni-stuttgart.de/institute/pi/4/Nano-Lab/Papers/diplrossi.pdf#search='Quantenpunkte'>

4.60 Indiumarsenid-Quantenpunkt
Quelle:
<http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2001/pri0125.htm>

4.61 Hergestellter Quantenpunkt im selbstorganisierten Wachstum
Quelle: Mark Rossi, Ladungsträger-Relaxations- und Rekombinationsmechanismen in Halbleiterquantenpunkte, Dezember 2002

4.62 Querschnitt eines InGaAs HEMT
Quelle:<http://de.wikipedia.org/wiki/High_Electron_Mobility_Transistor>

4.63 Doppelheterostruktur
Quelle: Gerhard Franz „Grundlagen der Mikro- und Nanotechnik“

4.64 Das Innere eines Quantenpunkt-Lasers
Quelle: <http://www.tu-berlin.de/presse/tui/98jun/grund.htm>

4.65 Dreifach durchlöchert: photonischer Kristall mit Bandlücke für Zentimeterwellen
Quelle: Pro Physik, 01.07.2003, Rainer Scharf„ Photonische Kristalle – Optische Materialien für das 21. Jahrhundert“

4.66 Schematische Darstellung einer magnetischen Eisen/Chrom Heteroschichtstruktur
Quelle: <http://www.rasch-multimedia.de/info/download/pdf/forum2000/sfb491.pdf>

4.67 Spin-Feldeffekt-Transistor
Quelle: <http://www-tfp.physik.uni-karlsruhe.de/~zuelicke/TALKS/habilkolloq.pdf#search='Rashba%20Effekt'>

4.68 Spin-Feldeffekt-Transistor ohne Gatespannung
Quelle: <http://www-zhv.rwth-aachen.de/zentral/dez3_themen_themen1_04.htm>

4.69 Spin-Feldeffekt-Transistor mit angelegter Gatespannung

4.70 Spinventilheterostruktur
Quelle: <http://www.rasch-multimedia.de/info/download/pdf/forum2000/sfb491.pdf>

4.71 MRAM-Speicherzelle
Quelle: <http://www.ep3.uni-halle.de/lehre/HeraeusAnwendungen/Folie10-de.html>

4.72 Magnetischer Tunnelkontakt
Quelle: <http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/PIT-II/teaching/ExPhys-V_WS03-04/ExP-V(3)-Kap5_6-6%20TMR.pdf>

4.73 TMR Element
Quelle: <http://www.wmi.badw-muenchen.de/E23/teaching/Magnetoelektronik/Magnetoelektronik_SS2004.html>

4.74 2*2 Array einer MTJ Speicherzelle
Quelle: Intel,
<http://www.ece.umd.edu/courses/enee759h.S2003/references/Stefan_Korea_022703.pdf>

4.75 MRAM Architektur
Quelle: <www.research.ibm.com/resources/news/20001207_mramimages.shtml>

4.76 MRAM Speicherzellen-Array mit zusätzlichen Dioden zur Vermeidung von Störeffekten beim Lesevorgang
Quelle: „Spinelektronik“, Prof. Dr. Rudolf Gross, Dr. Achim Marx,
<http://www.wmi.badw.de/E23/lehre/skript/ME/ME_Kapitel12.pdf>

4.77 Eindimensionales magnetisches Auswahlschema (Lesen und Schreiben) für magnetoresistive Speicherzellen
Quelle: „Spinelektronik“, Prof. Dr. Rudolf Gross, Dr. Achim Marx,
http://www.wmi.badw.de/E23/lehre/skript/ME/ME_Kapitel12.pdf

4.78 MRAM-Speicherzelle basierend auf Spinventilen und gekreuzten Leiterbahnen
Quelle: <http://www.weltderphysik.de/de/1404.php#navcontent>

4.79 Hybride MRAM-Zelle
Quelle: IEEE Spectrum

4.80 Der Aufbau einer GMR-Zelle
Quelle: IBM

4.81 Molekülaufbau der ferroelektrischen Polymere
Quelle: Intel

4.82 Schichtaufbau eines vierfach gestapelten polymer-basierten ferroelektrischen-RAM (PFRAM)
Quelle:Intel

4.83 Die unterschiedlichen Temperaturzyklen der Chalkogenide für Kristallisation (grüne-Kurve) und Amorphisierung (rote-Kurve)
Quelle: <http://www.ovonyx.com/tech_html.html>

4.84 Zellaufbau eines OUM unter Nutzung von Chalkogeniden
Quelle: <http://www.thompson.ece.ufl.edu/Fall2004/lecture19-20.pdf>

4.85 NROM-Zelle: zwei physikalische Bits werden in einer Zelle gespeichert
Quelle: <http://www.saifun.com/content.asp?id=15>

4.86 Flash-Speicherzelle
Quelle: <http://www.industrieportal.at/ireds-9266.html>

4.87 Speicher-Zelle aus 1T1MTJ-Zellen
Quelle:
<http://www.freescale.com/files/technology_manufacturing/doc/VSLI2002_1MB_MRAM_PRES.pdf>

4.88 Elektrische Leitfähigkeit von Kunststoffen
Quelle: <http://www.seilnacht.com/Lexikon/k_elektr.html>

4.89 Organischer OFET
Quelle: <http://www.pc.rub.de/ofet/main.html>

4.90 WORM-Speicher auf Kunststoff-Silizium-Basis
Quelle: <http://physicsweb.org/articles/news/7/11/5/1>

4.91 Nanomechanisches Speicherkonzept Millipede
Quelle: <http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/rsc.millipede.html>

4.92 OLED Patente
Quelle: „OLED – Patentkampf prägt die Innovation“, VDI nachrichten, Santa Clara, 12.11.04,
<http://www.rki-i.com/doc/OLED.htm>

4.93 Schematischer Aufbau einer OLED
Quelle: <http://www.elektroniknet.de/topics/bauelemente/fachthemen/2004/0032/index_a.htm>

4.94 Energetische Verhältnisse einer OLED
Quelle: < http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=974915211&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=974915211.pdf>

4.95 Prozesse in einer OLED
Quelle: Norwin von Malm, „Ladungsträgerfallen in amorphen organischen Halbleitern“, Darmstadt, 2003
<http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967763908&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=967763908.pdf>

4.96 Passivmatrix Display
Quelle: <http://www.vs-c.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/neu/oled/oled.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/neu/oled/passiv.vscml.html>

4.97 Aufbau und Schaltprinzip eines aktivmatrix Displays
Quelle: <http://www.elektroniknet.de/topics/bauelemente/fachthemen/2004/0032/index_a.htm>

4.98 Großflächiges 15 Zoll Display
Quelle: Kodak
<http://homepages.fh-giessen.de/~hg10013/Lehre/MMS/SS03/WebelsiepD/text.htm>

4.99 Vergleich zwischen OLED und LCD/TFT
Quelle: <http://www.elektroniknet.de/news/archiv.php?mode=shownews&NewsID=958&CatID=1>

4.100 Lebensdauer der OLEDs
Quelle: Kodak
<http://homepages.fh-giessen.de/~hg10013/Lehre/MMS/SS03/WebelsiepD/text.htm>

4.101 Chipkarte mit OLED Display
Quelle: Siemens AG

4.102 Marktentwicklung von OLEDs
Quelle: iSuppli, compiled by DigiTimes, April 2005

4.103 OLED-Hersteller-Ranking nach Umsatz
Quelle:iSuppli, compiled by DigiTimes, April 2005
<http://www.english.china.escasiaexpo.com/GENINFO/Market_Updates_20050415_OLED408.doc>

4.104 Nanoröhrchen für Flachbildschirme
Quelle: <http://www.ftd.de/ub/in/1088603071333.html?nv=se>

4.105 Fluid Focuslinse
Quelle: <http://www.golem.de/0403/30072.html>

4.106 Prinzipdarstellung der E-Paper-Technik
Quelle: <http://www.wissenschaft-online.de/artikel/674297&template=bild_popup&_bild=2>

4.107 Gitter-Lichtventil
Quelle: <http://www.loehneysen.de/neu08-2000.html#77>

4.108 Autofokus-Kameramodul
Quelle: <http://www.photoscala.de/node/view/841?from=80>
<http://www.sem.samsung.com>
<http://www.varioptic.com>

4.109 Investitionen der Nanotechnologie
Quelle: Technology Review 4/2005, S. 32

5.1 Bekanntheitsgrad der Nanowelt
Quelle: <http://www.komm-passion.de/index.php?id=648>

5.2 Anwendungen der Nanotechnologie
Quelle: VDI-TZ

5.3 Wirkungsgrad der Solarzellen
Quelle: „Photovoltaik: Solarstrom und Solarzellen in Theorie und Praxis“, <http://www.solarserver.de/wissen/photovoltaik.html>

5.4 Jährliches Weltmarktvolumen nanotechnologischer Produkte
Quelle: Wolfgang Luther und Norbert Malanowski, „Das wirtschaftliche Potenzial der Nanotechnologie“, Juni 2004

5.5 Büschel von Membranfasern
Quelle: <http://www.baikum.de/portal/news_detail,557,65836,detail.html>