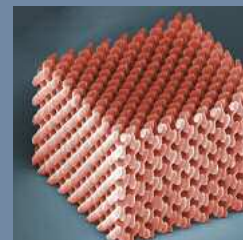
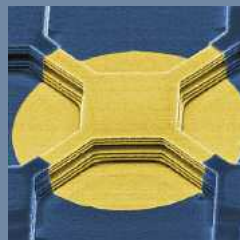
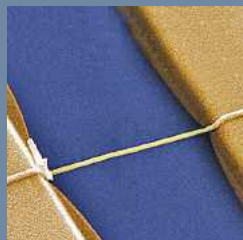
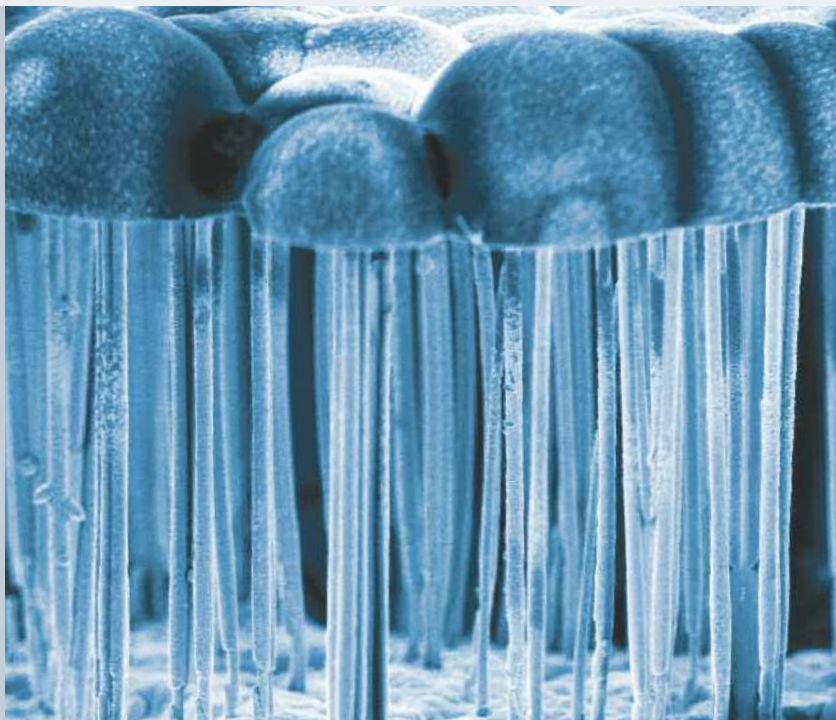




# Mikro-Nano-Integration

Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik



An **Hessen** führt kein Weg vorbei.



# Mikro-Nano-Integration

Einsatz von Nanotechnologie  
in der Mikrosystemtechnik

# Impressum

## Mikro-Nano-Integration - Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik

Band 13 der Schriftenreihe der Aktionslinie  
Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums  
für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

### Erstellt von

mst-Netzwerk Rhein-Main e. V. -  
Kompetenznetzwerk Mikrosystemtechnik  
c/o IHK Darmstadt  
Rheinstraße 89, D-64295 Darmstadt  
Telefon 06151 871284  
www.mst-rhein-main.de

Dipl.-Ing. Felix Greiner  
Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak  
Technische Universität Darmstadt  
Institut für Elektromechanische Konstruktionen

Dr. Guido Tschulena  
sgt Sensorberatung Dr. Guido Tschulena

Dipl.-Ing. Winfried Korb  
arteos GmbH

### Redaktion

Sebastian Hummel  
Hessisches Ministerium  
für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

Dr. Rainer Waldschmidt  
Alexander Bracht  
Markus Lämmer  
Hessen-Agentur, Hessen-Nanotech

### Herausgeber

HA Hessen-Agentur GmbH  
Abraham-Lincoln-Straße 38-42  
D-65189 Wiesbaden  
Telefon 0611 774-8614  
Telefax 0611 774-8620  
www.hessen-agentur.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die  
Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit  
der Angaben. Die in der Veröffentlichung geäußerten  
Ansichten und Meinungen müssen nicht mit der  
Meinung des Herausgebers übereinstimmen.

### © Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

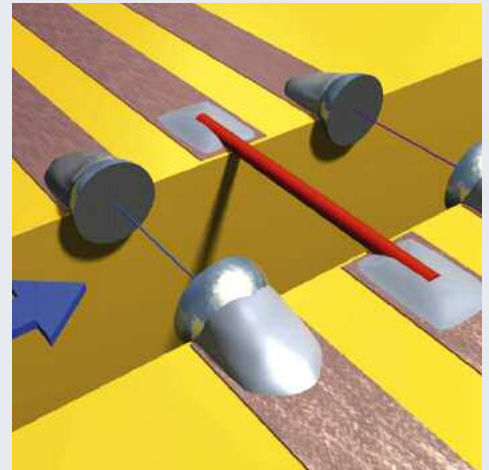
Kaiser-Friedrich-Ring 75  
D-65185 Wiesbaden  
www.wirtschaft.hessen.de

Vervielfältigung und Nachdruck -  
auch auszugsweise - nur nach vorheriger  
schriftlicher Genehmigung.

**Gestaltung:** WerbeAtelier Theißen, Lohfelden  
**Druck:** Werbedruck GmbH Horst Schreckhase, Spangenberg

[www.hessen-nanotech.de](http://www.hessen-nanotech.de)

1. Auflage Mai 2009  
2., unveränderte Auflage November 2011



Siehe Abb. 55 (Quelle: Technische Universität Darmstadt:  
I. Stöhr, F. Greiner, Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak)

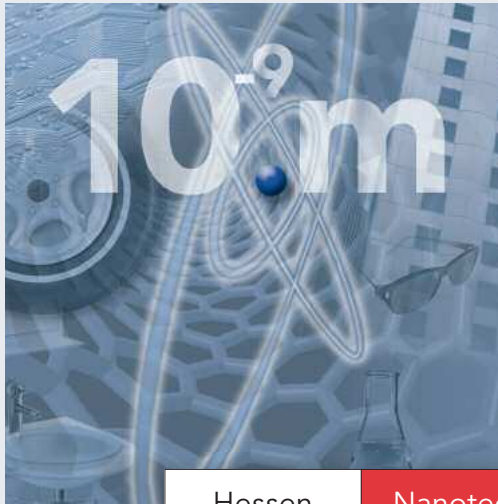
Titel: Quellen der Abbildungen:

groß: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,  
Darmstadt (Prof. Dr. R. Neumann) in Kooperation mit der Technischen  
Universität Darmstadt (Fachgebiet Chemische Analytik,  
Prof. Dr. W. Ensinger und Institut für Elektromechanische  
Konstruktionen, Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak)

klein v.l.n.r.: Fachhochschule Wiesbaden, Institut für Mikrotechnologien  
IMtech, Prof. Dr. habil. F. Völklein; Universität Kassel, Institut für  
Nanostrukturierungstechnologie und Analytik INA, Prof. Dr. H. Hillmer;  
Nanoscribe GmbH, Karlsruhe, Prof. Dr. M. Wegener

# Inhalt

Aktionslinie Hessen-Nanotech .....	2
Vorwort .....	3
Zusammenfassung .....	4
<b>1</b> Von Nanotechnologie und Mikrosystem- technik zur Mikro-Nano-Integration .....	8
<b>2</b> Wirtschaftliche Potenziale der Mikro-Nano-Integration .....	17
<b>3</b> Vom Nanomaterial zum MNI-System .....	23
<b>4</b> Produktchancen und Anwendungen der Mikro-Nano-Integration .....	38
<b>5</b> Innovationspotenziale für hessische Unternehmen .....	82
<b>6</b> Forschungsförderung .....	87
<b>7</b> Anhang .....	94



#### **Aktionslinie Hessen-Nanotech**

Die Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung bündelt und koordiniert die Aktivitäten des Landes Hessen im Bereich der Nano- und Materialtechnologie sowie der angrenzenden Felder der Oberflächentechnologie, der Mikrosystemtechnologie und der Photonik.

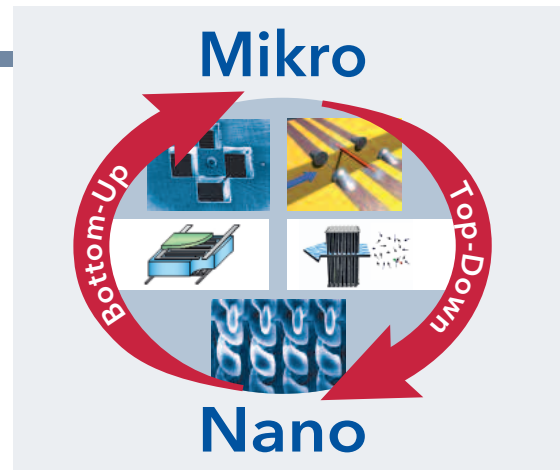
Die bei der landeseigenen Wirtschaftsförderungsgesellschaft HA Hessen Agentur GmbH angesiedelte Aktionslinie hat das Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit hessischer Technologie- und Dienstleistungsunternehmen weiter zu stärken.

Dazu werden Kompetenzen, Erfahrungen und Potenziale des Wirtschaftssektors dargestellt und weiterentwickelt. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Vernetzung von Technologieanbietern und -anwendern.

Aufgaben der Aktionslinien sind auch das Technologie- und Standortmarketing, die Organisation des Informationsaustauschs und die Informationsvermittlung sowie die Förderung der Netzwerkbildung.

[www.hessen-nanotech.de](http://www.hessen-nanotech.de)

# Vorwort



Wer möchte heute auf automatisch auslösende Airbags oder elektronische Stabilitätsprogramme im Automobil verzichten? Diese Produkte sind ohne eine ausgefeilte Mikrosystemtechnik nicht möglich. Doch die „klassische“ Mikrosystemtechnik gelangt zunehmend an ihre Grenzen. Die steigenden Anforderungen an die Systemtechnik hinsichtlich Miniaturisierung und Erweiterung des Leistungsspektrums sind mit gängigen Methoden und Materialien nicht zu erfüllen.

Einen Ausweg bietet die Nanotechnologie. Mit ihr können Materialien bereitgestellt und Verfahren entwickelt werden, um Bauteile technisch leistungsfähiger und gleichzeitig kleiner produzieren zu können. Dank der Nanotechnologie können zukünftig etwa Sensibilität und Lebensdauer von Sensoren erhöht werden bei gleichzeitiger Senkung des Energie- und Materialverbrauchs.

Die Mikro-Nano-Integration, die Kombination aus beiden Disziplinen, wird der Mikrosystemtechnik zu großen Entwicklungssprüngen verhelfen. Die Innovationskraft deutscher Unternehmen und Forschungseinrichtungen ist europaweit Spitze und erlaubt ein Kopf-an-Kopf-Rennen mit den USA und führenden asiatischen Industrienationen. Hessen ist mit starken Firmen, herausragenden Forschungseinrichtungen sowie aktiven Cluster- und Netzwerkinitiativen in einer hervorragenden Position.

Die Produkte der Mikro-Nano-Integration werden zunehmend in unseren Alltag einziehen und in wenigen Jahren nicht mehr wegzudenken sein. Dass hessische Produkte dabei an der Spitze stehen werden, zeigt ein Beispiel aus der Raumfahrt: Der Mars-Rover Spirit, der seit 2004 den Mars untersucht, wurde mit Sensoren eines hessischen Unternehmens ausgestattet und erfüllt auch unter den äußerst schwierigen klimatischen Bedingungen des roten Planeten zuverlässig seine Pflicht.

Ich bin zuversichtlich, dass insbesondere der hessische Mittelstand auf dem Gebiet der Mikro-Nano-Integration seine Chancen nutzen wird. Die vorliegende Broschüre soll dabei helfen, indem sie einen Überblick über aktuelle und zukünftige Möglichkeiten gibt und den aktuellen Forschungsstand zeigt.

Dieter Posch  
Hessischer Minister für Wirtschaft,  
Verkehr und Landesentwicklung

# Zusammenfassung

Die Mikro-Nano-Integration bringt die Nanotechnologie in die Mikrosystemtechnik und baut so die Brücke zwischen dem Nanokosmos und dem täglichen Leben, der Makrowelt. Gegenüber den etablierten Nanotechnologie-Anwendungen, wo die Nanoeffekte nur vollflächig (z. B. kratzfeste Oberflächen) oder im Volumen ausgenutzt (z. B. Füllstoffe) verwendet werden, bietet die Mikro-Nano-Integration (MNI) die Möglichkeit, Effekte der Nanoskaligkeit gezielt innerhalb der gewünschten Mikrostrukturen verfügbar zu machen. Für komplexe Systemlösungen wird die MNI künftig eine Schlüsselfunktion übernehmen.

## **Mikrosystemtechnik**

Die Mikrosystemtechnik (MST) hat sich in den vergangenen 20 Jahren von einem Forschungsgebiet mit dem Fokus auf Einzelkomponenten zu einer industriellen Querschnittstechnologie gewandelt. Besonders der Einsatz in der Automobilelektronik hat zu diesem Durchbruch beigetragen. Die klassischen Komponenten der Mikrosystemtechnik, die Sensoren und Aktoren, werden heute in großen Stückzahlen gefertigt. Sie bilden die Basis für breit gestreute Anwendungen in Elektronik, Mechanik, Optik sowie Biologie und Chemie. Moderne Mikrosysteme sind inzwischen vernetzt, autark und intelligent und weit mehr als eine Komponente. Sie haben sich zu eigenständigen Knoten in intelligenten Systemen wie z. B. Sensornetzwerken entwickelt. Durch die fortschreitende Miniaturisierung werden damit ständig weitere Anwendungsbereiche erschlossen. Mit einem Weltmarktvolumen von etwa 20 Milliarden US-Dollar im Jahr 2008 hat die MST unmittelbar eine hohe wirtschaftliche Bedeutung errungen. Dazu zählen Produkte wie Schreib-Leseköpfe und Tintenstrahldruckköpfe für Computer, wie Drucksensoren und Drehratensensoren im Kraftfahrzeug oder wie Mikrospiegel für Beamer. Betrachtet man den Wert der Systeme, deren Funktion durch die MST erst ermöglicht wird, so liegt das Marktvolumen bei einem etwa zehnfachen Betrag.

Ursprünglich hatte sich die MST aus der Siliziumbasierten Halbleitertechnik der Elektronik entwickelt. Die Massenfertigungstechnik wurde von dort übernommen und bringt heute wesentliche Kostenvorteile gegenüber großen Systemen. Durch ihren Querschnittscharakter stellt die MST in zahlreichen Anwendungsfeldern eine wichtige Schnittstelle zwischen der Makrowelt und dem Mikro- sowie neuerdings auch dem Nanokosmos dar. Diese Anbindung leistet die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT), mit deren Hilfe z. B. einem Mikrosensor das zu messende Gas aus der Prozessanlage sicher zugeführt wird. Gleichzeitig wird das Mikrosystem vor der rauen Umgebung geschützt. Auf der anderen Seite der Größenskala verkleinern sich jedoch die Strukturen in der Mikro- und Nanoelektronik von heute 130 nm auf 45 nm im Jahr 2010, so dass die MST ebenfalls durch ständige Miniaturisierung (Downscaling) in die Nanowelt vordringt.

Somit kommt der Mikrosystemtechnik mehr und mehr die Aufgabe zu, die Brücke zwischen der Makrowelt und der Nanotechnologie zu schlagen. Diese Brückenfunktion wird heute unter dem Begriff Mikro-Nano-Integration und die entscheidende Schnittstelle zwischen Mikro- und Nanowelt unter Mikro-Nano-Interface beziehungsweise Nano-Mikro-Interface breit diskutiert.

## Nanotechnologie

In den vergangenen zehn Jahren hat sich die Nanotechnologie ebenfalls als eine Querschnittstechnologie mit vielen Anwendungen in unterschiedlichen Lebensbereichen etabliert. Als gemeinsames Merkmal dient die Kleinheit der Grundbausteine, die eine charakteristische Größe von einigen Nanometern bis zu 100 nm, also einem zehntausendstel Millimeter, erreichen. Nanoskalige Füllstoffe sorgen für verbesserte Fahreigenschaften von Autoreifen, nanoskalige Partikel auf Oberflächen erleichtern die Reinigung beziehungsweise verhindern die Schmutzablagerung auf Textilien und Fassaden. Nanoschichten ermöglichen die dichte Informationsspeicherung in Festplattenlaufwerken. Diese herausragenden Eigenschaften aus dem Nanokosmos machen solche und viele andere Produkte auf dem Markt erfolgreich.

Die Nanotechnologie behandelt Nanoobjekte und -strukturen wie z. B. Titandioxid-Nanopartikel, Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT: Carbon-Nano-Tube) sowie Aluminiumdioxid-Nanopartikel oder Nanoporen in Polymeren. Sie werden oft direkt in und auf makroskopischen Produkten eingesetzt und können dort ihre Qualitäten nur zum Teil ausspielen.

## Mikro-Nano-Integration (MNI)

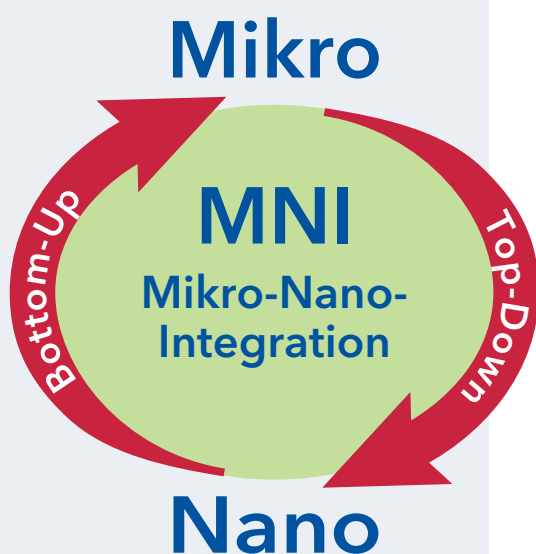
In welcher Weise kommen nun die Objekte der Nanotechnologie mit der Mikrosystemtechnik in Berührung? Unter dem Begriff Mikro-Nano-Integration werden die Integration von Nanoobjekten und -strukturen in die Mikro- und Makroebene sowie der Einsatz von Nanotechnologie-basierten Effekten in Mikrosystemen verstanden. Die MNI macht die Nanotechnologie „anschlussfähig“ für den Einsatz in neuen Produkten. Für komplexe Systemlösungen wird die MNI künftig eine Schlüsselfunktion übernehmen. Dabei werden zwei entgegengesetzte Vorgehensweisen verfolgt: Top-Down und Bottom-Up, siehe Abbildung 1.

Der Top-Down-Ansatz entspricht im Wesentlichen der stetig fortgeführten Miniaturisierung. Die Prozesse der MST können immer kleinere Strukturen herstellen beziehungsweise bearbeiten, so dass die funktionalen Strukturen kleiner als 100 nm werden. Diese Vorgehensweise wird beispielsweise bei Silizium-basierten Mikrosensoren angewendet, bei denen durch Downscaling die Empfindlichkeit gesteigert wird.

Beim Bottom-Up-Ansatz werden Nanoobjekte in Mikrokomponenten integriert, und dadurch die Effektivität bzw. Funktionalität der Mikrosysteme verbessert. Eine besondere Herausforderung bildet das gezielte Einbringen der Nanoobjekte in die Mikrosysteme. Dazu werden Nanoobjekte in Mikrostrukturen nur an den Stellen synthetisiert, die zuvor durch geeignete Strukturierungsprozesse vorbereitet wurden. Ein anderer Weg nutzt die physikalisch-chemischen Prinzipien der Selbstorganisation aus, die sich durch die Selbstausrichtung und/oder Selbstmontage (Self-Assembly) von Nanoobjekten beschreiben lassen.

Abbildung 1:

Die Mikro-Nano-Integration (MNI) umfasst die Integration von Nanoobjekten, Nanostrukturen bzw. Effekten der Nanotechnologie in Mikrosysteme. Man spricht vom Top-Down-Ansatz beim Downscaling von Mikrostrukturen in den Nanometerbereich. Bei der Bottom-Up-Vorgehensweise werden dagegen Nanoobjekte gezielt und geordnet in Mikrosysteme eingebracht.



## Chancen der MNI

Obwohl die MNI noch ein sehr junges Forschungsgebiet darstellt, sind bereits zahlreiche Anwendungsgebiete erschlossen worden. Dazu zählen die Sensorik, Aktorik, Elektronik, Optik sowie Chemie und Energiesysteme. Einige MNI-Systeme sind bereits als Produkte auf dem Markt erhältlich.

Derzeit bringt der **Einsatz von Nanotechnologie in der Fertigung der Mikrosystemtechnik** und der Mikroelektronik entscheidende Wettbewerbsvorteile. So ermöglicht nanoporöses Silizium in der Drucksensor-Fertigung niedrigere Prozesskosten. Die Selbstorganisation von Nanoporen wurde erfolgreich in die Fertigung leistungsfähigerer Mikrochips integriert.

Der Brückenschlag von der Nanotechnologie in die Mikro- und Makroumgebung birgt die Chance **Effekte der Nanotechnologie gezielt innerhalb der gewünschten Mikrostrukturen** verfügbar zu machen. Dies bedeutet einen entscheidenden Gewinn an Funktionalität gegenüber den etablierten Nanotechnologie-Anwendungen. Dort werden bisher Nanoeffekte meist vollflächig (z. B. kratzfeste Oberflächen) oder im Volumen ausgenutzt (z. B. Füllstoffe).

Schon heute ermöglichen Grenzflächeneffekte an Nanoschichten den kommerziellen Erfolg von **Magnetfeldsensoren** in Computerfestplatten und Sensoren für die Raddrehzahl bei den Stabilitätsprogrammen im Kraftfahrzeug. **CO<sub>2</sub>-Sensoren** mit MNI-Schicht für Klimaanlage überwachen die Luftqualität.

In der **faseroptischen Kommunikationstechnik** sind nanotechnologisch optimierte optische Anpassungsschichten bereits im Einsatz. Optische Filter mit photonischen Kristallen werden bald verstärkten Einsatz finden.

Nanoporöse Metalloxid-Oberflächen steigern die Leistungsfähigkeit **chemischer Sensoren** und werden in Kürze kommerziell verfügbar sein. Elektrisch kontaktierte Carbon-Nano-Tubes (CNTs) und Nanodrähte eröffnen ganz neue Möglichkeiten in der Niedertemperatur-**Gassensorik** und der **Gasströmungssensorik**.

Nanoschichten erlauben neue Ansätze in der **Aufbau- und Verbindungstechnik**, die damit den Anforderungen nach Niedertemperaturprozessen und weiter miniaturisierten Kontakten nachkommen wird.

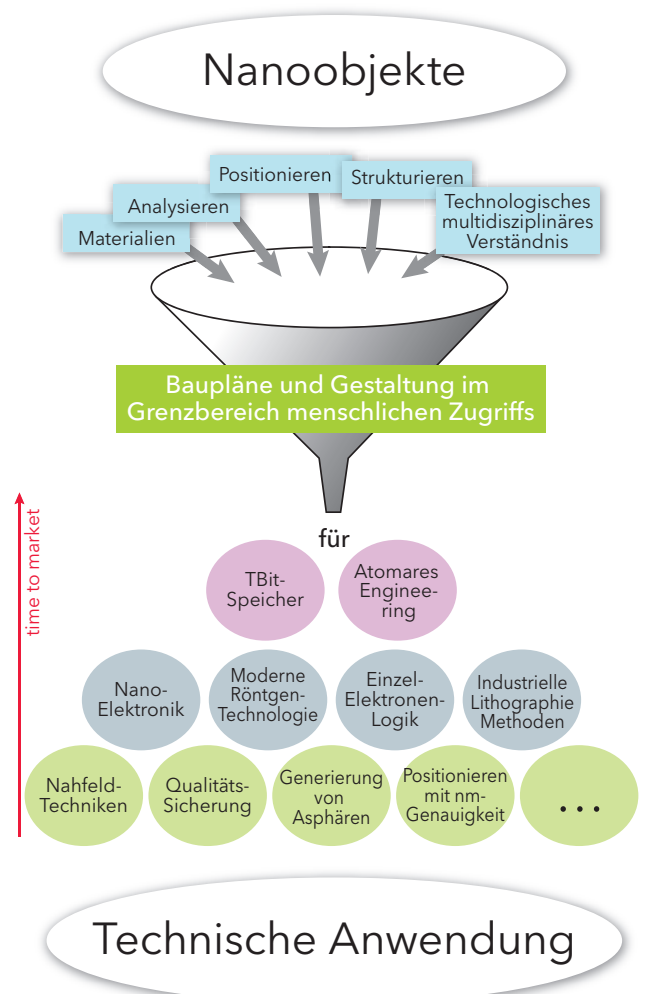
## Herausforderungen der MNI

Das etablierte große Marktvolumen der Mikrosystemtechnik lässt für die Mikro-Nano-Integration ein hohes Marktpotenzial erwarten. Auf dem Weg dahin ist jedoch ein Nadelöhr zu überwinden, siehe Abbildung 2. Um die Nanoobjekte in technische Anwendungen überführen zu können, muss die Technologie weiterentwickelt werden, z. B. die Materialtechnologie, die Strukturierung sowie die Positionierung. Eine besondere Herausforderung bilden die Gestaltung und Anordnung – die „Baupläne“ – die von den zunächst ungeordneten Nanoobjekten zur geordneten Systemintegration in die Mikrosysteme mit konkreten technischen Anwendungen führen. Die Lösung dieser Aufgaben ist letztlich entscheidend, den technologischen Vorsprung der heimischen Unternehmen zu sichern.

Abbildung 2:

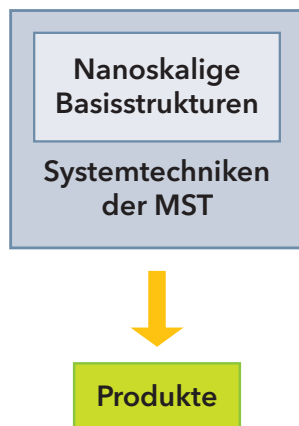
Engpass Mikro-Nano-Integration.

(Quelle: in Anlehnung an Bachmann, G.: Innovationsschub aus dem Nanokosmos, VDI-Technologiezentrum, 1998, S.123)



# Glossar

- **Aktoren**  
Lineare und rotatorische Antriebe, z. B. Elektromotoren („künstliche Muskeln“)
- **AVT (engl.: Packaging)**  
Aufbau- und Verbindungstechnik: Systemintegration mit den Schritten Positionieren, Fügen und Gehäusen.
- **Bottom-Up**  
Herangehensweise in der Mikro-Nano-Integration. Grundgedanke: Strukturausbildung durch Selbstorganisation oder Selbstmontage.
- **CNT**  
Kohlenstoff-Nanoröhren (engl.: Carbon-Nano-Tubes): Intensiv untersuchte nanoskalige Basisstrukturen mit herausragenden elektrischen und mechanischen Eigenschaften.
- **Halbleitertechnik**  
Fertigungstechnik für mikro- und nanoelektronische Schaltungen, z. B. Prozessoren in Computern.
- **Lithographie**  
Strukturierungsverfahren für Lacke: Durch eine Maske wird lichtempfindlicher Lack belichtet. Dieser ist dann mit Chemikalien selektiv löslich, sodass Lackstrukturen im Mikro- und Nanometerbereich entstehen.
- **Mikrometer**  
 $1/1\ 000\ 000\ \text{m} = 10^{-6}\ \text{m}$ , abgekürzt  $1\ \mu\text{m}$
- **MNI**  
Mikro-Nano-Integration: Integration von Nanoobjekten, Nanostrukturen bzw. Effekten der Nanotechnologie in Mikrosysteme.



- **MST**  
Mikrosystemtechnik: Entwurf, Fertigung und Applikation miniaturisierter technischer Systeme, deren Bauteile und Komponenten typische Strukturgrößen bzw. Toleranzen im Mikrometer- bis Nanometerbereich besitzen.
- **Nanometer**  
 $1/1\ 000\ 000\ 000\ \text{m} = 10^{-9}\ \text{m}$ , abgekürzt  $1\ \text{nm}$
- **Nanoskalige Basisstrukturen**  
0-D: Partikel  
1-D: Linienelemente (z. B. Drähte, CNTs)  
2-D: Schichten bzw. Plättchen  
3-D: Poren oder komplexe Strukturen
- **Nanotechnologie**  
Materialien, Verfahren und Systeme, bei denen Strukturen oder Genauigkeiten im Bereich kleiner  $100\ \text{nm}$  vorliegen.
- **Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis**  
Teilt man einen großen Körper in viele kleine auf, vergrößert sich die zusammengenommene Oberfläche und damit das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis extrem, vgl. zerkrümelter Keks.
- **Produkte der MST**  
Prominente Beispiele:
  - Schreib-Lese-Köpfe für Computer-Festplatten
  - Tintenstrahl-Druckköpfe
  - Beschleunigungssensoren (Kfz, Mobiltelefon)
  - Mikrospiegelsysteme in Beamern
  - Infrarot-Sensoren (Bewegungsmelder)
- **Selbstmontage (engl.: Self-Assembly)**  
Anordnung einzelner Objekte in Systemen ohne Energiezufuhr von außen. Eine klare Unterscheidung von der Selbstorganisation ist nicht immer möglich.
- **Selbstorganisation (engl.: Self-Organization)**  
Anordnung von Objekten in Systemen mit Energiezufuhr von außen, z. B. elektrische Felder. Eine klare Unterscheidung von der Selbstmontage ist nicht immer möglich.
- **Sensoren**  
Wandler mechanischer, chemischer, fluidmechanischer und anderer Größen in elektrische Signale, z. B. Reifendrucksensor im Kfz
- **Top-Down**  
Herangehensweise in der Mikro-Nano-Integration. Grundgedanke: Struktur von außen einem Material aufprägen.

# 1 Von Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik zur Mikro-Nano-Integration

Die meisten technischen Geräte und Systeme des Alltags sind in ihren Dimensionen an den Menschen angepasst. Man spricht von der Makrowelt. Entscheidende Funktionen erhalten sie jedoch aus dem Mikrokosmos. Eine Spielekonsole mit Bewegungsdetektion oder ein Mobiltelefon mit Lagesensor sind nur mit Mikrosystemen möglich. Sie stellen die Verbindung zwischen der Mikro- und der Makrodimension her.

Seit den Fortschritten der Mikroelektronik ist es üblich, die Längenskala im logarithmischen Maßstab zu skalieren, siehe Abbildung 3. Auf der logarithmischen Skala ist der Abstand zwischen 10 nm und 100 nm genauso groß dargestellt wie der zwischen 10 µm und 100 µm, obwohl er in Realität 1 000-mal kleiner ist. Diese Darstellung macht die große Spannweite der Dimensionen in heutigen technischen Systemen begreifbar.

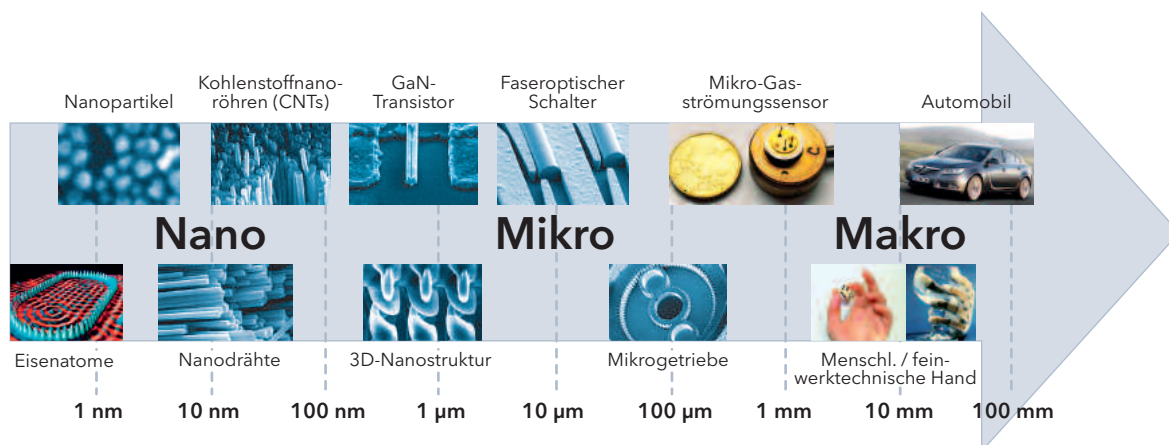
Oft bewegen sich die Größen der technischen Systeme im Millimeter- oder Zentimeterbereich, ihre funktionsbestimmenden Elemente – etwa Schichtdicken – jedoch im Mikro- und Nanometerbereich.

In der jüngsten Zeit sind die Forschungen und technischen Entwicklungen zum Verständnis für die Physik und Chemie der Nanomaterialien und Nanotechnologien fortgeschritten. Diese Entwicklungen haben eine Vielzahl neuartiger, nanoskaliger Basisstrukturen geschaffen, die interessante Möglichkeiten darstellen neue Produkte zu erzeugen oder bestehende zu verbessern.

Diese Broschüre zeigt, wie sich die neuen nanoskaligen Basisstrukturen in Produkte integrieren lassen. Diese Integrationsfunktion wird als Mikro-Nano-Integration (MNI) bezeichnet: Sie baut die Brücke zwischen den Nanostrukturen und der makroskopischen Anwendungsumgebung. Für das Verständnis bilden die Nanotechnologie und die Mikrosystemtechnik die Basis und werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

Abbildung 3: Dimensionen und Beispiele in der Nano-, Mikro- und Makro-Welt.

(Quellen v.l.n.r.: Physics Today 1993; Merck KGaA, Darmstadt; GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt; TU Darmstadt, Chemie, Prof. Dr. J. J. Schneider; TU Darmstadt, Elektrotechnik und Informationstechnik, Prof. Dr.-Ing. D. Pavlidis; Nanoscribe GmbH, Karlsruhe, Prof. Dr. M. Wegener; IMM Mainz GmbH; Micromotion GmbH, Mainz; arteos GmbH, Seligenstadt; TU Darmstadt, Institut EMK; GME Communications)



# 1.1 Was ist Nanotechnologie?

Ein Nanometer entspricht dem Durchmesser weniger Atome, bzw. der Länge eines einfachen organischen Moleküls. Bei Strukturabmessungen in diesen Dimensionen machen sich charakteristische Effekte und quantenmechanische Phänomene bemerkbar. Materialien mit besonderen und manchmal uner-

warteten Eigenschaften zeichnen sich durch Größeneffekte, durch Struktureffekte und durch Oberflächen- bzw. Grenzflächeneffekte aus. Entscheidend hierbei ist, dass mit dieser Nanoskaligkeit neue Eigenschaften verbunden sind.

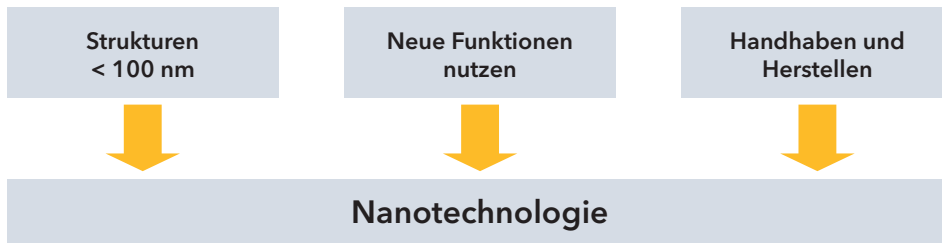


Abbildung 4: Definition der Nanotechnologie.

## 1.1.1 Definitionen der Nanotechnologie

Die Begrifflichkeiten der Nanotechnologie sind noch nicht in allen Bereichen einheitlich definiert. Die Internationale Standardisierungs Organisation (ISO) fasst unter dem Begriffsfeld „Nanotechnologien“ die folgenden Punkte zusammen:

1. Das Verständnis und die Kontrolle von Substanzen oder Prozessen auf der Nanoebene, die typischer Weise, aber nicht ausschließlich, in einer oder mehreren Dimensionen unterhalb von 100 Nanometern sind und durch ihre größenabhängigen Effekte in der Regel neue Anwendungen hervorbringen.
2. Die Nutzung von Eigenschaften nanoskaliger Materialien, die sich von den Eigenschaften einzelner Atome, Moleküle und Bulk Materialien unterscheiden und dadurch verbesserte Materialien, Anwendungen und Systeme erzeugen, die diese neuen Eigenschaften anwenden.

Die Nanotechnologie besteht also aus einer Kombination der folgenden Punkte:

### 1. Strukturen kleiner 100 nm:

Die Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die kleiner als 100 nm sind.

### 2. Neue Funktionen nutzen:

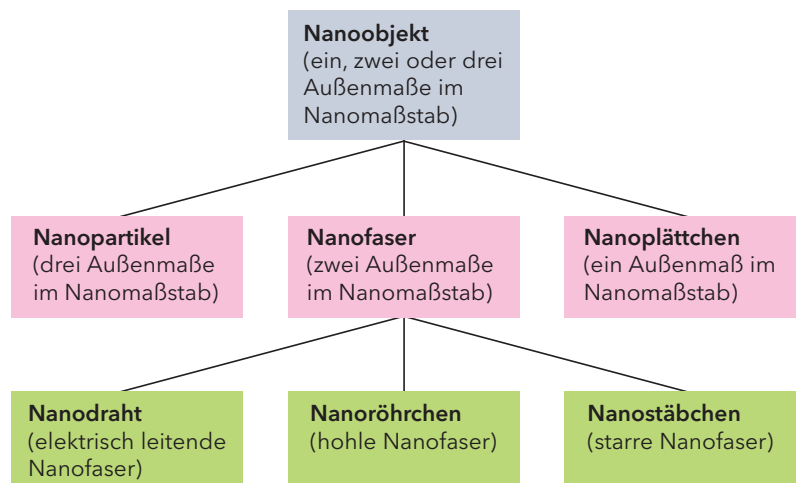
Es kommen neuartige charakteristische Effekte und Phänomene zum Einsatz, die auf der atomaren Ebene auftreten und bisher kaum in Produkten umgesetzt wurden. Diese Effekte werden genutzt um Produkte herzustellen und / oder Prozesse zu betreiben.

### 3. Handhaben und Herstellen:

In der Nanotechnologie werden einzelne Nanoobjekte, also Nanostrukturen und Nanokomponenten, gezielt hergestellt sowie gehandhabt und zwar in der Größenordnung kleiner 100 nm.

Einen wichtigen Schritt in Richtung Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten geht die Internationale Technische Spezifikation ISO/TS 27687, [ISOTS2008], vgl. Abbildung 5. Neben Definitionen zu Strukturen kleiner 100 nm beschreibt sie Möglichkeiten zur Messung der Partikelgröße. Einen Überblick über die nationalen, europäischen und internationalen Normungsaktivitäten gibt die Broschüre „NanoNormung“ (Band 8 der Schriftenreihe Hessen-Nanotech).

Abbildung 5: Nanotechnologische Begriffe und ihre hierarchische Zuordnung (Ausschnitt). (Quelle: DIN)



## 1.1.2 Neue Funktionen

Einige neue Funktionen sind bereits von neuen Produkten aus dem Alltag bekannt wie Antireflexschichten auf Gläsern zur Abdeckung von Solarzellen, mineralischer UV-Schutz in Sonnencreme oder antibakterielle Ausstattung von Textilien.

Die Dimension der Nanopartikel ermöglicht diese neuen Eigenschaften; sie kann wesentlich kleiner als die Wellenlänge von Licht sein. Eine weitere Ursache der neuen Merkmale ist das sehr große Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Die Oberflächenatome besitzen nicht so viele Bindungspartner wie die Atome im Inneren. Folglich können Nanomaterialien z. B. katalytisch aktiver sein.

Neben der Materialzusammensetzung und der Form von Nanopartikeln lassen sich Eigenschaften allein durch die Partikelgröße bzw. Schichtdicke einstellen. Jede physikalische Eigenschaft hat eine kritische Länge, wie etwa die Abschirmungslänge von Elektronen, die von der minimalen Schichtdicke einer blickdichten Metallbeschichtung bekannt ist. Mit diesen Kenntnissen können die Eigenschaften der mikro- und makroskopischen Produkte - wie eine veränderte Leitfähigkeit oder ein niedrigerer Schmelzpunkt - durch eine Beschichtung oder einen kontrollierten Aufbau aus Nanomaterialien gezielt herbeigeführt werden.

Funktion	Beispiele für Auswirkungen
<b>geometrisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selbstorganisations- und Selbstmontagekräfte relativ zu anderen Kräften erhöhen</li> </ul>
<b>mechanisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Haftung zwischen Oberflächen erhöhen / senken</li> <li>▪ Superplastizität / Superelastizität ermöglichen</li> <li>▪ Härte, Bruchzähigkeit und -festigkeit erhöhen</li> </ul>
<b>thermodynamisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fließeigenschaft von viskosen Fluiden verbessern</li> <li>▪ Temperatur des Schmelzpunktes senken</li> <li>▪ Benetzungswinkel erhöhen / senken</li> </ul>
<b>elektrisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elektrischen Widerstand erhöhen / senken</li> <li>▪ Zusätzliche elektronische Zustände ermöglichen</li> </ul>
<b>magnetisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Para- oder ferromagnetische Eigenschaften verbessern</li> <li>▪ Riesenmagnetowiderstand (GMR) ermöglichen</li> </ul>
<b>optisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Farben ändern durch Partikelgrößenänderung</li> <li>▪ Effektive Brechzahl anpassen, vgl. Kapitel 4.4</li> <li>▪ Neue Filtereigenschaften ermöglichen</li> </ul>
<b>biochemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Organische Kompatibilität herstellen</li> <li>▪ Sensorisch aktivieren</li> <li>▪ Biologische Anlagerungen verringern</li> </ul>
<b>chemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Katalytische Wirkung mit vergrößerter Reaktionsfläche intensivieren</li> <li>▪ Zusätzliche Adsorptionsfläche für Moleküle erzeugen</li> </ul>

Tabelle 1: Übersicht über neue Funktionen

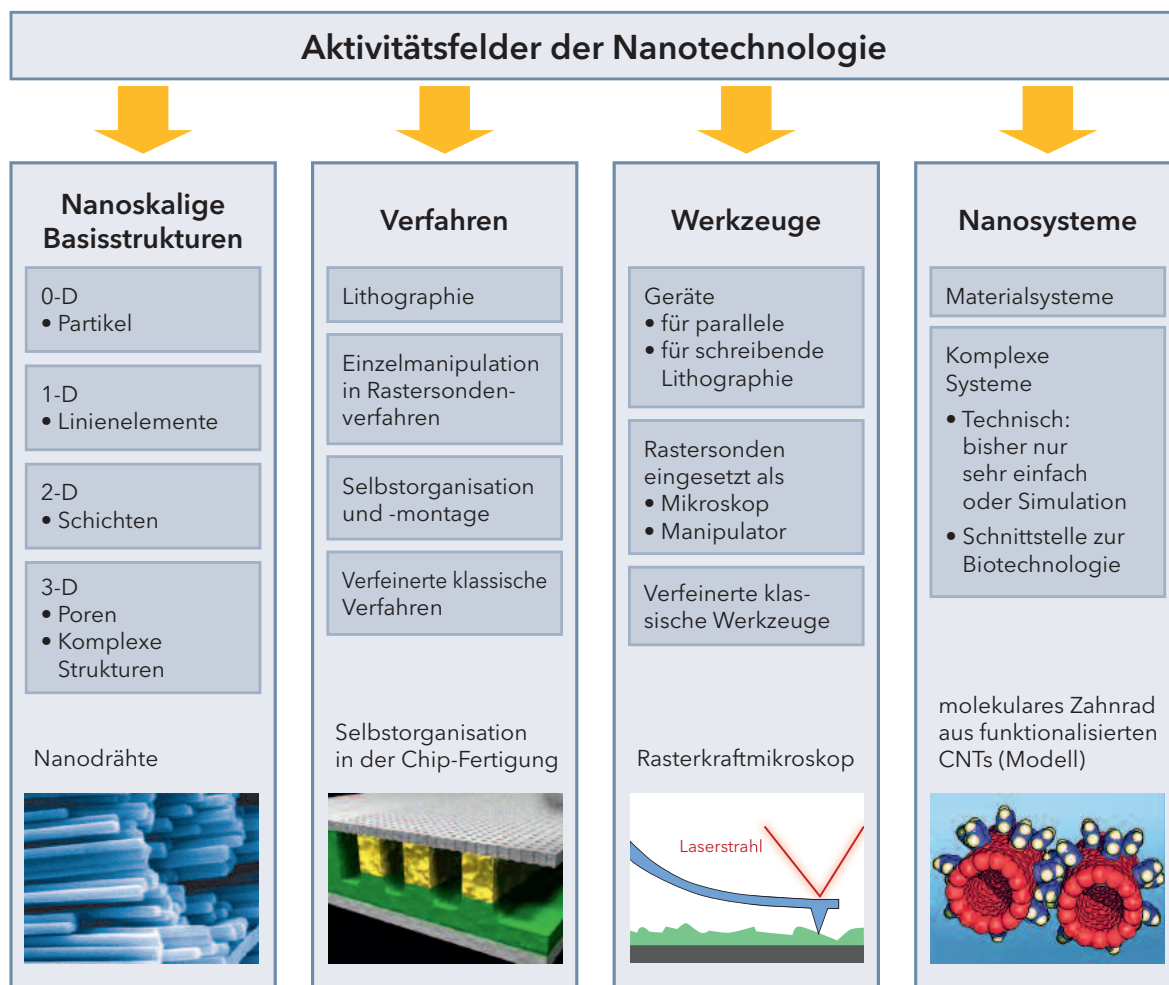
## 1.1.3 Aktivitätsfelder der Nanotechnologie

Die Grundbausteine der Nanotechnologie sind die **nanoskaligen Basisstrukturen**, vgl. Abbildung 6. Die Nanotechnologie befasst sich mit deren Wirkungsweise, Herstellung, Charakterisierung und Modifikation.

Mit chemischen und physikalischen **Verfahren** lassen sich die Eigenschaften dieser Basisstrukturen an die jeweilige Anwendung anpassen bzw. dafür einsetzen.

Die Kombination dieser Aktivitätsfelder mit den **Werkzeugen** der Nanotechnologie wird den Aufbau von **Nanosystemen** ermöglichen. Bei ihnen liegen alle wesentlichen Abmessungen im Nanometerbereich. Zu diesen Systemen kann man auch Materialsysteme zählen, da sie nanoskalige Basisstrukturen modifizieren, kombinieren sowie in Materialmatrizen integrieren. Komplexere Nanosysteme sind größtenteils noch Fiktion, wie z. B. ein molekulares Zahnrad.

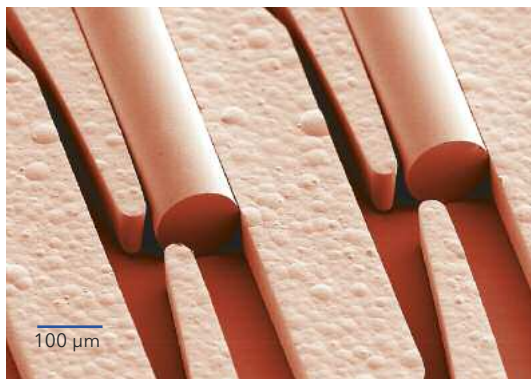
Abbildung 6:  
Aktivitätsfelder der Nanotechnologie.  
(Quellen v.l.n.r.: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt; IBM Research, T.J. Watson RC; <http://xnet.rrc.mb.ca/davidb/nanotools.htm>), vgl. [Paschen2004].



## 1.2 Was ist Mikrosystemtechnik?

Eine weit verbreitete Definition (nach [Gerlach2006]) beschreibt die Mikrosystemtechnik (MST) wie folgt:

*Die Mikrosystemtechnik umfasst den Entwurf, die Fertigung und die Applikation von miniaturisierten technischen Systemen, deren Bauteile und Komponenten typische Strukturgrößen bzw. Toleranzen im Mikrometer- bis Nanometerbereich besitzen.*



Die Mikrosystemtechnik kann durch ihre Wortbestandteile „**Mikrotechnik**“ und „**Systemtechnik**“ näher hinsichtlich der angewendeten Technologien und Arbeitsgebiete charakterisiert werden, siehe Abbildung 8.

Abbildung 7: Anwendung aus der MST: Faseroptischer Schalter.  
(Quelle: IMM Mainz GmbH)

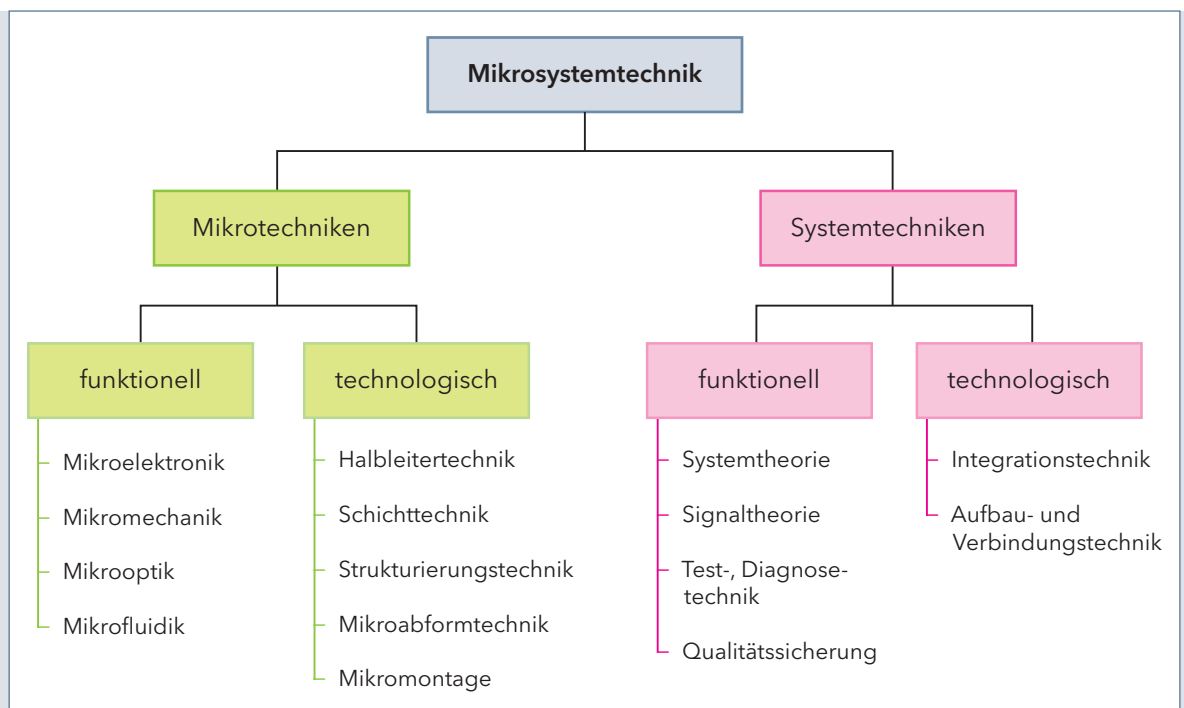


Abbildung 8: Begriffsdefinition der Mikrosystemtechnik.  
(Quelle: in Anlehnung an [Gerlach2006])

## 1.2.1 Mikrotechnik

Die Mikrotechnik ist die Fertigungstechnik für zwei- oder dreidimensionale Strukturen mit Abmessungen im Mikrometer- bis Nanometerbereich bzw. für Formteile mit Maßtoleranzen in diesem Größenbereich. Die meisten dazu nötigen Verfahren stammen aus der Halbleitertechnologie bzw. Mikroelektronik oder der Feinwerktechnik, siehe Tabelle 2.

Die genaue Strukturherstellung erfolgt vorwiegend mit Hilfe der Photolithographie auf Scheiben – Wafern – in Nutzen- oder Batchfertigung. Durch Vereinzeln entstehen separate Bauteile, wobei mehrere Bauteile durch Mikromontageverfahren zu Komponenten zusammengefasst werden können.

Die Fortentwicklung der feinwerktechnischen Fertigungsverfahren stellt Alternativen für größere Maßtoleranzen bereit: Für kleine Stückzahlen bietet die Mikroelektroerosion Kosten- und Geschwindigkeitsvorteile. Für die Massenproduktion konnten sich der Mikrospritzguss, das Heißprägen und die Mikrogalvanik etablieren.

Mikrotechniken der MST	Beispielhafte Verfahren	Beschreibung
<b>Schichtherzeugung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ CVD: Chemical Vapor Deposition</li> <li>■ PVD: Physical Vapor Deposition (Aufdampfen, Sputtern, etc.)</li> <li>■ Thermische Oxidation</li> <li>■ Belacken</li> </ul>	Polymere, ein- oder polykristalline, keramische oder metallische Schichten mit hoher Reinheit. Je nach Verfahren beträgt die Schichtdicke einige Nanometer bis zu einigen hundert Mikrometern.
<b>Strukturieren / Vereinzeln</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nass- / Trockenätzen</li> <li>■ Laserbearbeitung</li> <li>■ Spanen</li> <li>■ Erodieren</li> </ul>	3-D-Strukturierung mit Ätztechnik sowie weiterentwickelten Verfahren der Feinwerktechnik wie Ultrapräzisionsbohren oder -schleifen; neue Verfahren des Abtragens mit Elektronenstrahl, Plasmastrahl, Laserstrahl oder Flüssigkeitsstrahl; Strukturgrößen im Mikrometerbereich
<b>Abformen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ (Spritz-)Gießen</li> <li>■ Heißprägen</li> <li>■ Galvanik</li> </ul>	Kostengünstige Massenfertigung: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ polymere Mikrosystemtechnik; z. T. anschließend in Keramik überführt</li> <li>■ metallische Mikrosysteme aus polymeren Mikrostrukturen abgeformt</li> </ul>

Tabelle 2: Übersicht der wichtigsten Mikrotechniken in der MST

## 1.2.2 Systemtechnik

Mikrosystemtechnik ist das Verknüpfen der einzelnen Technologien und Komponenten zur Herstellung eines Mikrosystems. Mikrotechnische Komponenten wie Mikroaktoren, Mikrosensoren, Mikrokanäle und Signalverarbeitungsmodule werden integriert zu mikrosystemtechnischen Produkten.

Ein Mikrosystem umfasst zumeist mehrere Funktionen und ist daher aus mehreren mikrotechnischen Komponenten aufgebaut. Funktionell lässt sich eine Hierarchie im Mikrosystem definieren (siehe Abbildung 9). Mit Fertigungsverfahren der Mikrotechnik werden Funktions- und Formelemente - z.B. ein Biegebalken oder eine Membran - zu einer Komponente - z.B. einem Beschleunigungssensor - integriert, die zusammen mit mikroelektronischen Komponenten ein Mikrosystem ergeben. Ein Beispiel dafür ist ein intelligentes Beschleunigungssensorsystem mit der Steuerung für ein Airbagsystem im Kraftfahrzeug, Abbildung 10.

In den letzten zwei Jahrzehnten sind viele mikrotechnische Komponenten und Mikrosysteme entwickelt und in konkrete Produkte wie Drehratensensoren im Automobil, Drucksensoren in der industriellen Prozessautomatisierung oder Mehrachsbeschleunigungssensoren im Mobiltelefon und der Spielekonsole überführt worden. Die wesentlichen Anwendungsbereiche von Mikrosystemen sind:

- Automobil-, Luft- und Raumfahrtelektronik
- Peripherie-/Endgeräte der Informationstechnik
- Konsumelektronik
- Telekommunikation
- Industrieelektronik
- Prozessautomatisierung
- Medizintechnik
- Umwelttechnik

Durch die fortgeschrittene Systemtechnik sowie die zentrale Rolle der Mikrosysteme in Geräten und Prozessen lässt sich in der MST mit wenig Materialeinsatz eine große Wertschöpfung realisieren.

Abbildung 9:  
Aufbauhierarchie von  
Mikrosystemen.  
(Quelle: in Anlehnung  
an [Gerlach2006])

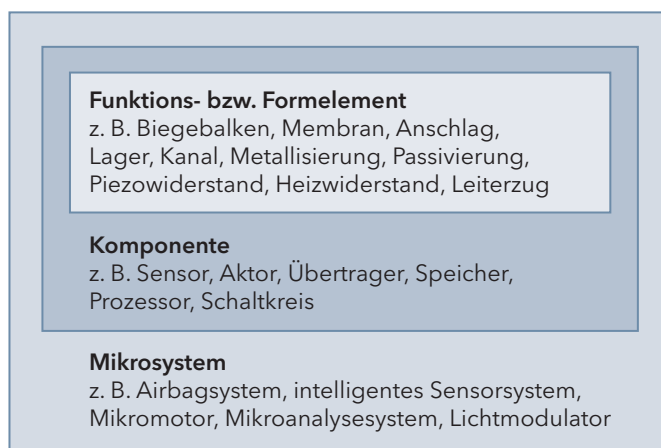


Abbildung 10:  
Beschleunigungssensor.  
(Quelle: Robert Bosch GmbH)

# 1.3 Was ist Mikro-Nano-Integration (MNI)?

Schon durch ihre Größenordnung haben die Nanotechnologie und die Mikrosystemtechnik technologisch eine große Schnittmenge. Außerdem verwenden sie gleiche Verfahren und Werkzeuge. Es liegt also nahe, die beiden Querschnittstechnologien in Verbindung zu bringen.

Außerdem eröffnet sich der Nanotechnologie mit der Mikrosystemtechnik ein interessanter Markt, denn die MST ist sowohl im Mittelstand als auch bei großen Unternehmen etabliert, vgl. Kapitel 2.

Der Verbraucher nimmt die MNI zunächst nur mittelbar wahr, z.B. durch günstigere Rad-Drehzahlsensoren für Stabilitätsprogramme und günstigere Drucksensoren für Airbags im Kraftfahrzeug oder als „Luftqualitäts-Sensor“, der in der Klimaanlage den CO<sub>2</sub>-Gehalt überwacht. Zukünftig wird er sie etwa in gedruckter Elektronik in der Kleidung oder in Mikrobrennstoffzellen in Computern oder Mobiltelefonen erleben, siehe Kapitel 4.

Technisch behandelt die Mikro-Nano-Integration die Einbettung nanoskaliger Basisstrukturen in Mikrosysteme. Sie umfasst außerdem den Einsatz Nanotechnologie-basierter Effekte zur Fertigung oder für den Betrieb von Mikrosystemen. Die Vermittler-Rolle der Mikrosystemtechnik ermöglicht dabei den Brückenschlag aus der Nanometerdimension über die MST in die Makrowelt der Produkte, vgl. Abbildung 11.

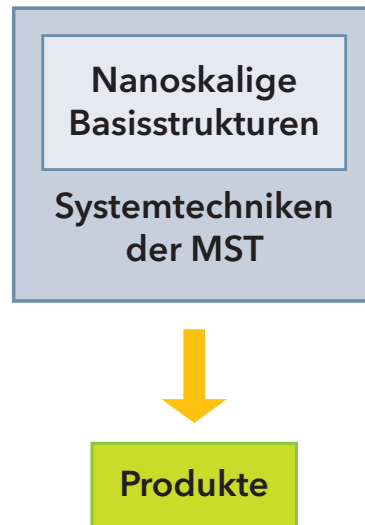
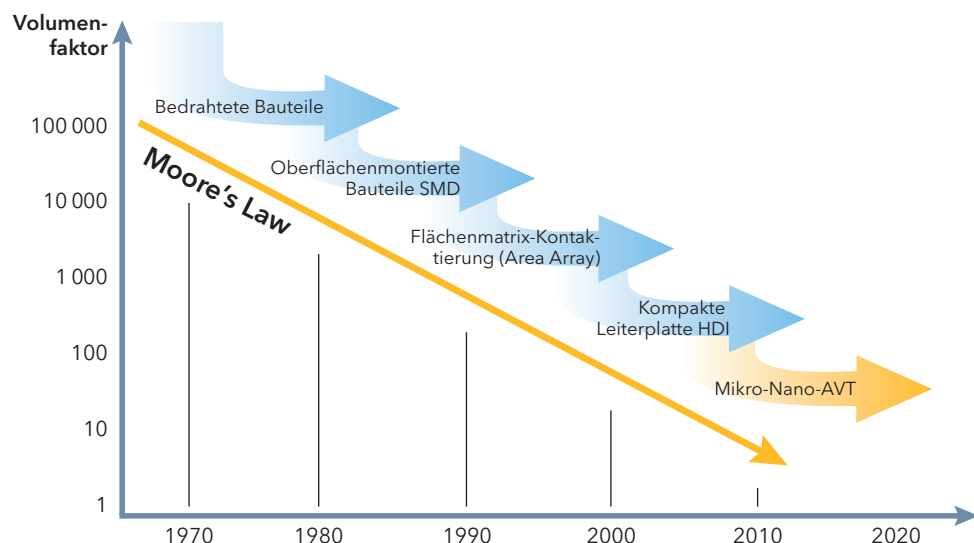


Abbildung 11: Umfang der Mikro-Nano-Integration (MNI).

Im amerikanischen Sprachraum bezeichnet man Mikrosysteme als MEMS (Microelectromechanical systems). MNI-Systeme gehören dort zu den NEMS (Nanoelectromechanical systems).

Bei der weiteren Miniaturisierung stößt die herkömmliche Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) an ihre Grenzen. Grenzflächenphänomene wie die Oberflächenspannung dominieren und geben zum Beispiel die derzeitige minimale Größe von industriellen Verbindungskonstruktionen vor. Die Systemintegration in Richtung „More than Moore“ lässt sich vor allem durch die Mikro-Nano-Integration fort-schreiben, siehe Abbildung 12.

Abbildung 12: Trends in der Systemintegration auf der Komponenten-Ebene. Der Volumen-faktor sinkt stetig: Pro integrierter Funktion ist immer weniger Bauvolumen nötig. Die Entwicklung schreitet v. a. in der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) wellenartig voran. (Quelle: in Anlehnung an [Wolter2006])



Die MNI lässt sich anhand der verwendeten Verfahren grundsätzlich in zwei Herangehensweisen einteilen:

■ **Top-Down**

Mit weiterentwickelten Methoden der MST funktionsbestimmende, nanoskalige Basisstrukturen in Mikrosystemen erzeugen oder dort einbringen

**Grundgedanke:** Struktur von außen einem Material aufprägen

■ **Bottom-Up**

Mit Verfahren aus der supramolekularen Chemie, Biochemie oder Physik nanoskalige Basisstrukturen in Mikrosysteme gezielt selbstgesteuert einbringen oder dort gezielt selbstgesteuert synthetisieren

**Grundgedanke:** Strukturausbildung durch Selbstorganisation oder Selbstmontage nanoskaliger Basisstrukturen oder molekularer Bausteine („Building Block“)

Diese Klassifizierung dient nur der groben Einteilung der Herangehensweise, wobei auch kombinierte Verfahren möglich sind. Der Top-Down- und der Bottom-Up-Ansatz können zum gleichen Ergebnis führen, wie in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3:  
Mikro-Nano-Integration am Beispiel von zwei Ansätzen zur Integration eines metallischen Nanodrahts (Durch das BMBF gefördertes Forschungsprojekt INANOMIK [www.institut-emk.de/inanomik](http://www.institut-emk.de/inanomik)).

Ansatz	Verfahren	Beispiel
<b>Top-Down</b>	<p>Strukturdefinition:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lithographie</li> </ul> <p>Strukturherzeugung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Additiv: Beschichten, Implantieren</li> <li>■ Subtraktiv: Spanen, Ätzen, Erodieren, Strahlbearbeitung</li> </ul> <p>Positionierung / Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Handhabung</li> <li>■ Kontaktieren mit Hilfsstoff</li> </ul>	<p>Nanodraht (gestrichelt) im Polymerblock (grün) mit AVT im Mikrosystem positionieren und verbinden</p> <p>Nanodraht durch Ätzen freilegen</p>
<b>Bottom-Up</b>	<p>Strukturdefinition:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Molekülform</li> <li>■ Grenzflächeneigenschaften</li> <li>■ Feld zur unterstützten Selbstorganisation</li> </ul> <p>Strukturherzeugung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Additiv: Vor-Ort-Synthese</li> <li>■ Subtraktiv: Strahlbearbeitung</li> </ul> <p>Positionierung / AVT:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Selbstorganisation und Selbstmontage der nanoskaligen Basisstrukturen</li> </ul>	<p>Nanodraht mit Dielektrophorese im Fluid ausrichten und galvanisch verbinden</p> <p>Fluid entfernen</p>

## 2 Wirtschaftliche Potenziale der Mikro-Nano-Integration

Durch die Mikro-Nano-Integration wird der Anwender neue Produkte angeboten bekommen und Produktverbesserungen bemerken. Diese reichen von neuen Fabrikaten wie Geruchssensoren - „elektronische Nasen“ - über kürzere Analysezeiten - z. B. bei der Blutuntersuchung beim Arzt - bis hin zur Migration von Merkmalen aus kostenintensiven Mobiltelefonen in preiswertere Modelle.

Die Endkunden und Konsumenten nehmen die verbesserten Eigenschaften der Fahrzeuge, Hausgeräte, Anlagen und Maschinen wahr:

- direkt etwa bei der berührungslosen Temperaturmessung in modernen Fieberthermometern;
- indirekt durch verbesserte Endprodukteigenschaften wie erhöhte Sicherheit - etwa durch automatische Reifendrucküberwachung im Pkw - oder geringere Leistungsaufnahme des Mobiltelefons.

Die Mikro-Nano-Integration bietet vielfältige Chancen für alle, die aktiv am Wertschöpfungsprozess von MNI-Produkten beteiligt sind. Dies betrifft:

- die Zulieferer von Nanomaterialien und Fertigungsgeräten sowie zugehöriger Dienstleister.
- die Hersteller nanotechnologisch veredelter Mikro-Bauelemente und Mikrosysteme. Hierzu gehören insbesondere die Gruppe der Sensoren aber auch die der Aktoren und die der mikroelektronischen Systeme.
- die Anwender dieser Bauelemente und Mikrosysteme in Instrumenten, Geräten und Produkten.
- die Systemhersteller, die diese Instrumente und Geräte in vielfältigen Produkten integrieren wie Fahrzeuge, Maschinen und Anlagen sowie in Konsumprodukte.

Dieser Zusammenhang lässt sich in einer vereinfachten Wertschöpfungskette darstellen, Abbildung 13. Durch Nanomaterialien werden die Eigenschaften von Sensoren verbessert, die wiederum in Geräten und Systemen eingesetzt werden und deren Leistungsfähigkeit bzw. Wettbewerbsfähigkeit erhöhen.

**Die Mikrosystemtechnik und die Nanotechnologie finden heute in vielen Bereichen des täglichen Lebens und in der Industrie ihre Anwendungen.**

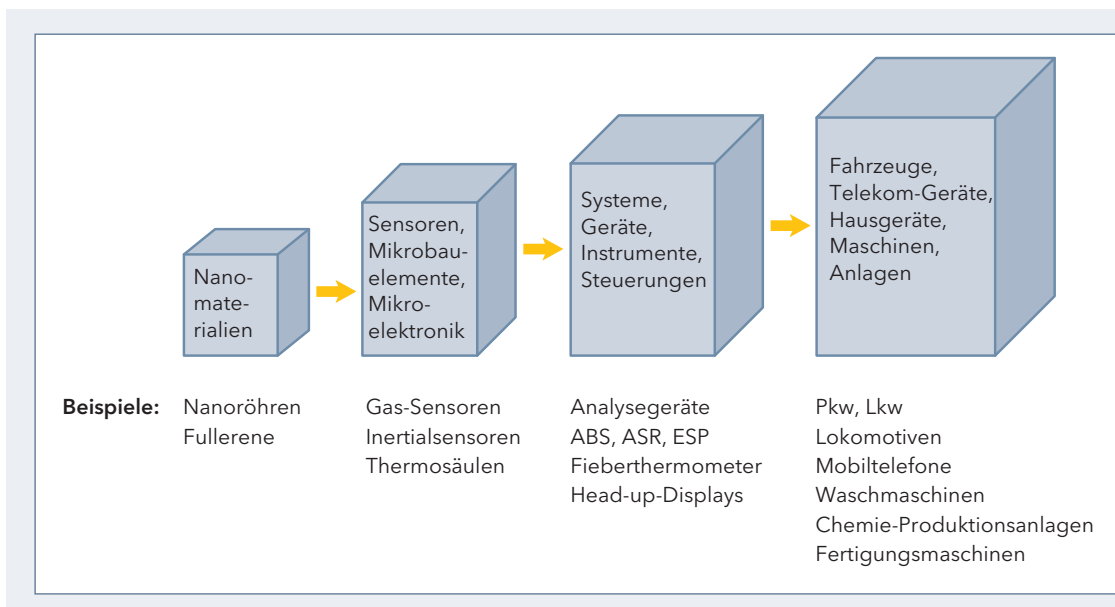


Abbildung 13: Darstellung der Wertschöpfungskette von den Nanomaterialien hin zu Anwendungen.

Dazu gehören:

- Automobiltechnik (vgl. Band 3\* „Nanotechnologien im Automobil“)
- Informations- und Kommunikationstechnik
- Hausgeräte
- Produktionsprozesse (vgl. Band 6\* „NanoProduktion“)
- Medizintechnik (vgl. Band 2\* „Nanomedizin“)
- Chemie- und Anlagenbau
- Energietechnik (vgl. Band 9\* „Einsatz von Nanotechnologien im Energiesektor“)
- Umwelttechnik (vgl. Band 1\* „Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie“)
- Werkstofftechnik (vgl. Band 10\* „Werkstoffinnovationen aus Hessen – Potenziale für Unternehmen“)
- Luft- und Raumfahrt
- Sicherheitstechnik
- Logistik und Transport

\* Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech

Tabelle 4 gibt Beispiele für die Notwendigkeit und die Chancen der Mikro-Nano-Integration in der Mikrosystemtechnik.

Damit ist die Mikro-Nano-Integration gleichermaßen für Großbetriebe wie für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) von Bedeutung. Die großen Unternehmen bedienen überwiegend Massenmärkte, bei denen ein hoher Preisdruck durch internationalen Wettbewerb herrscht. KMU fokussieren sich oft auf Spezialmärkte, in denen eine sehr hohe Qualität der Produkte und kundenspezifische Lösungen entscheidend sind. Damit sind KMU in der Regel schneller bereit neue Materialien und Technologien aufzugreifen. Die Mikro-Nano-Technologien gehören dazu.

Derzeit gibt es keine allgemein akzeptierten aussagekräftigen Daten zu Marktchancen, da die Definitionen und Abgrenzungen der Produkte und Anwendungsfelder von der MNI fließend sind. Diese Broschüre versucht erste Definitionen und Abgrenzungen festzulegen. Es bleibt den Anwendern der nächsten Jahre vorbehalten darüber ihr Urteil abzugeben.

Es gibt bisher nur einige wenige publizierte Markt-Abschätzungen. Diese Broschüre sieht die Produkte der Mikro-Nano-Integration insbesondere in unterschiedlichen Sensoren der Mikrosystemtechnik sowie in Aktoren und Systemen mit Nano-Materialsystemen.

Beispiele für Grenzen der gängigen Technologie	Beispiele für Chancen der Mikro-Nano-Integration
Empfindlichkeit und Reaktionsgeschwindigkeit von Mikrosensoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Vergrößerte spezifische Oberfläche von Nanomaterialien und -strukturen für größere Empfindlichkeit und Reaktionsgeschwindigkeit</li> </ul>
Fertigungskosten durch Bauteilgröße (Wafer-Fläche)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Geringere Bauteilgrößen, weil mehr Bauteile in einem Schritt zu gleichen oder ähnlichen Kosten gefertigt werden können</li> </ul>
Anbindung hochintegrierter Elektronik an die Außenwelt (AVT-Krise): Das Anschlussraster mit Lötkontakten ist durch die Oberflächenspannung des Lots begrenzt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Selbstorganisation zur Selbstmontage nutzen</li> <li>■ Trockene Kontaktierung und kalte Verbindung mit Nanostab-, Nanodraht- oder Nanoröhrenfeldern</li> <li>■ Durch reaktive Nanopartikel verringerte Temperatur beim Verbindungsaufbau</li> </ul>
Betriebstemperatur begrenzt	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Weniger temperaturabhängige Materialeigenschaften bei Nanomaterialien</li> </ul>
Geringe Lebensdauer polymerer optischer Bauteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Schutz durch Nano-Materialsystem-Beschichtung</li> </ul>
Hohe Betriebsspannung oder große Leistungsaufnahme von Aktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Senkung von Betriebsspannung und Leistungsaufnahme durch Materialverbesserung sowie neue Effekte der Nanoskaligkeit</li> </ul>

Tabelle 4: Beispiele für Grenzen der gängigen Technologie und Chancen der Mikro-Nano-Integration in der Mikrosystemtechnik.

## 2.1 Sensorik

Die Sensorik hat als Schlüsseltechnologie entscheidende Bedeutung in nahezu allen Bereichen des modernen gesellschaftlichen Lebens gewonnen, so z. B. in der Automobil-, Unterhaltungs- und Konsumelektronik-Industrie, Sicherheitstechnologie, im Maschinen- und Anlagenbau, in den Life Sciences oder der Luft- und Raumfahrt: Es gibt kaum einen industriellen Bereich, in dem nicht elektronisch geprüft, überwacht oder automatisiert wird. Das reicht von der gesamten produzierenden Industrie über weite Bereiche des Handwerks bis hin zum privaten Umfeld jedes Einzelnen. Industrielle Prozesse können verbessert und Abläufe im Handel optimiert werden. Der private Nutzer wird intelligente Umgebungen (ambient intelligence) wahrnehmen, so wie er sie heute schon teilweise in der Verkehrsleittechnik erlebt.

Die Markterwartungen an diese Schlüsselprodukte sind relativ hoch und nehmen weiter zu, so dass von einer Wachstumsbranche der nächsten Jahrzehnte gesprochen werden kann.

Hochrechnungen gehen davon aus, dass es in Deutschland ca. 800 Hersteller von industriellen Messsystemen mit darin enthaltenen Sensoren gibt, in Europa etwa 2 000 Firmen. Diese erwirtschaften damit in Deutschland alleine etwa 22–25 Milliarden Euro pro Jahr. Sie beschäftigen unmittelbar in der Messtechnik - Peripheriegeräte bzw. -aktivitäten nicht einbezogen - etwa 230 000 Mitarbeiter, die inkl. Wiederverkauf und sensorikspezifischen Dienstleistungen etwa 28–33 Milliarden Euro erwirtschaften.

Bei zum Teil stark differierenden Definitionen und Zuordnungen gehen Schätzungen von kommerziellen Marktforschern von einem Weltmarktpotenzial für die Sensorik von 70–120 Milliarden Euro aus. (Quelle: [www.ama-sensorik.de](http://www.ama-sensorik.de))

Dabei ist die Sensorbranche von Vielfalt geprägt. Diese Vielfalt spiegelt sich wieder:

- in etwa 100 Messgrößen, für die Sensoren auf dem Markt und in Entwicklung sind. Diese Sensor-Messgrößen lassen sich in fünf Kategorien klassifizieren:
  - geometrische und mechanische Größen wie etwa Winkel, Länge, Distanz, Füllstand, Position, Rauheit, Kraft, Druck und Härte;
  - dynamische Größen wie etwa Beschleunigung, Vibration, Schwingungen und Drehzahl;
  - thermische Größen wie etwa Temperatur und Wärmestrahlung;
  - optische Größen wie Lichtstärke, Reflexionsgrad, Transmissionsgrad, Absorptionsgrad und spektrale Strahlungsverteilung;
  - chemische, biologische und medizinische Größen wie pH-Wert, Konzentrationen von Ionen und Gasen, elektrische Leitfähigkeit, Multigasanalyse (elektronische Nase), Blutdruck bis hin zu Schwangerschaft.
- in vielen unterschiedlichen Sensormaterialien (z. B. Silizium, Glas, Keramik, Metall, Polymere).
- in der großen Anzahl angepasster Sensor-Fertigungstechniken, die Halbleitertechnik und insbesondere Siliziumtechnik umfassen, sowie etwa Dünnschichttechnik, Siebdrucktechnik und Hybridelektronik, Faseroptik und Folientechnik.

Auch die Sensorfirmen spiegeln diese Vielfalt wieder, von wenigen Großfirmen, die Massenmärkte beliefern, bis hin zur großen Zahl von kleinen Firmen, die hochspezialisierte, anwendungsspezifische Lösungen anbieten.

In Deutschland spielen diese innovativen Sensorfirmen eine besonders starke Rolle. Sie sind überwiegend mittelständig geprägt und haben zwischen 10 und 100 Mitarbeitern (Abbildung 14). Diese sind besonders innovativ und haben ein Umsatzwachstum zwischen 6 und 12 Prozent pro Jahr, das schließlich in der Schaffung von hochqualifizierten, neuen Arbeitsplätzen mündet: etwa 6 000 bis über 12 000 pro Jahr.

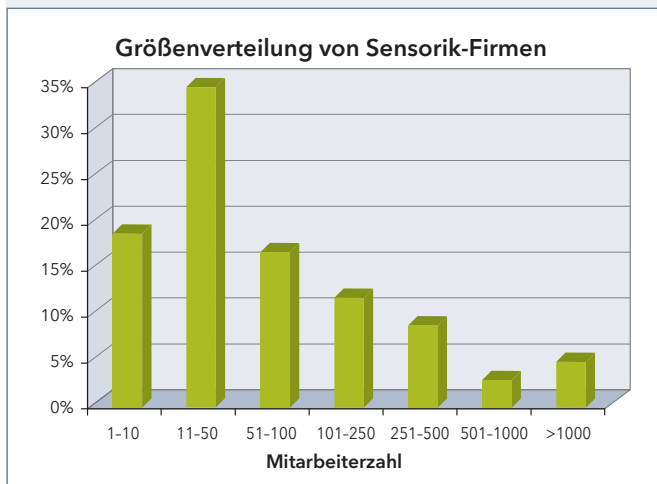


Abbildung 14:  
Größenverteilung von  
Sensorfirmen in Deutsch-  
land. (Quelle: AMA  
Arbeitsgemeinschaft  
Messwertaufnehmer e.V.,  
Fachverband für Sensorik,  
2008)

Hier spielt Hessen eine starke Rolle. Denn viele Sensorfirmen haben sich im Süden und in der Mitte von Deutschland etabliert; in Hessen sind etwa zehn Prozent aller deutschen Sensorfirmen zu finden.

So unterschiedlich die Märkte sind, so unterschiedlich sind auch die Preise der einzelnen Sensoren und messtechnischen Produkte. In Massenmärkten wie dem Automobil oder den Haushaltsgeräten liegen die Stückpreise bei einem oder wenigen Euro, und es herrscht ein starker internationaler Wettbewerb. In Spezialmärkten wie der Prozesstechnik und dem

Maschinenbau – teilweise auch in der Medizintechnik – sind Produktqualität, Funktionalität und Lebensdauer wettbewerbsbestimmend. Dort können die Preise für konfektionierte Sensorsysteme (Transducer) mit angepassten mechanischen und elektrischen Schnittstellen bei 100 Euro bis über 1000 Euro liegen. Dies ist die Nische vieler Spezialfirmen.

In diesem wachsenden Markt haben sowohl die mikrosystemtechnischen Produkte einen steigenden Anteil, als auch deren heute beginnende Weiterentwicklungen in Form von MNI-Produkten.

## 2.2 Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik-Weltmarktdaten (Sensoren und als weitere Produkte Aktoren und deren Integration hin zu Mikrosystemen) sind in den letzten Jahrzehnten von der europäischen Organisation NEXUS und nun aktuell von iSuppli ermittelt worden. Danach wird der Markt für Mikrosysteme ohne Schreib-Lese-Köpfe für Computer von rund sechs Milliarden US-Dollar in 2006 auf etwa neun Milliarden US-Dollar im Jahr 2012 anwachsen, Abbildung 15.

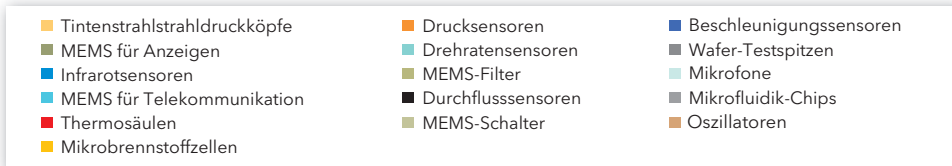
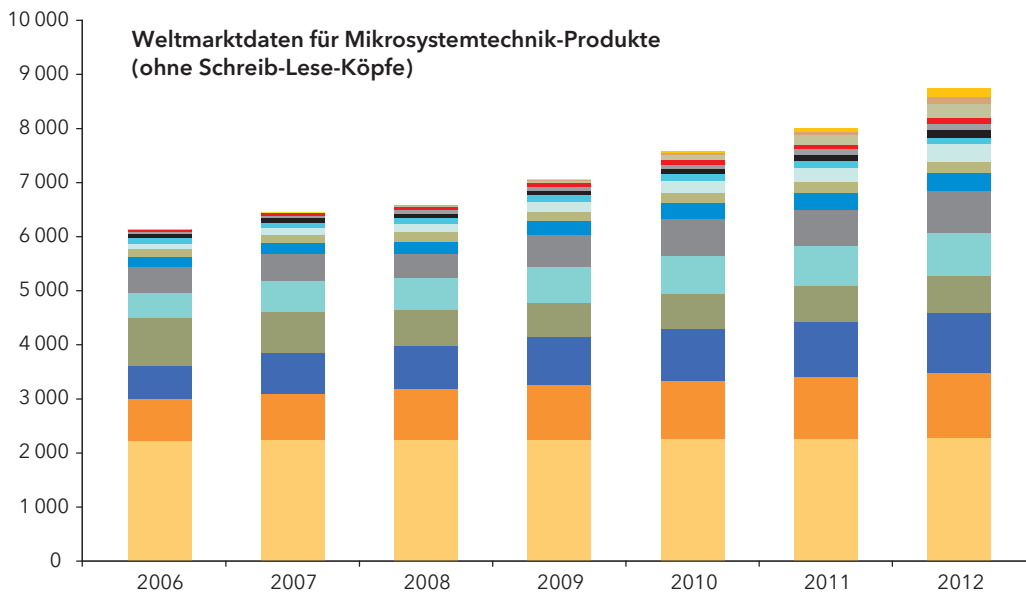
Den Markt dominierten bisher die Aktoren, wie Tintenstrahl-druckköpfe und digitale Mikrospiegel-Matrizen von Texas Instruments. Nun übernehmen

mikro-elektromechanische Sensoren (MEMS-Sensoren) den nächsten Wachstumsschub. Mit elf Prozent Wachstum pro Jahr haben sie ab 2007 die Aktoren überholt. Ein wesentlicher Grund dafür ist in dem dynamischen Bereich der Konsumelektronik zu finden. Bewegungs- und Inertialsensoren finden heute Einsatz in Spielekonsolen, Laptops, Digitalkameras und in Produkten für die drahtlose Kommunikation wie Mobiltelefone.

Die Konsumelektronik, der Automobilbereich und die industrielle Prozesskontrolle machen mehr als 60 Prozent des MEMS-Weltmarkts aus.

Millionen  
US-Dollar

### Weltmarktdaten für Mikrosystemtechnik-Produkte (ohne Schreib-Lese-Köpfe)



Quelle: iSuppli Corp. August 2008, sortiert nach Marktvolumen 2008

Abbildung 15:  
Globales MEMS-Markt-  
volumen 2006-2012.  
Produktspezifische  
Marktanalyse und  
-prognose (Quellen:  
NEXUS Market Analy-  
sis for MEMS and  
Microsystems III  
2005-2009, The  
NEXUS Association,  
Grenoble, France,  
2005; iSuppli, Herbst  
2008, in Sensor  
Magazin 3, 2008, S. 24)

Im Jahr 2008 machten drei Produktfamilien den größten Teil des Mikrosystemtechnik-Weltmarktes aus:

- Schreib-Lese-Köpfe für Computer-Festplatten, mit über zehn Milliarden US-Dollar Marktvolumen (in Abbildung 15 nicht enthalten)
- Tintenstrahl-Druckköpfe
- Beschleunigungssensoren
- Anzeigen, die auf MEMS-Techniken beruhen

Die Druck- und Beschleunigungssensoren machen gemeinsam mit den neuen Drehratensensoren ein jährliches Weltmarktvolumen von über zwei Milliarden US-Dollar aus.

Dann folgt eine wachsende Anzahl von MST-Sensoren und anderer mikrotechnischer Produkte mit einem Weltmarkt von jeweils über 100 Millionen US-Dollar (in 2010-2014). Dazu gehören unter anderem:

- Durchflusssensoren
- Infrarotsensoren, Thermosäulen
- Mikrofluidische Chips
- Optische MEMS-Teile für die Telekommunikation
- Neigungssensoren
- Hochfrequenz-Mikrosysteme (RF-MEMS)
- Miniaturisierte Mikrofone
- Medikamenten-Mikropumpen (Drug-Delivery-Systeme)
- Mikro-Energiequellen
- Mikro-Kühler
- Miniaturisierte Wafer-Prober

## 2.3 Nanomaterialien für MST-Produkte

Für Nanomaterialien und Nanotechnologie-Produkte gibt es bisher nur wenige und relativ unspezifische Marktabschätzungen, die aber immer einen großen, ansteigenden Markt beschreiben. Eine Übersicht und Zusammenfassung gibt beispielsweise die Nanotechnologie-Marktstudie von Sylvia Quandt Research 2008, [Quandt 2008]:

- Nanomaterialien haben heute ein Marktvolumen von über einer Milliarde US-Dollar, das mit über 50 Prozent Wachstum pro Jahr ansteigt und 2014 über zehn Milliarden US-Dollar betragen wird.
- Zu **Mikro-Nano-Intermediate Products** werden die hier beschriebenen Sensoren und Aktoren, optischen Komponenten sowie Elektronik gezählt, aber auch Beschichtungen und Textilien mit inkorporierten Nanomaterialien. Diese Produkte sollen einen Weltmarkt von über 35 Milliarden US-Dollar (2008) aufweisen, der bis 2014 sehr stark ansteigen wird.
- Der Markt der davon beeinflussten Endgeräte selbst ist dann zwei- bis mehr als fünffach so groß.

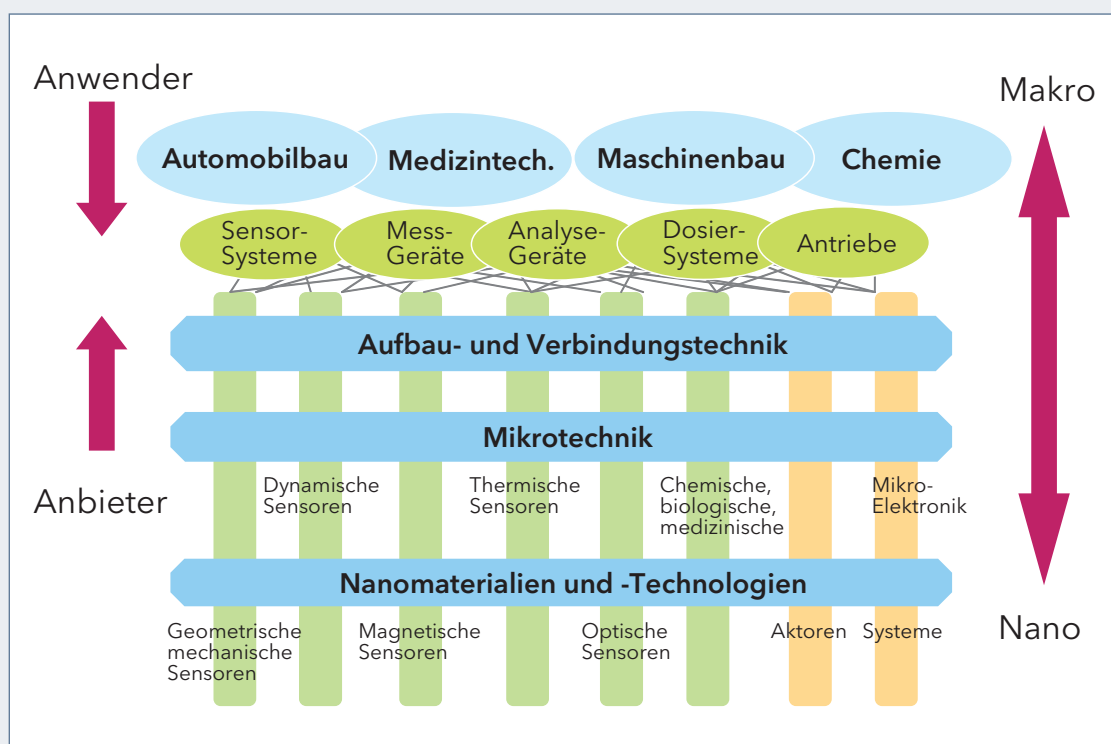
Eine Gliederung der Hierarchieebenen in der Wertschöpfung zur Mikro-Nano-Integration und deren Anwendungen in der Makrowelt veranschaulicht Abbildung 16.

Diese Broschüre beschreibt Produkte und Produktchancen im Spannungsfeld der Nanomaterialien und der Mikrosystemtechnik. **Für diese Mikro-Nano-Bauelemente sind interessante hohe Marktdaten mit großen Wachstumsraten zu erwarten.** Hier können mit innovativen Materialien und Technologien in relativ kurzer Zeit chancenreiche neue Produkte geschaffen werden.

Dazu ist mehr als in anderen Hochtechnologieentwicklungen die Zusammenarbeit zwischen Experten unterschiedlicher Fachdisziplinen gefragt. Dazu nötig sind:

- Materialforscher, die Nanomaterialien herstellen und charakterisieren
- Bauelemente-Entwickler
- Angepasste Handhabungs- und Fertigungstechnik
- Wissen um die Anwendungsmöglichkeiten und -probleme

Abbildung 16:  
Hierarchieebenen in der Wertschöpfung der Mikro-Nano-Integration - von den Nanomaterialien über die Mikrosystemtechnik bis zu Sensoren und Geräten



# 3 Vom Nanomaterial zum MNI-System

## 3.1 Nanomaterialien

Die nanoskaligen Basisstrukturen sind die Bausteine der Mikro-Nano-Integration. Sie werden einzeln für eine lokale Funktionalisierung integriert oder in Materialsystemen eingesetzt.

### 3.1.1 Nanoskalige Basisstrukturen

Die Forschungen in der Nanotechnologie haben zu einer Vielzahl neuartiger nanoskaliger Basisstrukturen geführt, die in Abbildung 17 dargestellt sind und hinsichtlich der Anzahl ihrer räumlichen Dimensionen in 0-D bis 3-D unterschieden werden. Mit den Erfahrungen aus den letzten 20 Jahren kann man sie jetzt repro-

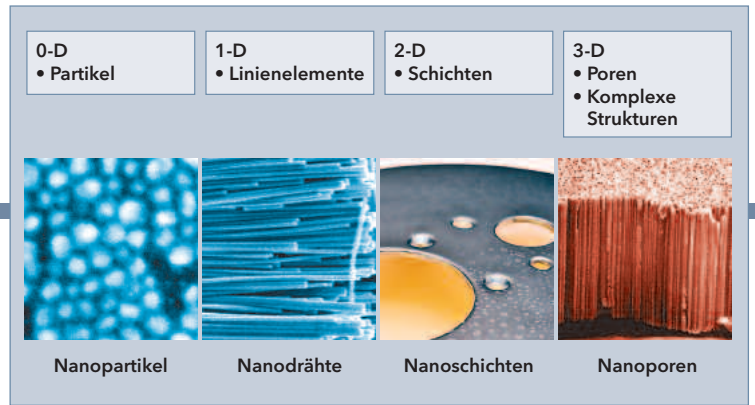


Abbildung 17: Übersicht der nanoskaligen Basisstrukturen. (Quellen v.l.n.r.: Merck KGaA, Darmstadt; GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt; Flad & Flad Communication/ [www.nanotruck.de](http://www.nanotruck.de); GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH)

duzierbar und wirtschaftlich herstellen. Diese Basisstrukturen können in unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen. Tabelle 5 stellt eine Übersicht der nanoskaligen Basisstrukturen dar, unterschieden nach ihren geometrischen Ausprägungen.

nanoskalige Basisstrukturen	mögliche Ausführungen	Technische Einsatzbeispiele
<b>0-D</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nanopartikel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Amorphe Nanopartikel</li> <li>Kristalline Nanopartikel</li> <li>Kohlenstoff-Hohlkugeln (Fullerene)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Füllstoffe in Lacken um Kratzfestigkeit zu erhöhen</li> <li>Quantenpunkte für die Optoelektronik</li> <li>Beschichtung gegen Biofilme in mikrofluidischen Systemen</li> </ul>
<b>1-D</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nano-Linienelemente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nanodrähte</li> <li>Nanostäbe</li> <li>Nanoröhren (CNTs)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Halbleitende Komponenten für die Nanoelektronik</li> <li>Schnelle, hochempfindliche Gassensoren</li> <li>Neue Hochleistungs-Aktoren</li> <li>Lösungen in der AVT: Flexible Kontaktierung, verbesserte elektrische und thermische Leitfähigkeit</li> </ul>
<b>2-D</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nanoschichten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einfachschichten</li> <li>Mehrfachschichten</li> <li>Organisch / anorganisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entspiegelung</li> <li>Kratzfeste Schichten für weiche Kunststoffe</li> <li>Tribologische Schutzschichten auf Metallen</li> </ul>
<b>3-D</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nanoporen</li> <li>Nanokanäle</li> <li>Nanofasergewebe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nanoporige Oberflächen</li> <li>Nanoporöse Materialien</li> <li>Nanoporige Siebe</li> <li>Nanogräben</li> <li>Nanobohrungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Filtration</li> <li>Katalyse</li> <li>Ätzmaske in der Prozessierung von ICs</li> <li>Medikamentenabgabe</li> <li>Entspiegelung</li> <li>Gassensitive Halbleiterschichten</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Komplexe Strukturen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3-D-strukturierter Photolack</li> <li>Monomere Bausteine („Building Blocks“)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Photonische Kristalle</li> <li>Rahmenstruktur für Zellwachstum → Biologische Schnittstelle</li> <li>Selbstmontage</li> </ul>

Tabelle 5: Übersicht über Beispiele nanoskaliger Basisstrukturen

## 0-D: Nanopartikel

Diese in allen drei Raumrichtungen nanoskaligen Partikel werden auch punktförmige, sphärische oder nulldimensionale Strukturen genannt. Als charakteristische Größe wird oft ein Durchmesser kleiner 100 nm angegeben. Im Gegensatz zu Drähten und Schichten weisen sie keine lineare oder flächenhafte Ausdehnung auf. Sie können als kristalline oder amorphe, sphärische Nanopartikel einzeln sowie als Nanopartikelverbände oder größere sphärische Moleküle auftreten.

Interessante Nanopartikel-Moleküle sind die so genannten Fullereene. Diese Kohlenstoff-Moleküle bestehen aus fünf- und sechseckigen Kohlenstoffringen, die eine nahezu geschlossene Kugelhülle bilden. Diese Molekülverbände besitzen diverse besondere Eigenschaften, wie z. B. perfekte Rotationssymmetrie, gute Biokompatibilität und die Kapazität, viele Radikale aufzunehmen und zu binden. Sie bergen großes Anwendungspotenzial und kommen in Mikro-Polymer-Solarzellen bereits zum Einsatz.

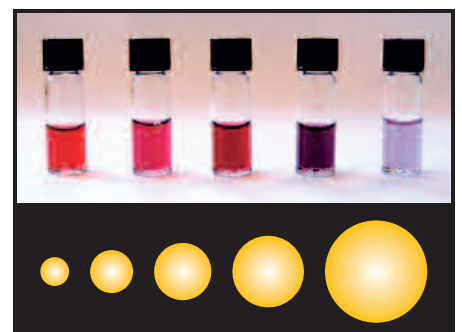
Viele Besonderheiten der Nanopartikel resultieren aus einem anderen Verhältnis des Partikelvolumens zu Partikeloberfläche als bei Festkörpern. Bei einem 10 nm großen Partikel können zum Beispiel rund 20 Prozent aller Atome an der Oberfläche liegen, bei einem Durchmesser von 1 nm sind es schon bis zu 90 Prozent der Atome. Die Oberflächenatome besitzen eine nicht so hohe Bindungsenergie wie die Atome im Inneren, die mit mehr Bindungspartnern interagieren. Aus diesem Grund verhalten sich Atome an der Oberfläche anders als im Inneren von Festkörpern. Folglich ist auch das Verhalten von Materialien, bei denen ein sehr großer Anteil der Atome an der Oberfläche liegt, anders als das von klassischem Vollmaterial (Bulkmaterial).

Andere Merkmale der Nanopartikel begründen sich allein in der Größe der Partikel. Die mechanischen, elektrischen, optischen und chemischen Eigenschaften haben eine charakteristische Länge, die oft im Bereich 10–100 nm liegt. Unterschreitet die Dimension der Nanopartikel diese Länge, ändern sich die mikroskopisch und makroskopisch wahrnehmbaren Eigenschaften drastisch und unterscheiden sich zum Teil wesentlich von den Eigenschaften des makroskopischen Basismaterials (Bulk). So ändert sich die Farbe von nanopartikulärem Gold in wässriger Lösung von weinrot bei 10 nm Partikeldurchmesser über rot bei 100 nm zu violett bis verschiedenen Grautönen bei weiter steigendem Partikeldurchmesser, vgl. Abbildung 18.

Nanopartikel können z. B. in folgender Weise weiter verarbeitet werden:

- Ebene Nanostrukturen auf Festkörperoberflächen
- Nanoporöse Festkörper
- Nanopulver
- Verteilt in flüssigen oder festen Materialien (Matrix) → Materialsysteme

Abbildung 18:  
Suspension von Goldnanopartikeln unterschiedlicher Größe in Wasser:  
Abhängigkeit der reflektierten Lichtfarbe von der Teilchengröße  
(10 nm: weinrot, 100 nm rot, weiter steigende Teilchengröße: violett bis  
verschiedene Grautöne) (Quelle: [www.nbi.dk/~pmhansen/gold\\_trap.htm](http://www.nbi.dk/~pmhansen/gold_trap.htm))



Materialien	Eigenschaften	Nutzung	Herausforderungen
<b>Nano-Pigmente</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Titandioxid TiO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Photoaktivität von TiO<sub>2</sub>: Ladungstrennung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mikro-Farbstoffsolarzellen</li> <li>■ Katalysatoren für Biochips und Lab-on-a-Chip-Systemen / <math>\mu</math>TAS (Micro Total chemical Analysis System)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Anordnung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Siliziumdioxid SiO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mechanische Stabilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zusatz in Schutzlacken und Packaging-Materialien → Materialsysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verhindern von Partikel-Agglomeraten</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Brechzahl abhängig von der Partikelgröße</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Transmissionssteigerung bei Lichteinkopplung in mikrooptische Komponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verhindern von Partikel-Agglomeraten</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Beschichtetes Zinkoxid ZnO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ UV-Absorption</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zusatz in Schutzlacken und Packaging-Materialien → Materialsysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verhindern von Partikel-Agglomeraten</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Metalle wie Gold, Silber Au, Ag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Elektrische Leitfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zusatz in AVT-Tinten → Materialsysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Adhäsion auf einigen Oberflächen</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Biochemisch aktiv</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Plasmonenresonanz ändert sich bei Reaktion → biol./chem. Sensorik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zuverlässigkeit</li> <li>■ Kosten zur Bestimmung der Plasmonenresonanz</li> </ul>
<b>Ferrite</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Legierungen wie Nickel-Eisen NiFe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aufheizbarkeit unter Mikrowelleneinfluss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zusatz in Klebstoffen → Materialsysteme: Schaltbare Klebstoffe für Chip-Level Bonding</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Anordnung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Legierungen wie Samarium-Kobalt SmCo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ferromagnetische Eigenschaft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mikrosensoren und Mikroaktoren → Materialsysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verhindern von Partikel-Agglomeraten</li> <li>■ Partikelkonzentration in Materialsystemen</li> <li>■ Kosten → Forschungsstadium</li> </ul>
<b>Fullerene</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kohlenstoff C-60</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Hohe Festigkeit</li> <li>■ Große Symmetrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Schmierung in Mikromotoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verfügbarkeit</li> <li>■ Kosten → Forschungsstadium</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Elektronisches und chemisches Speicherhalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Biochemische Ausstattung von Biochips und <math>\mu</math>TAS / Lab-on-a-Chip-Systeme</li> <li>■ Mikro-Polymer-Solarzellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verfügbarkeit</li> <li>■ Dotierung</li> <li>■ Kosten → Forschungsstadium</li> </ul>

Tabelle 6: Beispiele der Eigenschaften von Nanopartikeln sowie deren mikrotechnische Nutzung und Herausforderungen

## 1-D: Nano-Linienelemente

Linienelemente haben in zwei Raumrichtungen eine nanoskalige Ausdehnung von kleiner 100 nm und sind in der dritten Dimension wesentlich größer. Man nennt sie daher auch eindimensionale Strukturen. Zu dieser Gruppe gehören:

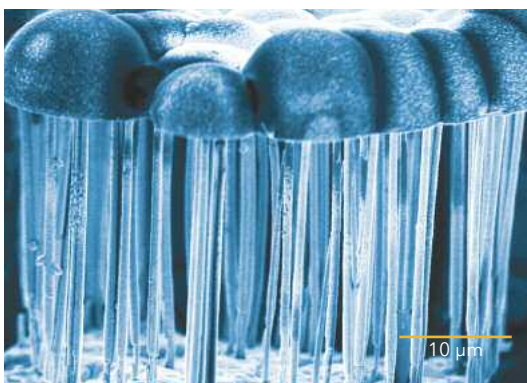
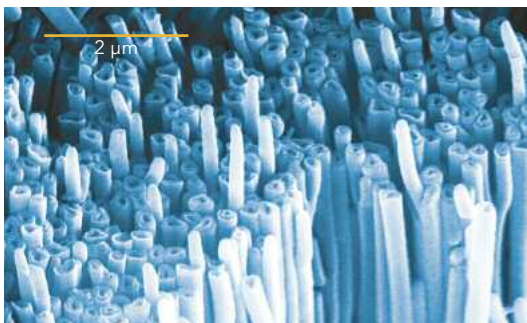
- Nanostäbe
- Nanodrähte
- Nanoröhren

Das Verhältnis der Länge zum Durchmesser der Linienelemente nennt man Aspektverhältnis. Bei Nanostäben ist es kleiner als 10:1, bei Nanodrähten werden Aspektverhältnisse von bis zu 1000:1 erreicht. Die Drähte und Stäbe können aus unterschiedlichen Materialien hergestellt werden wie Metalle, Kunststoffe oder Halbleiter.

Nanoröhren bestehen meist aus Kohlenstoff. Es liegen aber auch Forschungsergebnisse zu Metall- und Polymer-Nanoröhren vor. Die Röhren aus Kohlenstoff sind die am intensivsten untersuchten linienförmigen Nanostrukturen. Für sie hat sich der Begriff Carbon-Nano-Tube (CNT) etabliert. Hat die Röhre nur eine Wandung, nennt man sie Single-Walled CNT (SWCNT), bei mehreren Wandungen heißt sie Multi-Walled CNT (MWCNT).

Oft liegen die Nano-Linienelemente ungeordnet (als „Wolle“) vor. Spezialisten an der TU Darmstadt und dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt können die Nano-Linienelemente parallel angeordnet für den Einsatz im Mikrosystem herstellen. Auf Nanodrähten können für die Mikro-Nano-Integration mikroskalige Köpfe galvanisch abgeschieden werden, siehe Abbildung 20.

Abbildung 19:  
Parallel angeordnete  
hohle mehrwandige  
Kohlenstoff-Nano-  
röhren. (Quelle: TU  
Darmstadt, Chemie,  
Prof. Dr. J. J. Schneider)



Bei der Wirkungsweise von Nanopartikeln und Nano-Linienelementen - einzeln oder in einem Schichtaufbau - steht die Funktion der Basisstruktur im Vordergrund.

Setzt man die nanoskaligen 0-D- und 1-D-Basisstrukturen als Füllstoff in einem Basismaterial ein (z. B. in einem Lack), spielt die Wechselwirkung mit diesem Material eine wesentliche Rolle. Die aus diesen Materialsystemen hergestellten Schichten sind nicht automatisch Nanoschichten. Diese Nano-Materialsysteme werden im Kapitel 3.1.2 beschrieben.

Abbildung 20:  
Platin-Nanodrähte mit Köpfen.  
(Quelle: GSI Helmholtzzentrum für  
Schwerionenforschung GmbH,  
Darmstadt (Prof. Dr. R. Neumann)  
in Kooperation mit der TU Darmstadt  
(Fachgebiet Chemische Analytik,  
Prof. Dr. W. Ensinger))

Materialien	Eigenschaften	Nutzung	Herausforderungen
<b>Nanostäbe</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Metalle wie Nickel, Gold Ni, Au</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leiter in ICs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Orientierte Anordnung</li> <li>Kontaktierung</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feldabhängige Selbstorganisation im Fluid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mikro-Ultraschallsensoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kontaktierung</li> <li>Fluidentfernung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Eisen Fe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Im externen Magnetfeld sind Feldkräfte größer als die Kräfte der Brownschen Molekularbewegung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ferrofluide, z. B. genutzt in Biochips und <math>\mu</math>TAS als Ventil oder aktiver Wirkstoffträger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verhindern von Partikel-Agglomeraten</li> <li>Verhindern von chemischer Zersetzung der Partikel</li> </ul>
<b>Nanodrähte</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Metalle wie Kupfer, Gold, Platin, Silber, Kobalt Cu, Au, Pt, Ag, Co</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit</li> <li>Geringe thermische Kapazität durch kleine Abmessungen</li> <li>Große reaktive Oberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Thermische Mikro-Gasströmungssensoren</li> <li>Mikro-Reaktoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manipulation von Einzeldrähten</li> <li>Kontaktierung</li> <li>Kosten <math>\rightarrow</math> Forschungsstadium</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bismuth, Bismuttellurid Bi, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe thermoelektrische Effektivität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Thermoelektrische Energiewandlung: Autarke Mikroenergiequellen</li> <li>Hochsensible Infrarot-Sensoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manipulation von Einzeldrähten</li> <li>Kosten <math>\rightarrow</math> Forschungsstadium</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nanodrähte aus Nanopartikeln: Gold, Silber NP-Au, NP-Ag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zu Nanodrähten aufgereiht</li> <li>Berührungslose Montage</li> <li>Au: Biochemisch aktiv</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transistoren</li> <li>Sensoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definierter Nanodrahtaufbau</li> <li>Fluidentfernung</li> </ul>
<b>Nanoröhren</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Kohlenstoff Carbon-Nano-Tubes CNTs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Durch Gase veränderte elektrische Leitfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mikro-Gassensor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Großflächige Kontaktierung</li> <li>Selektion der CNTs</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Wärmeleitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hochleistungs-Wärmesenken z. B. für ICs oder LEDs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Orientiertes Wachstum</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elektrische Leitfähigkeitsänderung durch elektrisches Feld</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feldeffekt-Transistor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anteil halbleitender CNTs erhöhen</li> <li>Serientaugliches, orientiertes Wachstum</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feld-Emission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Displays, Sensoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Parallel ausgerichtetes Wachstum, stabile Spitzenbildung</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aktorischer Effekt in Elektrolyten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mikroaktoren (niedrige Ansteuerspannung, hohe Kraft)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Serielle Anordnung der CNTs damit sich Kräfte addieren <math>\rightarrow</math> Forschungsstadium</li> </ul>

Tabelle 7: Beispiele der Eigenschaften von Nano-Linienelementen sowie deren mikrotechnische Nutzung und Herausforderungen

## 2-D: Nanoschichten

Schichten mit Dicken zwischen 1 nm und 100 nm werden als Nanoschichten bezeichnet. Diese Art der nanoskaligen Basisstrukturen hat innerhalb der Nanotechnologie das größte Erfolgspotenzial und ist in der Industrie am weitesten fortgeschritten. Hier fließen Erfahrungen aus der Halbleitertechnik, Optik, Sensorik, Mikrotechnik und Chemie zusammen. In diesen Branchen werden Nanoschichten zum Teil schon seit Jahren erfolgreich eingesetzt. Viele hesische Unternehmen sind z. B. mit Vakuumverfahren erfolgreich am Markt platziert.

Die Nanoschichten sind oft nur wenige Atomlagen dick und ermöglichen so bestimmte Effekte, wie z. B. Quanten-Effekte. Das große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis von Nanoschichten macht sie reaktiver als Bulkmaterial. Beispielsweise kann sich im Ti-Al-Multischichtsystem (Abbildung 21) nach Einleiten einer Aktivierungsenergie die Ausbildung von Legierungen selbst fortpflanzen. Dieser Effekt ist vielversprechend für die Aufbau- und Verbindungstechnik in der Mikrosystemtechnik.

Der Einsatz von Nanoschichten für optische Zwecke wird im Band 5 „Nanotechnologien für die optische Industrie“ in der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech ausführlich dargestellt. Einige Beispiele aus der Mikrosystemtechnik führt Kapitel 4 auf, vgl. Abbildung 22.

Abbildung 21:  
TEM-Querschnitt eines reaktiven  
Ti-Al-Multischichtsystems.  
(Schichtherstellung: ZfM der TU Chemnitz;  
TEM-Analyse: Fraunhofer IWM Halle)

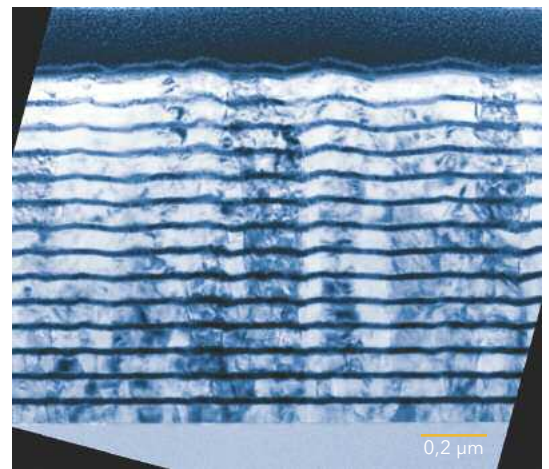
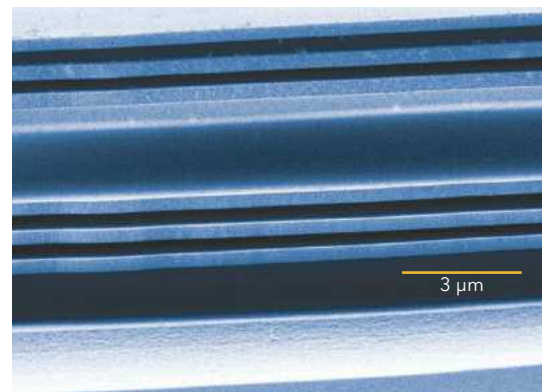


Abbildung 22:  
Schichtaufbau eines Fabry-Pérot Filters.  
(Quelle: Universität Kassel, Institut für  
Nanostrukturierungstechnologie und  
Analytik INA, Prof. Dr. H. Hillmer)



Materialien	Eigenschaften	Nutzung	Herausforderungen
<b>Vollmaterialschichten</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nickel-Eisen NiFe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anisotroper Magnetoresistiver Effekt (AMR): Elektrische Widerstandsänderung im Magnetfeld</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mikro-Magnetfeld-Sensoren → mobile Analytik</li> <li>Festplattenspeicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kostenreduktion</li> <li>Konzepte für mehr Anwendungen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nickel-Eisen + Kupfer NiFe + Cu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Riesenmagnetwiderstand-Effekt (Giant Magneto Resistance, GMR): Elektrische Widerstandsänderung im Magnetfeld, Transport von Elektronen und deren Spins durch dünne Metallschichten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mikro-Magnetfeld-Sensoren → mobile Analytik</li> <li>Festplattenspeicher erhöhter Dichte</li> <li>Erhöhte Betriebstemperaturen möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kostenreduktion</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nickel-Eisen + Oxid NiFe + Ox</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Magnetischer Tunnelwiderstand-Effekt (Tunneling Magneto Resistance, TMR): Elektrische Magnetfeldsensoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Festplattenspeicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In Entwicklung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Glas mit unterschiedlichen Brechzahlen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entspiegelung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diverse mikrooptische Systeme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Seit langem Stand der Technik</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Titan-Aluminium-Nitrid / Zirkonium-Nitrid, Titan-Aluminium TiAlN / ZrN, Ti/Al</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nach „Zündung“ selbstausbreitende Legierungsreaktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niedertemperatur-Verbindungs-Verfahren (Bonden)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prozessintegration</li> <li>Aktivierungsenergie einkoppeln</li> </ul>
<b>Schichten aus Partikeln</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Siliziumdioxid SiO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Effektive Brechzahl bestimmt durch Partikelgrößenmischung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transmissionssteigerung bei Lichteinkopplung in mikrooptische Komponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kombination der richtigen Partikelgrößen</li> <li>Stabilisieren der Partikel in Dispersionen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bentonite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diffusionsbarriere für H<sub>2</sub>O und O<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusatz in Packaging-Materialien → Materialsysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Orientierte Anordnung</li> <li>Verhindern von Partikel-Agglomeraten</li> </ul>

Tabelle 8: Beispiele der Eigenschaften von Nanoschichten sowie deren mikrotechnische Nutzung und Herausforderungen

### 3-D-Basisstrukturen

Ein Feststoff kann dreidimensional nanoskalig sein, wenn verschiedene nanoskalige Basisstrukturen oder nanoskalige Bläschen eingeschlossen sind. Ein Bläschen muss dafür in mindestens einer Richtung kleiner als 100 nm sein.

Beispielsweise ist ein nanoporiger Schaum solch eine 3-D-Basisstruktur. Die dreidimensionale Lage und die Größe der Poren bestimmt die Funktion des Schaums. Dabei spielt eine wesentliche Rolle, wie viel Feststoffmaterial sich zwischen den Gaspartikeln befindet.

Sind die Hohlräume linienförmig, können die Nanokanäle je nach Orientierung Nanogräben oder Nano Bohrungen sein.

Komplexe dreidimensionale Basisstrukturen sind in der Natur in großer Anzahl und Variation in biologischen Systemen zu finden. Hier soll es jedoch nur um technische nanoskalige 3-D-Strukturen gehen, wobei die Schnittstelle zu biologischen Strukturen sehr wichtig ist.

Die lithographische Herstellung von 3-D-Basisstrukturen folgt dem Top-Down-Ansatz. Ist die Struktur durch supramolekulare Chemie definiert, lässt sie sich dem Bottom-Up-Ansatz zuordnen.

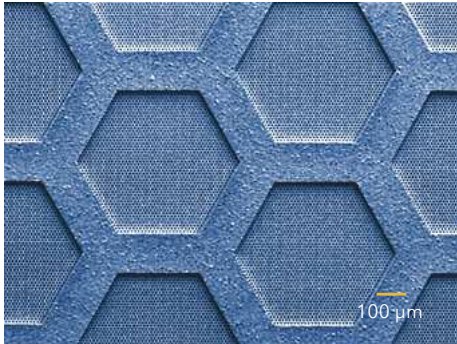


Abbildung 23: Mikrostrukturierte Waben auf nanoporöser Membran. (Quelle: IMM Mainz GmbH)

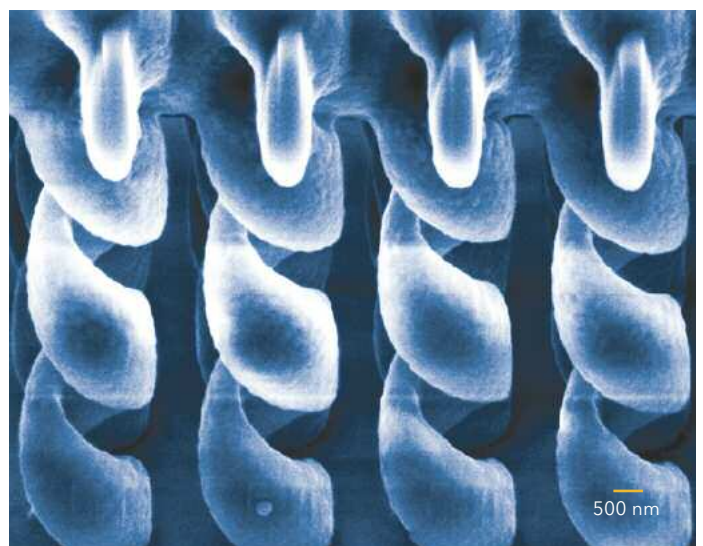


Abbildung 24: Nanolithographisch hergestellte 3-D-Struktur: Seitliche Ansicht von Spiralen aus einem Photoresist (SU-8). (Quelle: Nanoscribe GmbH, Karlsruhe, Prof. Dr. M. Wegener)

Porenform / Materialien	Eigenschaften	Nutzung	Herausforderungen
<b>Nanoporen</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Geschlossene Poren Durchmesser <math>\leq</math> mittlere freie Weglänge des Gases</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aerogele: Gute Wärmeisolation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Hochtemperaturisolation für Prozess-Messtechnik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Prozessintegration</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Offene Poren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sehr große Oberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Katalysator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Beschichtung</li> </ul>
<b>Nanokanäle</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nanobohrungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Offene Poren in dünnen Schichten, selbstorganisiert angeordnet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verschleißbare Ätzmaske für Halbleitertechnologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kostenreduktion</li> <li>■ Konzepte für mehr Anwendungen</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ätzkanäle nach Ionenbeschuss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Galvanoform für Nanodrähte</li> <li>■ Biosensoren: Einzelmolekülnachweis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kosten → Forschungsstadium</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Öffnungen in Membran</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mikrostrukturierte Waben zum quantisierten Nachweis von Bakterien im Trinkwasser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verstopfungsgefahr erfordert Vorfiltration</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Silizium-Membran zur Erzeugung vergrabener Hohlräume</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ CMOS-Prozess-kompatible Drucksensoren in Oberflächenmikromechanik, mit sehr kleinen Druckreferenzkammern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kostenreduktion</li> <li>■ Mehranwendungen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nanogräben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Gräbenabstände unterhalb der Wellenlänge von THz-Wellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ THz-Emitter für Sicherheitstechnik</li> <li>■ Optische Metamaterialien / photonische Kristalle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Konstante Gräbenabstände</li> </ul>
<b>Komplexe nanoskalige 3-D-Basisstrukturen</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 3-D-strukturierter Photolack</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Laserlithographisch hergestellte, beliebige Form aus einem Material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Photonischer Kristall z. B. für „negative Brechzahl“</li> <li>■ Rahmenstruktur für Zellwachstum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kosten durch Fertigungszeit → Forschungsstadium</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Monomere Bausteine („Building Blocks“)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Form durch supra-molekulare Chemie gegeben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Selbstmontage</li> <li>■ Erzeugen regelmäßiger Strukturen</li> <li>■ Selbstheilung von Oberflächen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Transfer der Selbstmontagekräfte auf Bauteilniveau</li> <li>■ Selektivität</li> </ul>

Tabelle 9: Beispiele der Eigenschaften von nanoskaligen 3-D-Basisstrukturen sowie deren mikrotechnische Nutzung und Herausforderungen

## 3.1.2 Nano-Materialsysteme

Nanoskalige Basisstrukturen können ihre besonderen Eigenschaften auch in Materialsystemen entfalten. Effekte, die beim Einsatz einzelner nanoskaliger Basisstrukturen eine untergeordnete Rolle spielen, bestimmen jetzt die Funktion des Materialsystems. So können Mikrosysteme durch den Einsatz von Nano-Materialsystemen zu neuen Funktionalitäten geführt werden.

### Schichten

Neben Nanoschichten mit nanoskaligen Dicken können zum Beispiel Nano-Linienelemente zu Mikrometer starken Schichten angeordnet werden. Eine Schicht parallel angeordneter Nanodrähte oder Nanoröhren ähnelt einer frisch gemähten Wiese und wird daher oft **Nanorasen** genannt.

Abbildung 25: Freistehende Nanodrähte. (Quelle: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt)



Bei der Annäherung von zwei gegenüberliegenden Nanorasen-Schichten kommen sich einzelne Nanodrähte oder Nanoröhren sehr nah. Zwischen ihnen treten Van-der-Waals-

Kräfte auf, die sich durch die große Anzahl der Nano-Linienelemente zu beträchtlichen Haltekräften der Verbindung addieren. Da die Van-der-Waals-Wechselwirkung die einzelnen Nanodrähte oder -röhren nicht angreift, ist die Verbindung mehrfach lösbar. Daher kommt auch die Bezeichnung **Nano-Klettverschluss** oder **Nano-Reißverschluss**.

Sind die Nano-Linienelemente elektrisch leitend, bietet diese lösbare Verbindung eine zukunftsweisende Bondverbindung für die steigenden Anforderungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT). Das gezielte Aufwachsen von Nano-Linienelementen auf mikrotechnisch strukturierten Elektroden ermöglicht das parallele Bonden mehrerer Kontakte.

### Komposite

Der Einsatz gedruckter Leiterbahnen stellt eine weitere Entwicklungsmöglichkeit der AVT-Branche dar. Der Druck mit elektrisch leitfähigen Tinten (Tintenstrahl, M<sup>3</sup>D®) hat das Potenzial das Drahtbonden in vielen Bereichen zu ersetzen. Noch ist es aufwändig, elektrisch leitfähige, stabile Dispersionen – also im Fluid aufgeschwemmte Partikel – mit Nanopartikeln als hochauflösende Drucktinten herzustellen.

Mit dem richtigen Füllstoff-Anteil machen Carbon-Nano-Tubes in Kunststoffen einen elektrischen Widerstand möglich, der sich bei Dehnung oder Stauchung stark ändert. Der Effekt basiert auf Perkolation der CNT und ähnelt dem piezoresistiven Effekt in dotiertem Silizium. Die physikalischen Vorgänge sind allerdings andere: Bei der Perkolationsschwelle berühren sich die Enden der CNTs gerade oder kommen sich sehr nah, sodass eine elektrische Verbindung durch eine Kette aus CNTs entsteht. Mechanische Einflüsse verändern den Abstand benachbarter CNT und ändern so den elektrischen Widerstand des Komposits. Erste Rasterkraftmikroskopie-Biegebalken (AFM cantilever) zeigen die Funktion des Verfahrens.

Der Einsatz von nanoskalig gefüllten Kompositen in der Mikrotechnik beschränkt sich nicht nur auf die Verbesserung der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit von Kunststoffen und Photolacken. Nanoskalige Füllstoffe ermöglichen auch die Anpassung der effektiven Brechzahl, der effektiven Dielektrizitätszahl oder der biologischen Wechselwirkung.

Beispielsweise ist ein Polymer-Komposit mit mikropartikulärem Zinkoxid wegen des Brechzahlunterschieds trüb. Sinkt der tatsächlich vorliegende Partikeldurchmesser auf unter ein Zehntel der Wellenlänge, kann die Dispersion transparent sein. Nanopartikuläres Zinkoxid mit einer Siliziumdioxidschicht und angepasster Oberflächenfunktionalisierung ist bei einem Anteil von 20 % im sichtbaren Bereich des Lichts noch transparent.

Abbildung 26: Stabilisierte Dispersion mit funktionalisiertem, nanopartikulärem Zinkoxid im Vergleich zu reinem Dispersionsmittel. (Quelle: Merck KGaA, Darmstadt)



## 3.2 Fabrikationsverfahren

Die Prozesskette zur Fertigung von MNI-Systemen besteht aus der Herstellung nanoskaliger Basisstrukturen, deren Einsatz in Materialsystemen und schließlich der Fertigung der MNI-Systeme selbst. Dabei ist der Umweg über ein Nano-Materialsystem nicht zwingend notwendig, vgl. Abbildung 27.



Abbildung 27: Prozesskette zur Fertigung eines MNI-Systems.

### 3.2.1 Nanomaterialien

Die Mikrotechnik setzt im Vergleich zu vielen anderen Branchen nur kleine Materialmengen ein, ebenso die Mikro-Nano-Integration. Der erwünschte Effekt auf der Nanometerskala muss zuverlässig von verhältnismäßig wenigen nanoskaligen Basisstrukturen bzw. von einem kleinen Nano-Materialsystem-Volumen erbracht werden. Unter anderem deshalb sind die Qualitätsanforderungen an das Material in der MNI höher als bei vielen makroskopischen Anwendungen. Um dem nachzukommen, setzt man relativ kostenintensive Fabrikationsverfahren ein. Durch die kleinen Nanomaterial-Volumina steigen die Systemkosten aber nur moderat.

#### Nanoskalige Basisstrukturen

Ausführlich beschreibt Band 6 „NanoProduktion“ in der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech die Fertigung nanoskaliger Basisstrukturen. Tabelle 10 vergleicht einige für die MNI relevante Verfahren.

#### Nano-Materialsysteme

Die Eignung der Nano-Materialsysteme für den Einsatz im MNI-System ist stark von der Anwendung abhängig. Daher lohnt es sich einen Blick auf die Fabrikationsverfahren für Nano-Materialsysteme zu werfen.

Die Agglomeration - das „Verklumpen“ - ist die größte Herausforderung bei der Komposit-Herstellung. Nanoskalige Basisstrukturen dürfen beim Einbringen in eine Materialmatrix, z.B. Wasser oder ein Polymer, nicht agglomerieren. Ansonsten können die erwünschten Effekte des Nano-Materialsystems nicht zum Tragen kommen. Beeinträchtigen z.B. Partikelagglomerate die Transparenz von Polymeren, kann das Ziel einer angepassten Brechzahl nicht erreicht werden.

Mit Hilfe von Ultraschall- oder Hochgeschwindigkeits-Rührgeräten erzeugt man mechanische Scherkräfte, die Strukturverbände aufbrechen. Dabei ist eine hohe Viskosität der Matrix für das Aufbrechen von Agglomeraten förderlich.

In einer flüssigen Matrix können sich die nanoskaligen Basisstrukturen stark annähern und agglomerieren, wenn man sie nicht funktionalisiert. Diese Funktionalisierung ist vom Füllstoff und der Materialmatrix abhängig, vgl. Abbildung 28.

Will man Nanorasen-Schichten für den Nano-Klettverschluss-Effekt herstellen, dürfen die Nano-Linienelemente nicht ungeordnet vorliegen, sondern müssen ausreichend parallel ausgerichtet sein und eine geeignete Form aufweisen.

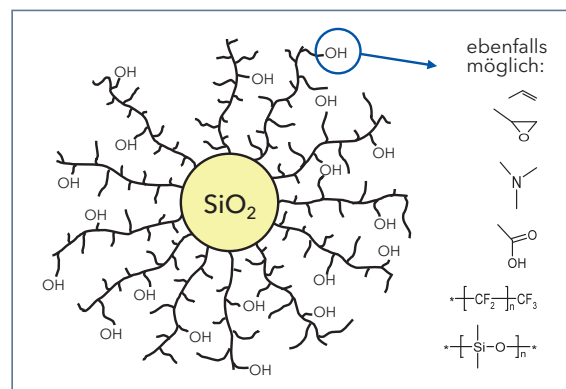


Abbildung 28: Funktionalisierung von Siliziumdioxid-Partikeln. (Quelle: Merck KGaA, Darmstadt)

Stark parallel angeordnete Nano-Linienelemente können in einem Templat mit parallelen Nanoporen erzeugt werden. In diesen Poren wachsen die Linienelemente parallel auf (Bottom-Up) und anschließend wird das Templat entfernt. Nanodrähte können beispielsweise galvanisch in Polycarbonatfolien aufgewachsen werden, CNTs mittels Gasphasensynthese (CVD) in Oxidkeramiken, vgl. Kapitel 4.1.5.

„Black silicon“ besteht aus dünnen Siliziumnadeln, die durch selbstmaskiertes Trockenätzen (RIE) erzeugt werden können. Die Form der Nadeln muss zur Eignung für den Nano-Klettverschluss-Effekt jedoch angepasst werden, vgl. Kapitel 4.3.2.

Verfahren	Charakteristika	Nanoskalige Basisstrukturen				Kosten	Anwendungsreife
		0-D	1-D	2-D	3-D		
<b>Nanolithographie (Top-Down)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EUV (extrem ultraviolette Strahlung, <math>\lambda=1...50</math> nm): Sehr stark parallelisiert, nur relativ große Strukturen (ca. 45 nm) möglich</li> </ul>			X		mittel	hoch
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Röntgen-Lithographie: Stark parallelisiert, aufwändige Optik + Maskentechnik</li> </ul>		X	X		hoch	hoch
	<ul style="list-style-type: none"> <li>E-Beam-Direktschreiben (EBID): Sehr kleine Strukturen möglich, langsam</li> </ul>		X	X	X	hoch	hoch
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laser-Lithographie: Sehr kleine Strukturen möglich, langsam</li> </ul>		X	X	X	hoch	mittel
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nanolithographie: Stark parallelisiert, aufwändige Stempelfertigung</li> </ul>		X	X	X	mittel	mittel
<b>Physical Vapor Deposition PVD (Top-Down)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gut einstellbare Schichtdicke und -homogenität</li> <li>Vakuumverfahren</li> <li>0-D nur über Umweg der Abscheidung auf Fluid möglich</li> </ul>	X		X		mittel	hoch
<b>Chemical Vapor Deposition CVD (Bottom-Up)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gut einstellbare Schichtdicke und -homogenität</li> <li>Vakuumverfahren</li> <li>CNT-Wachstum im Templat möglich</li> </ul>		X	X		mittel	hoch
<b>Sol-Gel (Bottom-Up)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Nanopartikelgüte</li> <li>Kleine Fertigungsvolumen</li> <li>Günstige Anlagen</li> </ul>	X		X		mittel	mittel
<b>Elektrochemische Abscheidung / Galvanik (Bottom-Up)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Günstige Anlagen und Materialien</li> <li>0-D: Nur Metalle und Oxide möglich</li> <li>Selektive Abscheidung möglich</li> </ul>	X		X		niedrig	hoch
<b>Flammpyrolyse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Etablierte Massenfertigung</li> <li>Starke Agglomeration der 0-D-Partikel durch lange Verweilzeit im Reaktor</li> <li>→ nanostrukturierte Mikropartikel</li> </ul>	X				niedrig	hoch

Tabelle 10: Beispiele für Fabrikationsverfahren nanoskaliger Basisstrukturen für die Mikro-Nano-Integration.

## 3.2.2 MNI-Systeme

Die Integration von nanoskaligen Basisstrukturen und Nano-Materialsystemen in Mikrosysteme ist mit einer Vielzahl spezieller Fertigungsverfahren möglich. Sie sind im Folgenden nach aufsteigenden Anforderungen in die Kategorien **Einstieg**, **Fortgeschritten** und **Zukünftig** eingeteilt.

### Einstieg

Den Einstieg in die Mikro-Nano-Integration bilden verbesserte Nano-Materialsysteme, die sich mit klassischen Verfahren der Mikrosystemtechnik verarbeiten lassen. Für den Anwender ist die Einstiegshürde relativ klein, er ist jedoch auf verlässliche Materiallieferanten angewiesen. Einige Beispiele können sein (Details in Kapitel 4):

- Feuchtediffusionshemmende Vergussmassen für Gehäuse mikrotechnischer Bauteile verwenden.
- Mit Nanopartikeln entspiegelte Gläser zum Schutz mikrooptischer Bauteile einsetzen.
- Nanoporöse Schichten oder nanoamorphe Graphitschichten im Siebdruckverfahren auf Substrate aufdrucken. Anwendung im Gassensor und Infrarot-Emitter.
- Niedrigschmelzende oder biokompatible Nano-Lotpasten für die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) im Siebdruckverfahren auf Lotflächen aufdrucken. Anwendung in der Kontaktierung temperaturempfindlicher bzw. biomedizinischer elektronischer Bauteile.
- Reaktive, legierungsbildende Nanoschichtverbünde in Folienform zwischen Bondverbindungspartner bringen und Verbindungsaufbau durch lokalen Energieeintrag „zünden“. Anwendung in der AVT beim Niedertemperatur-Fügen: Die Wärmeerzeugung in der Nanofolie lässt das Lot schnell aufschmelzen, ohne einen großen Energieeintrag darzustellen.

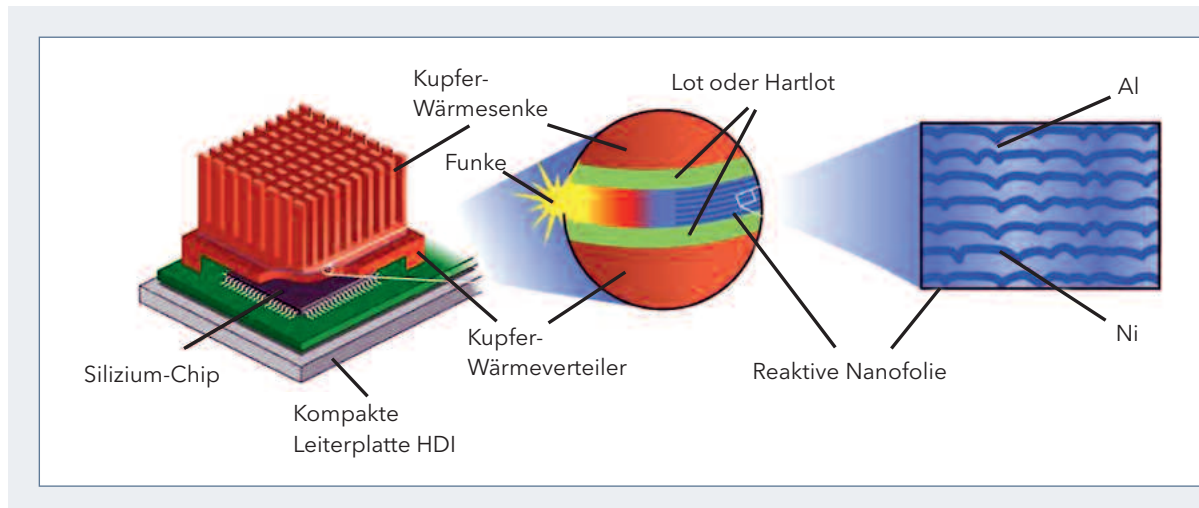


Abbildung 29:

Einsatz der reaktiven Nanofolie Nanofoil® zum Niedertemperatur-Bonden mit kleinen thermischen Übergangswiderständen beim Kühlkörper-Anschluss an elektronische Bauteile. Ähnliche Verfahren eignen sich zum Bonden von LED und Solarzellen. (Quelle: Reactive NanoTechnologies, Inc. [www.RNTfoil.com](http://www.RNTfoil.com))

## Fortgeschritten

Für anspruchsvollere MNI-Systeme setzen Firmen und Forschungseinrichtungen fortgeschrittene Fabrikationsverfahren ein. Sie adaptieren einerseits Nano-Materialsysteme an etablierte Verarbeitungsverfahren. Andererseits modifizieren sie die Verarbeitungsprozesse, um letztendlich Material und Verfahren aufeinander abzustimmen. Einige Beispiele sind (Details in Kapitel 4):

- Nano-Aerosole oder Nano-Tinten mit leicht modifizierten Verfahren auf polymere Substrate aufdrucken

Anwendung in der gedruckten Elektronik und der AVT

- Photolacke mit nanopartikulärer Ausstattung mit angepasster Photolithographie strukturieren: Anwendung in der AVT für photostrukturierte Substrate mit modifizierter thermischer Leitfähigkeit und angepasster Dielektrizitätszahl.
- Reaktive, legierungsbildende Nanoschichtverbände auf einem Bauteil lokal erzeugen: Anwendung in der AVT beim hermetischen Kapseln mit Temperaturbegrenzung.
- Elektroden auf einem Nanorasen strukturieren: Anwendung als Mikro-CNT-Gassensor

Die Integration von CNTs in ein Mikrosystem demonstriert das BMBF-Projekt MNI-CNTs (vgl. Kapitel 4.1.5, [www.nanotud.org](http://www.nanotud.org)). Auf einem Substrat ist ein Nano-Materialsystem aus einer Schicht hochparallel angeordneter CNTs aufgewachsen, vgl. Abbildung 19. Darauf strukturierte Mikroelektroden erlauben die gezielte elektrische Kontaktierung der CNTs. Die Kontakteigenschaften lassen sich mit Verfahren der Mikro-technik für die Anwendung anpassen.

- Nanodraht durch Einzeldrahtlithographie freitragend präparieren: Anwendung im Mikro-Gasströmungssensor.

Das BMBF-Projekt INANOMIK (INtegration und ANwendung von NanO-Drähten durch MIKro-Nano-Fabrikation und Mikro-Montage, vgl. Kapitel 4.1.4) zeigt mehrere Wege zum Aufspannen von Nanodrähten zwischen Mikroelektroden.

Eine Vorgehensweise nutzt zufällig auf einem Substrat verteilte Nanodrähte. Die Photolithographie und das Lift-off-Verfahren aus der Mikro-technik erlauben die Strukturierung von Mikroelektroden um einen Nanodraht herum. So kann der Nanodraht elektrisch kontaktiert werden, ohne auf dem Substrat bewegt werden zu müssen. Anschließend dienen die Mikroelektroden als Maske für das Freilegen des Nanodrahts mit reaktivem Ionenätzen. Ohne den Nanodraht greifen zu müssen wird er so zwischen zwei Elektroden freitragend aufgespannt, vgl. Abbildung 30.

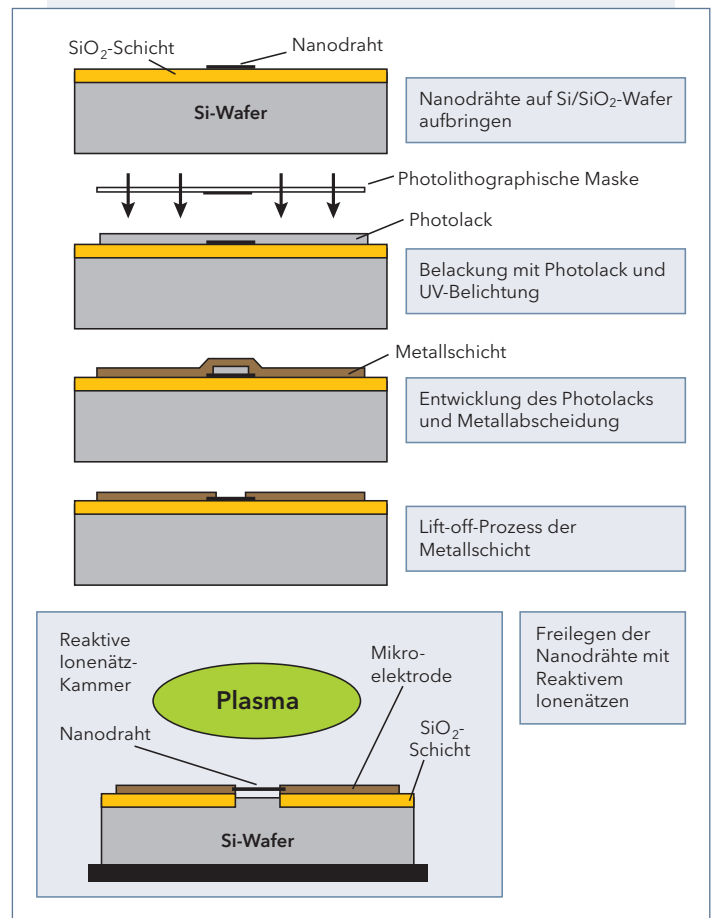


Abbildung 30: Mikro-Nano-Integration von Nanodrähten: Einzeldraht im Lift-off Verfahren präparieren (Quelle: FH Wiesbaden, IMtech, Prof. Dr. habil. F. Völklein)

## Zukünftig

Grundlagenorientierte Forscher suchen nach zukunftsweisenden Ansätzen zur Mikro-Nano-Integration. Sie bringen nanoskalige Basisstrukturen mit neuen Verfahren hochintegriert in dreidimensionale Mikrosysteme ein. Vor dem Hintergrund der Prozesskostenminimierung gewinnen Bottom-Up-Verfahren an Bedeutung.

Einige Beispiele sind (Details in Kapitel 4):

- Optische Nano-3-D-Gitter auf Kameralinsen im **Nanolithographie-Verfahren** aufbringen, siehe Kapitel 4.1.6: Anwendung in der optischen Bildvorverarbeitung für die 4-D-RGB-Sensorik.
- Optische Nano-Strukturen – Photonische Kristalle – im Nanolithographie-Verfahren in mikrofaseroptische Bauteile integrieren.
- CNTs zwischen Elektroden aufspannen und vor Ort verformen: Anwendung in der Nanoelektronik in Single-Electron-Transistoren.
- Nanorasen auf mikrotechnisch strukturierten Flächen lokal aufwachsen und gezielt eine Verbindung zwischen jeweils zwei Nanorasenflächen aufbauen: Anwendung in der AVT als trockene Bondverbindung mit hoher Kontaktdichte. Elektrische Verbindung mit CNTs, mechanische Verbindung mit Black Silicon.
- Einzelne CNTs gezielt zwischen Elektroden synthetisieren: Anwendung in der Nanoelektronik für CNT-Feldeffekt-Transistoren. Synthetisches Wachsen von CNTs auf einem Halbleitersubstrat mit Mikroelektroden erlaubt die CMOS-kompatible Fertigung von CNT-Feldeffekt-Transistoren. Als Schalter und als chemische Sensoren haben sie großes Anwendungspotenzial ([www.etit.de](http://www.etit.de)). Jedoch entstehen bei der Synthese neben halbleitenden CNTs auch metallische Nanoröhren, die eine Transistorfunktion verhindern.
- Ultrapräzisionsmontage durch Selbstausrichtungseffekte: Anwendung bei der Bauteilmontage in der AVT.
- Nano-Linienelemente kontaktlos montieren
  - Nanostäbe durch Ultraschall oder Magnetfelder positionieren.
  - Nanodrähte bzw. CNTs dielektrophoretisch zwischen Mikroelektroden abscheiden und dort fügen: Anwendung im Mikro-Gasströmungssensor bzw. im Mikro-CNT-Aktor.

Die dielektrophoretische Abscheidung von CNTs erlaubt die Trennung von metallischen und halbleitenden CNTs. Dazu werden einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren (Single-Walled Carbon-Nanotubes SWCNTs) in einer Flüssigkeit über ein Mikroelektrodenfeld gespült und dort elektrochemisch abgeschieden. Über eine galvanische Metallabscheidung können die SWCNTs nun elektrisch und mechanisch mit den Elektroden verbunden werden (vgl. Kapitel 4.2.1).

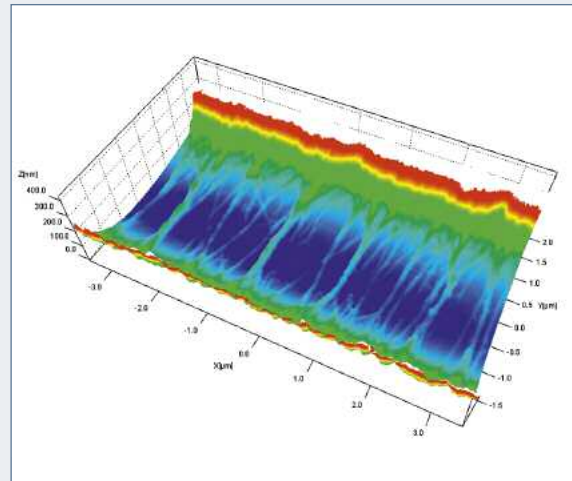
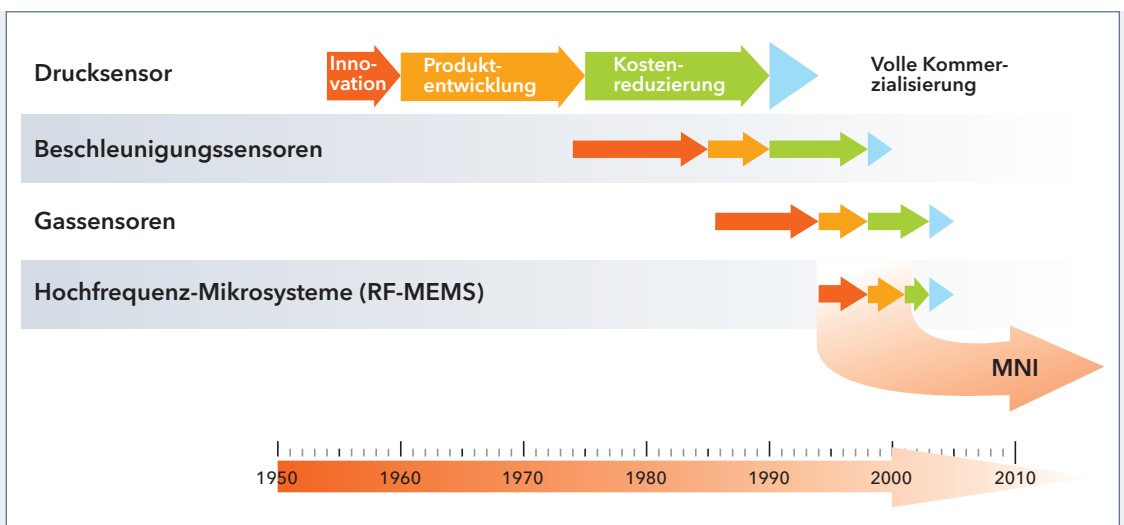


Abbildung 31:  
AFM-Aufnahme von metallischen SWCNTs (hellblau) zwischen zwei Mikroelektroden (rot) zur Nutzung in Mikroaktoren  
(Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe, Dr. Koker)

## 4 Produktchancen und Anwendungen der Mikro-Nano-Integration

Abbildung 32:  
Entwicklungszyklen aus-  
gewählter MST-Produkte.  
(Quellen: Grace, R.:  
Current and future high  
volume automotive appli-  
cations of microsystems  
technology, Proc. 10th  
Commercialization of  
Micro and Nano Systems  
Conference, Baden-Baden,  
2005; Bosch - Automotive  
Electronics: MEMS Pro-  
ducts and Technology,  
Reutlingen, 2007 / 2008)



Die Mikrosystemtechnik und die Nanotechnologie sind Querschnittstechnologien, die in vielen Produkten Anwendung finden. Ihre wirtschaftliche Hebelwirkung bündelt sich in der Mikro-Nano-Integration und erlaubt eine beträchtliche Wertschöpfung.

Abbildung 32 stellt die Entwicklungszyklen ausgewählter MST-Produkte dar. Der Fortschritt lässt sich durch laufende Innovationen und Produktentwicklungen in der Mikro-Nano-Integration fortschreiben.

Hessische Unternehmen haben durch die gut entwickelte Forschungsumgebung einen Standortvorteil. Daraus resultieren Produktchancen für den Bereich der MNI. Gleiches gilt für den Bereich der Analytik. Dieser Sektor ist inhaltlich und wirtschaftlich für die hessische Wirtschaft bedeutend, kann hier aber wegen des Umfangs nicht behandelt werden. Daher wird zu diesem Themen eine eigene Broschüre in der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech veröffentlicht.

### 4.1 Sensorik

Die Sensorik hat in der Mikrosystemtechnik einen hohen Stellenwert, weil die Miniaturisierung für das Messen entscheidende Vorteile bringt:

- Je kleiner Sensorelemente und Probekörper sind, desto schneller liefern sie Messwerte und desto kleinere Probevolumina sind nötig.
- Die Auswerteelektronik kann in den Sensor integriert werden, sodass weniger Störungen auftreten. Die Sensoren werden genauer und zuverlässiger.
- Die Sensoren werden kleiner und günstiger, sodass sie in Massenanwendungen wie Kraftfahrzeugen, Computer-Festplatten oder Mobiltelefonen Platz und Einsatz finden.

Die Sensorik hat sehr stark die Materialentwicklungen und Fertigungstechnologien der Mikroelektronik nutzen können. So wurde in den 1950er Jahren der piezoresistive Effekt in Silizium entdeckt und innerhalb eines bis zwei Jahrzehnten kamen die ersten Drucksensoren auf den Markt. Ähnlich hat es sich mit der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes oder der Diodenkennlinien verhalten, die ebenfalls in hochwertigen Sensoren genutzt werden. Beschleunigungssensoren wurden in den 1970er Jahren entwickelt und in Folge kamen die Sensoren auf den Markt, die etwa als Airbag-Sensoren in den 1990er Jahren zum hochwertigen und dennoch kostengünstigen Massenprodukt weiterentwickelt wurden.

Diese Entwicklungen gehen weiter, etwa in Richtung miniaturisierter Mikrofone, Mikro-Displays, Lichtablenker, Gassensoren, biochemischer Sensoren, Mikroventile, Mikro-Zahnräder, Mikro-Getriebe und mehr. Einige dieser Entwicklungen werden in den nächsten Jahren zu kommerziell erfolgreichen Produkten führen.

Die Nutzung von Nanomaterialien und Nanotechnologie für Mikro-Bauelemente und -Systeme lässt viel erwarten. Denn hierdurch können neuartige

Bauelemente geschaffen werden und bestehende bessere Eigenschaften erhalten. Aktuell wird an der Verbesserung von statischen, mechanischen und dynamischen Sensoren, thermischen Sensoren und Strömungssensoren sowie magnetischen Sensoren gearbeitet. Insbesondere bei chemischen und biochemischen Sensoren zur Messung von kleinsten Mengen interessierender Substanzen in Flüssigkeiten oder in Gasen sind große Fortschritte zu erwarten.

## 4.1.1 Sensoren für geometrische und mechanische Messgrößen

### Drucksensoren

Drucksensoren finden vielfältige Anwendungen in der Industrie, im Automobil, in Haushaltsgeräten, in der Klimatechnik sowie in der Medizintechnik. NEXUS ermittelte 2005 einen Weltmarkt von rund 180 Millionen Stück für das Jahr 2004 und prognostizierte 480 Millionen Stück für das Jahr 2009, vgl. Abbildung 15. Durch die Finanzkrise 2008/2009 werden die tatsächliche Stückzahlen insbesondere im Automotive Bereich kleiner ausfallen, allerdings prognostiziert Yole im Januar 2009 trotzdem ein Wachstum für den MEMS-Markt im Konsum-Bereich von fünf Prozent für das Jahr 2009. Grund dafür ist der verstärkte Einsatz von Mikrosystemtechnik-Produkten in diesem Marktsegment.

Die Fertigungstechniken für Drucksensoren nutzen die Siliziumtechnik und in geringerem Maße auch die Dünnschichttechnik (etwa für Sensoren mit Stahlmembranen) und Dickschichttechnik (etwa bei Keramikmembranen). Hier beginnt zurzeit die Nanotechnologie als Fertigungstechnologieschritt auf Basis von nanoporösem Silizium in Mikrobauelemente einzufließen.

Auf Basis der Siliziumtechnik ist die Mikrosystemtechnik entwickelt worden, um dünne Membranen in Teilen der Silizium-Bauelemente herzustellen. Diese Membranen können sich durch den Druckeinfluss verbiegen, was durch Änderungen von diffundierten elektrischen Widerständen oder durch Kapazitätsänderungen zwischen der beweglichen Elektrode und einer Festelektrode elektrisch erfasst wird. Dabei kann eine erste Signalvorverarbeitung, etwa verbunden mit einer Temperaturkompensation, schon auf dem Rande des Sensorchips realisiert werden. Für diese elektronischen Funktionen hat sich die CMOS-Technik als besonders günstig erwiesen.

Die Mikrosystemtechnik nutzt dabei das anisotrope Ätzverfahren durch Kaliumhydroxid KOH. Große Siliziumwafer werden partiell - im Bereich der Drucksensor-Membran - dünn geätzt. Dabei können, je nach Chipgröße und Wafergröße, bis zu über 1000 Drucksensorchips in einem Arbeitsgang auf einem Siliziumwafer kostengünstig hergestellt werden. Danach werden die Wafer rückseitig mit Spezialglas anodisch gebondet. Dieser Silizium-Glas-Verbund wird in Sensorchips vereinzelt und auf entsprechende Sockel montiert. Diese Glaszwischen-schicht hat den Vorteil, dass mechanischer Stress durch Temperaturänderungen zwischen dem Silizium und dem metallischen Sockelkörper ausgeglichen werden kann, Abbildung 33.

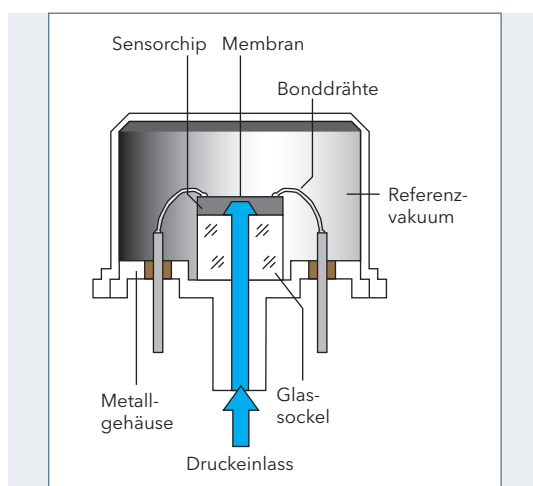


Abbildung 33:  
Drucksensor der ersten  
Generation in Metallgehäuse.  
(Quelle: Robert Bosch GmbH)

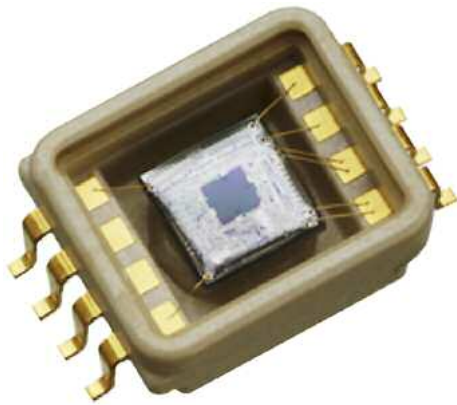


Abbildung 34: Intelligenter Drucksensor in einem Kunststoffgehäuse.  
(Quelle: Robert Bosch GmbH)

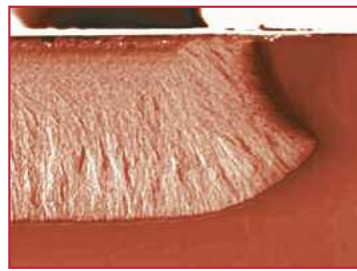
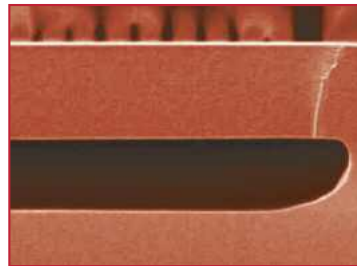


Abbildung 36:  
REM-Aufnahme des  
Querbruchs, vgl. Abbildung 35.  
(Quelle: Robert Bosch GmbH)



**oben:** nach der Anodisierung  
und vor dem Wasserstoff-  
Prebake (zwischen Schritt a  
und b); hellgrauer Bereich:  
Nanoporöses Silizium  
**unten:** nach der Si-Epitaxie,  
vgl. c.

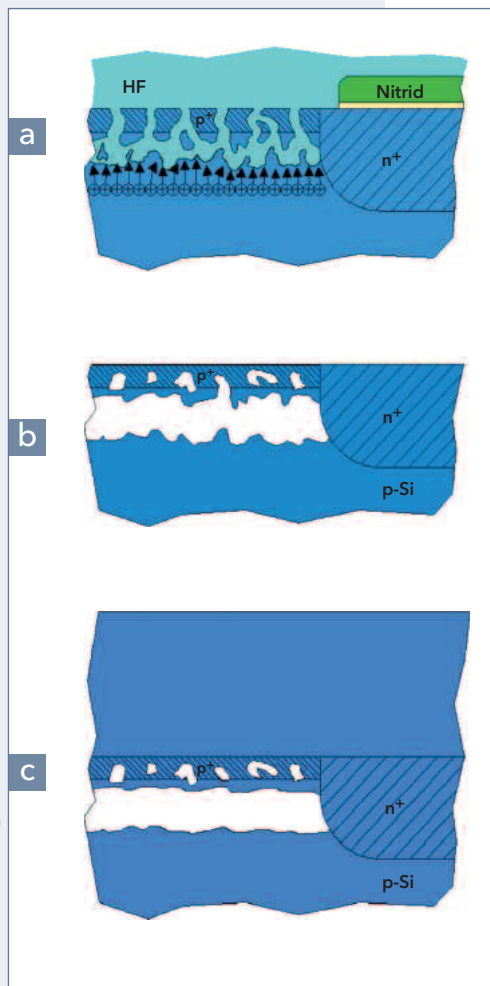


Abbildung 35:  
Schematischer Prozessfluss:  
Si-Substrat  
**a)** während Anodisierung,  
**b)** während Wasserstoff-  
Prebake,  
**c)** nach Silizium-Epitaxie.  
(Quelle: Robert Bosch GmbH)

Im Jahr 2007 wurde der **Advanced Porous Silicon Membrane-Prozess (APSM)** bei der Robert Bosch GmbH eingeführt, [Knese2007]. Damit können integrierte Automobil-Drucksensoren in einem Standard-Mixed-Signal-CMOS-Prozess hergestellt werden.

Zuerst wird das p-Silizium-Substrat lokal dotiert mit einem tiefen n<sup>+</sup>-dotierten Ring, der ein flaches p<sup>+</sup>-dotiertes Gitter umschließt. Beim Anodisieren (Abbildung 35 a) wird das p-Si durch die Löcher im Gitter der p<sup>+</sup>-dotierten Region porös geätzt. Damit entsteht ein einkristallines p<sup>+</sup>-dotiertes Mikrogitter über einer Matrix von nanoporösem Silizium.

Nach Abätzen der Silizium-Nitridschicht wird das Substrat in einer Wasserstoffatmosphäre zwischen 900°C und 1100°C getempert (Abbildung 35 b). Dabei diffundiert der Wasserstoff zuerst in das poröse Silizium und desorbiert allen Sauerstoff von eventuell vorhandenen Oxidschichten. Danach beginnt sich das poröse Silizium in eine einzige große Kaverne umzulagern.

Im gleichen Reaktor wird dann die Temperatur auf über 1100°C erhöht und eine Epitaxieschicht wächst auf dem p<sup>+</sup>-Silizium-Gitter auf (Abbildung 35 c). Durch laterales Überwachsen werden alle Löcher hermetisch geschlossen. Der während dieses Prozesses eingefangene Wasserstoff diffundiert bei späteren Prozessen aus der Kaverne, wodurch ein Referenzvakuum entsteht.

Dieser APSM-Prozess ist CMOS-kompatibel und wird in Kombination mit einem Standard-IC-Prozess zur Herstellung kapazitiver Drucksensoren verwendet. Auf Basis dieser Technologie können kosteneffektiv miniaturisierte kapazitive Sensoren hergestellt werden, wie Drucksensoren, aber auch Mikrofone oder thermische Strömungssensoren.

## 4.1.2 Sensoren für dynamische Messgrößen – Inertialsensoren

**Inertialsensoren** sind Mikrosystemtechnik-Produkte in Silizium, die im Automobil zu vielen Millionen Stück eingesetzt werden. Sie tragen dort wesentlich zur Erhöhung der Sicherheit bei. Zu Inertialsensoren gehören:

- Beschleunigungssensoren, die im Falle von Crashes die Airbagentfaltung auslösen
- Drehratensensoren, die z. B. zur Fahrzeugstabilisierung eingesetzt werden (ESP-Systeme)

Im Moment ist in kommerziellen Inertialsensoren die Nanotechnologie noch nicht bestimmend. Nanoskalige Abstandsänderungen machen die Funktion indes erst möglich. Die Miniaturisierung geht jedoch weiter und an der Mikro-Nano-Integration wird gearbeitet, z. B. am Einsatz des APSM-Prozesses.

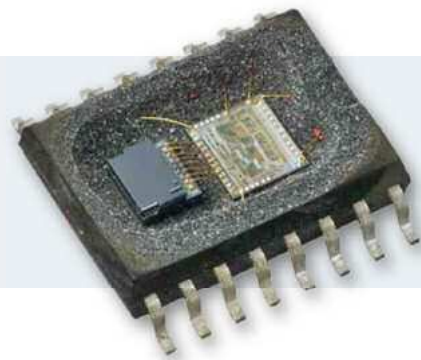
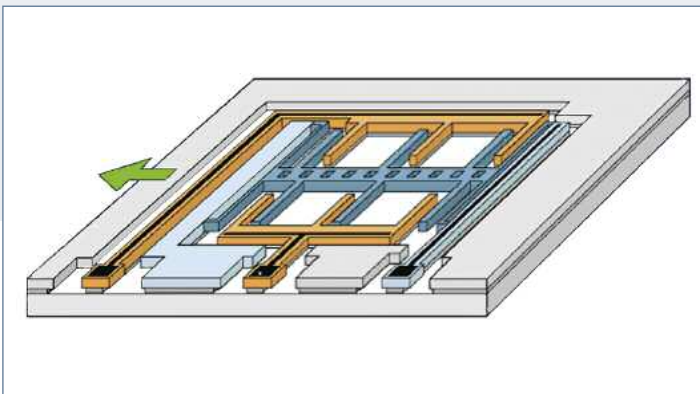


Abbildung 37:  
Schema eines Oberflächen-Mikromechanik-Beschleunigungssensors (links) sowie Beschleunigungs-Sensorchip mit Signalverarbeitungschip in einem Gehäuse (rechts).  
(Quelle: Robert Bosch GmbH)

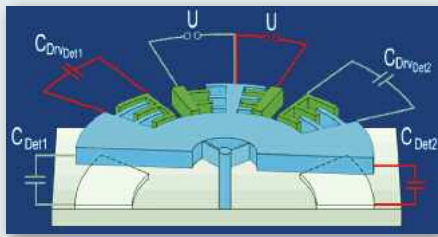
### Beschleunigungssensoren

Diese Inertialsensoren nutzen die Trägheit einer Silizium-Prüfmasse aus. In der älteren Mikromechanik-Technik sind Silizium-Paddel an federnden dünnen Balken zwischen stationären Kondensatorplatten im Sensorkörper aufgehängt. Bei Beschleunigungen zwischen der halben bis über 200-fachen Erdbeschleunigung verschiebt sich die Prüfmasse relativ zu den Kondensatorelektrodenplatten um Mikrometer-Bruchteile. Dies bewirkt Kapazitätsänderungen, die sehr schnell ausgewertet werden und innerhalb von Millisekunden zum Auslösen der Airbags führen.

In der jüngeren Oberflächen-Mikromechanik besteht die träge bewegliche Paddelstruktur aus dünnen Polysiliziumstrukturen. Sie sind in Kammform frei beweglich an Federn aufgehängt, Abbildung 37. Die Abstandsänderung zwischen Prüfmasse und Elektrode wird wieder über die Kapazitätsänderung ausgelesen. Es sind relativ große, fingerförmige Kammstrukturen notwendig, damit die dünnen Schichtkondensatoren hinreichend große Kapazitätswerte aufweisen.

Heute sind in Kfz mehrere Beschleunigungssensoren enthalten. Sie bestimmen an unterschiedlichen Stellen des Fahrzeugs die Beschleunigung in verschiedenen Raumrichtungen. Sie stellen also fest, wo und wie stark ein Fahrzeug bei einem Unfall in Mitteleidenschaft gezogen wird. So können beim Unfall die Airbags gezielt gezündet und die Fahrzeuginsassen optimal geschützt werden.

#### Elektrostatrischer Antrieb der Silizium-Scheibe



#### Kapazitive Detektion der Verkipfung

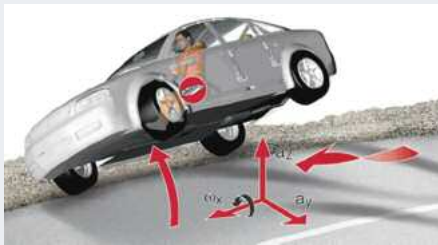
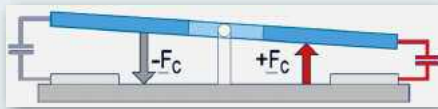


Abbildung 38: Arbeitsweise der Drehratensensoren (oben), Detektionsrichtungen des gesamten Überroll-Detektionssystems zum Insassenschutz (unten). (Quelle: Robert Bosch GmbH)

### Drehratensensoren

Drehratensensoren sind eine weitere jüngere Mikrosystemtechnik-Entwicklung des letzten Jahrzehnts. Mit ihnen erfasst man die

- Drehbewegungen um die Hochachse des Fahrzeugs im Elektronischen Stabilitätsprogramm ESP und
- Drehbewegungen des Fahrzeugs um seine Längsachse für die Überroll-Sensierung bei Insassenschutzsystemen.

Damit werden ungewollte Drehungen und Beschleunigungen von Fahrzeugen erkannt und mit gezieltem Bremsen verhindert.

Die höchstempfindlichen Drehratensensoren bestehen aus oszillierenden „Silizium-Scheiben“, die elektrostatrisch angetrieben werden. Beim Auftreten von Rotationsbewegungen verkippen diese Scheiben aufgrund der Corioliskraft leicht, was kapazitiv detektiert wird. Damit können Verkipfungen dieser Mikrostrukturen höchstempfindlich, mit Distanzänderungen bis in den Nanometer-Bereich genau und schnell bestimmt werden (Abbildung 38).

Auch hier wird an einer weiteren Miniaturisierung der Sensoren und an der Integration der Auswertelektronik auf einem Chip gearbeitet.

## 4.1.3 Magnetische Sensoren

### Magneto-resistive Sensoren

Die Entdeckung des Magneto-resistiven Effektes (Magneto Resistance, MR) 1857 durch Thomson konnte erst über 100 Jahre später in erste technische Anwendungen einfließen. Der erste bekannte Einsatz dieses Effektes war die Leseinheit in Magnet-Bubblespeichern Ende der 1960er Jahre. Jedoch erst um 1980 wurde mit der Entwicklung der ersten Magneto-resistiven Sensoren begonnen.

Der **Anisotrope Magneto-resistive Effekt** (Anisotropic Magneto Resistance, AMR) tritt in magnetischen Materialien auf, wie FeNi-Legierungen. Deren spezifischer elektrischer Widerstand ist parallel zur Magnetisierung einige Prozent größer als senkrecht dazu. In nur wenige Nanometer dünnen Schichten aus diesen Materialien ist die Magnetisierung leicht drehbar, so dass damit leistungsfähige Sensoren realisiert werden können.

Ein Beispiel eines leistungsfähigen AMR-Sensors der Firma Sensitec in Lahnau ist in Abbildung 39 gezeigt ([www.sensitec.com](http://www.sensitec.com)). Die eigentliche Sensorschicht ist nur 30 nm dick. Es erfordert eine leistungsfähige Fertigungstechnik, solch dünne Nanoschichten mit hoher Qualität gleichmäßig auf großen Silizium-Wafern abzuscheiden. Zur Sensorschicht kommen noch metallische Kontaktschichten und Abdeckschichten hinzu. Die Siliziumwafer werden danach zu Chips vereinzelt und können dann etwa in Winkelmesssystemen eingebaut werden.

Magneto-resistive Sensoren bieten hervorragende mikrosystemtechnische Lösungen für die Messung und Regelung von magnetischen, elektrischen und mechanischen Größen. Sie werden überall dort eingesetzt, wo Bewegung kontrolliert und gesteuert wird, wo Wege, Winkel, Positionen, elektrische Ströme oder magnetische Felder gemessen und detektiert werden.

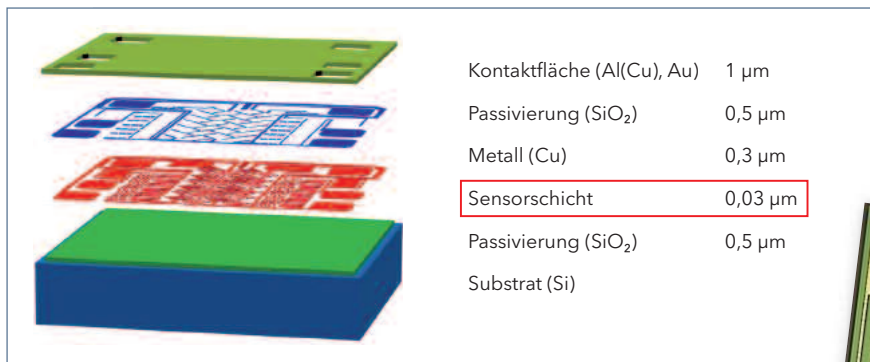
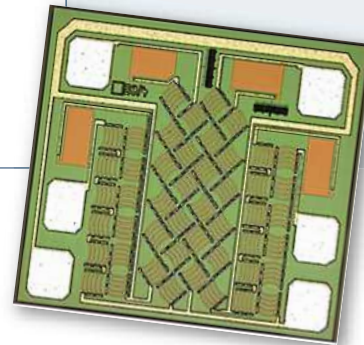


Abbildung 39:  
Aufbauschema und Foto eines AMR-Sensorchips für Winkelmessungen, Chipgröße: kleiner 1 mm<sup>2</sup>.  
(Quelle: Sensitec GmbH)



So sind MR-Sensoren seit 2004 zur Positionsmessung auf dem Mars im Einsatz. Sie dienen zur Steuerung aller beweglichen Teile wie der Räder, der Antenne, Solarzellen oder z. B. des Probenbohrers der Mars-Erkundungsfahrzeuge Spirit und Opportunity der NASA, Abbildung 40. Dazu werden kundenspezifische MR-Sensoren verwendet, wobei die eigentlichen MR-Sensoren aus ganz normalen Serienteilen bestehen, die in großen Stückzahlen mit Serien-Prozessen hergestellt werden. Lediglich die verwendete Elektronik musste zur Vermeidung von Ausfällen beim Flug und bei den auf dem Mars auftretenden kosmischen Strahlungsbelastungen modifiziert werden. Die MR-Sensoren arbeiten bei extremen Temperatur- und Umweltbedingungen und werden u. a. auch deshalb für viele Anwendungen in der Industrie oder im Automobil eingesetzt. Insgesamt gesehen werden MR-Sensoren heute schon in hoher Millionenstückzahl gefertigt.

Im **Automobil-Bereich**, insbesondere zur Rad-Drehzahlerfassung für das Antiblockiersystem ABS, sind derzeit AMR-Sensoren in großen Stückzahlen im Einsatz: weltweit über 100 Millionen Stück. Mit diesen Sensoren wird das Blockieren der Räder bei starkem Bremsengriff erkannt und an das Anti-Blockier-System weitergeleitet. Über eine Korrelation der Rad-drehgeschwindigkeit und dem Lenkwinkel mit dem Drehraten- und Querschleunigungssensorsignal lässt sich auch die Abweichung der gewünschten und der realen Kurvenfahrt ermitteln, vgl. Abbildung 41. Durch gezielten Bremsengriff des ESP an einzelnen Rädern kann somit ein Schleudern des Fahrzeuges verhindert werden. In dem Marktsegment der Raddrehzahlsensoren ist Continental weltweit führend. Der Vorteil liegt in der hohen Präzision und Robustheit der Messtechnik.

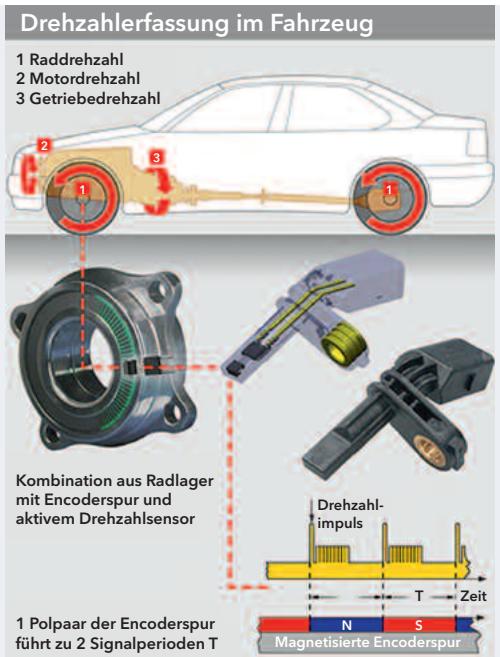
Weitere Anwendungen im Automobilbereich umfassen

- die Drehmoment- und Drehwinkel-Messungen an der Motorwelle
- die Pedalweg-Messung
- die Messung des Lenkwinkels an der Lenkung für die elektrische Servolenkung
- die Ventilpositionsmessungen an Motortestständen.



Abbildung 40:  
Mars-Rover „Spirit“ mit MR-Sensoren von Sensitec.  
(Quelle: Sensitec GmbH)

Abbildung 41:  
Funktionsdarstellung von Raddrehzahlsensoren. (Quelle: Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt am Main)  
Die Anzahl der Sensoren, die in einem modernen Fahrzeug eingesetzt werden, steigt ständig. Die treibenden Kräfte dafür sind Drive-by-wire-Konzepte, erhöhte Sicherheitsanforderungen und gesteigerter Fahrgastkomfort.



Im Bereich der industriellen Automatisierung gibt es ebenfalls viele Anwendungen für Magneto-Resistance-Sensoren, etwa zur Positionsmessung, Drehwinkelmessung, Drehzahlmessung und zur Längenmessung.

Außerdem werden MR-Sensoren auch in großen Stückzahlen zur Strommessung im Bereich von unter einem bis mehrere tausend Ampere und als elektronischer Kompass eingesetzt.

Entdeckt wurde der **Riesenmagnetwiderstand**-Effekt (Giant Magneto Resistance, GMR) 1988 durch Prof. Dr. P. Grünberg in Jülich und Prof. Dr. A. Fert von der Universität Paris, Abbildung 42.

Der GMR-Effekt tritt in Schichtsystemen mit mindestens zwei dünnen ferromagnetischen Schichten und einer metallischen Zwischenschicht auf. Stehen in

diesen Schichten die Magnetisierungen antiparallel, so ist der elektrische Widerstand größer als bei paralleler Magnetisierung. Dieser Unterschied kann bis zu 50 Prozent betragen. Daher kommt der Name „GIANT“. Damit bieten solche Schichtsysteme gute Beispiele für Nanoschichten.

In der Praxis müssen dazu eine Vielzahl von extrem dünnen Schichten kontrolliert abgeschieden werden, Abbildung 43. Die Schichtdicken liegen im Bereich von einem bis wenigen Nanometern. Diese neue Technik erlaubt geringere Chipgrößen und Betriebstemperaturen bis etwa 180°C.

Die GMR-Technik findet in großem Umfang Einsatz in Schreib-Leseköpfen von Computer-Laufwerken. Bei Sensitec in Lahnau wird sie in GMR-Sensoren eingesetzt, die unter anderem Anwendung finden

- in der magnetischen Feldmessung
- als magnetische Schalter
- als neue Zahnsensoren für Längen- und Drehzahlmesssysteme.

Die Entwicklungen gehen weiter: Der **Magnetische Tunnelwiderstand**-Effekt (Tunneling Magneto Resistance, TMR) tritt in Schichtsystemen mit mindestens zwei ferromagnetischen Schichten und einer sehr dünnen Isolationsschicht von 1 nm bis 2 nm Dicke auf. Es scheinen Widerstandsänderungen bis zu einem Faktor 500 möglich. Der Effekt wurde in den 1970er Jahren entdeckt, und wird seit den 1990er Jahren auch als Basis für die Hochleistungsspeicher MRAM (Magneto Resistance Random Access Memory) eingesetzt.

Die Umsetzung in Sensoren steht noch am Anfang. Es wird an Produkten für Magnetfeld-Schalter sowie Sensoren gearbeitet. Die starke Miniaturisierung lässt Bauelemente mit hoher Ortsauflösung möglich erscheinen.

Abbildung 42:  
Prof. Dr. A. Fert (links) und Prof. Dr. P. Grünberg (rechts),  
Physik-Nobelpreisträger 2007.  
(Quellen v.l.n.r.: Bruno Fert: Invisuphoto;  
Peter Grünberg: Forschungszentrum Jülich)

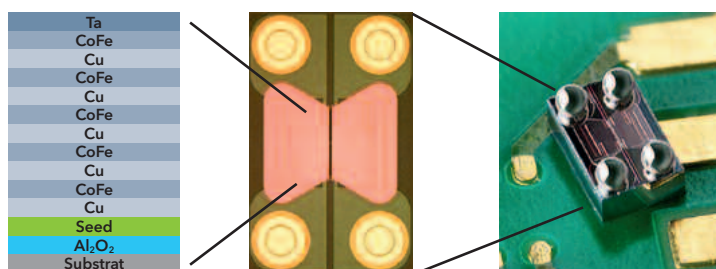


Abbildung 43:  
Abfolge magnetischer und nichtmagnetischer Schichten in GMR-Sensoren (links), GMR-Multi-Layer-Sensor-Chip (Mitte und rechts). Bei entsprechender Dicke der nicht magnetischen Cu-Zwischenschicht erhält man im Ruhezustand ohne äußeres Feld eine antiparallele Magnetisierung. Schichtdicken jeweils ca. 2 nm. Chipgröße: 2 mm. (Quelle: Sensitec GmbH).

## 4.1.4 Thermische Sensoren

Die Temperatur hat auf sehr viele Prozesse Einfluss und daher einen hohen Stellenwert in der miniaturisierten Messtechnik. Es gibt heute eine Vielzahl von Temperaturmessmethoden und zugehörigen Sensoren, sowohl für die berührende Temperaturmessung als auch die berührungslosen Verfahren.

Die Verfahren der berührungslosen Temperaturmessung nutzen aus, dass jeder heiße Körper Strahlung abgibt. Das Maximum der Strahlung von Sonnenlicht liegt im sichtbaren gelben Spektralbereich, das von heiß strahlenden Körpern im Infrarot-Bereich (IR). Je nach Strahler-Temperatur verschiebt sich das Maximum der Wärmestrahlung. Damit kann aus der Strahlungsintensität im Infraroten die Oberflächentemperatur bestimmt werden.

Die thermischen Detektoren wurden in den letzten beiden Jahrzehnten immer empfindlicher. Möglich machte dies die Silizium-Mikromechanik z.B. eingesetzt bei Perkin Elmer Optoelectronics in Wiesbaden ([www.perkinelmer.com](http://www.perkinelmer.com)), Heimann Sensor in Eltville ([www.heimansensor.com](http://www.heimansensor.com)) und HL-Planartechnik.

### Thermoelemente

Die Thermoelektrik kann genutzt werden, um Wärme unter Ausnutzung des Seebeck-Effekts direkt in elektrische Signale umzuwandeln. Der Seebeck-Effekt beschreibt die Entstehung von elektrischen Spannungen zwischen zwei Punkten eines elektrischen Leiters mit unterschiedlicher Temperatur. Je größer der Temperaturunterschied, umso größer ist das elektrische Signal, Abbildung 44.

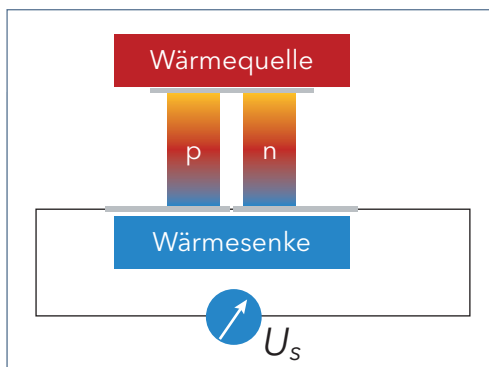


Abbildung 44: Schematischer Aufbau eines Thermoelements. Im n-dotierten Material werden im warmen Bereich mehr Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband gehoben und stehen als Ladungsträger zur Verfügung; entsprechend stehen bei einem p-dotierten Material mehr Löcher zur Verfügung. Dieser Potenzialunterschied generiert das elektrische Signal.

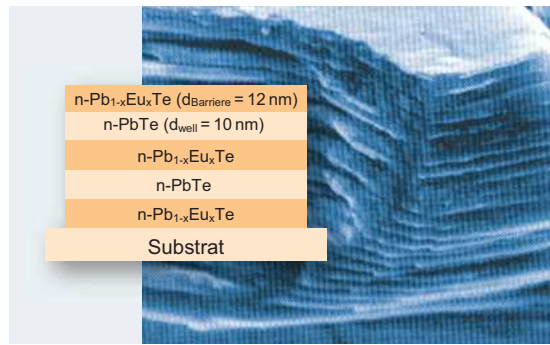
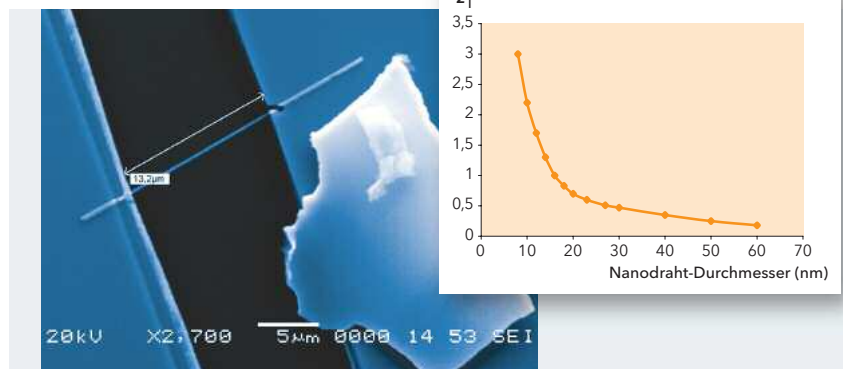


Abbildung 45: PbTe/PbEuTe-Multi-Quantum-Well-Strukturen hoher thermischer Effektivität. Herstellung durch Molekularstrahlepitaxie, FhG-IPM Freiburg.

Gewünschte Materialeigenschaften bei der Thermoelektrik sind eine geringe Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit einer guten elektrischen Leitfähigkeit. Diese thermoelektrische Effizienz drückt man durch die dimensionslose Kennzahl  $z_T$  (Figure of Merit) aus. Zur Steigerung der Effizienz muss das Verhältnis der elektrischen zur thermischen Leitfähigkeit vergrößert werden. Klassische Materialien sind hier bereits weit ausgereizt und erreichen in etwa  $z_T = 1$ .



Nanoskalige thermoelektrische Materialien zeigen in festkörperphysikalischen Berechnungen eine wesentliche Verbesserung. Experimente mit Multi-Quantenfilm-Strukturen (Multi-Quantum-Well; MQW) bestätigen dies mit  $z_T > 2$ , Abbildung 45. Noch bessere Ergebnisse lassen Nanodrähte erwarten. Der Ladungs- und Wärmetransport findet hier quasi eindimensional statt. Abbildung 46 zeigt die berechneten Werte von  $z_T$  für Bismuth-Nanodrähte als Funktion des Drahtdurchmessers.

Die Mikro-Nano-Integration eröffnet den Weg zu wesentlich sensitiveren thermoelektrischen Sensoren. Die Broschüre „NanoEnergie“ in der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech beschreibt den Einsatz dieser Technik für die Energiegewinnung.

Abbildung 46: Berechnete Thermoelektrische Effektivität  $z_T$  für Bi-Nanodrähte (nach L. Yu-Ming et al., Appl. Phys. Lett. 81 (2002), 2403) und Bismuth-Nanodraht (Herstellung durch GSI Darmstadt, Abteilung Materialforschung) mit elektrischer Kontaktierung zur Messung der thermoelektrischen Eigenschaften (IMtech).

## Thermosäulen

Die Hintereinanderschaltung mehrerer Thermoelemente ergibt eine Thermosäule (engl.: thermopile). Thermosäulen arbeiten bei Raumtemperatur und bestimmen die Temperaturerhöhung durch absorbierte Infrarotstrahlung. Sie verwenden dazu eine Serie von etwa 80 Thermoelementen, deren Thermospannungen sich addieren, Abbildung 47.

Die Voraussetzung für die Fertigung von empfindlichen und kostengünstigen Thermosäulen ist die Nutzung der Silizium-Mikromechanik. Dabei müssen die Thermoelemente und die Membran darunter sehr dünn sein und eine niedrige Wärmekapazität aufweisen, damit geringste Temperaturerhöhungen bestimmt werden können. Die Thermoelemente bestehen aus mikroskaligen Polysilizium-Schichten. Sie sind auf spannungsarmen Silizium-Oxinitrid-Membranen strukturiert. Elektronische Schaltungen im Chiprand erlauben die integrierte Verstärkung und Temperaturkompensation. So sind die Thermosäulen in den letzten Jahren kontinuierlich kleiner geworden, wobei das Gehäuse mit dem IR-durchlässigen Fenster einen großen Teil des Volumens einnimmt, Abbildungen 47 und 48.

Die weitere Miniaturisierung erlaubt die Kombination von Sensorelementen zu Multisensoren. Lineare und quadratische Sensorarrays verbessern die IR-Gasanalyse und ermitteln Wärmeverteilungen. Das Thermosäulen-Array von Heimann Sensor in Eltville in Abbildung 49 besteht aus 256 kleinen IR-Empfän-

gern und Elektronik im Chiprand. Hier sind integriert: rauscharme Vorverstärker, Tiefpassfilter, Multiplexer, Spannungs- und Temperaturreferenzen und A/D-Wandler für Mixed-Signal-Ausgabe. Hier gibt es weitere Entwicklungen zur Miniaturisierung, die in die Nanotechnologie leiten.

Wesentliche Anwendungsfelder von Infrarotsensoren liegen in industriellen Geräten zur berührungslosen Temperaturmessung, [Schieferdecker1998]. Sie kommen beispielsweise zum Einsatz in der Prozessüberwachung bei der Lacktrocknung, in Extrudiervorgängen und bei der Glas- und Keramik-Herstellung. Damit kann ohne Kontakt auch an kleinen, dünnen Körpern gemessen werden. Sie erlauben auch auf größere Entfernungen an bewegten, rotierenden oder schnell bewegten Körpern Temperaturen zu messen. Ein weiteres größeres Einsatzfeld hat sich in der medizinischen Temperaturmessung, etwa in der kontaktlosen Messung als Ohrthermometer ergeben. Dort erfasst man aus definierten Entfernungen die Temperatur des Trommelfells im Ohr.

Durch die Messung der räumlichen Temperaturverteilung können Qualitätsparameter erfasst werden, etwa die Qualität der Wärmeisolierung von Bauten. Die Temperaturverteilung auf der menschlichen Haut eröffnet die Diagnose von Durchblutungsstörungen, Hautreizungen oder allergischen Reaktionen. Weitere Anwendungen von Infrarotsensoren liegen in der Sicherheitstechnik, etwa zum Überwachen von Räumen oder Eingängen im vorbeugenden Brandschutz.

Bei Haushaltsgeräten werden Heiz- und Garprozesse durch Thermosäulen gesteuert, zum Beispiel in Toastern, Mikrowellengeräten, Herden, Backöfen oder Kochmulden. Auch in Haartrocknern findet man sie, sowie zur Steuerung von Dunstabzugshauben oder im Überhitzungs- und Brandschutz.

Abbildung 47: Schematischer Thermosäulen-Aufbau (links) und Sensor-Chip (rechts, Quelle: Heimann Sensor GmbH), mit

- Absorberschicht im Zentrum,
- Thermoelementen zwischen „heißem“ Zentralbereich und „kaltem“ Rand,
- Silizium-Chip mit dünn geätzter Membran im Zentralbereich

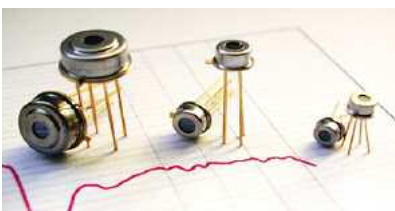
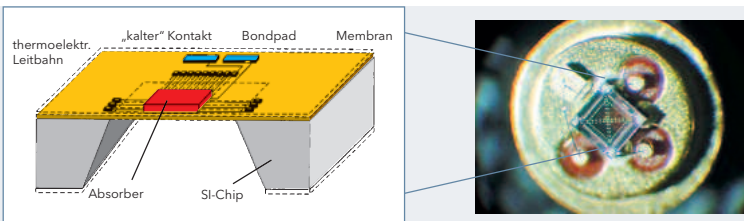


Abbildung 48: Miniaturisierungs-Entwicklung von Thermosäulen-Detektoren. (Quelle: Heimann Sensor GmbH)

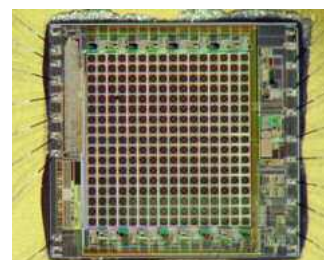


Abbildung 49: Neue Thermosäulen-Array-Sensoren: Matrix zur Erfassung der Wärmeverteilung. (Quelle: Heimann Sensor GmbH)

## Thermische Durchflusssensoren

Thermische Luftmassensensoren sind Strömungssensoren, die auch als thermisches Anemometer oder Hitzdrahtsensor bezeichnet werden. Mit ihnen kann man die Richtung und die bewegten Volumina von Gasen und z.T. von Flüssigkeiten bestimmen. Diese Sensortypen kamen etwa in den 1980er Jahren als größere Hitzdraht-Strömungssensoren auf den Markt. In den 1990er Jahren wurden sie in Dickschichttechnik auf Keramik realisiert. Ab etwa 1995 bestimmen die miniaturisierten Luftmassensensoren aus der **Silizium-Mikromechanik** die **Massenanwendungen**, Abbildung 50. Durch Integration von Heizelement, Temperatursensor, Verstärker und A/D-Wandler auf einem Chip kombinieren sie

- einen großen Messbereich
- ein gutes dynamisches Verhalten
- eine niedrige elektrische Leistungsaufnahme
- niedrige Kosten bei Massenfertigung.

Aktuelle Ansätze setzen Nanodrähte ein, um die technischen Leistungsdaten von Luftmassensensoren weiter zu verbessern, Abbildung 51.

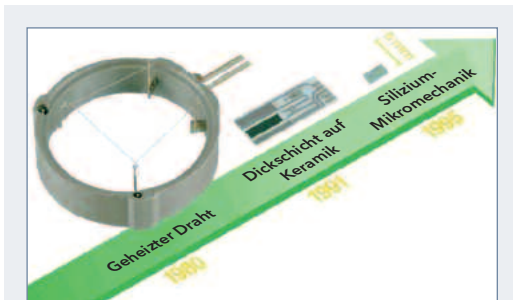


Abbildung 50:  
Techniktrend in der Entwicklung thermischer Luftmassensensoren. 1980-1995: diskrete Fertigungstechnik, Dickschichttechnik auf Keramik, Dünnschichttechnik auf Silizium. (Quelle: Robert Bosch GmbH)

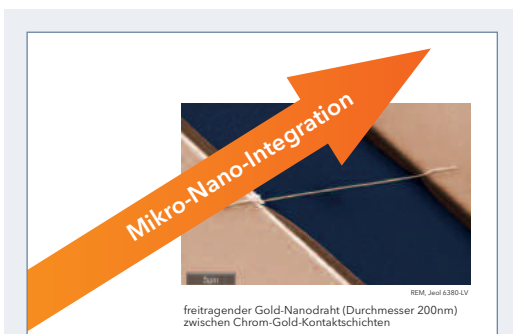
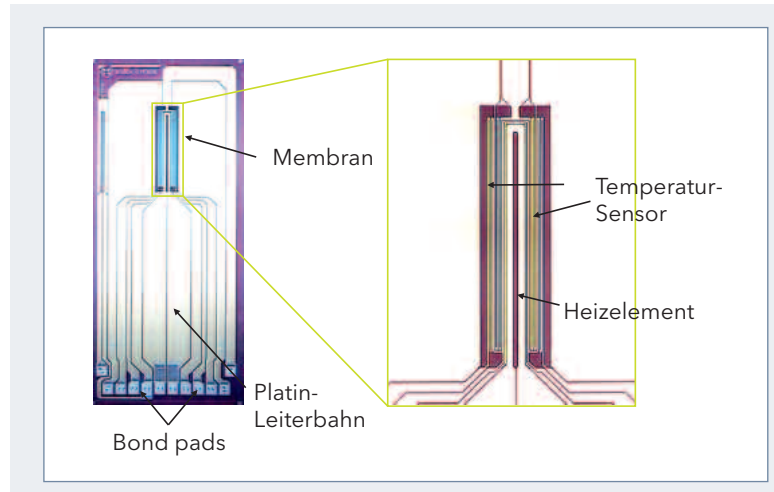


Abbildung 51:  
Prognose der weiteren Entwicklung aus dem Projekt INANOMIK. (Quelle: IMtech an der Fachhochschule Wiesbaden)



Ein typischer Silizium-Mikromechanik-Luftmassensensor besteht aus einer dünnen Siliziumoxid- oder Siliziumnitrid-Membran. Darauf sind Temperatursensoren und dünne metallische Heizelemente angebracht, Abbildung 52. Der Messeffekt beruht auf dem Transfer der Wärme vom Heizer über das umgebende Gas zu den beiden Temperatursensoren. Dieser Wärmetransfer erfolgt bei ruhendem Gas symmetrisch, bei bewegtem Gas wird die Temperaturverteilung unsymmetrisch. Der angeströmte Temperatursensor bleibt kälter, der andere wird wärmer. Daraus lässt sich die Gas-Strömungsgeschwindigkeit bzw. die Masse des bewegten Gases ermitteln.

Solche Sensoren werden genutzt zur Luftstrommassenkontrolle und zur Gas-Detektion in allen Arten von Automotoren wie z. B. in Diesel-, Benzin- oder in jüngster Zeit auch für Wasserstoffmotoren. Auch für die Heizungs- und Klimakontrolle im Automobil oder in Gebäuden setzt man solche Luftmassensensoren ein, mit typischen Flussraten von 1 bis 5 m/s.

Eine Massenstromregelung wird auch zur Regelung bei allen Arten von Verbrennungsprozessen benötigt

- zur Brenner-Steuerung
- zur Durchflussmessung in Prozessgasen
- zur Volumenstrom-Messung in Prüfständen
- zur Geschwindigkeitsmessung in Trocknungsanlagen und Sterilisationstunneln.

Zu den medizinischen Anwendungen gehören etwa die Messung des Lungenvolumens und die Steuerung von Anästhesiegeräten.

Abbildung 52:  
Thermischer Silizium-Mikromechanik-Luftmassensensor bestehend aus einem Heizelement und Temperatursensoren auf einem Siliziumchip. (Quelle: Robert Bosch GmbH)

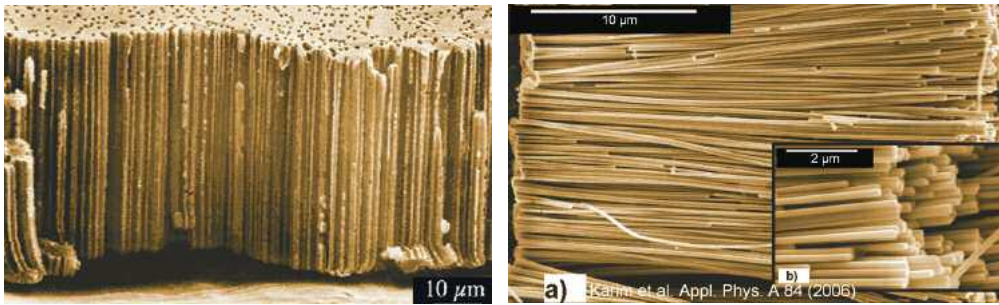


Abbildung 53:  
Geätzte Ionenspurmembran (links) und  
freistehende Nanodrähte (rechts).  
(Quelle: GSI Helmholtzzentrum für  
Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt)

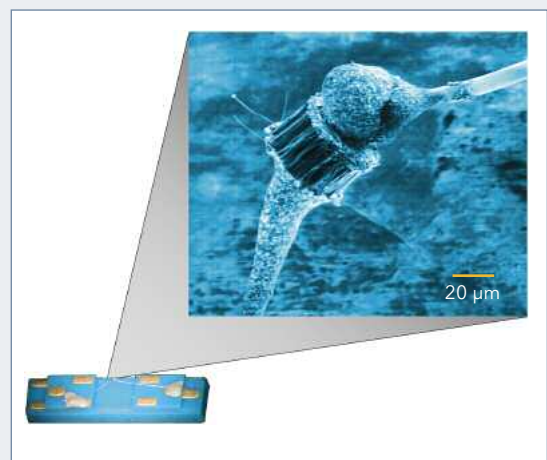
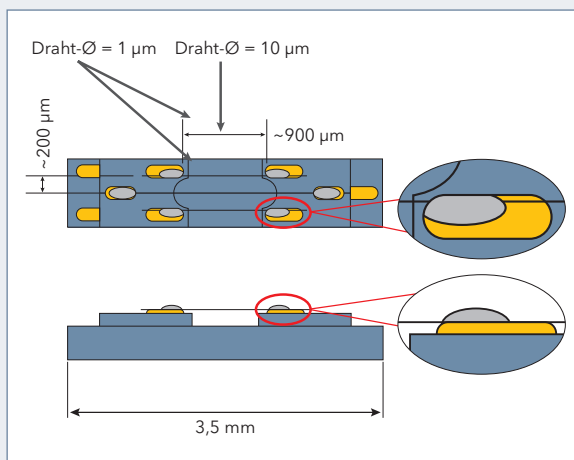
Ein technischer Trend geht hin zu Sensoren mit höheren Empfindlichkeiten und kleineren Zeitkonstanten in Kombination mit gesenkter Leistungsaufnahme. Dies ist verbunden mit einer möglichst geringen thermischen Masse des Heizelements, des Temperatursensors und der konstruktiven Membranen. Das von der Technischen Universität Darmstadt (Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak) geleitete Forschungsprojekt INANOMIK behandelt den Einsatz metallischer Nanodrähte für die Temperaturmessung ([www.emk.tu-darmstadt.de/inanomik](http://www.emk.tu-darmstadt.de/inanomik)). Geklärt werden müssen dafür die Themenkomplexe:

- Wie stellt man geeignete Nanodrähte her?
- Wie separiert, handhabt und montiert man diese Drähte?
- Wie kontaktiert man sie?
- Wie baut man sie in makroskopische Messsysteme ein?

Für die Herstellung von Nanodrähten gibt es mehrere Methoden, die in Kapitel 3.1.1 beschrieben sind. Eine Methode ist die Herstellung von metallischen Nanodrähten durch Ionenspurtechnik am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt. Dazu werden von der Abteilung Materialforschung (Prof. Dr. R. Neumann) in Kooperation mit der TU Darmstadt (Prof. Dr. W. Ensinger) Polymerfolien am UNILAC mit Schwerionen bestrahlt. Dabei entstehen latente Kernspuren mit Durchmessern im Bereich 5 nm–10 nm. Die Länge der Spur ist durch die Dicke der Polymerfolien bestimmt.

Durch nasschemisches Ätzen der Ionenspuren entstehen Nanokanäle mit Durchmessern zwischen 20 nm bis über 1000 nm. Galvanisches Füllen dieser Nanoporen ermöglicht metallische polykristalline oder auch einkristalline Nanodrähte. Das Aspektverhältnis der Drähte (Länge zu Durchmesser) kann sehr hohe Werte von bis zu 1000:1 erreichen.

Abbildung 54:  
Schema eines Mikro-  
Gasströmungs-  
sensors auf einem  
Keramiksубstrat  
(Quelle: arteos GmbH,  
Seligenstadt) und  
kontaktiertes Nano-  
drahtarray im Mikro-  
Gasströmungs-  
sensor-Substrat  
(Quelle: Greiner, F.;  
Korb, W.; Rauber, M.:  
Projekt INANOMIK;  
TU Darmstadt, GSI,  
arteos GmbH).



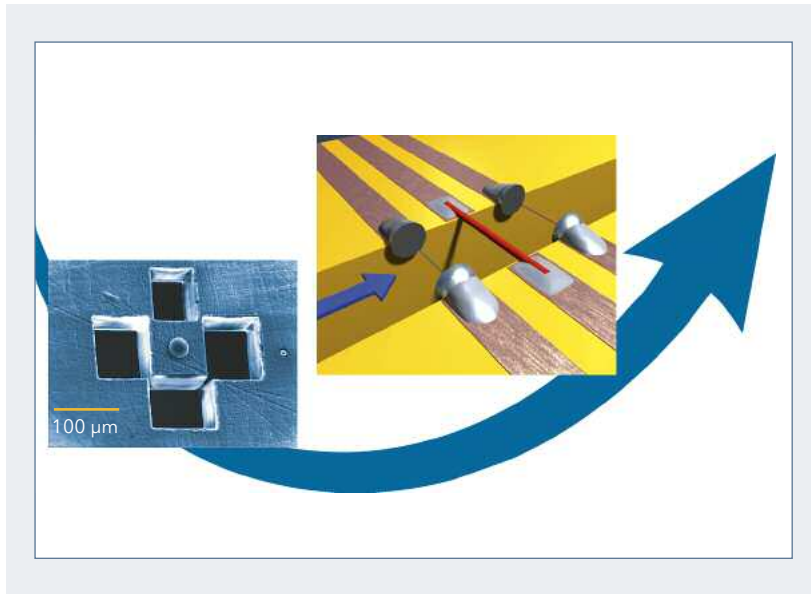


Abbildung 55:

Mikro-Nano-Integrierter Gasströmungssensor, wie er im Projekt INANOMIK auf Basis von Nanodrähten in Polymerblöcken entsteht, vgl. [Cornelius2008], [Ionescu2008].

**links:** Platin-Nanodraht mit Köpfen im Polymerblock. (Quelle: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt (Prof. Dr. R. Neumann) in Kooperation mit der TU Darmstadt (Fachgebiet Chemische Analytik, Prof. Dr. W. Ensinger und Institut für Elektromechanische Konstruktionen, Prof. Dr. H. F. Schlaak))

**rechts:** Zwei Nanodrähte (Durchmesser 100 nm) mit Köpfen als Temperatursensoren und ein Mikrodraht (Durchmesser 1 µm) als Heizelement. (Quelle: Technische Universität Darmstadt, Stöhr, I.; Greiner, F.; Schlaak, H. F)

**Angedeutete Funktion:** Der kalte Gasstrom (blau) fließt über den linken Temperatursensordraht (Durchmesser 100 nm), wird am Heizelementdraht (Durchmesser 1 µm, rot) erhitzt und überträgt Wärme auf den rechten Temperatursensordraht (Durchmesser 100 nm, violett).

Die Nanodrähte können in der Kunststoffmatrix vorliegen oder freigeätzt werden. Dann stehen sie parallel auf dem Substrat (Nanorasen). Oftmals werden sie auch vom Substrat abgelöst und in einer Flüssigkeit verteilt weiterverarbeitet. Verschiedene Konzepte zur Nanodraht-Montage im Mikrosystem sind bisher erarbeitet worden:

- Die Selbstausrichtung zur Nanodraht-Montage wurde am IMtech der Fachhochschule Wiesbaden in Rüsselsheim (Prof. Dr. habil. F. Völklein) erfolgreich erprobt.
- Dort sind auch Nanodrähte erfolgreich kontaktiert und elektrisch in Abhängigkeit der Temperatur vermessen worden.
- Nanodrahtarrays aus der Kooperation zwischen der GSI und der TU Darmstadt wurden bei der Firma arteos in Seligenstadt erfolgreich auf einem Mikro-Gasströmungssensor-Substrat kontaktiert, siehe Abbildung 54.
- Die Mikrostrukturierung des Nanodraht-Trägers mittels Laser ermöglicht die Integration einzelner Nanodrähte in die klassische Mikro-AVT, siehe Abbildung 55.
- Das In-situ-Wachstum der Drähte an der TU Darmstadt (Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak) eröffnet neue Möglichkeiten der wirtschaftlichen Mikro-Nano-Fabrikation.

## 4.1.5 Chemische, biologische und medizinische Sensoren

Chemische Sensoren bestimmen Art und Konzentration bestimmter Stoffe in Flüssigkeiten und Gasen. Die Industrie kombiniert die Sensoren in komplexen Analysesystemen. Für einige Aufgaben reichen einfache spezifische Einzelsensoren aus. Solche Einzelsensoren haben entweder eine gewisse Selektivität

für die zu messenden Größen, wie Sauerstoffkonzentrationen im Abgas oder Glukose im Blut. Sie können aber auch relativ unspezifisch auf oxidierende oder reduzierende Gaskomponenten reagieren, wie etwa Brandsensoren.

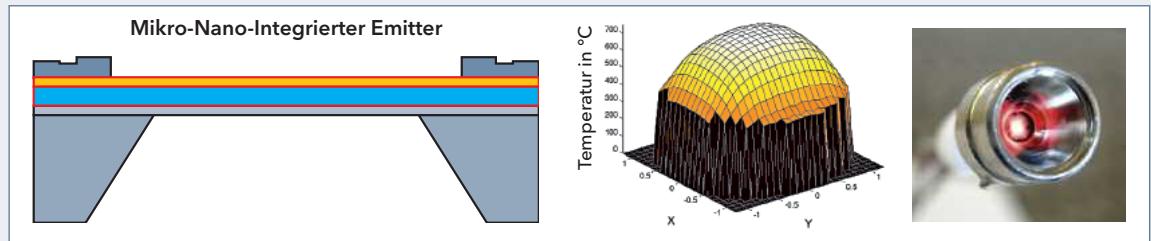


Abbildung 56:

Heizstrahler in Silizium-Mikromechanik mit mikro-nano-integriertem Emmitter (links, Quelle: INTEX, [www.intexworld.com](http://www.intexworld.com), CEO Dr. Terje Skotheim), Temperaturverteilung des Heizstrahlers (Mitte, Quelle: INTEX, [www.intexworld.com](http://www.intexworld.com), CEO Dr. Terje Skotheim) und Bündelung der Strahlung mit parabolischem Reflektor (rechts, Quelle: Laser Components).

### IR-Gassensoren

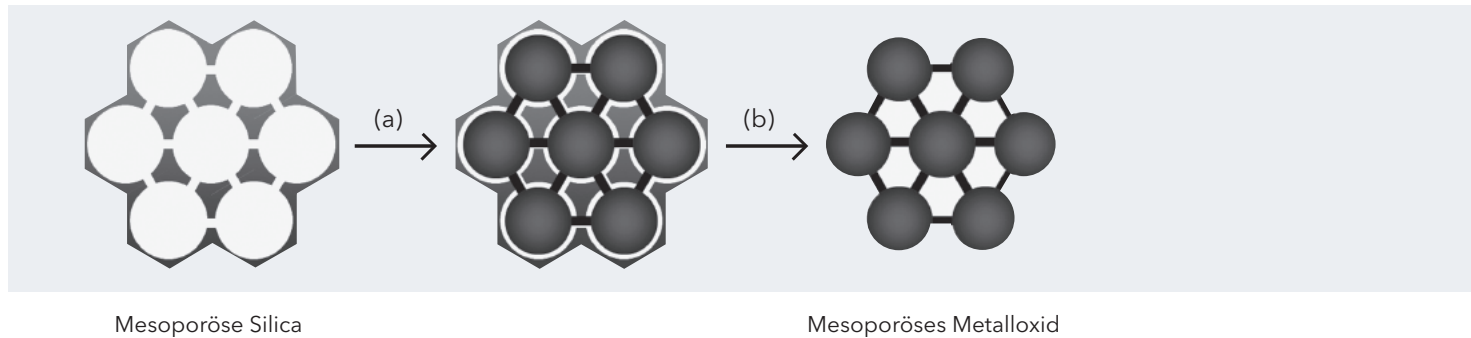
Ein großes Anwendungsfeld von Infrarot-Strahlung liegt in den Gasabsorptionsmessungen. Viele mehratomige Gasmoleküle absorbieren elektromagnetische Strahlung in spezifischen Wellenlängenbereichen des nahen IR. Dies gilt spezifisch für Wasserdampf, der in der Atmosphäre die Transmission im IR-Bereich stark beeinträchtigt. Auch Kohlendioxid kann mit der Gasabsorptionsmessung detektiert werden. Da die  $\text{CO}_2$ -Konzentration mit für die menschliche Gesundheit und das Wohlbefinden verantwortlich gemacht wird, findet die Technik in Klimasensoren Anwendung. Für solche Absorptionsmessungen werden Lichtquellen benötigt, die im gewünschten IR-Spektralbereich stark emittieren.

Nanoamorphes Carbon auf Mikro-Membranstrukturen erfüllt diese Anforderungen, [Kunsch2007], Abbildung 56. Diese Heizstrahler lassen sich in weiten Bereichen einstellen und sind stabil bis etwa  $750^\circ\text{C}$ . Die gleichmäßige Temperaturverteilung über der Emmiteroberfläche ermöglicht eine starke Bündelung der Strahlung. Die niedrige Wärmekapazität des mikro-nano-integrierten Strahlers erlaubt Pulse bis 100 Hz. Das erleichtert die Signalauswertung auf der Sensorseite.

Abbildung 57:

Bei der Strukturabformung im Nanometer-Maßstab (Nanocasting) werden die Poren einer Siliziumdioxid-Matrix mit einer geeigneten Ausgangsverbindung gefüllt, welche dann in das gewünschte Produkt umgewandelt werden, bevor die Matrix entfernt wird.

(Quelle: Justus-Liebig-Universität Gießen: Dr. Michael Tiemann, Institut für Anorganische und Analytische Chemie; Prof. Dr. C.-D. Kohl, Institut für Angewandte Physik; Prof. Dr. P. J. Klar und Prof. Dr. M. Eickhoff, 1. Physikalisches Institut)



### Metalloxid-Sensoren

Chemische Wechselwirkungen der Gasmoleküle mit halbleitenden Metalloxiden beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit des Oxids. Solche Metalloxid-Gassensoren oder Chemiresistoren werden auf einige 100 °C erhitzt. Dann sind die Widerstandsänderungen schnell genug für den praktischen Einsatz im Sensor. Heute gibt es viele kommerzielle Sensoren mit Zinnoxid sowie weiteren Oxiden und deren Mischungen. Auch dotierte oder mit Katalysatoren versetzte Systeme werden eingesetzt. Diese Gassensoren detektieren gefährliche Substanzen am Arbeitsplatz, in Chemieanlagen oder im Bergbau. Sie kontrollieren die Emission bei Abgasen und dienen der Brand- oder der Klimaüberwachung in öffentlichen Gebäuden oder im Kraftfahrzeug. Diese Technik ist sehr weit fortgeschritten.

Dennoch sind die detaillierten Wechselwirkungsprozesse zwischen Gasen und den Oxidmaterialien nur unvollständig verstanden. Sie sind noch nicht ausgereizt, und daher Gegenstand weiterer laufender Untersuchungen.

Der Einsatz hochgeordneter, nanoskaliger Basisstrukturen hat in den letzten Jahren neue Funktionsmaterialien hervorgebracht. Die Abformung nanoskaliger Basisstrukturen - Nanocasting - ermöglicht hochporöse Stoffe. Ihre spezifischen Oberflächen können mehrere hundert Quadratmeter pro Gramm betragen. An solchen mesoporösen Schichten für Gassensoren arbeiten Chemiker in Kooperation mit Physikern und Technikern an der Universität Gießen. Als Strukturmatrizen dienen poröse Siliziumdioxide, die mit organischen Templaten hergestellt werden. Die Poren dieser Matrizen können beispielsweise mit Lösungen von Metallsalzen gefüllt werden. Diese lassen sich dann in den Poren zu entsprechenden Metalloxiden thermisch umsetzen. Am Ende wird die Matrix weggeätzt, so dass das Produkt als Negativabdruck zurückbleibt, Abbildung 57.

Dieses Verfahren erzeugt ein extrem großes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis und eine sehr einheitliche Porosität. Es entstehen poröse Halbleitermaterialien mit Porendurchmessern zwischen 2 nm und 50 nm. Daraus resultiert eine hohe spezifische innere Oberfläche von bis zu 270 m<sup>2</sup>/g. Dabei ändert sich die elektronische Leitfähigkeit durch chemische Oberflächenreaktionen mit den jeweiligen Gasmolekülen. Auf diese Weise stehen höchstempfindliche Sensoren zur Verfügung, Abbildung 58. Es lassen sich schon geringe Gaskonzentrationen quantitativ messen.

Dies findet Anwendung etwa bei der Überwachung der Atemluft in Industrieanlagen, im Bergbau, im Automobil oder im Wohnbereich. Das giftige Gas Kohlenstoffmonoxid lässt sich mit einer Konzentration kleiner als ein ppm (parts per million) messen. Das ist deutlich unterhalb des maximal erlaubten Arbeitsplatzgrenzwerts von 30 ppm in Deutschland.

Durch zyklische Variation von Messspannungen und Temperatur der Sensoren werden charakteristische Signale für einzelne Gase erzielt. In bestimmten Fällen können Gas-Selektivitäten erreicht werden. Mit spezifischer Mustererkennung können Sensoren zwischen Zigarettenrauch und schwelendem Holz unterscheiden. Wesentliche Qualitätsmerkmale von Halbleiter-Gassensoren sind

- hohe Empfindlichkeiten
- hohe Langzeitstabilität
- kurze Ansprechzeiten
- geringe Querempfindlichkeiten auf Luftfeuchtigkeit oder andere Gase.

Sie lassen sich durch gezielte Variation der Porosität bei der chemischen Synthese noch weiter beeinflussen. Hierzu laufen entsprechende Entwicklungsarbeiten an der Universität Gießen.

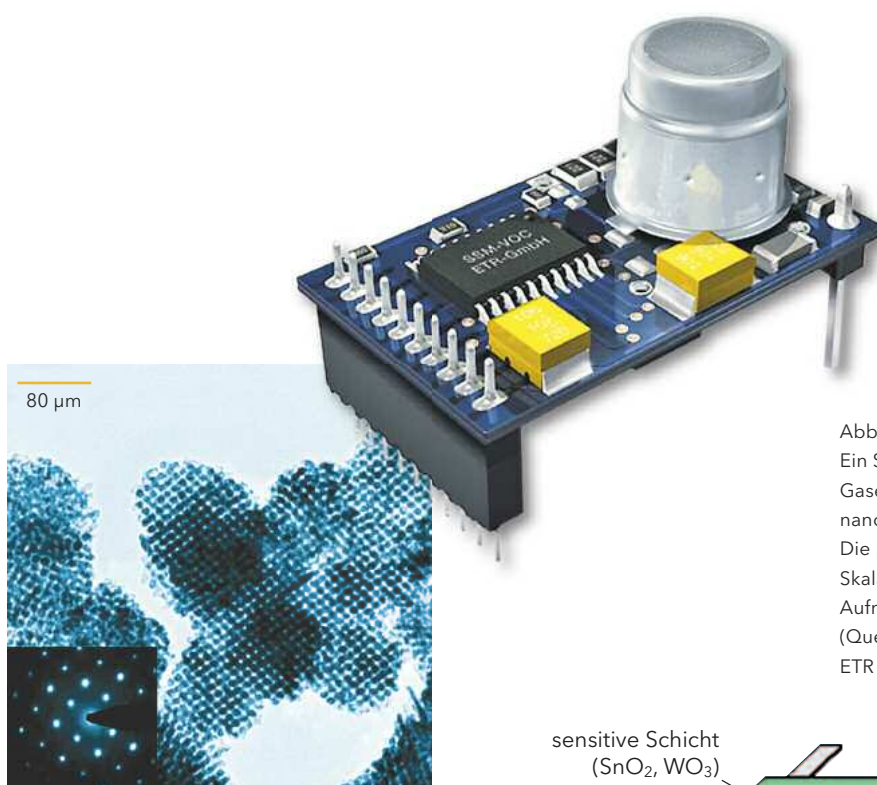
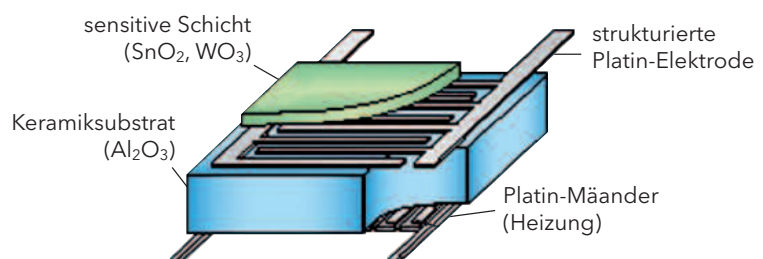


Abbildung 58:  
Ein Sensormodul (oben) zur Detektion von Gasen nutzt als sensitive Schicht (unten) ein nanoporöses Metalloxid. Die poröse Struktur auf der Nanometerskala ist in der elektronenmikroskopischen Aufnahme (links) zu erkennen. (Quelle: Justus-Liebig-Universität Gießen, ETR GmbH)



## Kohlenstoff-Nanoröhren CNT als chemische Sensoren

Das Forschungsprojekt MNI-CNTs an der TU Darmstadt (Prof. Dr. J. J. Schneider, Prof. Dr. D. Pavlidis) behandelt die Mikro-Nano-Integration hochgeordneter Kohlenstoff-Nanoröhren für chemische Sensoren. Dabei geht es um die Herstellung und Systemintegration von dreidimensional strukturierten Kohlenstoff-Nanoröhren. Es sollen MNI-Sensorarrays entstehen, [Schneider1] - [Schneider5].

Das neue Sensorkonzept sieht als zentrales Element eine flächige Schicht parallel ausgerichteter CNTs vor. Dabei liegen mehrere hundert Millionen parallel

ausgerichteter CNT-Einzelnöhren pro Quadratzentimeter vor. Dazu werden Nanotemplate aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hergestellt und darin CNT-Anordnungen erzeugt. Durch Lithographie- und Ätzverfahren werden diese mikrostrukturiert.

Die CNTs können auf unterschiedliche Weisen in ein mikrostrukturiertes Sensor-Bauteil integriert werden. Das Gas kann dann entweder senkrecht zu den CNTs fließen oder alternativ auch von oben durch die Röhren geleitet werden. Abbildung 59 stellt dieses Funktionsprinzip schematisch dar.

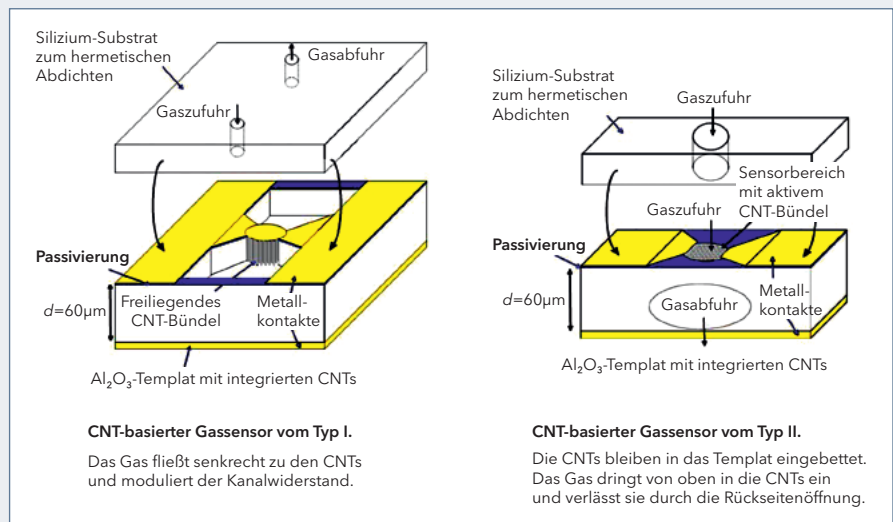


Der Einbau dieser hochgeordneten CNT-Bündel in Sensorstrukturen ist ebenfalls noch Untersuchungsgegenstand. In Abbildung 60 werden Möglichkeiten zur Integration der CNT-Struktur in ein makroskopisches Sensorbauteil dargestellt.

Ein wichtiger Punkt ist die elektrische Kontaktierung der CNTs im Bauteil. Eine Ätzung der CNTs um die Kontaktfläche ermöglicht einen einfacheren Gasfluss, Abbildung 61.

Diese grundlegenden Forschungsarbeiten zielen auf höchstempfindliche Gas- bzw. Moleküldetektion im ppb- (parts per billion) bzw. sub-ppb-Bereich ab.

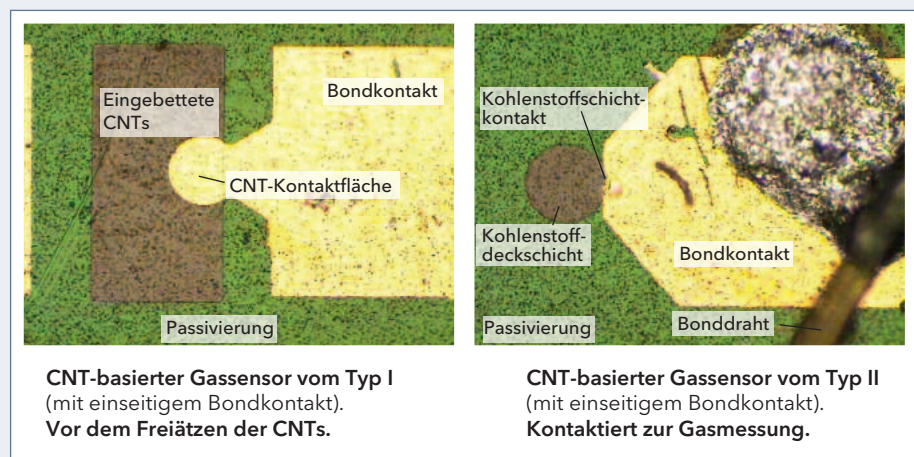
Abbildung 60:  
Typen von Gassensor-  
Anordnungen mit sensitiven  
geordneten CNT-Arrays in  
Mikrogehäusen. (Quelle:  
TU Darmstadt, Projekt MNI-  
CNTs, Prof. Dr. J. J. Schnei-  
der, Prof. Dr. D. Pavlidis)



Die Funktionsweise derartiger Sensorbauelemente konnte anhand von Gasmessungen erfolgreich bestätigt werden. Derzeit werden die Bauteile auf

ihre Sensoreigenschaften für unterschiedliche Gase und Gasmischungen untersucht.

Abbildung 61:  
Mikro-Aufnahmen von  
CNT-basierten Gassensoren  
vom Typ I und II. (Quelle: TU  
Darmstadt, Projekt MNI-CNTs,  
Prof. Dr. J. J. Schneider, Prof.  
Dr. D. Pavlidis)



### Biegebalken- und Oberflächenplasmonenresonanz-Sensoren (Cantilever- und SPR-Sensoren)

In diese Mikrosensoren sind biologisch bzw. chemisch aktive Schichten integriert. Ihre Reaktion mit Probenflüssigkeiten oder -gasen kann das Mikrosystem auswerten. Führt die Reaktion etwa zum Massebelag der Schicht, können Mikro-Biegebalken in Schwingungen versetzt und deren Resonanzfrequenzänderung gemessen werden. Ändert die Reaktion etwa die optischen Eigenschaften der aktiven Schicht, lassen sich diese mit einem Laserstrahl auswerten.

Bei der Integration der aktiven Schichten sowie bei der Auswertung der Reaktion spielen Nanopartikel ebenso wie Nanoschichten eine entscheidende Rolle. Mit dieser komplexen Materie befassen sich neben Forschungseinrichtungen wie das Max-Planck-Institut für Polymerforschung (MPI) in Mainz auch Firmen wie Concentris in Basel oder Siemens. Eine ausführliche Beschreibung der Aktivitäten ist in der Broschüre „Nanomedizin“ (Band 2 dieser Schriftenreihe) zu finden.

## 4.1.6 Optische Sensoren

Trotz allen Fortschritts haben biologische Systeme den technischen oft noch etwas voraus. Hightech-Kameras können zwar mit ihrer hohen Auflösung oft Details sehen, die das menschliche Auge nicht wahrnimmt. Doch in einigen optischen Eigenschaften reichen sie nicht an das Sinnesorgan heran: beim dreidimensionalen Sehen zum Beispiel, bei der Unterscheidung von Vordergrund und Hintergrund oder beim Erkennen von Farben auch bei schlechter Beleuchtung.

Das Forschungsprojekt NAMIROS (gefördert durch das BMBF) zielt auf die Realisierung einer neuen Generation intelligenter optischer Mikrosensoren und Abbildungssysteme ab, [www.opttech.tu-berlin.de/namiros](http://www.opttech.tu-berlin.de/namiros). Sie sollen aus der Physiologie des Sehens bekannte Funktionalitäten des menschlichen Auges für die optische Informationsverarbeitung nutzbar machen, vgl. Abbildung 62. Mit einem System aus verschiedenen raumgitterartigen optischen Schichten für die diffraktive Bildvorverarbeitung wird eine Funktion in der Sensoroptik erreichbar, die zu funktionalen Leistungen vergleichbar mit dem menschlichen Sehvorgang führt. Die Methode wird optisch als 4-D-RGB-Sensorik beschrieben, da das Raumgittersystem die 3-D-Objektinformation um eine zusätzliche, im Spektrum des Lichts enthaltene, Dimension erweitert.

Um ein solches optisch-sensorisches Abbildungssystem künstlich zu schaffen, müssen Nano- und Mikro-Raumgitterstrukturen, mit Periodizitäten von wenigen Nanometern bis zu einigen hundert Mikrometern, hergestellt werden. Die Schwierigkeit liegt dabei in der Entwicklung geeigneter Materialien, die sich durch Licht fein strukturieren und präzise zu einem Raumgittersystem zusammenfügen lassen. Insbesondere die geforderte hohe optische Transparenz und der kontrollierbare Beugungs- kontrast der Raumgitterkomponenten werden durch den Einsatz maßgeschneiderter polymerbasierter Nanokomposite unterstützt.

Eine weitere Herausforderung besteht in der Entwicklung und Optimierung der Verfahren zur Erzeugung der periodischen diffraktiven Strukturen. Zum Einsatz kommen unter anderem die Selbstorganisation von Nanopartikeln und die holographische Belichtung von photosensitiven Materialien, bei der Form und Skalierung der erzeugten Strukturen wesentlich durch die Geometrie der Schreibanordnung vorgegeben werden können. Eine weitere interessante Möglichkeit zur Fertigung der Strukturen stellt das Nanolmprint-Verfahren dar (siehe Kasten, Seite 56).

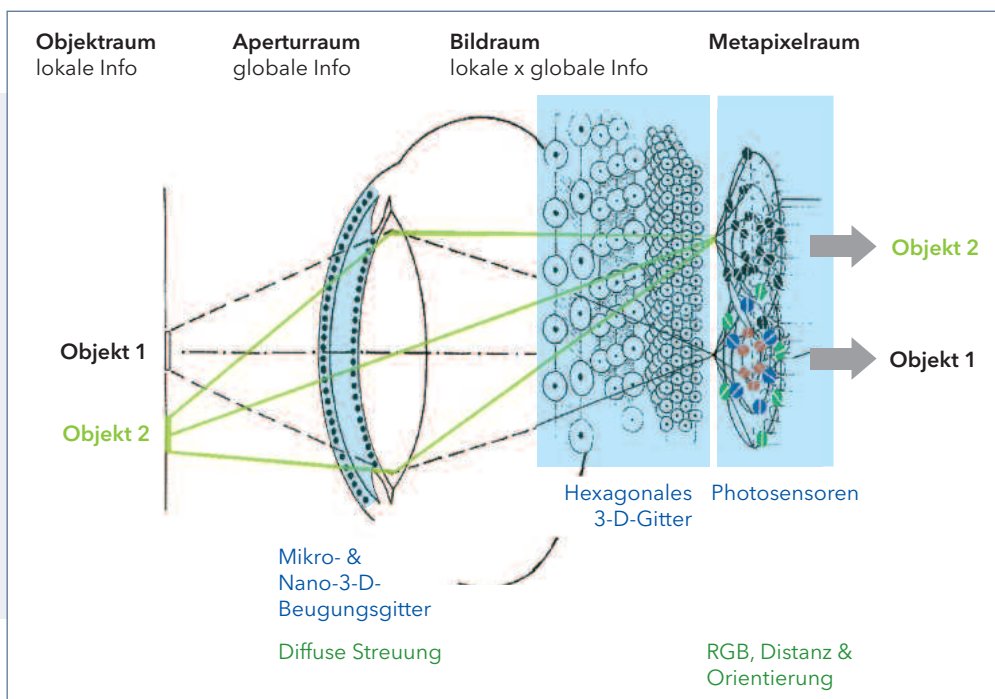


Abbildung 62: Funktionsprinzip des Auges mit natürlichen Fasern und zellulären Gittern, die als dreidimensionale Beugungsgitter fungieren. (Quelle: CORRSYS 3D Sensors AG)

Die Entwicklung soll schließlich Anwendung finden in verschiedenen Bereichen der Industrie wie der Verkehrstechnik bei CORRSYS 3D Sensors AG in Wetzlar oder der digitalen Bildverarbeitung bei Vitronic in Wiesbaden. Typische Einsatzgebiete für objektklassifizierende optische Filter wären z.B. intelligente Bewegungsmelder, die zwischen typischen Objekten (Tiere, Menschen, Autos) unter-

scheiden können; intelligente Ampeln, automatisch fahrende Fahrzeuge oder Sicherheits- und Überwachungssysteme, die an Gebäuden, an Fahrzeugen sowie an industriellen Robotern durch die berührungslose Erkennung von Signalklassen in Echtzeit Entscheidungen treffen. Der Einsatz von Nanotechnologie in mikrooptischen Systemen außerhalb der Sensorik ist im Kapitel 4.4 ausführlich beschrieben.

## NanoImprint

NanoImprint ist ein Abformungsverfahren, bei dem Nanostrukturen von einem Stempel (Negativ) in aushärtbare Materialien (Positiv) abgeformt werden. Dabei ist nicht nur eine Abformung einer großen Zahl von Nanostruktur-Systemen möglich, sondern auch die Herstellung hochpräziser Nanostrukturen auf großen Flächen durch ein Step-and-Repeat oder ein Rolle-Verfahren.

NanoImprint ist nicht nur für funktionelle Oberflächen und für nano-optische Strukturen interessant, sondern steht auch auf der Roadmap zur zukünftigen Chipherstellung ab 2020. Damit charakterisiert diese spezielle Nanotechnologie neben ihrer außerordentlichen Anwendungsbreite auch ihre ausgeprägte Zukunftsperspektive und Nachhaltigkeit, vgl. Abbildung 63, [www.nanoimprint-hessen.de](http://www.nanoimprint-hessen.de).

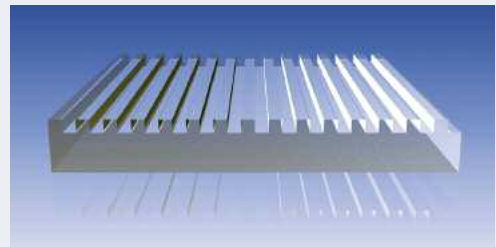
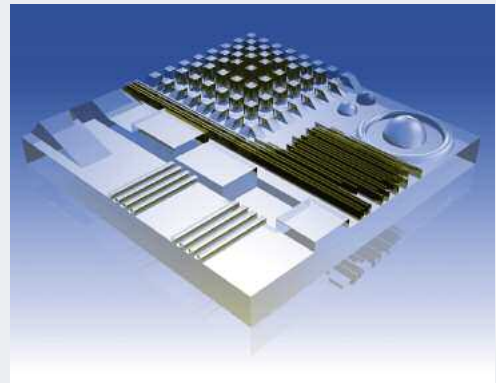


Abbildung 63:  
Höchstaflösende 3-D-Stempel (oben) erlauben die präzise Abformung deutlich komplexerer mikro- und nanoskaliger Strukturen als konventionelle Stempel (unten). (Quelle: Universität Kassel, Institut für Nanostrukturierungstechnologie und Analytik INA/ NanoImprint Konsortium Hessen)

## 4.1.7 Zusammenfassung Sensorik

Die Nutzung von Nanomaterialien und Nanotechnologie für die Mikro-Sensoren zeigt viel Potenzial. Die Mikro-Nano-Integration eröffnet viele Verbesserungsmöglichkeiten von bestehenden Bauelementen. Sie ermöglicht aber auch völlig neue Systeme zu realisieren. Eine Zusammenfassung zeigt Tabelle 11.

Sensoren für geometrische und mechanische Messgrößen	
Potentiometrische Sensoren zur Wegmessung	Verschleiß-Vermeidung, bzw. -Verringerung an potentiometrischen Sensoroberflächen
Drucksensoren	Anteil der CMOS-Prozesse erhöhen, Miniaturisierung
Sensoren für dynamische Messgrößen	
Beschleunigungssensoren	Miniaturisierung
Drehratensensoren	Miniaturisierung
Magnetische Sensoren	
Magnetoresistive Sensoren	Erhöhung der Empfindlichkeit und der maximalen Arbeitstemperatur
Thermische Sensoren	
Thermoelemente	Thermoelemente mit Nanodrähten, für erhöhte Empfindlichkeit und geringere Zeitkonstanten
Thermosäulen	Miniaturisierung, Sensor-Arrays
Thermische Durchflusssensoren	Miniaturisierung, Erhöhung der Empfindlichkeit und Schnelligkeit
Chemische, biologische und medizinische Sensoren	
Nanoporöse Sensorschichten	Erhöhte Stabilität, Empfindlichkeit, Selektivität, geringere elektrische Leistungsaufnahme
Nanodrähte als Mikroelektroden	Miniaturisierte Elektroden für biologische Untersuchungen, etwa an Zellen
Optische Sensoren	
Optische Bewegungsdetektion Optische Objekterkennung und -klassifizierung	Erweiterung um räumliche Information durch diffraktive Bildvorverarbeitung

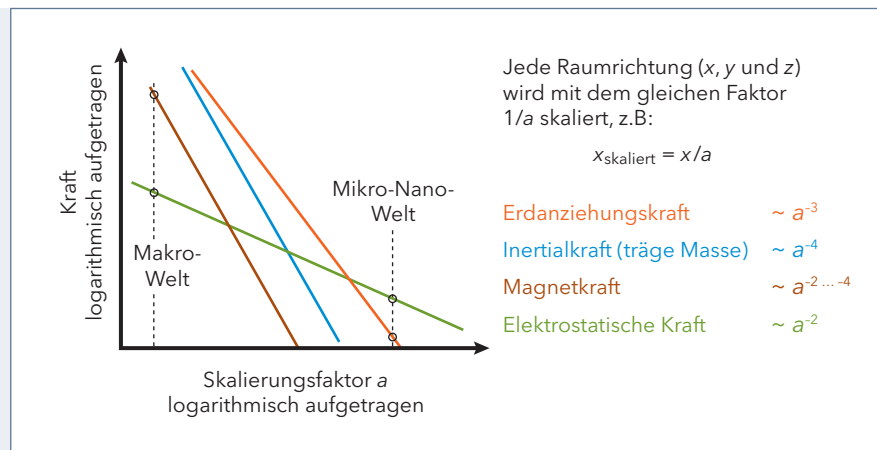
Tabelle 11: Beispiele für potenzielle Verbesserungen an Sensoren durch Mikro-Nano-Integration

## 4.2 Aktorik

Aktoren sind die Muskeln der Technik. Sie liefern Kräfte und setzen Dinge in Bewegung. Im täglichen Umfeld kennt man sie z. B. als Verbrennungsmotoren in Kraftfahrzeugen und als Elektromotoren in Haushaltsgeräten. In der Mikrowelt erzeugen die Aktoren zumeist keine Drehbewegung, sondern eine lineare Bewegung und funktionieren elektrisch.

In der Makrowelt sind die Erdanziehungskraft und die Inertialkraft (träge Masse) bestimmend für die Aktorik. In der Mikro- und der Nanoaktorik sind die elektrostatische Kraft und die thermische Ausdehnungskraft viel bedeutender. Je kleiner die Dimensionen werden, desto größer wirken sich diese Effekte aus, vgl. Abbildung 64.

Abbildung 64:  
Kräfteverhältnisse bei der Systemverkleinerung.  
(Quelle: in Anlehnung an Prof. Dr. H. Hillmer: Templateherstellung für die Nanolithographie, Nanolmprint Workshop, Wetzlar, 2008)



### 4.2.1 CNT-Aktoren

Kohlenstoff-Nanoröhren (CNTs) sind auch für die Mikroaktuatorik interessant. Sie haben herausragende mechanische, elektrische und elektromechanische Eigenschaften. Der Elastizitätsmodul einer einzelnen, perfekten, einwandigen Nanoröhre (Single Walled Carbon Nano Tube, SWCNT) ist größer als der von Stahl. Er beträgt etwa eine Millionen Newton (N) pro Quadratmillimeter ( $1 \text{ MN/mm}^2$ ). Auch die Zugfestigkeit übersteigt mit mehr als 30 000 Newton pro Quadratmillimeter ( $> 30 \text{ kN/mm}^2$ ) die von Stahl bei weitem.

In einem flüssigen Elektrolyt bildet sich an der Außenfläche der SWCNT eine elektrolytische Doppelschicht. Sie besteht aus Elektronen der CNT und solvatisierten Ionen des Elektrolyts. Legt man an die CNT eine elektrische Spannung an, wird diese Doppelschicht umgeladen. Dadurch ändert sich die Länge der kovalenten Bindungen der CNT. Es resultiert eine Längendehnung der Nanoröhre von bis zu 1,2 Prozent, Abbildung 65.

Am Forschungszentrum Karlsruhe untersuchte die Gruppe von Dr. T. Koker die Realisierung eines SWCNT-Aktors. Für technisch nutzbare Längenänderungen und Kräfte werden viele metallische SWCNTs in Reihe und parallel geschaltet. Die einzelnen SWCNTs sollen dazu über Mikrostegestrukturen mechanisch und elektrisch miteinander verbunden werden. Für diese Mikro-Nano-Integration steht eine Prozesskette zur Verfügung, die Potenzial zur industriellen Nutzung hat. In Zukunft könnten Aktoren mit neunfach größerer Längenänderung und 230-fach geringerer Betriebsspannung als Piezoaktoren möglich sein, vgl. [Koker2006] und [Koker2008].

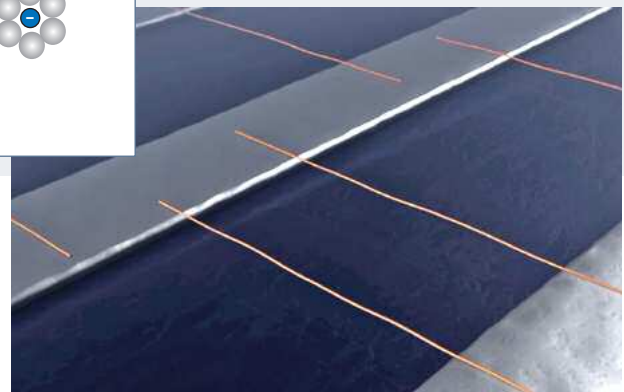
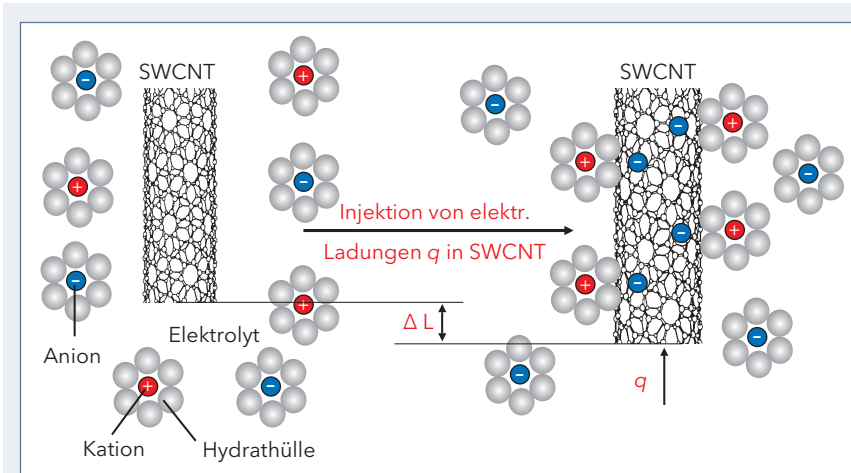


Abbildung 65:

**links:** Prinzip der Längenänderung von SWCNTs beim Anlegen einer Spannung im flüssigen Elektrolyten. (Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe, Dr. Koker)

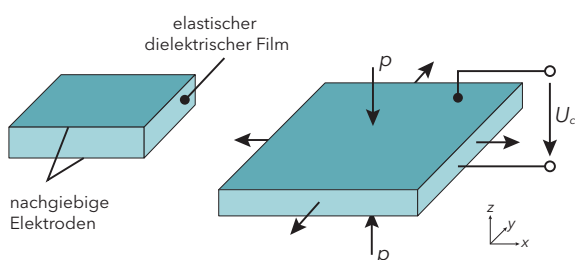
**rechts:** Visualisierung metallischer Single-Walled Carbon-Nano-Tubes (SWCNTs), die zwischen Mikroelektroden abgeschieden werden. (Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe, Dr. Koker)

## 4.2.2 Dielektrische Elastomeraktoren

Dielektrische Elastomeraktoren gehören zur Klasse der elektrostatischen Antriebe. Hierbei sind die sich anziehenden entgegengesetzt geladenen Elektroden durch ein elastisches Dielektrikum (Elastomer) getrennt. Wirkt der elektrostatische Druck  $p$  auf das Dielektrikum, so kommt es zu einer Stauchung des Materials mit gleichzeitiger Vergrößerung der Elektrodenfläche. Der elektrostatische Druck  $p$  ist gleich der mechanischen Spannung  $T$  und berechnet sich zu

$$p = T = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{U_c^2}{z^2} = \epsilon_0 \epsilon_r E^2$$

mit der elektrischen Feldkonstanten  $\epsilon_0$ , der Permittivitätszahl des Materials  $\epsilon_r$ , seiner Dicke  $z$  und der angelegten Spannung  $U_c$ .

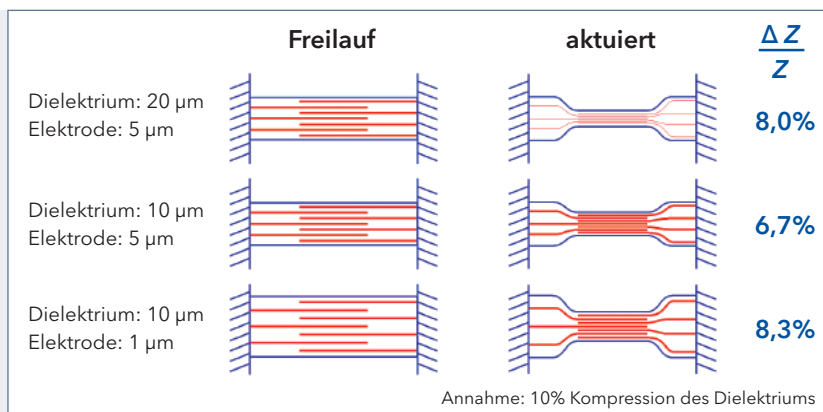


Um die elektrischen Spannungen zu begrenzen, muss die Schichtdicke des Dielektrikums im Mikrometerbereich liegen. Aus diesem Grund können trotz der großen Dehnungen (bis zu 20%) nur geringe absolute Auslenkungen erreicht werden. Um größere Bewegungen bzw. Kräfte zu erzeugen, sind spezielle Aktoranordnungen erforderlich. Ein Beispiel hierfür ist der Multilayeraktor, der aus vielen übereinander angeordneten Aktorschichten besteht, deren Elektroden abwechselnd parallel geschaltet sind. Die Fläche des Aktors bestimmt die erreichbare Kraft und die Schichtanzahl den absoluten Stellweg, so dass Aktorhübe im Millimeterbereich möglich sind.

Am Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK) der TU Darmstadt (Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak) wird seit fast zehn Jahren auf dem Gebiet der dielektrischen Elastomeraktoren gearbeitet. Zur Herstellung von Multilayerstapelaktoren mit über 100 Schichten ist eine automatisierte rechnergestützte Anlage entwickelt worden. Die Elastomerfilme werden durch Aufschleudern von flüssigem Silikon hergestellt, vgl. [Jungmann2004].

Abbildung 66: Prinzipbild der dielektrischen Elastomeraktoren. (Quelle: Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak)

Abbildung 67:  
Bedeutung der Elektroden-  
dicke für die Auslenkung  
eines Aktors. (Quelle:  
Technische Universität  
Darmstadt, Prof. Dr.-Ing.  
H. F. Schlaak)



Die dehnbaren Elektroden bestehen aktuell aus Graphitpulver. Für die bisherigen Schichtdicken der Elastomerfilme von etwa 25  $\mu\text{m}$  sind die Graphitpartikel mit einem Durchmesser von 2  $\mu\text{m}$  ausreichend klein. Da auch wesentlich dünnere Elastomerschichten von nur einigen Mikrometern Dicke herstellbar sind, zielt die aktuelle Forschung des Instituts EMK darauf, alternative Elektrodenmaterialien zu finden, vgl. [Matysek2008]. Wie Abbildung 67 zeigt, muss bei dünneren Elastomerschichten auch eine dünnere Elektrode verwendet werden, damit die relative Auslenkung konstant gehalten werden kann.

Durch die vergleichsweise hohe Leitfähigkeit und das extreme Aspektverhältnis sind CNT eine vielversprechende Materialklasse für die Elektroden. Aktuelle Arbeiten des Instituts beschäftigen sich damit, Elektroden auf CNT-Basis auf dem Dielektrikum aufzubringen.

Auf der Seite des dielektrischen Elastomers wird untersucht, welche Möglichkeiten Nanopartikel bieten, die Permittivität des Elastomers zu erhöhen. Gemäß der obigen Gleichung ist der entstehende elektrostatische Druck proportional zur Permittivität des Materials. Anorganische Materialien wie Titandioxid oder Bariumtitanat besitzen eine Permittivitätszahl  $\epsilon_r$  von bis zu 1 000. Nano-Materialsysteme mit Nanopartikeln im Elastomer-Komposit ermöglichen den Aktorhub bzw. die Aktorkraft deutlich zu verbessern, vgl. [Lotz2008].

Während sich die Strukturgrößen der Aktoren im Mikrometerbereich bewegen und für die Elektroden- und Füllstoffmaterialien die aktuellen Entwicklungen der Nanotechnologie genutzt werden, finden sich die Anwendungen dieser Aktoren in der „normalen“ Makro-Welt mit Abmessungen im Zentimeterbereich.

Die hohe Verformbarkeit der Elastomere kann genutzt werden, um dynamisch deformierende Oberflächen zu erzeugen. Mit einer sich bewegenden Oberfläche können in einem taktilen Display für den Menschen ertastbare Oberflächeninformationen dargestellt werden. Werden zwei Elastomeraktoren übereinander angeordnet, so können zwischen ihnen Kammern gebildet und wieder verschlossen werden. Die gezielte Ansteuerung einzelner Aktorelemente lässt die Kammern durch den Elastomerkörper wandern und bildet damit die Basis für eine peristaltische Pumpe, Abbildung 68.

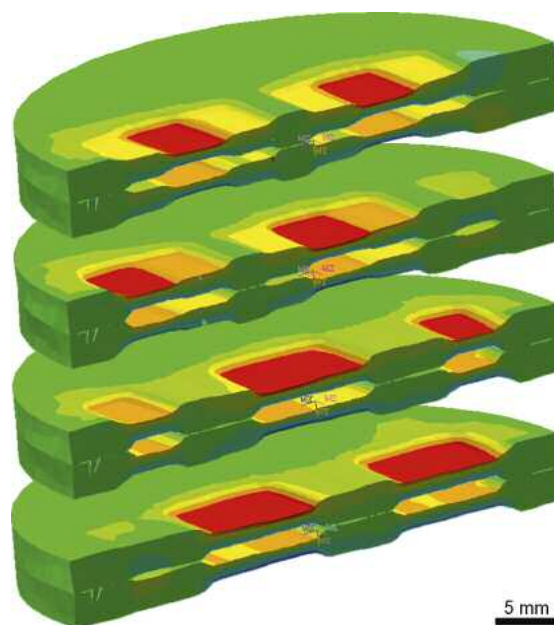


Abbildung 68:  
Visualisierung der Kammerbewegung innerhalb  
einer peristaltischen Pumpe aus dielektrischen Elas-  
tomeraktoren. (Quelle: Technische Universität Darm-  
stadt, Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak)

## 4.3 Elektronik

Seit Beginn der industriellen Halbleiterfertigung treibt die Elektronik die Integration und Miniaturisierung voran. Immer mehr Bauteile auf kleinem Bauraum führen zu leistungsfähigeren Komponenten.

Der Übergang von der Mikro- zur Nanometerskala verdeutlicht die Grenzen der weiteren Verkleinerung. Er erfordert einen Paradigmenwechsel in der Fertigungstechnik.

### 4.3.1 Von der Mikro- zur Nanoelektronik

Industrielle Mikro- und Nanoelektronik findet Einsatz in Prozessoren und Speicherelementen für Computer, Mobiltelefone, Digitalkameras oder Taschenrechner und an vielen weniger sichtbaren Orten wie z. B. in der Steuerelektronik im Fahrzeug. Zur Fertigung nutzt man verfeinerte Top-Down-Verfahren der Mikrotechnik. So konnte auch in den letzten Jahrzehnten das Mooresche Gesetz erfüllt werden: Die Komplexität integrierter Schaltkreise mit minimalen Komponentenkosten verdoppelt sich etwa alle zwei Jahre, vgl. Abbildung 12. Das heißt, dass der Volumenfaktor stetig sinkt: Pro integrierter Funktion ist immer weniger Bauvolumen nötig. Funktionsbestimmende Abmessungen liegen heute schon in ein bis zwei Raumrichtungen im Bereich kleiner als 100 nm. Die so strukturierten Materialien verhalten sich anders als das Vollmaterial (Bulkmaterial) oder dünne Schichten, die in der Mikroelektronik schon lange untersucht werden.

Die **industrielle Mikro- und Nanoelektronik** arbeitet auf der höchsten Integrationsebene vorwiegend planar bzw. vertikal: Die kleinsten Funktionselemente liegen in einer Ebene nebeneinander bzw. reichen in die Ebene hinein. Der Fokus der Weiterentwicklung liegt dabei auf der Fertigung von Nanostrukturen im Halbleitermaterial oder darauf.

Die **Mikro-Nano-Integration in der Mikrosystemtechnik** behandelt daneben auch die Integration in allen drei Raumrichtungen. Sie verwendet nanoskalige Basisstrukturen, die auch außerhalb des Mikrosystems gefertigt und in das Mikrosystem integriert werden.

Hier sollen drei Tendenzen beispielhaft in der Entwicklung von der Mikro- zur Nanoelektronik aufgezeigt werden. Sie zeigen Möglichkeiten für die MNI in der Mikrosystemtechnik und definieren Anforderungen an sie:

- Neue Effekte in neuen Materialien
- Neue Prozesse
- Anforderungen an neue Integrationstechniken.

#### Neue Effekte in neuen Materialien: Carbon-Nano-Tubes CNTs

Die elektrischen Eigenschaften von CNTs können in einem weiten Bereich von halbleitend bis leitend variieren. Daher spielen sie auch in der Nanoelektronik-Forschung eine große Rolle.

Eine wesentliche Herausforderung ist die Integration der CNTs in einen elektrischen Schaltkreis. Forscher verfolgen verschiedene Ansätze mit dem Potenzial zur industriellen Nutzung, etwa das Abscheiden aus dem Elektrolyten, vgl. Kapitel 3.2.2, oder die Vor-Ort-Synthese der CNTs zwischen Mikro-Elektroden, vgl. [www.etit.de](http://www.etit.de).

Die Verformung von CNT bietet die Chance, mehrere funktionale Bereiche eines miniaturisierten Transistors in eine Nanoröhre zu integrieren. An einem Knick steigt der elektrische Widerstand signifikant, sodass sich aus einem zweifach geknickten CNT ein Single-Electron-Transistor (SET) aufbauen lässt, Abbildung 69. Elektronen können beim Anlegen einer Gate-Spannung durch die geknickten Bereiche tunneln, sodass die Leitfähigkeit des CNT gesteuert werden kann. Vorteilhaft an der Verwendung von CNTs zum Aufbau von SETs ist neben der weiteren Miniaturisierung, dass ein Betrieb bei Raumtemperatur möglich wird.

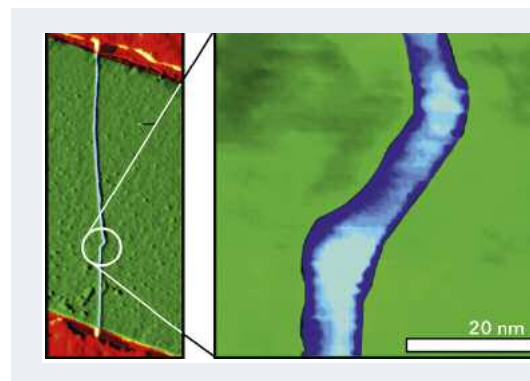


Abbildung 69: Doppel-Knick-Nanoröhre auf einer isolierten Back-Gate-Elektrode. (Quelle: Postma, H. W. Ch.; Teepe, T.; Yao, Z.; Grifoni, M.; Dekker, C.: Carbon Nanotube Single-Electron Transistors at Room Temperature; Science 6 July 2001: Vol. 293. no. 5527, pp. 76-79)

### Neue Prozesse:

#### Neue Strukturierungsverfahren

Eine wesentliche Herausforderung zur industriellen Herstellung von Nanostrukturen ist die Nanolithographie. Die klassische Lithographie arbeitet mit UV-Licht, dessen Wellenlängen im Bereich 100 bis 400 nm liegen. Dadurch sind die minimalen optischen Auflösungsgrenzen im zweistelligen Nanometerbereich gesetzt. Eine Alternative für die Zukunft der Miniaturisierung stellt die UV-Nano-Imprint-Lithographie dar. Für die MNI in der Mikrosystemtechnik bietet sie ein großes Potenzial in optischen Anwendungen. Daher ist sie ausführlich im Kapitel 4.1.6 beschrieben.

### Neue Prozesse:

#### Prozessoptimierung durch Nanotechnologie

Die Nanotechnologie bietet auch in den bestehenden Prozesstechnologien der Mikroelektronik Verbesserungspotenziale. Mit dem Airgap-Prozess von IBM lassen sich die dielektrischen Verluste in hochintegrierten mikro- und nanoelektronischen Schaltungen wirtschaftlich reduzieren.

Die meisten Isolatormaterialien zwischen den Leitern eines Mikrochips haben eine hohe Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  und einen beachtenswerten Verlustwinkel  $\tan \delta$ . Sie sorgen für dielektrische Verluste, die bei der Miniaturisierung und der Erhöhung der Taktfrequenz immer bedeutender werden. Der beste Isolator ist Vakuum, bei dem Dielektrizitätszahl und Verlustwinkel minimal sind. Ziel ist also das Entfernen des Isolatormaterials zwischen den Leitern ohne diese anzugreifen sowie das Versiegeln der entstandenen Spalte unter Vakuum.

Dazu bringt man einen Polymerfilm mit Nanoporen auf die Leiterstruktur mit dazwischen liegendem Isolatormaterial auf. Die Nanoporen ordnen sich durch Selbstorganisation regelmäßig im Film an. Der Prozess erlaubt das selektive Ätzen des darunter liegenden Isolators durch die Poren hindurch sowie das Verschließen der freigeätzten Bereiche unter Vakuum, vgl. Abbildung 70.

### Anforderungen an neue Integrationstechniken

Die Miniaturisierung der kleinsten Strukturen erhöht die Anforderungen an die Kontaktierung der Mikrochips und Bauelemente. Auch die Abfuhr der Abwärme wird für die Gehäusung immer bedeutender. In den nächsten acht Jahren wird die Mikro- und Nanoelektronik Bauelemente auf den Markt bringen mit

- bis zu 5000 Anschlüssen,
- einem Anschlussraster von 20  $\mu\text{m}$  und
- einer Verlustleistung von 150 W/Chip.

Die Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik steht also vor der Herausforderung der Nanoelektronik-gerechten AVT, vgl. [Wolter2006].

Für die Gesamtleistungsfähigkeit elektronischer Produkte spielt neben der Funktionsdichte auf dem Chip die Integrationsumgebung eine entscheidende Rolle. Durch die Erhöhung der Volumenintegration kann die AVT den Anforderungen der Nanoelektronik gerecht werden. Dafür sind Lösungen auf lateralen und räumlichen Schaltungsträgern mit angepassten Verfahren und Ausrüstungen nötig, vgl. [ZVEI2005]. Der Einsatz der Nanotechnologie in der AVT zeigt hier Lösungsansätze auf.

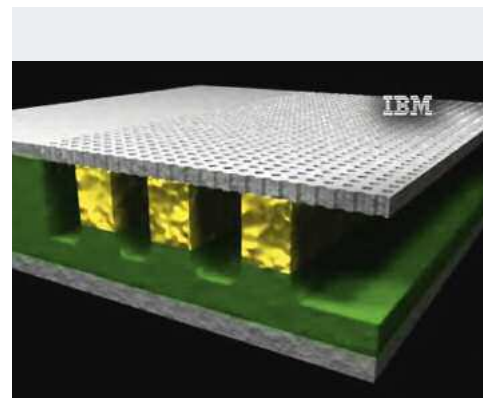


Abbildung 70:  
Simulationsansicht der Airgap-Technologie:  
Polymerfilm mit Nanoporen während des  
Isolator-Ätzvorgangs. (Quelle: Courtesy of  
IBM Research, T.J. Watson Research Center)

## 4.3.2 Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) in der Mikrosystemtechnik

In der Elektronik und Halbleitertechnik beinhaltet die AVT (Packaging) die Systemintegration von Bauelementen, mit den Schritten

- Positionieren
- Fügen (Bonden, Schweißen, Löten, Kleben)
- Gehäusen (Kapseln, Abdecken, Einbauen).

Grundsätzlich gilt dies auch für die Mikrosystemtechnik, siehe Abbildung 71 und Abbildung 72. Die AVT ist somit die Voraussetzung für den Aufbau mikrotechnischer Systeme und durch den anhaltenden Miniaturisierungstrend ein Kerngebiet der Mikro-Nano-Integration.

### Die AVT ist eine skalenübergreifende Technik

Die Aufbau- und Verbindungstechnik macht die Effekte auf der Nanometerskala für makroskopische Produkte verfügbar. Sie stellt die Verbindung zwischen den nanoskaligen Basisstrukturen und der Außenwelt her.

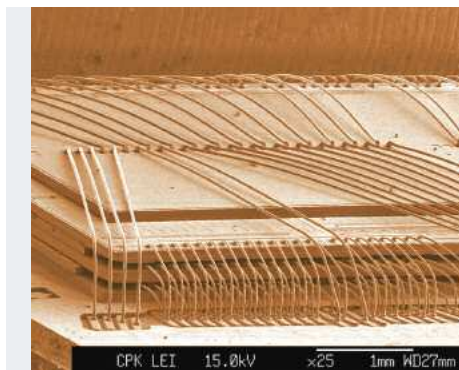


Abbildung 71: Verdrahtung eines Mikrochipstapels mit vier Mikrochips und zwei Abstandshaltern: Eine Herausforderung für die AVT in der Elektronik (Quelle: STATS ChipPAC)

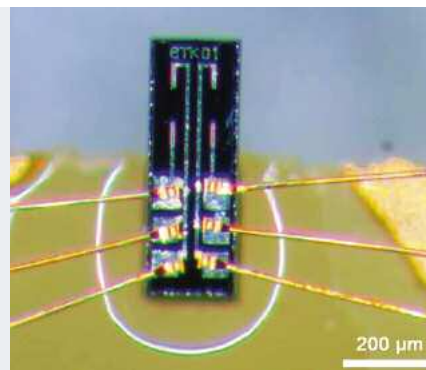
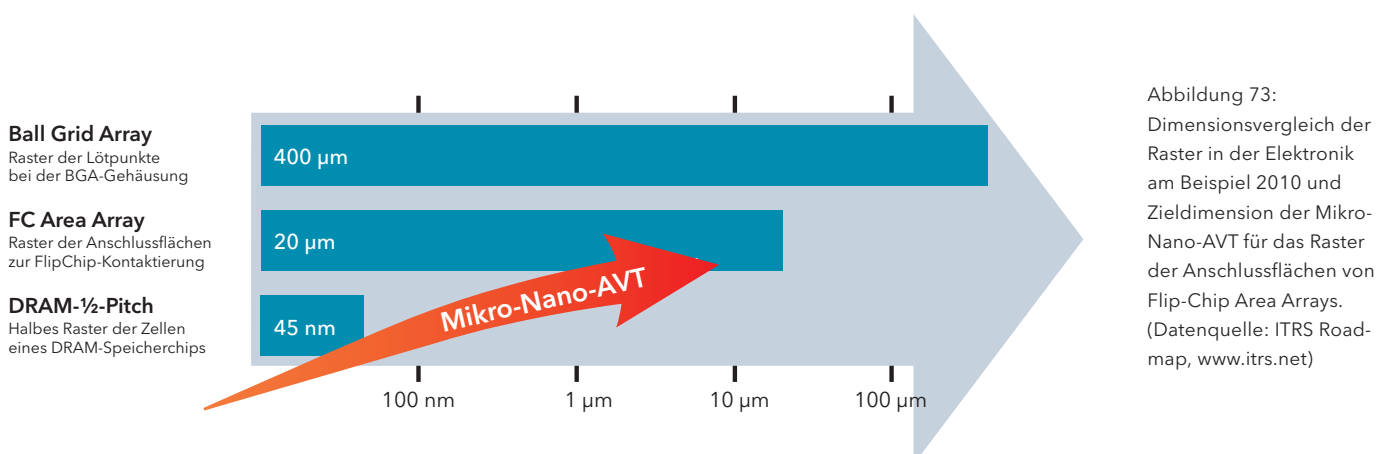


Abbildung 72: Kontaktierung eines miniaturisierten Kraftsensors für die Medizintechnik: Eine Herausforderung für die AVT in der Mikrosystemtechnik. (Quelle: TU Darmstadt, Institut EMK, Prof. Dr.-Ing. R. Werthschützky)

Abbildung 73 verdeutlicht den skalenübergreifenden Charakter der AVT an Beispielen aus der Elektronik. Sie zeigt aber auch die dringende Notwendigkeit für neue Lösungen zur Mikrochip-Kontaktierung mit verkleinerten Anschlussflächen, vgl. [Coskina 2007]. In diesen Abmessungsbereich fallen auch

dreidimensionale Kontaktierungsaufgaben in sensorischen Anwendungen. Hier knüpft ein Schwerpunkt der Mikro-Nano-AVT an: Materialien und Effekte aus der Nanometerskala sollen die minimal kontaktierbaren Anschlussflächen verkleinern.



## Ebenen der AVT

Die Dimensionen der AVT umschließen im Wesentlichen zwei Bereiche, vgl. Abbildung 74:

- Die **Chip-Ebene** umfasst die Montage und die Kontaktierung der Mikrochips sowie deren Gehäusung. Die MST zählt hierzu auch andere Bauelemente mit Abmessungen im Mikrometer- bis kleinen Millimeterbereich, z. B. Sensordrähte.
- Die **Komponenten-Ebene** behandelt die Integration der gehäusten oder gedruckter Bauteile in und auf Leiterplatten.

Die Mikro-Nano-Integration in der Mikrosystemtechnik ist stark mit dieser Entwicklung verknüpft. Die Randbedingungen und Schwerpunkte sind aber teilweise andere. Neben der Miniaturisierung der Bauteile sind zum Beispiel neue Funktionalitäten in Sensoranwendungen sowie die Integration neuer Materialien maßgebend.

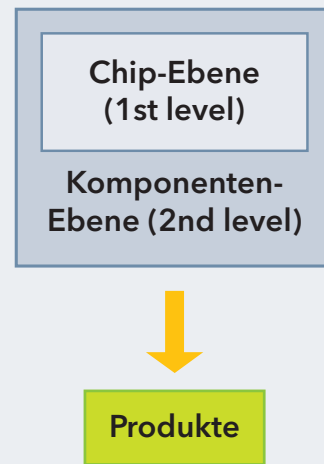


Abbildung 74:  
Ebenen der Baugruppen-AVT. Die industrielle Mikro- und Nanoelektronik benötigt eine Nanoelektronik-gerechte AVT.

## Trends in der AVT

Die wachsende Forderung der Kunden nach mehr Funktionalität bei gleichem oder kleinerem Bauraum führen zu drei generellen Entwicklungen, vgl. Abbildungen 76 und 77:

- 1 Hochminiaturisierte Komponenten und Gehäusungen
- 2 Hochintegrierte Ein-Chip-Gehäusungen führen zu sehr kleinen Abmessungen und sehr kleinen Anschlussrastern der Bauelemente (z. B. SoC = System on Chip, CSP = Chip Scale Package oder Chip Size Package).
- 3 Multi-Technologie-integrierende Gehäusungen reduzieren die Anzahl der Anschlüsse an einem Gehäuse oder Gehäuseverbund bzw. erlauben die Integration in die Leiterplatte (z. B. SiP = System in Package, PoP = Package on Package, PiP = Package in Package, SoP = System on Package).

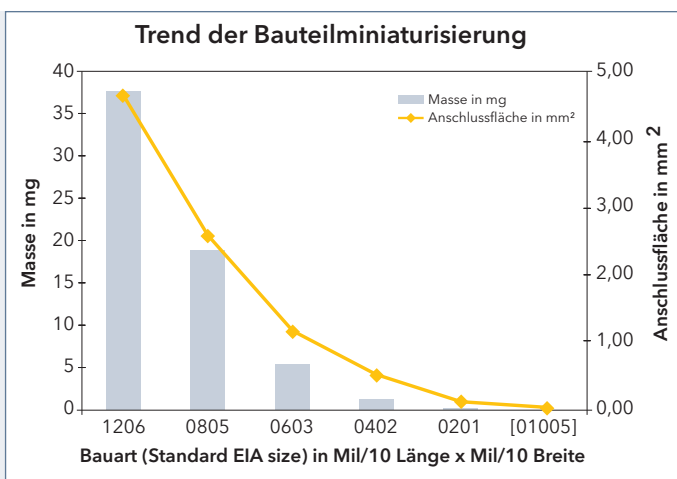


Abbildung 75:  
Die Bauteilgröße nimmt immer weiter ab.  
(Quelle: Fiedler, S.: *Mikro- und Nanotechnologien für Advanced Packaging*: SMT-Tutorial, Nürnberg, 2006)

Eine wesentliche aktuelle Entwicklungsrichtung stellt die Systemintegration im Gehäuse dar. Die Annäherung von Prozessen und Technologien aus der traditionellen Halbleitertechnik (Front-end) und der Baugruppenproduktion (Back-end) mündet in einer ganzheitlichen Betrachtung einer Funktionsbaugruppe. In einer zukünftigen Baugruppe sind also Funktionen horizontal und vertikal integriert.

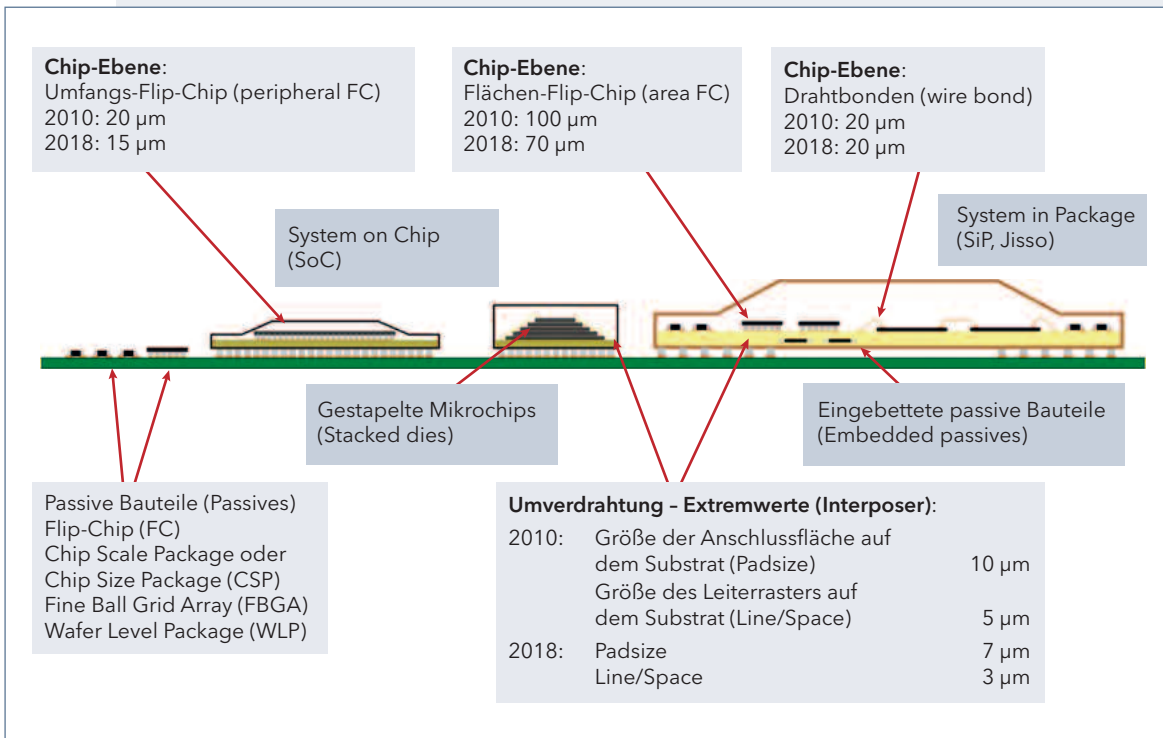


Abbildung 76: Mittel- und langfristige Entwicklungen in der Baugruppen-AVT auf Chip-Ebene, zusammengetragen aus mehreren Marktstudien und Roadmaps, vgl. [Wolter2006].

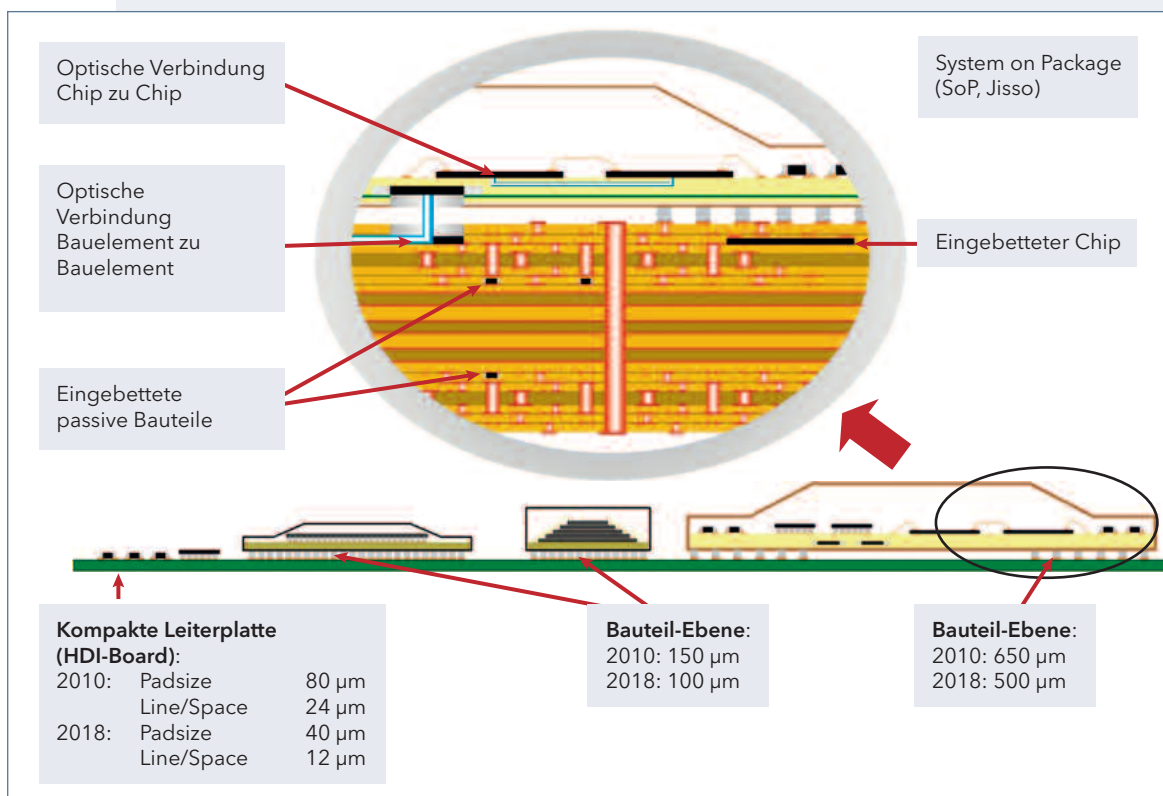


Abbildung 77: Mittel- und langfristige Entwicklungen in der Baugruppen-AVT auf Komponenten-Ebene, zusammengetragen aus mehreren Marktstudien und Roadmaps, vgl. [Wolter2006].

Folgende Punkte kennzeichnen den aktuellen Trend in der AVT:

#### Brücke zwischen Nanostrukturen und Anwendung

Die AVT bildet eine Brücke zwischen den Nanostrukturen und der Anwendung. Dabei entsteht der Kontakt über folgende Stufen:

- Nanometer-Raster auf dem Mikrochip
- 5 µm-Raster auf der Umverdrahtung
- 20-100 µm-Raster beim Drahtbonden / Flip-Chip
- 500 µm-Raster für oberflächenmontierte Bauteile.

#### Physikalisches Verständnis

AVT-Technologien erfordern immer mehr physikalisches Verständnis für:

- Materialphysik
- Entwärmung
- Hochfrequenzverhalten
- Thermomechanische Spannungen.

#### Multidisziplinäres Arbeitsgebiet

Packaging ist ein multidisziplinäres Arbeitsgebiet hinsichtlich:

- Materialwissenschaft
- Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Tests, Ausbeute, Einsatzbedingungen in Anwendungen der Ingenieurwissenschaften, Biologie, Chemie, Medizin, etc.
- Mechanischer, thermischer und elektrischer Simulation
- Konzept (Concept Engineering), Fertigung (Manufacturing Engineering) und Betriebswirtschaft (Business Planning).

#### Zusammenarbeit und Abstimmung

Lösungen erfordern intensive Zusammenarbeit und Abstimmung von

- Halbleitertechnik (Front-end)
- Baugruppenproduktion (Back-end)
- Chipentwurf (Chip-Design)
- Gehäusungsentwurf (Package-Design)
- Leiterplattenentwurf (Board-Design).

#### Packaging-Kosten

Die Kosten der AVT werden in Zukunft einen größeren Anteil am Endpreis des Produkts haben.

#### Packaging-Lösung

Die Wahl einer Packaging-Lösung muss schon frühzeitig im Produkt-Design berücksichtigt werden. Daraus folgen:

- Wachsende Bedeutung von Chip- / Package-Co-Design
- Herausforderungen neuer Materialien.

#### Ein Paradigmenwechsel ist nötig

Die bisherigen Entwicklungen in der AVT wurden wesentlich vom Miniaturisierungsdruck der Mikro- und Nanoelektronik vorangetrieben. Die Mikrosystemtechnik bediente sich dieser Werkzeuge und erweiterte ihren Einsatzbereich auf andere Umgebungsbedingungen und Materialien, vgl. Abbildungen 71 und 72.

Aus der Miniaturisierung mikroelektronischer Komponenten und Bauteile folgt die Forderung nach kontaktarmer bzw. druckarmer oder druckfreier **Positionierung** der Objekte. Einen Lösungsansatz stellen Platzierungswerkzeuge dar, die auf einseitig angreifenden pneumatischen Ansaugprozessen basieren. Die Größe der einsetzbaren Pipetten (Saugdüsen) - und somit die Größe der pneumatisch haltbaren Bauteile - ist jedoch begrenzt. Kleine Mikrochips (Chipllets) können wesentlich kleinere Kantenlängen als 200 µm erreichen. Außerdem sind sehr kleine Komponenten leicht durch elektrostatische Ladungen gefährdet. Man braucht also ggf. eine abschirmende Trägerflüssigkeit.

Das **Fügen** erreicht ebenfalls Grenzen. Lötunkte benötigen durch die Oberflächenspannung beim Aufschmelzen einen gewissen Mindestabstand. Er begrenzt die weitere Kontaktminiaturisierung.

Die Entwärmung der aktuellen **Gehäusung** und Integration in Leiterplatten ist kritisch. Sie kann die Anforderungen der Nanoelektronik-gerechten AVT nur unzureichend erfüllen. Ohne ein neues Kühlkonzept können sich Mikrochips auf und in Leiterplatten (FR4) auf weit über 150 °C erhitzen und Schaden nehmen.

Mit dem Übergang zur Nanometerskala ändern sich viele physikalische Phänomene. Zum Beispiel steigt die Zähigkeit eines Fluids extrem an, was die Handhabung nanoskaliger Basisstrukturen stark beeinflusst. Beim Greifen gewinnen auch die Oberflächenspannung und die elektrostatischen Kräfte an Dominanz. Klassische Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik stoßen an ihre Grenzen. Die Änderungen der physikalischen Phänomene bergen aber auch Chancen wie reaktivere Oberflächen, niedrigere Schmelzpunkte von Metallen oder modifizierte thermische Leitfähigkeit.

**In den Entwicklungen der AVT bedarf es eines Paradigmenwechsels.**

## Neue Ansätze

Nanoobjekte wie Nanopartikel oder Nanodrähte lassen sich nicht immer wirtschaftlich im Bauteil synthetisieren oder abscheiden. Daher sind massenfertigungskompatible Methoden zur Positionierung und Montage von ungeordneten Nanoobjekten für die zukünftige Entwicklung relevant.

Bisher in der Mikrotechnik und der Mikrosystemtechnik wenig beachtete Verfahren gewinnen hierfür an Bedeutung. Vor allem Kräfte in Fluiden und an Fluidgrenzflächen sind geeignet, sehr kleine Partikel zu bewegen und zu positionieren, siehe Kapitel 4.2.1, [Fiedler2008]. Der Einfluss von Van-der-Waals-Kräften steigt auf der Nanometerskala und macht neue Montagekonzepte möglich.

Die zwei- oder mehrpolige Dielektrophorese kann man nutzen, um Nanopartikel, Nanostäbe, Nanodrähte oder Nanoröhren zu handhaben.

Die Manipulation durch Schallwellen im Fluid (Ultra- und Megaschall) stellt eine weitere interessante Variante dar und lässt sich mit der Dielektrophorese kombinieren.



Abbildung 79: In Knoten eines Ultraschallfeldes zu Ketten konzentrierte Gold-Nanodrähte mit 14 µm Länge, vgl. [Fiedler 2008].

Ebenso ist die Handhabung mithilfe magnetischer Felder im Fluid vielversprechend und lässt sich mit den beiden obigen Verfahren kombinieren.



Abbildung 78: Dielektrophoretisch montierte Gold-Drähte (0,6 µm x 14 µm) zwischen Mikroelektroden (Abstand: 25 µm), vgl. [Fiedler 2008].

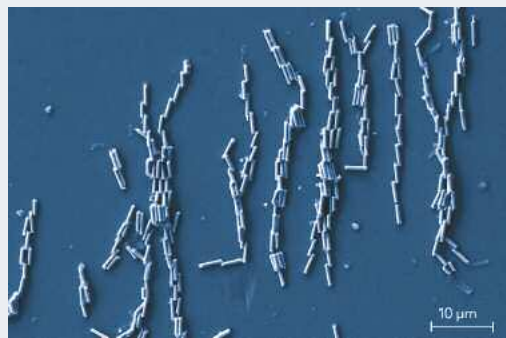
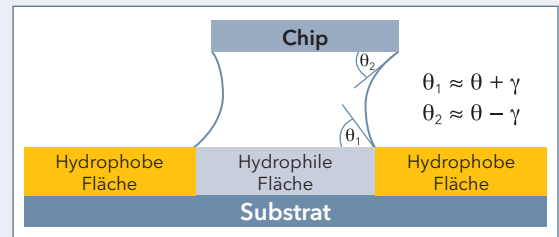


Abbildung 80: Nickel-Nanostäbe ordnen sich im magnetischen Feld auf einer Siliziumoberfläche zu kabel-ähnlichen Strukturen an, vgl. [Fiedler 2008].

Kraft	Prinzip	Anwendungsvarianten
Elektrisches Feld	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elektrophorese</li> <li>Dielektrophorese</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Freie Lösung / Feldflussfraktionierung (FFF)</li> <li>Kapillarelektrophorese</li> <li>Negative Dielektrophorese (nDEP)</li> <li>Positive Dielektrophorese (pDEP)</li> <li>Wanderwellen-Dielektrophorese</li> <li>Wanderwellen-Pumpen</li> </ul>
Magnetisches Feld	<ul style="list-style-type: none"> <li>Magnetophorese</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mechanisch bewegte Magneten</li> <li>Elektrisch aktuierte Ferrofluidaktoren</li> <li>Magnetische Pinzetten</li> </ul>
Optischer Druck und Energieabsorption	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laser-Pinzette / Photonische Kraftmikroskopie</li> <li>Lasersezieren</li> </ul>
Akustischer Druck und Hydrodynamische Strömung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interpartikuläre Wechselwirkung</li> <li>Akustische Energie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verschiedene Typen der Feldflussfraktionierung (FFF)</li> <li>Akustische Fallen / Stehende Ultraschallwellen</li> </ul>

Tabelle 12: Verfahren zur berührungslosen Manipulation von Nanoobjekten. (Quelle: S. Fiedler (2004) NanoBioPackaging – Ansätze, Chancen, Trends, P.L.U.S. 7 1168-1175 & 8 1362-65, extended M. Wiklund (2004))

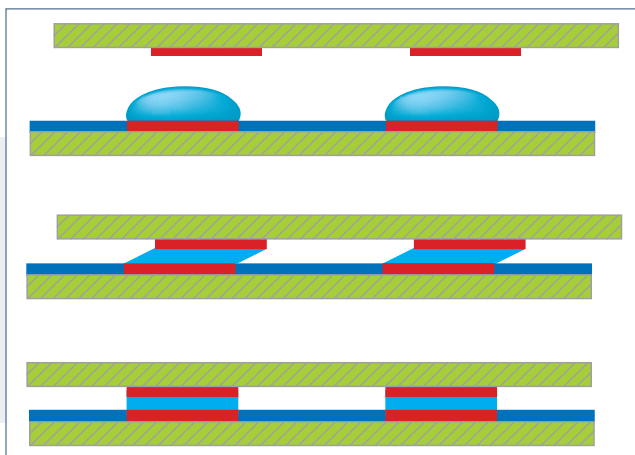
Abbildung 81:  
Benetzungswinkel zwischen einem Tropfen, einer hydrophilen Oberfläche und einem Mikrochip. (Quelle: in Anlehnung an Schlenker, D. et al: Abschlusspräsentation des MNI-Projekts FluidAssem: Selbstmontage von Kleinst-Chips mit Flüssigkeiten)



Auf einer Matrix aus hydrophilen und hydrophoben Flächen bleibt ein Wassertropfen auf einer hydrophilen Fläche hängen. Entscheidend hierbei sind die Benetzungswinkel zwischen dem Tropfen und dem Substrat, vgl. Abbildung 81. Ein elektrischer Potenzialwechsel der Elektroden unter den hydrophilen und hydrophoben Flächen erlaubt das Ändern dieses Winkels. Eine koordinierte Ansteuerung der Elektroden gestattet die Bewegung des Tropfens über die Matrix aus hydrophilen und hydrophoben Flächen. Dieses Verfahren heißt „Electrowetting on Dielectrics“ (EWOD).

An Fluidgrenzflächen treten große Kräfte auf, z. B. an der Oberfläche eines Wassertropfens. Ein mit EWOD bewegter Tropfen kann so einen Mikrochip kontaktlos manipulieren.

In der Präzisionsmontage können die Kräfte an den Fluidgrenzflächen den Justagefehler eines vorpositionierten Bauteils minimieren, vgl. Abbildung 82 und Tabelle 13.



Im Fluid können viele biologisch inspirierte Prozesse zum Einsatz kommen. Zum Beispiel organisieren sich Peptid-funktionalisierte Polymer-Nanopartikel auf mikrostrukturierten Polymeroberflächen selbst. So können nanostrukturierte Klebstoffpads direkt auf einem Substrat synthetisiert werden.

Für zukünftige Bondverbindungen sind unter anderem folgende Aspekte bedeutend:

- Lotfreie Verbindungen haben das Potenzial zur Verkleinerung der Bondflächen. Oberflächenspannungen begrenzen das Raster der Kontaktpunkte nicht mehr.
- Verbindungsverfahren ohne Temperaturprozess mindern die mechanische Belastung der Bondverbindung und der Bauelemente.
- Selbstreparaturverhalten erhöht die Produktzuverlässigkeit v.a. bei stark steigender Verbindungsanzahl.
- Korrigierbarkeit der Bondverbindung senkt die Kosten bei Fehljustagen.

Abbildung 82:  
Ultrapräzisionsmontage durch Selbstausrichtungseffekte: Die Benetzungskräfte des Fluids (hellblau) sorgen durch präparierte Oberflächen (rot) für die Ausrichtung der Substrate (grün). (Quelle: Rühle, J; Wilde, J; Biesalski, M.: Abschlusspräsentation des MNI-Projekts NanoPad: Klebprozesse mit Nanopads für die Mikro-Nano-Integration.)

Tabelle 13:  
Selbstausrichtungseffekte für die Ultrapräzisionsmontage. (Quelle: MNI-Projekt NanoPad)

Prinzip der Selbstausrichtung	Kräfte	Beeinflussung
Oberflächenspannung	Benetzungskräfte	Passiv, Strukturierung
Elektrisch	Elektrostatische Kräfte	Aktiv, adaptiv
Electrowetting	Benetzungskräfte	Aktiv, adaptiv

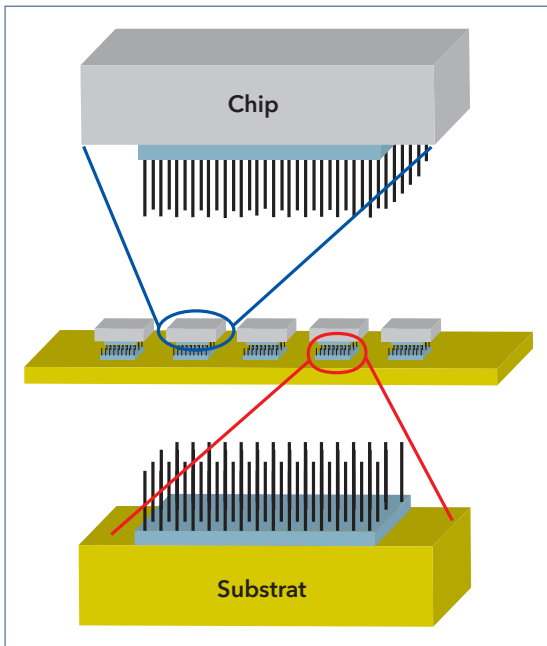


Abbildung 83:  
Prinzip des Niedertemperatur-Bondverfahrens mit CNTs.  
(Quelle: in Anlehnung an Ecke, R., Winkler, P., Pahl, B.:  
Abschlusspräsentation des MNI-Projekts NanoLawn-  
CoNTemp: Carbon-Nano-Tubes für Nanoskalige Nieder-  
Temperaturverbindungen)

Forscher betrachten reversible Verbindungen mit dem Funktionsprinzip eines „Nano-Klettverschlusses“, vgl. Abbildung 83. Dazu verwenden sie als Nano-Linienelemente Carbon-Nano-Tubes sowie Siliziumstäbe in schwarzem Silizium, vgl. Abbildung 83.

Die Bondfördernden Mechanismen (Abbildung 85) erhöhen die Stabilität der Verbindung, senken zum Teil aber ihre Reversibilität. Ist keine reversible Verbindung nötig, ist auch eine intensivere Verbindung möglich - eine „Kaltverschweißung“.

Ein weiterer interessanter Ansatz für das hermetische Waferbonden basiert auf alternierenden, reaktiven Nanoschichten. Eine TiAlN/ZrN- bzw. Ti/Al- Multilagenschicht zwischen den Bondpartnern wird z.B. durch einen Laserstrahl thermisch aktiviert, sodass sich zwischen den einzelnen Schichten Legierungen ausbilden. Durch die exotherme Reaktion breiten sich die Reaktions- und damit die Bindungsfront selbständig aus. Dabei entsteht kurzzeitig eine sehr hohe Temperatur, die das Lot aufschmelzen lässt, die verkapselten MEMS-Bauteile und die Substrate jedoch kaum erwärmt, vgl. Abbildung 21 [Bagdahn2008] und Abbildung 29.

Neue Ansätze nutzen die Van-der-Waals-Kräfte bei der nanoskaligen Annäherung von Nano-Linienelementen (1-D) untereinander bzw. an Flächen. Diese schwachen nicht-kovalenten Wechselwirkungen summieren sich bei einer hohen Linienelementdichte zu nutzbaren Haltekräften. Die Kraft einer Verbindung zwischen zwei Nano-Linienelementen ist jedoch so klein, dass sich die Verbindung prinzipiell schadensfrei wieder lösen lässt. Das Prinzip ist auch als Gecko-Effekt bekannt.

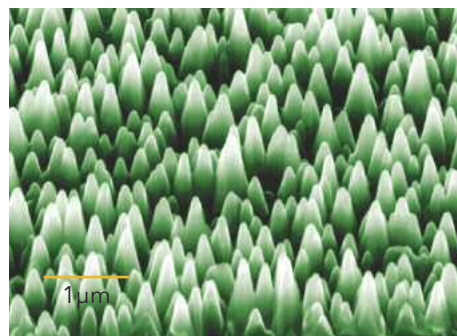


Abbildung 84:  
Modifizierte Black-Silicon-Oberfläche.  
(Quelle: Bartsch de Torres, H.; Hoffmann, M. et al.:  
Abschlusspräsentation des MNI-Projekts NanoSILKE:  
Verbindungsverfahren zwischen selbstorganisierten, nanostrukturierten Siliciumoberflächen und adaptierten LTCC-Folien)

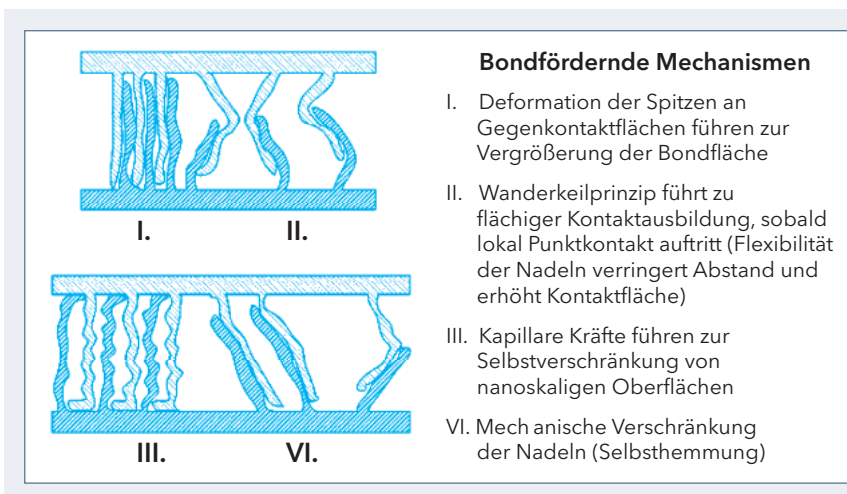


Abbildung 85:  
Bondfördernde Mechanismen.  
(Quelle: Mescheder, U. et al.:  
Abschlusspräsentation des MNI-Projekts NanoBond:  
Skalierbare Verbindungstechnik mittels anpassbarer nanoskaliger Verbindungsstrukturen)

## 4.3.3 Nanoskalige Funktionswerkstoffe in der Elektronik und der AVT

Bisher spielt das Materialverhalten von Funktionswerkstoffen nur in Teilbereichen der AVT eine Rolle. Der zunehmende Einsatz von Funktionsmaterialien ist jedoch einer der grundlegenden Trends. Fol-

gende Beispiele zeigen die Potenziale nanoskaliger Materialien für den Masseneinsatz in der Elektronik und der AVT.

### 1 Widerstandsschichten

Widerstandsschichten werden zunehmend in elektronische Schaltungen als eingebettete Passive Bauteile eingesetzt, vgl. Abbildungen 76 und 77. Dies betrifft sowohl polymere Leiterplatten-Anwendungen als auch keramische Hochtemperaturmaterialien, z. B. Niedertemperatur-Einbrand-Keramiken (LTCC). Die zugehörigen Widerstände werden zumeist als Pastengemische aufgebracht und später eingebrannt. Für diese Anwendungen können nanogefüllte und anorganische Pasten signifikante Eigenschafts- und Verarbeitungsvorteile bieten.

### 2 Dielektrische Materialien

In ähnlicher Weise werden neue dielektrische Materialien verfügbar sein, mit denen Kondensatoren in die Schaltungsträger integriert werden können. Die Funktionalisierung der AVT-Oberfläche erlaubt dabei auch eine Erweiterung im Hinblick auf Stoff-Sensorik, z. B. Feuchte. So ist es denkbar, polymere, ionensensitive Strukturen abzuscheiden.

### 3 Elektrolumineszenz-Materialien

Der Einsatz und die Verarbeitung organischer Elektrolumineszenz-Materialien (EL) haben dazu geführt, dass kostengünstige Substrate der AVT (keramische oder polymere Träger) als Displayflächen genutzt werden können (Anwendung in OLED: Organische Licht-Emittierende Diode). Derzeit werden in fortführenden Arbeiten neuartige „Quantum-Dots“ erforscht, um weitere Elektrolumineszenz-Schichten auf Basis von Nanomaterialien verfügbar zu machen. Derartige elektrisch ansteuerbare Fluoreszenzfarbstoffe sind farbtreu, haben ein einstellbares Emissionsspektrum, ein breites Absorptionsspektrum und bis zu 100 Prozent Quantenausbeute. Es ist zu erwarten, dass diese Materialien mit den Standard-Methoden der AVT, z. B. Siebdruck oder Photostrukturierung, verarbeitbar werden.

### 4 Quantum-Dots

Die Realisierung von diskreten Halbleitern aus Quantum-Dots mit einstellbarer Bandlücke erlaubt darüber hinaus zukünftig die Erzeugung von Solarzellen auf Standard-Substraten der AVT, z. B. dem Platinenmaterial FR4.

### 5 Magnetmaterialien

In ähnlicher Weise werden polymer gebundene Magnetmaterialien integrierbar. Hierdurch werden package-integrierte Sensoren, Abschirmungen oder Aktoren verfügbar. Nanostrukturierte Magnetwerkstoffe weisen beispielsweise eine hohe Permeabilitätszahl, Remanenzflussdichte oder Koerzitivfeldstärke auf. Unter dem Einsatz nanoskaliger, polymergebundener Magnetwerkstoffe könnten beispielsweise Funktionsschichten für Sensoren oder Aktoren in die Leiterplatten eingebracht werden. Ein Forschungsprojekt untersucht die Verwendbarkeit dieser Materialien als Marker zur Montagekorrektur im Magnetfeld, [BMBFVeranst2008], [BMBFBericht2009].

### 6 Cermet-Dünnschichten

Weitere technisch interessante Effekte treten an Cermet-Dünnschichten auf (keramischer Werkstoff in metallischer Matrix). So wurde an nanoskaligen Schichten aus  $\text{SiO}_x/\text{Cr}_y$  ein sehr geringer Temperaturkoeffizient des Widerstandes beobachtet, der von einer sehr hohen mechanischen Spannungsempfindlichkeit begleitet ist. Es besteht damit die Möglichkeit, package-integrierte Sensorschichten herzustellen. Sie können aufgrund ihrer Zusammensetzung aus nanoskaligen Teilchenverbunden im Vergleich zu konventionellen Dünn- und Dickschichtmaterialien bessere Eigenschaften aufweisen. Voraussetzung für die Nutzung sind jedoch geeignete Strukturierungsverfahren.

## 7 Bioverträgliche Lötpasten

Der Schmelzpunkt bioverträglicher Materialien sollte sich durch die Verwendung von Nanopartikeln senken lassen. Die bioverträgliche Funktionalisierung der Partikel kann sie für die Anwendung in der Lotpaste stabilisieren. An diesem Materialsystem wird noch geforscht, vgl. [Kohl2008].

## 8 Feuchtebarriere in Verkapselungsmaterial

Die Dichtigkeit von Kunststoffmaterialien lässt sich durch orientierte Einlagerung von Nanoplättchen erhöhen. So kann die Permeation von Feuchte oder Gasen verringert bzw. vermieden werden, Abbildung 86, vgl. [Braun2008].

## 9 Leitfähige Klebstoffe und Tinten

Das große Aspektverhältnis von leitfähigen CNTs ermöglicht eine elektrische Leitfähigkeit bei vergleichsweise geringen Füllgraden. So bleibt das Materialverhalten trotz Füllstoffeinsatz ähnlich wie das von Standardmaterialien. Mit etablierten oder leicht modifizierten Verfahren (z. B. Tintenstrahldruck oder Aerosoldruck) können z. B. Leiterbahnen auf Topologien gedruckt werden – eine Ersatztechnologie für das Drahtbonden, vgl. [Zöllmer2008].

Auf allen Systemebenen (Wafer-Level, Interposer, Verbundwerkstoff, Funktionswerkstoff) kann eine Vielzahl von Potenzialen durch den Einsatz nanotechnologisch modifizierter Werkstoffe aufgezeigt werden. Viele weitere Forschungsergebnisse zu den Themen MNI in der AVT und nanobasierte Materialien sind 2008 bei der öffentlichen BMBF Abschlussveranstaltung Mikro-Nano-Integration für die Mikrosystemtechnik vorgestellt worden, [BMBFVeranst2008]. Sie werden in einem gemeinsamen Schlussbericht zusammengefasst, [BMBFBericht2009].

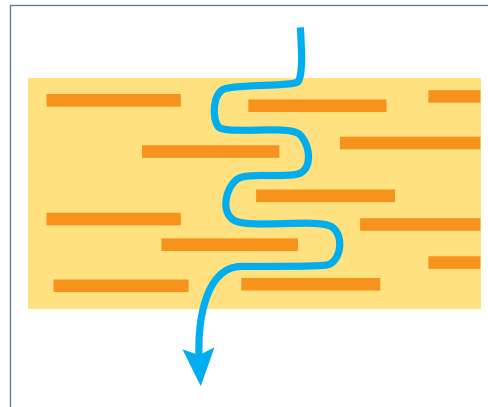


Abbildung 86: Verringerung der Permeation durch Nanoplättchen aufgrund längerer Diffusionswege (blau).

Für die Entwicklung von Materialien im Kontext der Produktionstechniken haben die Technische Universität Darmstadt und die Merck KGaA in einer Forschungsallianz das MerckLab an der TU Darmstadt gegründet. In dem Labor an der TU Darmstadt sollen in den kommenden Jahren neuartige anorganische Verbundmaterialien erforscht werden, die sich als druckbare Bauteile für hochleistungsfähige elektronische Anwendungen eignen (Printed Electronics). Dies sind z. B. druckbare Funk-Chips auf der Basis anorganischer Stoffe im Bereich der so genannten RFID-Technologie (Radio Frequency Identification). Ein weiteres Ziel ist das Verständnis und die Entwicklung so genannter Feldeffekttransistoren (FET) auf Basis anorganischer Materialien.

Diese können z. B. als aktive Bauteile in neuartigen Chemosensoren dienen. In beiden Forschungsgebieten bewegen sich die beteiligten Wissenschaftler auf einem überaus spannenden Feld von Grundlagenforschung und direkter Anwendung. Neben zwei Forschergruppen aus dem Fachbereich Chemie sind fünf weitere Arbeitsgruppen der TU aus den Fachbereichen Elektrotechnik und Informationstechnik, Maschinenbau und Material-/Geowissenschaften an dem Gemeinschaftslabor MerckLab beteiligt. Weiterhin arbeiten permanent Wissenschaftler der Merck KGaA im Labor auf der Lichtwiese, [MerckLab2008].

Abbildung 87: Demonstratoren und Messergebnisse für das Projektziel des MerckLab, bis 2011 einen vollständig gedruckten RFID-Demonstrator zu erstellen. (Quelle: Kursawe, M.: Nanotechnologie: Project „Printed Electronics“: Jahrestagung des Mikrosystemtechnik Netzwerks Rhein-Main e.V. 2007. IHK Frankfurt.)



## 4.4 Optik

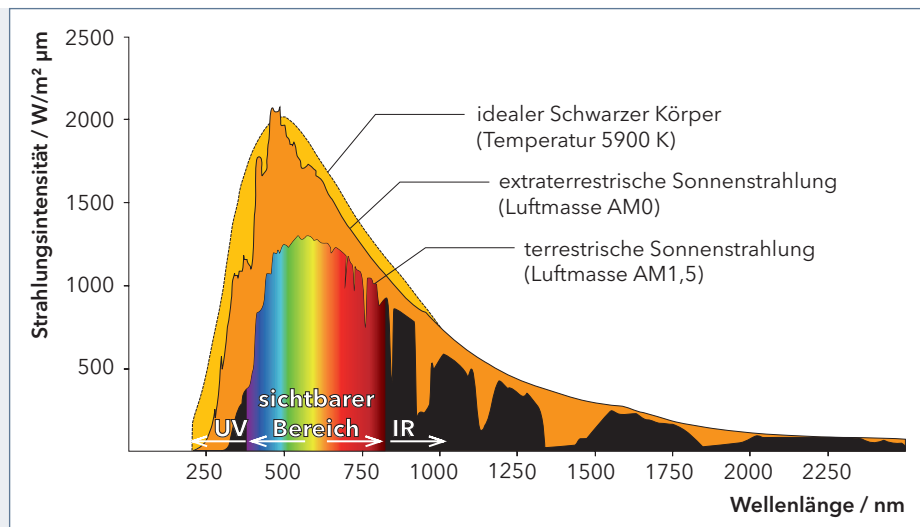
Die Optik beschäftigt sich mit der Lehre des Lichts. Für den Menschen wesentlich ist dabei das sichtbare Licht in einem Wellenlängenbereich von etwa 380 nm bis 780 nm, Abbildung 88. Dies ist der Mikro-Nano-Übergangsbereich, in dem die MNI ihre Stärken ausspielen kann.

Die Manipulation von Licht mit großen und kleinen Bauteilen war schon 1200 v. Chr. bekannt. Lichtbrechung, Lichtreflexion und Lichtstreuung sind „alte“ und bekannte Phänomene. Im Licht der modernen Nanotechnologie werden sie neu beleuchtet, denn heute sind Strukturen und Bauteile möglich, deren Dimensionen den Lichtwellenlängen entsprechen bzw. darunter liegen.

Nanoskalige Basisstrukturen sind wesentlich kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Dadurch ändern sich die mikroskopisch und makroskopisch wahrnehmbaren optischen Phänomene drastisch. Beispielsweise ändert sich die Farbe von nanopartikulärem Gold in wässriger Lösung in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser, siehe Kapitel 3.1.1.

Auf den Einsatz von Nanotechnologien in der optischen Industrie geht der Band 5 dieser Schriftenreihe ausführlich ein. Im Folgenden sind die für die Mikrotechnik relevanten Einsatzmöglichkeiten skizziert.

Abbildung 88:  
Intensitätsverteilung der  
Sonnenstrahlung im Weltraum  
sowie deren Näherung durch  
einen thermischen Strahler.  
Unterste Kurve: Situation auf  
der Erdoberfläche bei  
Normalbedingungen (AM 1,5).  
(Quelle: Benutzer Quilbert,  
de.wikipedia.org, cc-by-sa)



### 4.4.1 Nanopartikulär dotierte Lichtwellenleiter

Für die Datenfernübertragung setzt man heute Lichtwellenleiter aus Glas ein. Sie haben gute Übertragungseigenschaften, komplexe Bauteile sind damit aber nur aufwändig herzustellen. Dafür stellen polymere Materialien wie Polymethylmethacrylat PMMA oder Polycarbonat PC eine Alternative dar. Die Übertragungseigenschaften dieser Materialien sind allerdings schlechter als die von Glas.

Bei kurzen Distanzen fällt dies nicht so stark ins Gewicht. Hier ist die günstigere Fertigungsmöglichkeit entscheidend. Daher kommen polymere Lichtleiterstrukturen in faseroptischen Steckverbindern oder integriert optischen Wellenleiterkomponenten zum Einsatz, Abbildung 89. Ein wesentlicher Nachteil dieser Bauteile ist, dass am Materialübergang von Glas zum polymeren Lichtleiter Übertragungsqualität bzw. Lichtleistung verloren geht. Ein Grund dafür ist der Unterschied der Brechzahlen von Glas und polymerem Werkstoff.



Abbildung 89:  
4 x 4 Starlink:  
4 x 4 optischer Sternkoppler als integriert optische Polymerwellenleiterkomponente.  
(Quelle: IMM Mainz GmbH)

Ein Polymerkomposit mit Nanopartikeln ist transparent, wenn der Partikeldurchmesser ein Zehntel der Wellenlänge unterschreitet. Das Licht „sieht“ dann die einzelnen Partikel nicht. Es tritt kaum oder keine Lichtstreuung auf. Lichtabsorption ist jedoch möglich wie beispielsweise in transparenten, grau getönten Kunst-

stoffscheiben. Hat das Vollmaterial der Nanopartikel eine andere Brechzahl als das Polymermaterial, ändert sich die effektive Brechzahl. So kann die Brechzahl des Lichtwellenleiters aus Polymerkomposit dem von Glas angepasst werden. Der Übertragungsqualitätsverlust im Übergang vom Glas zum Polymer lässt sich damit minimieren, [Hanemann2005].

Eine nur zum Teil gelöste Herausforderung ist die Stabilisierung der Nanopartikel im flüssigen Polymer. Sind Partikelagglomerate größer als ein Zehntel der Wellenlänge, erscheinen die Komposite nicht mehr transparent.

Eine weitere Aufgabe ist die Stabilisierung der Brechzahl bei der Verkleinerung der Partikeldurchmesser. Durch die große relative Oberfläche von Nanopartikeln steigen die mechanischen Spannungen im Partikel. Dies bewirkt, dass die Brechzahl des Nanopartikels stark von dem des Vollmaterials abweichen kann.

## 4.4.2 Reflexionsminderung

Die Reflexionsminderung spielt bei großflächigen Solarzellen eine entscheidende Rolle. Dazu beschichtet man das Schutzglas auf Solarmodulen mit nanoporösen Sol-Gel-Schichten. Die Kombination von Nanopartikeln mit unterschiedlichen Durchmessern erlaubt die optische Anpassung dieser Schichten. Auch hier ist die effektive Brechzahl die entscheidende Größe.

In mikrooptischen Bauteilen wie Laserdioden oder LEDs muss ein möglichst großer Anteil des erzeugten Lichts ausgekoppelt werden. Die Beschichtung mit Nanoschichten aus Oxiden und Gläsern ist hier eine etablierte Technik aus der Halbleitertechnik und aus der Linsenvergütung. Teilweise sind damit hohe Temperaturen und teure Vakuumprozesse verbunden.

Polymere Linsen können im Spritzgussverfahren sehr günstig hergestellt werden. Die Brechzahl lässt sich auch hier durch nanopartikuläres Dotieren steigern, Abbildung 90. Die Beschichtung von Mikrolinsen mit nanoporösen Sol-Gel-Schichten erlaubt die Leistungssteigerung polymerer optischer Mikrosysteme. Diese Systeme können beispielsweise Anwendung finden in der optischen Nachrichtentechnik, der Gas-sensorik oder in Lab-on-a-Chip-Systemen der medizinischen Diagnostik.



Abbildung 90:  
Spritzgegossene Linse aus Polycarbonat PC vor nanopartikulär gefüllten Polymerprobekörpern.  
(Quelle: Technische Universität Darmstadt, Institut EMK/Deutsches Kunststoffinstitut, Abt. Technologie)

### 4.4.3 Transparente Diffusionssperre

Als günstige Alternative zu herkömmlichen Leuchtdioden (LED) haben Organische Leuchtdioden (OLED) auch in der Mikrotechnik ein großes Potenzial. Ihre Langzeitstabilität ist noch nicht hinreichend

groß für die meisten Anwendungen. Eine transparente Diffusionsbarriere gegen Sauerstoff und Wasserdampf könnte die Dauerhaftigkeit von OLED deutlich verbessern, vgl. Kapitel 4.3.3.

### 4.4.4 Laserdioden mit variabler Lichtwellenlänge

Laser mit abstimmbarer Wellenlänge sind die Schlüsselkomponenten zukünftiger optischer Kommunikationssysteme. Darüber hinaus ist ein breitbandig, kontinuierlich abstimmbarer Laser mit hochreinem Emissionsspektrum ein vielseitiges Werkzeug für verschiedene Sensoranwendungen. So kann zum Beispiel die Emission von Treibhausgasen durch Absorptionsspektroskopie gemessen oder die Deformation von Gebäuden durch die Abfrage von Faser-Bragg-Gittern (FBG) überwacht werden [Kögel 2007]. Aufgrund ihres monomodalen Verhaltens, der geringen Leistungsaufnahme und Kompaktheit sind Oberflächen-emittierende Laser mit Vertikalresonator (engl. vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) hierfür besonders geeignet.

Das Fachgebiet Optische Nachrichtentechnik des Fachbereichs Elektrotechnik- und Informationstechnik an der TU Darmstadt koordiniert seit April 2008 das mit 2,7 Millionen Euro geförderte EU-Projekt SUBTUNE. Geforscht wird an der Entwicklung eines elektrisch gepumpten, abstimmbaren VCSEL im Wellenlängenbereich von 800 nm – 2,0 µm, [www.subtune.eu](http://www.subtune.eu). Ein weiteres Ziel des Projektes ist, die Polarisation der Laser zu stabilisieren. Dies geschieht durch Einschreiben eines Oberflächengitters mit Abmessungen im Sub-Wellenlängenbereich.

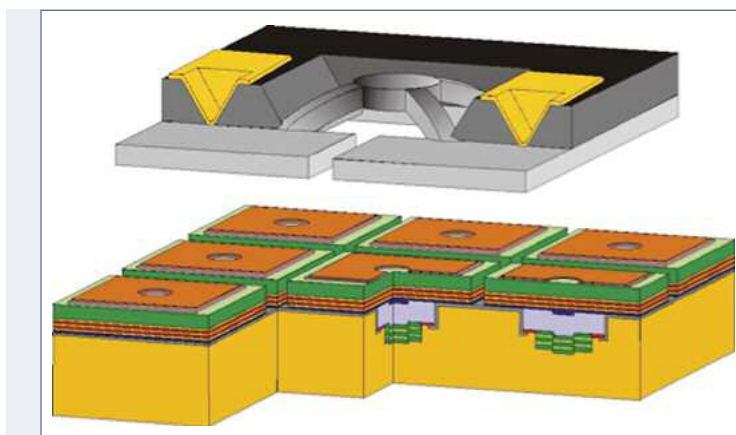


Abbildung 91:  
Abstimmbarer MEMS-  
VCSEL in hybridem  
Zwei-Chip-Aufbau.  
(Quelle: Technische  
Universität Darm-  
stadt,  
Prof. Dr. P. Meißner)

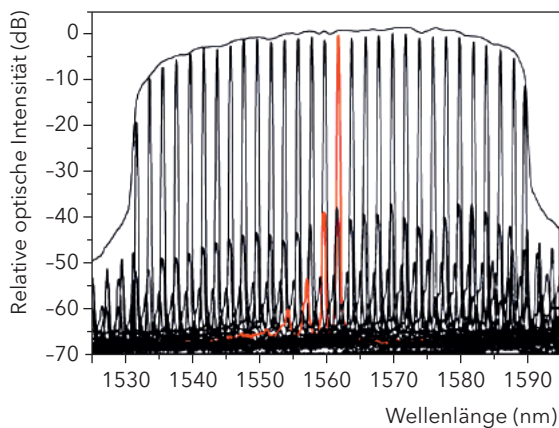


Abbildung 92:  
Spektrum eines abstimmbaren, monomodalen MEMS-VCSELs - ein Spektrum rot hervorgehoben.  
(Quelle: Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr. P. Meißner)

In der gegenwärtigen Technologie besteht ein mikro-mechanisch abstimmbarer VCSEL (MEMS-VCSEL) aus zwei Bauteilen, Abbildung 91. Die optisch aktive Komponente nennt man auch Halb-VCSEL. Die mechanisch aktive Komponente ist eine in Volumen-Mikromechanik hergestellte, bewegliche Spiegelmembran. Die beiden Bauteile werden in einem hybriden Aufbau miteinander verbunden.

Durch die elektrothermische Aktorik kann der obere Spiegel ausgelenkt, der Luftspalt vergrößert und so die Resonanzwellenlänge abgestimmt werden. Auf diese Weise können bereits Laser mit einem kontinuierlichem Abstimmbereich von größer 60 nm bei Wellenlängen um 1,55  $\mu\text{m}$  realisiert werden. Abbildung 92 zeigt das typische Spektrum eines MEMS-VCSELs.

Gegenwärtig wird eine integrierte Technologie unter Verwendung einer induktiv-gekoppelten, Nieder-temperatur-Plasma-Abscheidungsanlage (IC-PECVD) entwickelt. Die Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) in Abbildung 93 zeigt als vorläufiges Ergebnis einen dielektrischen ( $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ ) Bragg-Spiegel, der in Oberflächen-Mikromechanik freigelegt wurde.

Die Krümmung der Spiegelmembran ist entscheidend um auch bei Halb-VCSEL mit großer Apertur ausschließlich den Grundmodus (Gauß-Strahl: transversales Profil gemäß einer Gauß-Kurve) anzuregen. Hierdurch können monomodal Ausgangsleistungen bis +5 dBm (dBm: Leistungspegel mit der Bezugsgröße 1 mW) erzielt werden.

Bereits in der derzeitigen Projektphase finden Experimente zur Gassensorik, Faser-Bragg-Gitter-Messtechnik und optischer Kommunikationstechnik statt, [www.subtune.eu](http://www.subtune.eu).

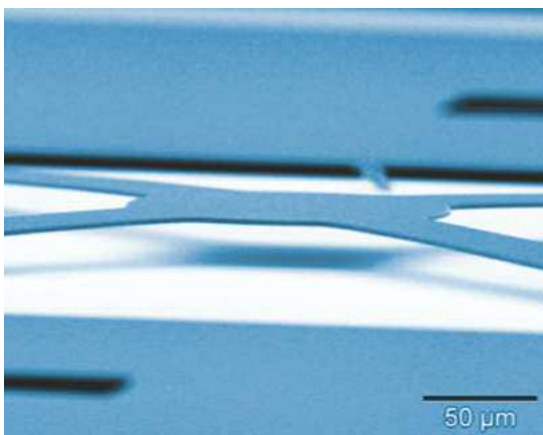


Abbildung 93:  
REM-Aufnahme einer integrierten dielektrischen Spiegelmembran.  
(Quelle: Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr. P. Meißner)

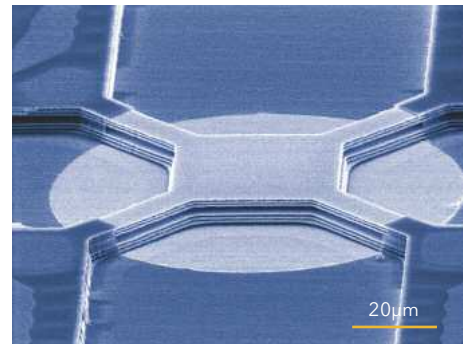
## 4.4.5 Elektrisch einstellbare optische Filter

Zur Detektion von optischen Signalen mit einer bestimmten Wellenlänge setzt man möglichst schmalbandige Filter ein. Hierzu gehören beispielsweise Fabry-Pérot-Filter, die aus zwei Spiegeln bestehen, die eine Kavität einschließen. Ihre Größe ist für die Wellenlänge des Bauelements bestimmend. Um eine hohe Güte der Filter zu erreichen, werden die Spiegel als Braggreflektoren (DBR) hergestellt. Sie bestehen aus einer abwechselnden Schichtfolge zweier Materialien mit unterschiedlicher Brechzahl.

Am Institut für Nanostrukturierungstechnologie und Analytik (INA) der Universität Kassel stellen die Forscher unter Leitung von Prof. Dr. H. Hillmer Nanoschichten aus Indiumphosphid (InP) her, vgl. Kapitel 3.2. Abwechselnd mit Luft bzw. Vakuum ergibt sich eine Schichtfolge mit großen Brechzahlunterschieden.

Die große elektrostatische Kraft im Mikro- und Nanometerbereich ermöglicht eine Abstandsänderung der Nanoschichten mit geringer Ansteuerspannung, vgl. Kapitel 4.2. Dadurch können die im INA hergestellten Filter sehr weit durchgestimmt werden. Die Filterwellenlänge kann um 221 nm bei einer nominellen Wellenlänge von 1550 nm variiert werden.

Abbildung 94:  
Durchstimmbares Fabry-Pérot-Filter, bestehend aus zwei InP/Luftspalt-Spiegeln, die eine Kavität einschließen. Mit Hilfe von photonischen Kristallstrukturen auf der Filterfläche ist es möglich, weitere optische Eigenschaften, wie zum Beispiel die Polarisation, zu beeinflussen. (Quelle: Universität Kassel, Institut für Nanostrukturierungstechnologie und Analytik (INA), Prof. Dr. H. Hillmer)



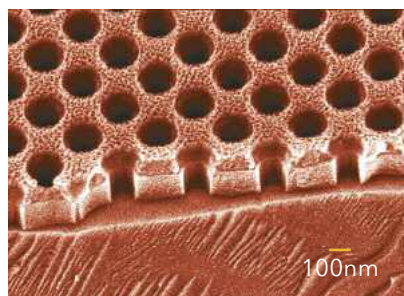
## 4.4.6 Photonische Kristalle und Quantenpunkte

Schon 1669 wurde ein natürlicher photonischer Kristall entdeckt. So zeigen Kalkspatkristalle das Phänomen der Doppelbrechung: sie weisen zwei unterschiedliche Brechzahlen auf.

Photonische Kristalle sind periodische Strukturen aus verschiedenen Materialien mit zumeist unterschiedlichen dielektrischen Parametern. Die Eigenschaften solcher photonischer Kristalle können analog zum Verhalten von Elektronen in Kristallgittern beschrieben werden und stellen somit das optische Gegenstück der Halbleiter dar. Sie ermöglichen die Kontrolle der Wellenausbreitung und bilden die Grundlage für neuartige Materialien und Bauelemente.

Photonische Kristalle werden eingesetzt, um mehr Licht aus LEDs, OLEDs und Laserdioden auszukoppeln, Abbildung 95. Durch die Abhängigkeit der Eigenschaften von der geometrischen Struktur lassen sie sich auch als optische Dehnungssensoren verwenden. Ihre Spiegel- und Filtereigenschaften werden für den Einsatz in der optischen Nachrichtentechnik untersucht.

Abbildung 95:  
Zweidimensionaler photonischer Kristall, hergestellt mit dem Nanoimprint-Verfahren, vgl. Kapitel 4.1.6. (Quelle: Molecular Imprints)



Dreidimensionale photonische Kristalle ermöglichen Materialien mit negativer Brechzahl, Abbildung 96. Für Mikrowellen sind solche Materialien seit einigen Jahren bekannt, für sichtbares Licht werden diese aktuell erforscht. Mögliche Anwendungen finden sich zunächst in der weiteren Effizienzsteigerung optoelektronischer Bauteile. Durch die große Wellenlänge der infraroten Strahlung können die Nanostrukturen größer sein als bei sichtbarem Licht. Außerdem reichen photonische Kristalle mit Abmessungen im Mikrometerbereich zur Nutzung der Effekte im MEMS-Bauteil aus.

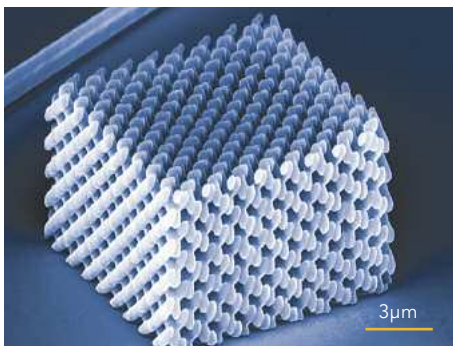
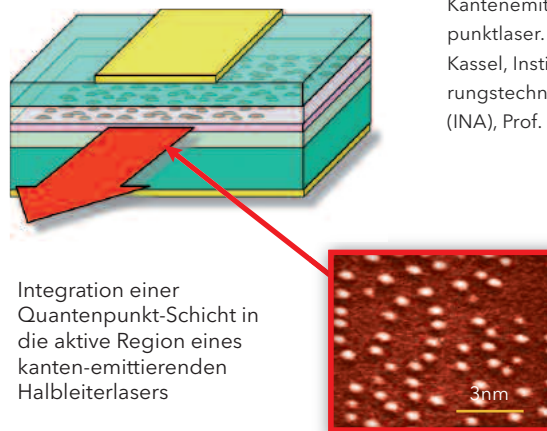


Abbildung 96:  
Dreidimensionaler photonischer Kristall. (Quelle: Nanoscribe GmbH, Karlsruhe, Prof. Dr. M. Wegener)

Für die Weiterentwicklung der optischen Nachrichtentechnik sind hochbrillante Laserdioden eine Schlüsselkomponente. Durch einen gezielten Aufbau aus Nanoschichten und synthetisierten Nanopartikeln sind temperaturstabile Quantenpunktlaser möglich, Abbildung 97. Ihre Funktion basiert wie bei photonischen Kristallen auf der Beeinflussung der möglichen energetischen Zustände durch Strukturierung im Nanometerbereich.



Integration einer Quantenpunkt-Schicht in die aktive Region eines kanten-emittierenden Halbleiterlasers

Abbildung 97:  
Kantenemittierender Quantenpunktlaser. (Quelle: Universität Kassel, Institut für Nanostrukturierungstechnologie und Analytik (INA), Prof. Dr. J. P. Reithmaier)

## 4.4.7 Diffraktive Optische Elemente

Klassische optische Bauelemente brechen das Licht (engl.: refractive). Zu ihnen zählen Linsen, Spiegel und Prismen.

Diffraktive Optische Elemente (DOE) sind im Vergleich dazu kleiner und leichter. Sie beugen das Licht (engl.: diffractive). Die strahlformende Wirkung beruht auf der Interferenz von vielen Beugungsmustern, die durch Mikrostrukturen im DOE erzeugt werden. Die geschickte Überlagerung der Beugungsmuster eröffnet eine Vielzahl neuer Anwendungen für DOEs. Dazu zählen:

- Einfache Gitter, die zur Aufteilung von Licht in seine Wellenlängen dienen.
- Strahlformende Elemente, die wie Linsen Licht bündeln oder zerstreuen (Zonen-Platten, Fresnel-Zonen-Platten).
- Bauelemente, die Lichtstrahlen mit inhomogenen Intensitätsverteilungen in Lichtstrahlen mit homogener Intensitätsverteilung wandeln (Beam shaping, Computergenerierte Hologramme (CGH)).
- Abbildende Systeme, mit denen sich Bilder projizieren lassen (CGHs), Abbildung 98.

Als Ersatz für konventionelle optische Elemente ermöglichen DOEs leichtere und kompaktere Objektive für Kameras. Sie erlauben optische Korrekturen, die sonst nur mit aufwändigen und schweren Linsenkombinationen aus Spezialglas realisierbar sind.

In der Laser-Technik werden DOEs als Strahlformer eingesetzt. Sie können das gaußförmige Laser-Strahlprofil mit hoher Effizienz in ein homogenes Strahlprofil umwandeln.

Weitere Anwendung finden DOEs in der digitalen Elektronik. So werden heute häufig DOEs in Linsensystemen für digitale Mobiltelefon-Kameras und CD/DVD-Laufwerke eingesetzt.

In der optischen Messtechnik ermöglichen DOEs:

- Erweiterte Anwendungsgebiete
- Verbesserte Auflösung
- Kleinere und leichtere Sensoren.

Zum Beispiel kann durch Einsatz eines DOEs der Messbereich eines chromatisch-konfokalen Messsystems verdreifacht werden (Firma Precitec in Rodgau [www.precitec-optronik.de](http://www.precitec-optronik.de)).

Hergestellt werden DOEs durch die Mikrostrukturierung von transparenten Materialien. Dabei bringt man Muster mit Dimensionen von circa einem bis fünf Mikrometern in die Oberfläche des Materials ein. Die Tiefe entspricht der Wellenlänge oder einem Bruchteil davon ( $\lambda$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ ) - also im Nanometerbereich. An den dabei entstehenden Kanten wird

das Licht gebeugt. Eine Möglichkeit für die Herstellung von DOEs ist die photolithographische Erzeugung einer Maske auf dem Material, mit der dann die Struktur durch einen Ätzprozess in das Material übertragen wird. Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von DOEs ist die Abformung. Hierbei wird in einem ersten Schritt ein Prägestempel mit der gerade beschriebenen Methode hergestellt. Danach wird mit diesem Stempel das eigentliche DOE abgeformt. Mit diesem Verfahren können DOEs aus Kunststoff oder Glas kostengünstig in Massenprozessen hergestellt werden. Für die Herstellung von Prototypen oder Einzelstücken bieten sich auch direkt-schreibende Verfahren an. Entweder werden Strukturen durch Ablations-Verfahren direkt in das Material eingebracht, oder es werden lithographische Masken durch direktes Schreiben mit einem Laser-Strahl oder einem Elektronen-Strahl erzeugt.

Die Hochschule Darmstadt verfügt über effiziente Programme zum Entwerfen, Gestalten und Simulieren von DOEs. Am Institut für Mikrotechnologien (IMtech, Prof. Dr. habil. F. Völklein) stehen alle notwendigen Technologien zur Herstellung von DOEs in Gläsern, Silizium oder in Prägestempeln zur Verfügung. Das IMtech beschäftigt sich mit der Entwicklung und Charakterisierung von Fertigungsprozessen für die Herstellung von DOEs und mit der optischen Charakterisierung von gefertigten DOEs.

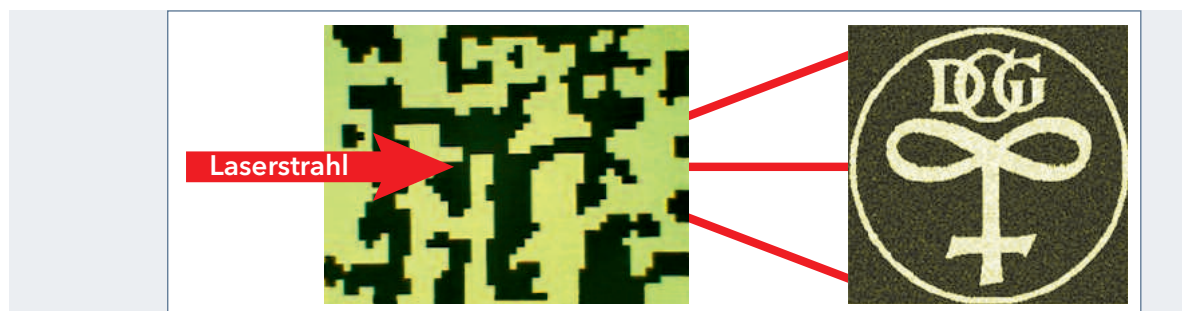


Abbildung 98:

Entwicklung diffraktiver mikrooptischer Bauelemente: Binäre Phasenrelief-Struktur in Quarzglas mit einem 2-Level-Phasenrelief (Äztiefe  $600 \text{ nm} = \lambda / 2$ ) sowie berechnetes Intensitätsmuster der Laserstrahlung.

Minimale Strukturdimension:  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ , Herstellung: Beschichtung, Lithographie, Reaktives Ionenätzen (RIE). (Quelle: IMtech an der Fachhochschule Wiesbaden, Prof. Dr. habil. F. Völklein)

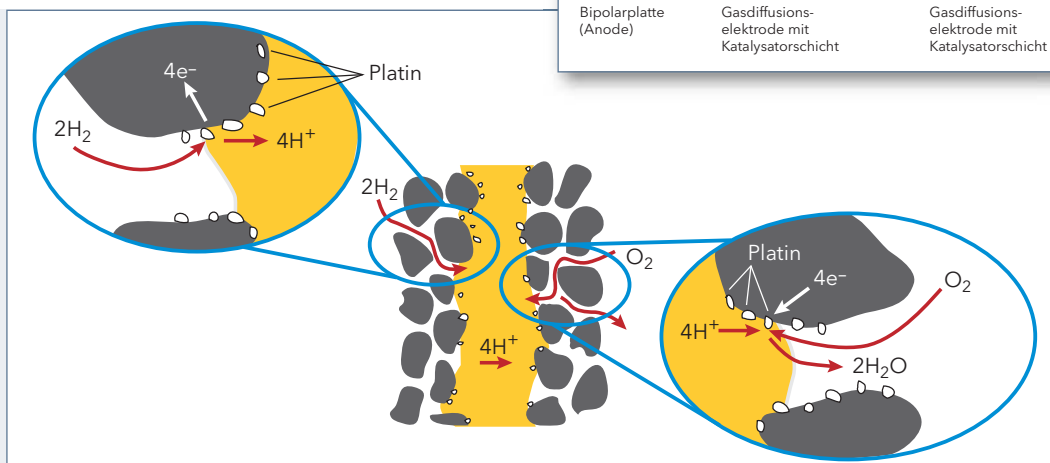
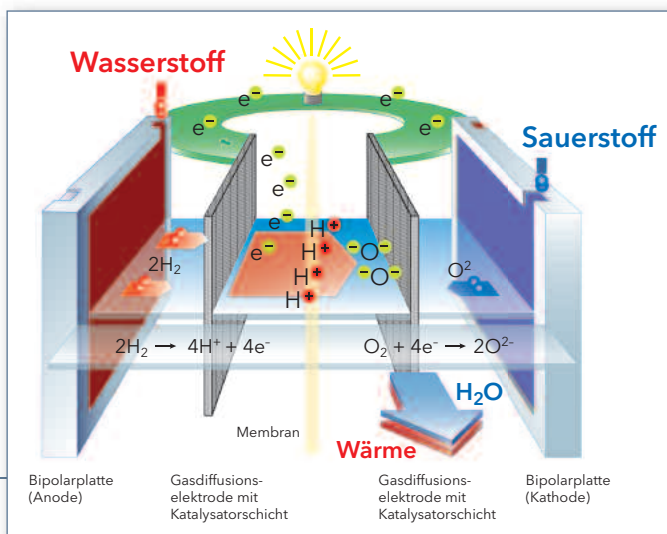
## 4.5 Chemie / Energie

Der allgemeine Einsatz von Nanotechnologien im Energiesektor wird im Band 9 dieser Schriftenreihe ausführlich behandelt. Hier liegt der Fokus auf dem Energiemanagement von Mikrosystemen.

Abbildung 99:

**rechts:** Schematische Darstellung der Funktion einer Brennstoffzelle. (Quelle: PEMEAS GmbH)

**unten:** Elementar-Reaktionen der Brennstoffzelle. (Quelle: Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr. T. Hartkopf)



### 4.5.1 Brennstoffzelle

Über die Anode gelangt Wasserstoff in das Innere der Brennstoffzelle. Dabei gibt das Gas Elektronen ab, die durch einen elektrischen Stromkreis zur Kathode fließen. Dort nimmt der Luftsauerstoff die Elektronen wieder auf und reagiert im Inneren der Zelle mit dem oxidierten Wasserstoff zu Wasser.

Die Elektrode einer Brennstoffzelle muss dabei vielfältigen Kriterien genügen, unter anderem:

- Hohe elektrische Leitfähigkeit
- Gute Gasdurchlässigkeit
- Guter Kontakt zur Ionenmembran
- Große Katalysatoroberfläche
- Hohe mechanische Stabilität.

Die strukturellen, mechanischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften prädestinieren CNTs für den Einsatz in der Mikrobrennstoffzelle. Hier spielen das extrem hohe Aspektverhältnis und die sehr große spezifische Oberfläche eine wesentliche Rolle. Wichtig sind auch die erhöhte elektrische Leitfähigkeit und die Oxidationsstabilität. Damit sind CNTs dem amorphen Kohlenstoff (Graphit, Carbon Black, Kohlenstoff-Fasern etc.) und Metallen wie Kupfer oder Gold nicht nur in der Herstellung elektronischer Kontakte überlegen. Die Kontaktqualität ist gerade in der Solar- und Brennstoffzellentechnologie sehr wichtig.

Den Einsatz von CNTs in Brennstoffzellen untersuchen Forscher der TU Darmstadt am Fachgebiet Regenerative Energien aktuell in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern, [CANAPE]. Mit CNTs können erstmals Kohlenstoff-Diffusionselektroden im (Sub-)Mikrometer-Bereich realisiert werden. Tabelle 14 vergleicht wichtige Elektrodeneigen-

schaften eines Standardmaterials und eines Kohlenstoff-Nanomaterials. Erhebliche Vorteile ergeben sich durch die deutliche Reduktion von Masse und Volumen sowie des Widerstands. Abbildung 100 verdeutlicht den Unterschied in der Dimension der Materialien.

Elektrodentyp	Dicke in $\mu\text{m}$	Spezifische Masse in $\text{mg}/\text{cm}^2$	Spezifische Leitfähigkeit in $\text{S}/\text{cm}$ bei Raumtemperatur
E-TEK	400	24	2
SWCNT präpariert mit Natriumdodecylsulfat	10	0,7	160
SWCNT präpariert mit Salpetersäure	10	0,7	2450

Tabelle 14: Elektrodeneigenschaften eines Standardmaterials aus Carbonfasern (E-TEK von BASF Fuel Cells GmbH) und einer SWCNT-Elektrode, die nach dem Bucky-paper-Verfahren aus Single Walled CNTs hergestellt wurde.

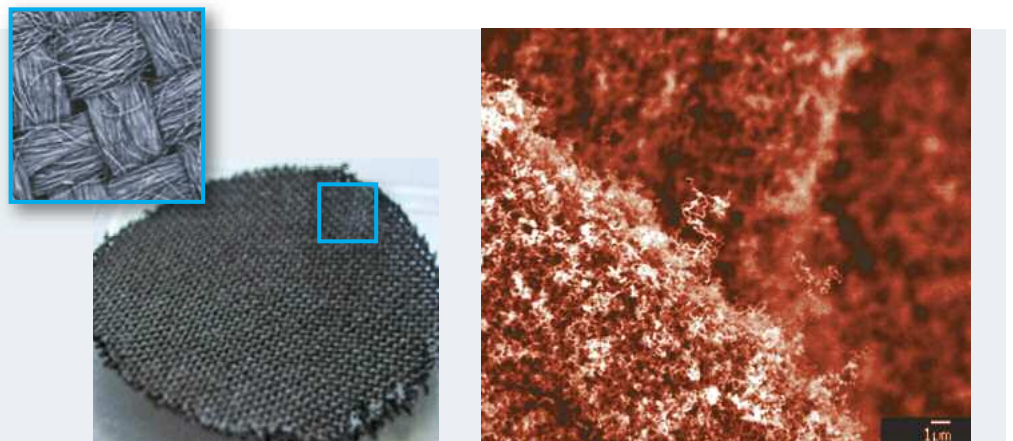


Abbildung 100: **links:** Konventionelles Gewebe aus Kohlenstoff (Kohlenstoff-Fasern; engl.: Carbon-Cloth) **rechts:** Auf links dargestelltem Gewebe aufgewachsene CNTs (Quelle: Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr. T. Hartkopf, Ansprechpartner: Dip.-Ing. Matthias Söhn)

Ein wichtiger Schritt bei der Herstellung effizienter Dünnschichtelektroden ist die Präparation des Platin-Katalysators auf dem CNT-Trägermaterial. Platin-Nanopartikel mit einem Durchmesser von 3–5 nm werden darauf nasschemisch abgeschieden. Ein Sprühtrocknungsverfahren bringt anschließend das CNT/Pt-Material auf die Brennstoffzellenmembran auf.

Tests im Sauerstoff/Wasserstoff-Betrieb bei 75°C mit Nafion® 117 als Membran zeigen die gute Leistungsfähigkeit der Polymerelektrolytbrennstoffzellen (PEMFC), Abbildung 101. Mit einer Katalysatorbelastung von nur 0,05  $\text{mg}/\text{cm}^2$  erreicht die Zelle eine Leistungsdichte von über 300  $\text{mW}/\text{cm}^2$ . Dabei kann die Dicke der Elektroden auf ca. 1  $\mu\text{m}$  verringert werden.

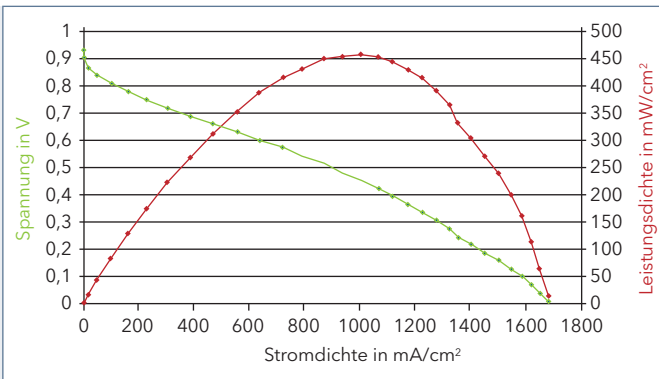


Abbildung 101:  
Messergebnis an einer Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEMFC) mit 0,3 mg/cm<sup>2</sup> Platin auf mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren (Multi-Walled Carbon Nano Tubes MWCNTs), die im Sprühtrocknungsverfahren auf Nafion® 117 aufgetragen als Elektrode eingesetzt werden: Die Spannung und die Leistungsdichte über der Stromdichte sind bei 75 °C Betriebstemperatur aufgenommen worden. (Quelle: Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr. T. Hartkopf, Ansprechpartner: Dip.-Ing. Matthias Söhn)

Die neuartigen CNT-Elektroden wurden auch in phosphorsauren Brennstoffzellen bei bis zu 150 °C getestet. Dabei zeigte sich, dass sie gegenüber den konventionellen langjährig optimierten Elektroden konkurrenzfähig sind.

Die geringe Elektrodendicke prädestiniert diese Materialien für miniaturisierte Brennstoffzellenanwendungen.

Die nasschemische Abscheidung des Katalysators erlaubt einfaches Hochskalieren der prozessierten Flächen. Für die Herstellung großflächiger Dünnschichtelektroden muss allerdings die Reproduzierbarkeit des Aufsprühverfahrens weiter verbessert werden.

### Zink / Luft-Mikrobrennstoffzelle

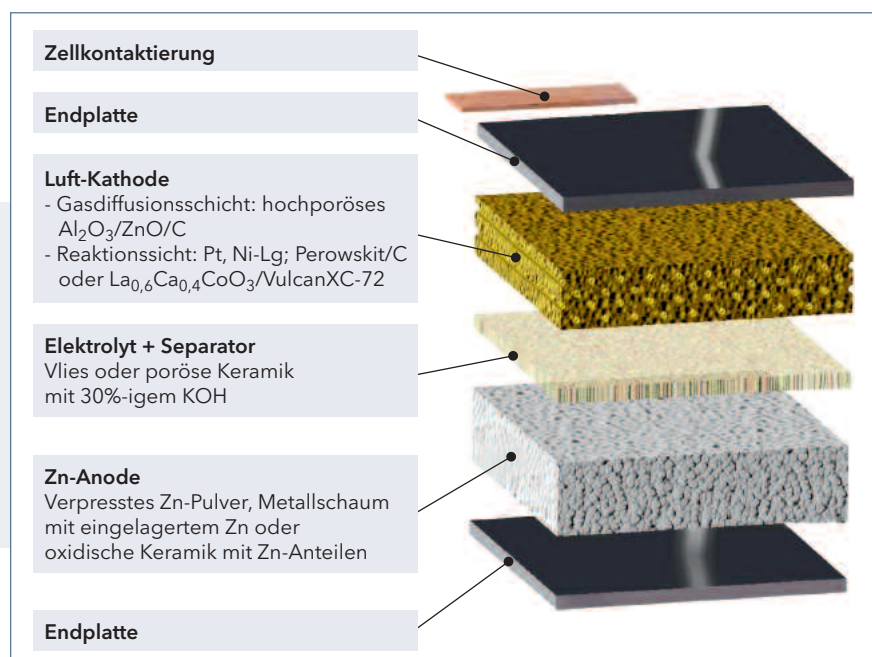
Einen anderen Ansatz verfolgt das Verbundprojekt Zink / Luft-Mikrobrennstoffzelle (ZiLuZell), an dem die DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie in Frankfurt am Main beteiligt ist. Die

Mikrobrennstoffzelle ist aufgebaut aus einer Zink-Anode, einem Elektrolyten und einem Separator sowie einer Luft-Kathode zwischen den zwei Endplatten, Abbildung 102.

An der Kathode reagiert der Luftsauerstoff mit dem Elektrolyten. Für den Gasaustausch ist eine hohe Porosität der Kathodenstruktur nötig. Auch für die Reaktion des Zinks mit dem Elektrolyten an der Anode ist eine hochporöse Matrix für den Stoffaustausch sinnvoll. Durch die stabile Anoden-Matrix soll die Zelle verformungsfrei wiederaufladbar werden. Die widerstandsfähige Anode soll die Integration in ein Mikrosystem vereinfachen. Vorgesehen ist die Verwendung für das universelle Baukastensystem für Mikrosysteme Match-X.

Neben der Variation der Porengröße im Mikrometer- und Nanometerbereich kann die Nanotechnologie mit Platin-Nanopartikeln in der Luft-Kathode zum Einsatz kommen.

Abbildung 102:  
Schichtaufbau der Zink/Luft-Mikrobrennstoffzelle (ZiLuZell). (Quelle: Verbundprojekt Zink/Luft-Mikrobrennstoffzelle (ZiLuZell), www.ziluzell.de)



# 5 Innovationspotenziale für hessische Unternehmen

Kapitel 2 skizziert die Applikationsmöglichkeiten, Stückzahlen und Märkte. Kapitel 3 beschreibt die Möglichkeiten der Mikro-Nano-Integration aus technischer Sicht und Kapitel 4 die Anwendung in neuen MNI-Produkten. Nun gilt für die hessischen Unternehmen: **Chancen ergreifen!**

Entwicklungsschwerpunkte mit Innovationspotenzial in der Mikro-Nano-Integration sind laut VDI/VDE Innovation und Technik GmbH (VDI/VDE-IT), vgl. [Kamin2006]:

- Entwicklung und Anwendung von neuen Materialien und verbesserten Methoden für die Nutzung dieser Materialien und deren Integration in elektronische Systeme
- Entwicklung von Mikrosystemtechnik-kompatiblen kostengünstigen Nanotechnologien
- Nano-Polymerentechnologien insbesondere für Anwendungen in Sensorik, Optik, Photovoltaik und biologischen Anwendungen. Damit lassen sich auch großflächige Sensorsysteme realisieren.
- Einsatz von Nanotechnologien in Bio-Systemen
- Nano-Analytik und Nano-Tools für die Nanotechnologie.

Diese Liste lässt sich ergänzen mit:

- Weitergehende Miniaturisierung von Mikrosystem-Komponenten und Systemen
- Verbesserungen im Packaging und in der AVT
- Geräte und Methoden zur Qualitätssicherung.

Auf Basis dieser technologischen Ansätze sehen die Experten interessante Möglichkeiten in der Entwicklung von

- Neuen Sensorprinzipien für Low-Power-Sensoren, insbesondere für Strömungssensoren oder chemische Sensoren
- Verbesserung bestehender Sensoren durch den Einsatz von Nanomaterialien in Richtung erhöhter Genauigkeit, verminderter Energieaufnahme und schnellerer Ansprechgeschwindigkeiten
- Ultra-miniaturisierte Sensorknoten für drahtlose Sensornetzwerke
- Smart Systems für den Einsatz in neuen Anwendungsgebieten etwa in den Bereichen Beleuchtung, Medizin, Landwirtschaft, Sicherheitsüberwachungen, Nahrungsmittelkontrolle, Sport und Wellness, Kleidung, Logistik, Betreuung von Älteren und Behinderten.

## 5.1 Zusammenarbeit in Hessen

Sowohl die Mikrotechnologie als auch die Nanotechnologie sind Querschnittstechnologien. Daher sind für die Forschung und die Umsetzung in Produkte **interdisziplinäre Teams** wichtig. Zusammenarbeiten müssen unter anderem Chemiker, Physiker, Biologen, Designer, Elektrotechniker und Maschinenbauer, Verfahrenstechniker, Fertigungs- und Anwendungsexperten.

Insbesondere in der Frühphase der Produktentwicklung oder Erprobung sind nicht alle Erfahrungen im Haus verfügbar. Hier hilft eine Kooperation zwischen Experten aus Industrie und akademischen Institutionen. Gerade bei räumlicher Nähe ist diese Zusammenarbeit sehr effizient. Kurze Wege ermöglichen mehr persönliche Kontakte und bringen Projekte voran.

Im Bereich Mikro-Nano-Integration tätige Industrieunternehmen und Zulieferer in Hessen sowie Experten an hessischen Forschungseinrichtungen sind in Kapitel 7 aufgeführt.

Nützliche Tipps für erfolgreiche Kooperationen von kleinen und mittleren Nanotechnologie-Unternehmen gibt die im Rahmen der Schriftenreihe Hessen-Nanotech erschienene Broschüre „Nanotech-Kooperationen“ (Band 12).

## Mikro-Nano-Integration in Hessen

Hessen gehört mit seinen innovativen Unternehmen und einem breiten Angebot an wissenschaftlichen Einrichtungen zu den wirtschaftsstärksten Regionen in Europa. Hier befinden sich viele Dienstleistungsunternehmen und im industriellen Sektor Unternehmen aus den Branchen Automation, Automobilindustrie, Chemie, Pharmazie, Biotechnologie, Gesundheitswirtschaft und Materialien. Sie alle tragen mit ihren Produktionsstätten und Forschungszentren zur Zukunftsfähigkeit der Region bei, Abbildung 103.

In Hessen und dem angrenzenden Rhein-Main-Neckar-Raum sind mehr als 300 Unternehmen in den Bereichen Mikrosystemtechnik, Nanotechnologie, Oberflächentechnik und optische Techniken tätig, [Kreuziger2007]. Sie arbeiten eng mit etwa 100 Arbeitsgruppen an hessischen Hochschulen sowie den Experten in den Forschungsinstituten der Region zusammen.

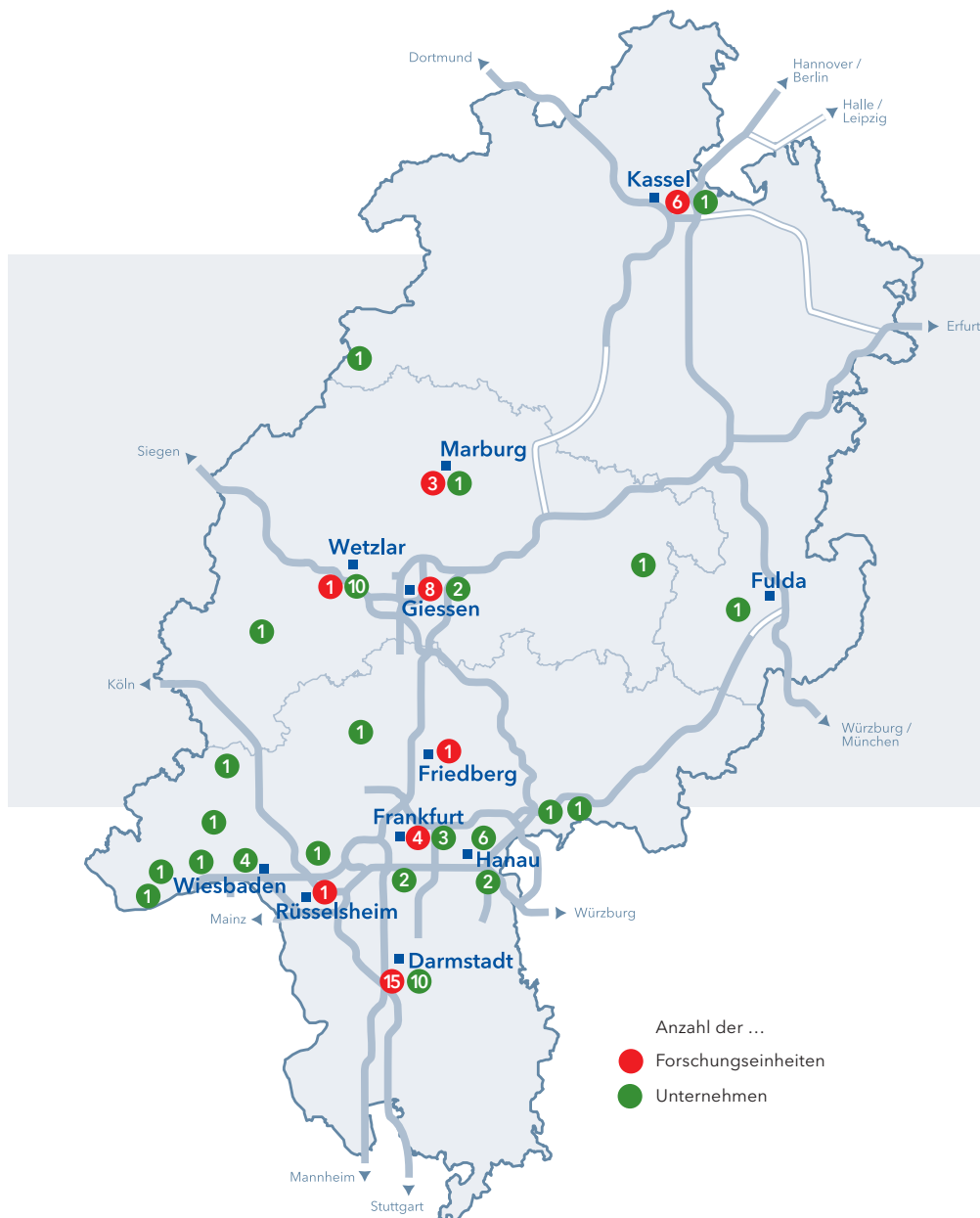


Abbildung 103: Standorte von Unternehmen und Forschungseinheiten in der Mikro-Nano-Integration in Hessen.

## 5.2 Auswahl größerer Forschungszusammenschlüsse mit Relevanz für die Mikro-Nano-Integration

### 5.2.1 Arbeitskreis Mikro-Nano-Integration im Mikrosystemtechnik-Netzwerk Rhein-Main

Das mst-Netzwerk Rhein-Main e.V. ist eine junge Initiative (Gründung 2004) mit über 30 Mitgliedern im Rhein-Main-Gebiet. Dazu gehören Hersteller, Anwender und Zulieferer der Mikrosystemtechnik sowie eine Reihe von herausragenden Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Ziel ist es, die Mikrosystemtechnik in der Region zu fördern, die gemeinsame Forschung zu intensivieren und den Wissens-Transfer von der Wissenschaft in die Industrie zu stärken, siehe Kapitel 7.3.

Die Mitglieder des Arbeitskreises Mikro-Nano-Integration wollen den Einsatzbereich von Mikrosystemen erweitern sowie neue und verbesserte Mikrosysteme und Sensoren realisieren.

Der Arbeitskreis ist eng vernetzt mit dem Fachausschuss 4.7 „Mikro-Nano-Integration“ der bundesweit organisierten VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM).

[www.mst-netzwerk.de/arbeitskreise/mikro-nano-integration/](http://www.mst-netzwerk.de/arbeitskreise/mikro-nano-integration/)



### 5.2.2 MerckLab an der Technischen Universität Darmstadt

Das MerckLab an der Technischen Universität Darmstadt ist ein Gemeinschafts-Forschungslabor. Dort werden Materialien für zukünftige Polymerbauelemente untersucht, insbesondere für RFID-Bauelemente. Hier arbeiten Forscher und Entwickler aus Universität und Industrie eng zusammen in den Bereichen Materialwissenschaften, Makromolekulare und Anorganische Chemie,

Drucktechnik und Mikroelektronische Systeme. Sie behandeln Fragen von der Grundlagenforschung bis hin zu direkten Anwendungen von Radio Frequency Identification RFID-Komponenten und Materialien. Der Partner Merck KGaA ist ein weltweit agierender Zulieferer von Spezialchemikalien, führend bei den Flüssigkristallen für Display-Anwendungen.



### 5.2.3 Forschungsschwerpunkt der Technischen Universität Darmstadt: „Nanomaterialien: Innovation durch molekulare Konzepte“

Der Forschungsschwerpunkt „Nanomaterialien: Innovation durch molekulare Konzepte“ an der TU Darmstadt bündelt seit Oktober 2006 vorhandene Aktivitäten im Bereich Nanowissenschaften. Die Mitglieder kommen aus fünf Fachbereichen: Chemie, Physik, Biologie, Material- und Geowissenschaften, Elektrotechnik und Informationstechnik. Dort arbeitet man an der Erschließung neuartiger Forschungskonzepte unter Verwendung von nanostrukturierten Materialien an den Schnittstellen der beteiligten Fachdisziplinen. Die Forschung behandelt nanoskalige Materialien und Methoden, mit deren Hilfe innovative Katalyse- und Sensorkonzepte für die ressourcenschonende und energieeffiziente Stoffumwandlung realisiert werden können. In einem DFG-Schwerpunktprogramm geht es um die Erforschung nanoskaliger Materialien, die aus molekularen Bausteinen erzeugt werden.

In mehreren Arbeitsgruppen (Institut EMK und Hochfrequenztechnik des Fachbereichs ETiT, siehe Kapitel 7 Anhang) stehen Reinraumlabor mit über 200 m<sup>2</sup> zur Mikrostrukturierung, Mikrotiefenlithographie, Beschichtungstechnologie (PVD, CVD, MOCVD, Mikrogalvanik) und Mikroätztechnik zur Verfügung.

In zwei vom BMBF geförderten Projekten werden Mikro-Nano-Integrationsverfahren für die Gassensorik untersucht. Die beiden Projekte MNI-CNTs und INANOMIK sind im Kapitel 4 dargestellt.

[www.nanotud.org](http://www.nanotud.org)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



### 5.2.4 GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Die GSI in Darmstadt ist eine Forschungseinrichtung von internationalem Rang. Ein Jahresbudget von 85 Millionen Euro sowie 1050 Mitarbeiter, davon 300 Wissenschaftler und Ingenieure, sprechen für sich. Neben Kern- und Atomphysik, Tumorthherapie und Plasmaforschung wird hier auch im Bereich Materialforschung gearbeitet.

Nanodrähten in Nanokanälen. Die Forscher transportieren ihre Ergebnisse auch in Anwendungen wie Sensoren, Katalysatoren, Filter und elektronische Bauteile.

[www.gsi.de](http://www.gsi.de)

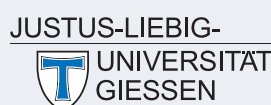


### 5.2.5 Mikro- und Nanostrukturierungslabor an der Justus-Liebig Universität Gießen

Ein neues Mikro- und Nanostrukturierungslabor wurde im Juni 2008 als zentrale Einrichtung für die Nano-, Mikro- und Materialwissenschaften in Mittelhessen eröffnet. Es steht eine zeitgemäße Ausrüstung im Wert von rund zwei Millionen Euro zur Verfügung. Auf einer Reinraumfläche von 41 m<sup>2</sup> bietet das Labor unter anderem Photolithographie (Maskaligner MA 56), Rasterelektronenmikroskopie mit Elektronenstrahlithographie (JEOL JSM 7001F), Aufdampfanlagen, Strukturübertragung mit Trockenätzen (Reaktivionenäzter)

und Nassätzen (Abzug, Nassbänke). Erforscht werden die Strukturerzeugung (Top-Down und Bottom-Up) sowie die Mikro-Nano-Integration.

[www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/einrichtungen/mikro-und-nanostrukturierungslabor](http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/einrichtungen/mikro-und-nanostrukturierungslabor)



## 5.2.6 Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik INA

Das INA forscht an neuartigen Nanostrukturierungsverfahren und deren Anwendungspotenzialen. Es werden Fragestellungen im Bereich der Nanostrukturtechnologien, der Nanosystemtechnik, der Nanomechanik, der Nanosensorik, der Nanoanalytik, der Optoelektronik, der Nanophotonik und der Nanoelektronik und letztendlich der Integration von Nanostrukturen in Mikrobauteile bearbeitet. Dazu stehen 400 m<sup>2</sup> Reinraumlaborfläche bis hin zur Klasse 1 zur Verfügung.

[www.ina-kassel.de](http://www.ina-kassel.de)

U N I K A S S E L  
V E R S I T Ä T



## 5.2.7 Photonik Zentrum Hessen in Wetzlar AG

Das Photonik Zentrum Hessen ist eine kleine Aktiengesellschaft mit 38 Aktionären und versteht sich als Mittelpunkt eines Netzwerkes für Firmen und Hochschulen aus dem Bereich Optik, Optoelektronik, Sensorik und Feinmechanik. Einer der unternehmerischen Schwerpunkte des PZH liegt in dem Geschäftsbereich NanoImprint (Technologie und Produktion). In dem firmeneigenen Reinraum wird die NanoImprint-Anlage für die kosteneffiziente Kleinserienfertigung mikro- und nanostrukturierter optischer Komponenten mit Serienstückzahlen von einigen 1 000 bis 10 000 St./Jahr eingesetzt. Mit der Maschine ist deren Fertigung mit außergewöhnlicher Präzision bis hinunter zu wenigen Nanometern möglich. Das Produktportfolio

des PZH umfasst: Optische Beugungsgitter, maßgeschneiderte Diffusoren, Wellenleiterstrukturen, Diffraktive Optische Elemente (DOEs), Mikrolinsen und Mikrolinsenarrays. Deren mögliche Anwendungsbereiche liegen in der Laserstrahlformung, in der Spektroskopie, in der Biosensorik oder auch in der Telekommunikation.

[www.pzh-wetzlar.de](http://www.pzh-wetzlar.de)



## 5.2.8 Institut für Mikrotechnologien IMtech der Fachhochschule Wiesbaden

In diesem 2004 gegründeten Institut werden Forschung und Lehre sowie gleichzeitig Studien- und Diplomarbeiten bzw. Master-Arbeiten durchgeführt. Auch an industriefinanzierten oder von DFG/BMBF geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekten arbeitet das interdisziplinäre Team. Themen sind die Entwicklung von Mikrosensoren und Mikroaktoren, Technologien zur 2D- und 3D-Mikrostrukturierung von Funktionsschichten und diffraktiven mikrooptischen Bauelementen wie Mikrolinsen oder Phasenrelief-

Hologrammen. Für Unternehmen und deren Mitarbeiter werden auch Qualifizierungskurse zur Mikrotechnologie angeboten.

[www.imtech-fhw.org](http://www.imtech-fhw.org)



# 6 Forschungsförderung

## 6.1 Forschungsprogramme

Deutschland ist ein relativ rohstoffarmes Land mit einer traditionell forschungsintensiven Industrie. So ist Deutschland im weltweiten Vergleich ein starker Exporteur von Automobilen, Maschinen, Chemieprodukten sowie Elektrotechnik- und Elektronik-Produkten. In all diesen und in vielen weiteren Branchen werden Sensoren und mechatronische Komponenten und Systeme benötigt. Es gibt daher eine langjährige Tradition in Deutschland und in Hessen, die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten nicht nur institutionell an Forschungsinstituten und an Hochschulen durchzuführen, sondern die Zusammenar-

beit von Industrie und Forschungsinstitutionen über spezifische Programme zu fördern. Denn durch gemeinsame Forschung werden Entwicklungen durchgeführt, die schließlich zu wirtschaftlichen Innovationen führen und Wirtschaftswachstum bewirken. Dies gilt für die Sensorik gleichermaßen wie für die Mikrosystemtechnik und deren jüngste Entwicklung, die Mikro-Nano-Integration. Eine Übersicht zu den unterschiedlichen Förderoptionen geben die folgenden Unterkapitel, vgl. [Tschulena1] und [Tschulena2].

## 6.2 Europäische Förderung

**Die Förderung von gemeinsamen Forschungsaktivitäten gehört zu den großen Aufgaben der Europäischen Union. Im 7. Rahmenprogramm sind für die Jahre 2007 bis 2013 die Weichen für eine Stärkung von europäischen Kooperationen in den 17 Mitgliedsländern gestellt worden.**

In diesem 7. Rahmenprogramm werden rund 50 Milliarden Euro für gemeinsame europäische Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in vier spezifischen Programmen bereitgestellt:

### 1 Zusammenarbeit (32,4 Milliarden Euro)

Damit soll Europas Führungsrolle in zehn Schlüsselthemen aufgebaut werden. Die Europäische Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung wird gefördert. Mindestens 15 Prozent der Mittel sollen kleine und mittlere Unternehmen (KMUs) erhalten.

### 2 Kapazitäten (4 Milliarden Euro)

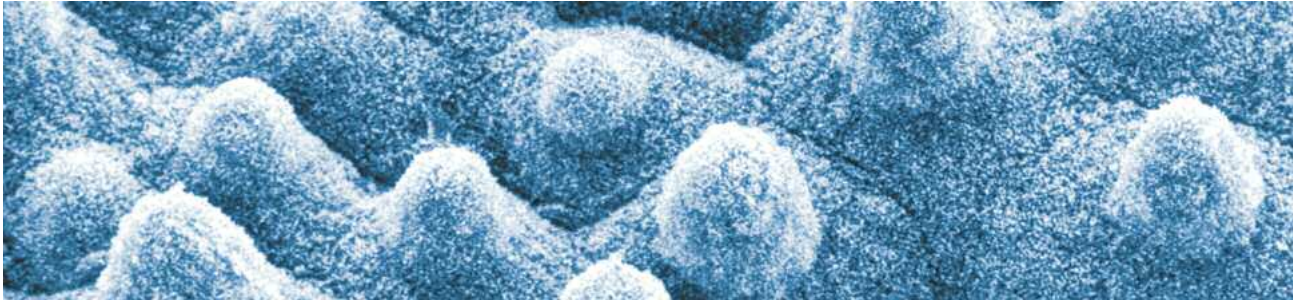
Eine weltweit herausragende Infrastruktur für europäische Forscher soll aufgebaut werden. Hier gibt es ein spezifisches Programm „Forschung für KMUs“.

### 3 Ideen (7,5 Milliarden Euro)

Hier wird ein neuer europäischer Forschungsrat zur Stärkung von Europas Grundlagenwissenschaften beitragen.

### 4 Menschen (4,7 Milliarden Euro)

Dies soll zur Unterstützung einer europäischen Forschungskarriere ausgegeben werden.



Quelle: Prof. Dr. Wilhelm Barthlott, Universität Bonn

Im **Programm „Zusammenarbeit“** gibt es für Sensorik- sowie Mikro- und Nanotechnologie-Interessenten einige relevante Themen in den sog. Herausforderungen, bzw. Schwerpunktprogrammen:

- 1 Robotik, Kognitive Systeme, Interaktion
- 2 Komponenten, Systeme, Engineering, mit
  - Nanoelektronische Bauteile der nächsten Generation
  - Organische und großflächige Elektronik- und Display-Systeme
  - Photonische Komponenten und Teilsysteme
  - Mikro- / Nanosysteme, smarte miniaturisierte Systeme.
- 5 Nachhaltige und personalisierte Gesundheitsfürsorge
- 6 Mobilität, nachhaltige Umwelt- und Energieeffizienz.

In jeder dieser Herausforderungen werden in den spezifischen Ausschreibungsrunden (ein bis zwei Mal pro Jahr) etwa 30 Millionen Euro bis über 90 Millionen Euro als Fördermittel zur Verfügung gestellt.

Für Forschungsvorhaben im Programm Zusammenarbeit gibt es themengebundene **„Aufrufe zur Beteiligung an Projektvorschlägen“** („Call for Proposals“), an denen sich Projekte von europäischen Teams mit mindestens drei Partnern aus drei EU-Ländern beteiligen können. Dabei beteiligt sich die EU immer nur an einem Teil der Projektkosten. Die maximale Förderquote für F&E-Aktivitäten liegt in der Regel bei 50 Prozent, für KMUs bei bis zu 75 Prozent der Kosten.

Die eingereichten Projektvorschläge werden jeweils von Gutachtern nach festgelegten Auswahlkriterien bewertet. Es entscheiden dabei die Innovationsqualität, das Team und das Management sowie die Mobilisierung der Mittel.

Die nächsten relevanten „Call for Proposals“ sind Call 4 und 5, die im **ICT-Programm 2009 und 2010** die Themen **„Nanoelectronics Technology“**, **„Photonics“**, **„Organic Photonics and other Disruptive Photonics Technologies“**, **„Microsystems and Smart Miniaturized Systems“** und **„Flexible, Organic and Large Area Electronics“** als Themenschwerpunkte enthalten werden. Ausführliche aktuelle Informationen dazu sind erhältlich über <http://cordis.europa.eu/de>.

Im **Programm „Kapazitäten“** werden Mittel bereit gestellt, um die europäische Forschungsinfrastruktur zu stärken, Forschung zugunsten von kleineren und mittleren Unternehmen durchzuführen, mehr Wissenschaft in die Gesellschaft zu bringen sowie die internationale Zusammenarbeit zu fördern.

Im **Programm „Ideen“** wird „Forschung an der Grenze des Wissens“, also Grundlagenforschung gefördert und exzellente Wissenschaftlerteams werden unterstützt. Dies wird von dem neu gegründeten eigenständigen Europäischen Forschungsrat (European Research Council - ERC) organisiert. Hier sollen in den nächsten Jahren bis zu 500 Excellence-Teams pro Jahr gefördert werden.

Im **Programm „Menschen“** werden Maßnahmen zur Förderung und Laufbahnentwicklung von Forschenden unterstützt, die als Marie-Curie-Maßnahmen bezeichnet werden, mit Ausbildungsnetzwerken für die Doktorandenausbildung, Individual-Stipendien für Post-Doktoranden, mit Unterstützung von Partnerschaften zwischen Industrie und Akademie, internationale Zusammenarbeit sowie Stipendien für Nachwuchswissenschaftler aus Drittstaaten.

Kontaktstelle für Informationen zu EU-Förderprogrammen ist das Enterprise Europe Network Hessen, [www.een-hessen.de](http://www.een-hessen.de).

## 6.3 Förderung in Deutschland

Die Förderung von gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekten durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie hat in Deutschland eine lange Tradition.

Das **Bundesministerium für Bildung und Forschung** (BMBF) hat 2007 zum ersten Mal eine nationale **„High-Tech-Strategie für Deutschland“** für die Innovationspolitik formuliert. Darin sind 17 Technologie- und Anwendungsfelder definiert worden, die für die zukünftigen Forschungsaktivitäten in Deutschland wesentlich werden ([www.ideen-zuenden.de](http://www.ideen-zuenden.de)), Abbildung 104. Für Maßnahmen und Themen der Hightech-Strategie stehen von 2006 bis 2009 gut 14 Milliarden Euro bereit. Für die Recherche der Forschungsergebnisse sowie für Anknüpfungspunkte für zukünftige Projekte im Rahmen einer neuen Förderstrategie lohnt sich ein Blick auf die laufende Förderlinie.

Abbildung 104:

Die 17 Innovationsfelder der deutschen Hightech-Strategie. (Quelle: BMBF: Die 17 Innovationsfelder der deutschen Hightech-Strategie) Hervorgehoben: die Kernfelder der Mikro-Nano-Integration.



Für die Mikro-Nano-Integration (MNI) und Sensorik kommen insbesondere die Technologieschwerpunkte Mikrosystemtechnik, Nanotechnologie, Biotechnologie, sowie deren Anwendungen, insbesondere in den Bereichen Energie, Medizin, Fahrzeug und Umwelt in Frage.

Die laufenden Förderprogramme des BMBF haben ein Gesamtbudget, das 2007 bei 8,5 Milliarden Euro lag. Davon wurden 2,2 Milliarden Euro (26 Prozent) für Technologie- und Innovationsförderung und 1,4 Milliarden Euro (17 Prozent) für Forschungs- und Entwicklung zur Daseinsvorsorge reserviert. Dies teilt sich auf mehrere sogenannte Rahmenprogramme auf. Für die MNI relevant sind:

- **Rahmenprogramm Mikrosystemtechnik:**  
Förderung mit 260 Millionen Euro  
Projekträger: VDI/VDE Innovation und Technik GmbH (VDI/VDE-IT), Berlin
- **Rahmenprogramm Optische Technologien:**  
Förderung 310 Millionen Euro  
Projekträger: VDI Technologiezentrum GmbH (VDI-TZ), Düsseldorf
- **Rahmenprogramm Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft (WING), Nanomaterialien, neue Werkstoffe:**  
Förderung mit 420 Millionen Euro  
Projekträger: Projekträger in der Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ), Jülich
- **Rahmenprogramm Forschung für die Produktion von Morgen, Mikrotechnische Produktion:**  
Förderung mit 250 Millionen Euro  
Projekträger: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Karlsruhe
- **Förderschwerpunkt Nanotechnologie:**  
Förderung mit 640 Millionen Euro  
Projekträger: VDI-TZ, Düsseldorf
- **Sicherheitsforschung:**  
Projekträger: VDI-TZ, Düsseldorf
- **IKT, Elektronik und Elektroniksysteme:**  
Projekträger: VDI-TZ, Düsseldorf

In diesen Förderschwerpunkten gibt es jährlich einige Bekanntmachungen zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in spezifischen Themenfeldern.

**KMU-Innovativ** ist eine neue Förderberatung des BMBF mit Angeboten über die Beratung zu den Förderprogrammen, mit Informationen über Verfahrenswege, zur Vermittlung an die relevanten Projektträger, bis hin zur Beratung zur Existenzgründung. Für die Laufzeit von 2007 bis 2009 sind 300 Millionen Euro Förderbudget geplant. Es gibt dafür standardisierte Skizzen und Anträge. Die Skizzen sollen innerhalb von zwei Monaten bzw. an zwei bis drei jährlichen Stichtagen beurteilt werden.

- ▶ [www.foerderinfo.bund.de](http://www.foerderinfo.bund.de)
- ▶ [www.kmu-innovativ.de](http://www.kmu-innovativ.de)

#### Themen-Schwerpunkte von KMU-Innovativ:

- Biotechnologie
- Nanotechnologie
- Informations- und Kommunikationstechnologien
- Produktionstechnologie
- Technologien der Ressourcen- und Energieeffizienz
- Optische Technologien
- weitere werden folgen.

Anfragen werden an die jeweiligen Projektträger weitergeleitet, etwa an den Projektträger VDI-TZ in Düsseldorf für die Themenfelder Elektronik, Kommunikation, Nanochance und Optische Technologien sowie VDI/VDE-IT für die Mikrosystemtechnik.

Das **Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie** (BMWi) unterstützt themenoffene Forschungs- und Entwicklungs-Projekte (F&E) zur Entwicklung innovativer Produkte, Verfahren oder technischer Dienstleistungen. Im Mittelstandsprogramm des BMWi stehen 2009 rund 673 Millionen Euro zur Verfügung. Ziel dieses Förderbereiches ist es, kleinen und mittleren Unternehmen Zuschüsse und zinsgünstige Darlehen zu gewähren, damit sie Forschungs- und Innovationsprojekte finanzieren können.

Das **Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand** (ZIM, seit 2008), ist zuständig für die Unterstützung von

- F&E-Kooperationen zwischen KMU
- F&E-Kooperationen zwischen KMU und Forschungseinrichtungen
- Technologieübergreifenden Verbundprojekten von mindestens vier KMU und zwei Forschungseinrichtungen

- F&E-Aufträge von KMU an F&E-Einrichtungen
- Einzelbetrieblichen Einstiegsprojekten bisher nicht innovierender KMU.

Seit Februar 2009 können auch Unternehmen mit bis zu 1 000 Mitarbeitern unterstützt werden. Bei Kooperationsprojekten sind anteilige Zuschüsse vorgesehen in Höhe von 35 Prozent bis 50 Prozent (für KMU) und bis zu 100 Prozent (für Forschungseinrichtungen).

Zur Umsetzung der F&E-Projekte können zusätzlich auch innovationsunterstützende Dienst- und Beratungsleistungen (z. B. Marktstudien, Patentrecherchen) gefördert werden. Daneben können in sogenannten Netzwerkprojekten die Management- und

Organisationsdienstleistungen von innovativen Netzwerken unterstützt werden.

Ansprechpartner für das ZIM-Programm des BMWi ist die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. AiF (F&E-Kooperationen) und VDI/VDE-IT (Netzwerkprojekte); [www.zim-bmwi.de](http://www.zim-bmwi.de).

Daneben kann die Gründung von innovativen Unternehmen unterstützt werden ([www.exist.de](http://www.exist.de)), sowie die Anmeldung von Patenten und anderen gewerblichen Schutzrechten sowie die Entwicklung intelligenter Patentstrategien ([www.signo-deutschland.de](http://www.signo-deutschland.de)).

## 6.4 Förderung in Hessen

Das Land Hessen unterstützt im Rahmen seiner Innovationsfördermaßnahmen insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen bei forschungs- und entwicklungsintensiven Verbundprojekten mit hessischen Hochschulen. Zu allen Fragen der Existenzgründung, Wirtschaftsförderung und des Technologietransfers steht die HA Hessen Agentur GmbH zur Verfügung, vgl. [HMWVL1] und [HMWVL2].

Im Rahmen von **Hessen Modellprojekte** werden derzeit drei Förderangebote des Hessischen Wirtschafts- und des Hessischen Wissenschaftsministeriums betreut, durch die Entwicklungen insbesondere in den folgenden Bereichen gefördert werden:

- Werkstoffe, Materialien und Oberflächentechnologien, inklusive Nanotechnologie
- Mikrosystemtechniken
- Optische Technologien
- Produktions- und Automatisierungstechnologien, Maschinenbau und Mechatronik
- Verkehrswesen, inkl. Telematik und neuartigen Verkehrskonzepten
- Umwelttechnologien, hier insbesondere regenerative und klimafreundliche Energiekonzepte und Brennstoffzellentechnologien
- Biotechnologie
- Medizintechnik, insbesondere Entwicklung neuer Geräte, Diagnostik und Werkstoffe

In Einzelfällen werden auch Projekte ohne Einbeziehung eines weiteren Partners unterstützt. Hierzu stehen EU-Mittel zur Verfügung, die durch das Land Hessen kofinanziert werden. Projektträger von Hessen Modellprojekte ist die HA Hessen Agentur GmbH.

[www.hessen-modellprojekte.de](http://www.hessen-modellprojekte.de)

Das **Hessische Wirtschaftsministerium** und die **Europäische Union** förderten außerdem Unternehmen und Netzwerke in den Bereichen Nanotechnologie und angrenzender Technologien. Im Rahmen einer durch die Regionalförderung der Europäischen Union kofinanzierten Förderinitiative **„Nanotechnologie im Dienste der regionalen Wirtschaftsentwicklung in Hessen (NanoHE)“** wurden zwischen 2006 und 2008 insgesamt rund fünf Millionen Euro für hessische Unternehmen bereitgestellt.

Dabei gefördert wurden unter anderem nanotechnologische Modell- und Pilotprojekte, die sich etwa mit der Herstellung von Nanokomponenten, mit Anwendungen von Nanomaterialien, mit Lernhilfen (Experimentierkoffer für Schulen), sowie mit Technologietransfer und mit Netzwerkaktivitäten befassen.

Zu den Ergebnissen der Fördermaßnahme zählen auch die Professionalisierung des mst-Netzwerks Rhein-Main e.V. und die erfolgreiche Einrichtung des Arbeitskreises Mikro-Nano-Integration, dessen Arbeiten und Projekte ein Teil der Wissensbasis für die vorliegende Broschüre bilden.

Ansprechpartner für NanoHE sind Sebastian Hummel, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung und Alexander Bracht, Leiter der Aktionslinie Hessen-Nanotech und Nanotech-Lotse für Unternehmen. Künftige Nanotech-Projekte können beispielsweise durch den Förderbereich Hessen Modellprojekte (s. links) bezuschusst werden.

[www.nanohe.de](http://www.nanohe.de)



2008 wurde vom hessischen Wirtschaftsministerium die Initiative **LOEWE - Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz** gestartet. Nach einer Anlauffinanzierung im Jahre 2008 und 2009 sehen die Planungen vor, ab dem Jahr 2010 jährlich 90 Millionen Euro zur Verfügung zu stellen. Hier werden unterstützt:

#### ■ Förderlinie 1:

LOEWE-Zentren (thematisch fokussierte Forschungszentren in bzw. mit Hochschulen). Ziel ist hier die Förderung von etwa zehn Zentren in Hessen mit einem Gesamtvolumen von etwa 50 Millionen Euro pro Jahr ab 2010.

#### ■ Förderlinie 2:

LOEWE-Schwerpunkte an hessischen Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Ab 2010 sind hier 15 bis 20 Schwerpunkte vorgesehen, die mit Mitteln von etwa 20 Millionen Euro pro Jahr ab 2010 unterstützt werden sollen.

#### ■ Förderlinie 3:

LOEWE-KMU-Verbundvorhaben. Hier werden Modell- und Pilotprojekte zwischen KMU und Hochschulen gefördert, um innovative Verfahren und Produkte oder Dienstleistungen auf den Markt zu bringen. Die Beantragung erfolgt zweistufig (Skizze/Vollantrag). Hier sollen ab 2010 etwa neun Millionen Euro pro Jahr zur Verfügung stehen.

Der Bereich der Mikro-Nano-Integration bietet sich an für Verbundvorhaben zwischen Hochschulen und Industrie, damit neues Wissen in den Unternehmen generiert wird bzw. der Wissenstransfer zwischen KMUs und Hochschulen sowie außeruniversitären Einrichtungen beschleunigt wird.

Die HA Hessen Agentur GmbH ist als Projektträger des Hessischen Ministeriums für Wissenschaft und Kunst (HMWK) zuständig für die administrative Betreuung der „Förderlinie 3: LOEWE-KMU-Verbundvorhaben“. Hier stellt das Land Hessen in den ersten drei Jahren von 2008 bis 2010 insgesamt 16 Millionen Euro an Fördermitteln für etwa 50 Projekte zur Verfügung.

## 6.5 Relevante Ansprechpartner für die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

### Modell- und Pilotprojekte des Landes Hessen

[www.hessen-modellprojekte.de](http://www.hessen-modellprojekte.de)

HA Hessen Agentur GmbH  
Frank Syring, Projektleiter Hessen Modellprojekte

- LOEWE Förderlinie 3
- MPP: KMU-Modell- und Pilotprojekte
- Modellhafte Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Schwerpunkt im Automotivebereich

### Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Projekträger im DLR, [www.dlr.de](http://www.dlr.de)

- Projekträgerschaft des BMBF für die Bereiche:
  - Informations- und Kommunikationstechnologien
  - Gesundheitsforschung
  - Umweltforschung und -technik
- Nationale Kontaktstellen für das Forschungsrahmenprogramm der EU in den Bereichen Informations- und Kommunikationstechnologien und Lebenswissenschaften
- Projekträgerschaft des BMWi für die Bereiche:
  - Luftfahrtforschung
- Nationale Kontaktstellen für das Forschungsrahmenprogramm der EU im Bereich Luftfahrtforschung

### Forschungszentrum Jülich GmbH

Projekträger Jülich, [www.fz-juelich.de](http://www.fz-juelich.de)

- Projekträgerschaft des BMBF für die Bereiche:
  - Biotechnologie
  - Werkstoffinnovationen
  - Forschung für die Nachhaltigkeit
  - Grundlagenforschung Energie
- Nationale Kontaktstellen für das Forschungsrahmenprogramm der EU in den Bereichen Werkstoffe und Umwelt
- Projekträgerschaft des BMWi für die Bereiche:
  - Rationelle Energieverwendung
  - Technologien zur Energieumwandlung
  - Schifffahrt- und Meerestechnik
  - EXIST – Existenzgründungen aus der Wirtschaft
  - Verwertungsoffensive
- Nationale Kontaktstellen für das Forschungsrahmenprogramm der EU in den Bereichen Energie, Schifffahrt und Meerestechnik
- Projekträgerschaft des BMU für den Bereich:
  - Erneuerbare Energien

### Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Projekträger im FZK, [www.fzk.de](http://www.fzk.de)

- Projekträgerschaft für die Bereiche:
  - Produktionstechnologien
  - Wassertechnologie und Entsorgung
- Nationale Kontaktstellen für das Forschungsrahmenprogramm der EU in den Bereichen Produktion, Wassertechnologie und Entsorgung

### VDI Technologiezentrum GmbH

[www.vditz.de](http://www.vditz.de)

- Projekträgerschaft für die Bereiche:
  - Nanotechnologien
  - Laser- und Optikforschung
- Nationale Kontaktstellen für das Forschungsrahmenprogramm der EU im Bereich Nanotechnologie

### VDI/VDE Innovation und Technik GmbH

[www.vdivde-it.de](http://www.vdivde-it.de)

- Projekträgerschaft des BMBF für die Bereiche:
  - Mikrosystemtechnik
  - Innovations- und Technikanalyse
- Projekträgerschaft des BMWi für die Bereiche:
  - InnoNet – Förderung von innovativen Netzwerken
  - Gründerwettbewerb Multimedia
- Nationale Kontaktstelle für das Forschungsrahmenprogramm der EU im Bereich Mikrosystemtechnik

### Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

[www.aif.de](http://www.aif.de)

- Projekträgerschaft des BMBF für den Bereich: Forschung an Fachhochschulen
- Projekträgerschaft des BMWi für die Bereiche: Programm „Innovationskompetenz mittelständischer Unternehmen (PPO INNO II)“, Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)

### Beratung zu EU-Förderprogrammen

[www.een-hessen.de](http://www.een-hessen.de)

Enterprise Europe Network Hessen  
Hotline: 0611 774-8998  
E-Mail: [een.hessen@hessen-agentur.de](mailto:een.hessen@hessen-agentur.de)

## 7 Anhang

### 7.1 Auswahl von Unternehmen in Hessen im Bereich Mikro-Nano-Integration

Weitere Nanotechnologie-Unternehmen finden Sie unter [www.nanoportal-hessen.de/brancheninfo/unternehmen](http://www.nanoportal-hessen.de/brancheninfo/unternehmen)

#### 7.1.1 Sensorik-Firmen

##### Corrsys-Datron GmbH, Wetzlar

**Produkte:** Sensoren für Fahrzeugtests, insbesondere für berührungslose Geschwindigkeitsmessungen (optische, GPS, Mikrowellen, mechanische)  
**MNI-Aktivitäten:** Optische Gitter als Sensorbausteine für Farb-, 3-D u. Bildsensorik, Nanogitter für Aperturstreuer (künstliche Augen, Korrelatoren, Bildverarbeitung)

[www.corrsys-datron.com](http://www.corrsys-datron.com)

##### CORRSYS 3D Sensors AG, Wetzlar

**Produkte:** Optische Schienenfahrzeug-Sensoren (Rail Sensors), Industriesensorik: Längen- und Geschwindigkeitssensorik, Datenerfassung  
**MNI-Aktivitäten:** Integration von Nanostrukturen in Kameraaufbauten für die 3-D-Kamerasensorik

[www.corrsys3d.com](http://www.corrsys3d.com)

##### Heimann Sensor GmbH, Eltville

**Produkte:** Thermopiles für Messung von Infrarot-Strahlung  
**MNI-Aktivitäten:** Untersuchungen zur Nutzung von Nanoschichten und Nanostrukturen

[www.heimannsensor.com](http://www.heimannsensor.com)

##### Helmut Hund GmbH, Wetzlar

**Produkte:** Mikroskope, Messtechnik allgemein und insbesondere Umweltmesstechnik, Rastertunnelmikroskop, Optikteile, Elektronikbaugruppen, Kunststoff-Spritzgusstechnik, Flexible Lichtleittechnik

[www.hund.de](http://www.hund.de)

##### Heraeus Holding GmbH, Hanau

**Produkte:** Temperatursensoren von Heraeus ElectroNite N.V. (Weltmarktführer von Sensoren für die Stahlindustrie), bzw. Heraeus Sensor Technology GmbH: Platin-Dünnschicht-Temperatursensoren, Quarzglas von der Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG, UV-Strahler von der Heraeus Noblelight GmbH, Zahnprodukte, Edelmetalle.

[www.heraeus.de](http://www.heraeus.de)

##### Nanoscale Systems GmbH, Darmstadt

**Produkte:** Spezielsensoren und Nanospitzen erzeugt mit Elektronen- und Ionenstrahl-induzierter Deposition EBID und IBID  
**MNI-Aktivitäten:** Mikrostrukturen, etwa für Nanoanalytik

[www.nanoss.de](http://www.nanoss.de)

##### Perkin Elmer Optoelectronics GmbH & Co. KG, Wiesbaden

**Produkte:** Optoelektronische Bauelemente, Sensoren, Thermopiles  
**MNI-Aktivitäten:** Untersuchungen zur Nutzung von Nanoschichten und Nanostrukturen

[www.perkinelmer.com](http://www.perkinelmer.com)

##### Sensitec GmbH, Lahnau

**Produkte:** AMR- und GMR-Sensoren für Positions-, Längen-, Winkel-, Drehzahl- und Strommessung  
**MNI-Aktivitäten:** Dünnschichttechnik bis in den Nanometerbereich zur Fertigung von AMR- und GMR-Sensoren

[www.sensitec.com](http://www.sensitec.com)

##### Wachendorff Automation GmbH & Co. KG, Geisenheim

**Produkte:** Drehgeber, Winkel- und Längensensoren, Automatisierungstechnik

[www.wachendorff.de](http://www.wachendorff.de)

## 7.1.2 Analytik-Firmen

AQura GmbH, Hanau-Wolfgang

**Produkte:** Analysedienstleistungen

[www.aqura.de](http://www.aqura.de)

Cascade Scientific GmbH, Frankfurt

**Produkte:** Analytik für Silizium- und opto-elektronische Bauelemente zur Fertigungskontrolle

**MNI-Aktivitäten:** SIMS, TOF-SIMS, TXRF, XPS, AES, AFM-STM and SRP

[www.eaglabs.com/contact/germany.php](http://www.eaglabs.com/contact/germany.php)

Emerson Process Management GmbH & Co. OHG, Hasselroth

**Produkte:** Gasanalyse-Systeme

[www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com)

FEI Deutschland GmbH, Kassel

**Produkte:** REM, TEM, Ionenstrahl-Analytik

[www.fei.com](http://www.fei.com)

NanoAndMore GmbH, Wetzlar

**Produkte:** Rastersonde, CVD (Molekulare Gasphasenabscheidung)

[www.nanoandmore.com](http://www.nanoandmore.com)

Omicron Nanotechnologie GmbH, Taunusstein

**Produkte:** Nanoanalytik, Rastersonden

**MNI-Aktivitäten:** Kombinationsgeräte

[www.omicron.de](http://www.omicron.de)

Porotec GmbH, Hofheim/Ts.

**Produkte:** Geräte zur Charakterisierung von porösen Materialien

**MNI-Aktivitäten:** Gaspyknometer zur Ermittlung der wahren Dichte, bis zu Nano-Porenweiten

[www.porotec.de](http://www.porotec.de)

Stoe&Cie GmbH, Darmstadt

**Produkte:** Röntengeräte

**MNI-Aktivitäten:** Messtechnik zur Untersuchung von Nanopartikeln

[www.stocretec.de](http://www.stocretec.de)

## 7.1.3 Aktorik-Firmen

Fludicon GmbH, Darmstadt

**Produkte:** Elektrorheologische Flüssigkeiten, steuerbare Schwingungs-Dämpfersysteme

**MNI-Aktivitäten:** Elektrorheologische Flüssigkeiten

[www.fludicon.com](http://www.fludicon.com)

## 7.1.4 Elektronik-Firmen

Ebara Precision Machinery Europe GmbH, Hanau

**Produkte:** Pumpen, Elektronik-Fertigungsanlagen, Beschichtungs- und Poliersysteme

**MNI-Aktivitäten:** Maschinen zum Polieren (bis in den Nanometer-Bereich) und für Halbleiterherstellung

[www.ebara-europe.com](http://www.ebara-europe.com)

NaWoTec GmbH, Roßdorf

**Produkte:** Elektronenstrahl-Strukturierung, Maskenreparatur

**MNI-Aktivitäten:** Elektronenstrahl-induzierte chemische Reaktionen in Mikrodimensionen

[www.smt.zeiss.com/nawotec](http://www.smt.zeiss.com/nawotec)

## 7.1.5 Optik-Firmen

### Befort Wetzlar OHG, Wetzlar

**Produkte:** Präzisionsoptik, Beschichtungen  
**MNI-Aktivitäten:** Herstellung dielektrischer und metallischer Schichten

[www.befort-optic.com](http://www.befort-optic.com)

### Leica Microsystems GmbH, Wetzlar

**Produkte:** Optische Präzisionsgeräte für die Analyse von Mikrostrukturen  
**MNI-Aktivitäten:** Mit der 4Pi-Technologie für die Messung an lebenden Zellen, dem Fluoreszenz-Mikroskop Leica TCS 4PI für die optische Erfassung von Strukturen bis 100 nm und mit dem STED-Mikroskop konnten Details bis 20 nm visualisiert werden (Deutscher Zukunftspreis 2006)

[www.leica-microsystems.com](http://www.leica-microsystems.com)

### LOT Oriel GmbH & Co. KG, Darmstadt

**Produkte:** Vertrieb optischer Geräte  
**MNI-Aktivitäten:** Rastersonden, Mikrohärte-Prüfgerät, Nanospektroskopie, Partikelgrößen, Mikro-manipulatoren, Scheibenzentrifugen-Korngrößen-Analysator

[www.lot-oriel.de](http://www.lot-oriel.de)

### Nano-Optik Beschichtung GmbH, Löhnberg

**Produkte:** Optische Beschichtungen für Antireflexschichten, sowie dielektrische Schichten und metallische Spiegelschichten  
**MNI-Aktivitäten:** Einfach- und Multischichten, bis in den Nanometer-Dickenbereich

[www.nano-optik.de](http://www.nano-optik.de)

### Photonik Zentrum Hessen in Wetzlar AG, Wetzlar

**Produkte:** NanoImprint-Technologie, Bauwerksmonitoring, Innovative Produktentwicklungen, Optische Messtechnik  
**MNI-Aktivitäten:** Kostengünstige, industrielle Fertigung von mikro- und nanostrukturierten optischen Komponenten; Produktportfolio: bspw. optische Beugungsgitter, Wellenleiterstrukturen, maßgeschneiderte Diffusoren, Diffraktive Optische Elemente (DOEs); Kleinserienfertigung mit Serienstückzahlen von einigen 1000 bis 10 000 St./Jahr

[www.pzh-wetzlar.de](http://www.pzh-wetzlar.de)

### Precitec Optronik GmbH, Rodgau

**Produkte:** Messgeräte für Oberflächentopographie, Chromatisch kodierte und Weißlichtinterferometer  
**MNI-Aktivitäten:** Messgeräte mit Auflösung bis in den 10 nm-Bereich

[www.precitec-optronik.de](http://www.precitec-optronik.de)

### Taylor Hobson Precision GmbH, Wiesbaden

**Produkte:** Präzisionsmessgeräte für Oberflächenrauigkeit, Weißlichtinterferometer, elektrooptische Messtechnik von geometrischen Parametern  
**MNI-Aktivitäten:** Talysurf mit Auflösungen / Genauigkeiten bis in den Sub-Nanometer-Bereich

[www.taylor-hobson.com](http://www.taylor-hobson.com)

### ViaOptic GmbH, Wetzlar

**Produkte:** Präzisionsoptik in Kunststoff  
**MNI-Aktivitäten:** Genauigkeiten bis in den Sub-Mikrometerbereich

[www.viaoptic.de](http://www.viaoptic.de)

## 7.1.6 Life-Science, Biochemie, Medizintechnik

### Aquanova AG, Darmstadt

**Produkte:** Hydrophile Solubilisate  
**MNI-Aktivitäten:** Bioverfügbarkeit, Mikroverkapselung

[www.aquanova.de](http://www.aquanova.de)

### Cinvention AG, Wiesbaden

**Produkte:** Herstellung von Nanopartikeln, auf C-Basis, Nanokomposite  
**MNI-Aktivitäten:** Für Koronar-Stents, Biopharmaka, Zellkultur-basierte Herstellung von pharmazeutischen Wirkstoffen

[www.cinvention.com](http://www.cinvention.com)

### EpiRet GmbH, Gießen

**Produkte:** Entwicklung und Vermarktung von Sehprothesen, die als Implantate für bestimmte Formen der Erblindung durch lokale elektrische Reizung der Netzhaut das Sehvermögen teilweise zurückgeben können.

[www.epiret.de](http://www.epiret.de)

### Möller Medical GmbH & Co, Fulda

**Produkte:** Komponenten und Produkte für medizinische Anwendungen, wie Schlauchpumpen, Dialyse-Systeme, DNS-Analyseboxen, Blutmischwaagen für Blutspendedienste, Fettabsaugsysteme  
**MNI-Aktivitäten:** Nano-Coatings für beschichtete Produkte, antiadhäsiv, kratzfest, biokompatibel, autoklavierbar, für Medizintechnik und Analytik

[www.moeller-medical.com](http://www.moeller-medical.com)

### Sanofi-Aventis Deutschland GmbH, Frankfurt

**Produkte:** Pharmaproduktion, Medikamente gegen Diabetes  
**MNI-Aktivitäten:** Nanotechnologie in Galenischer Entwicklung

[www.sanofi-aventis.de](http://www.sanofi-aventis.de)

### Thomas Recording GmbH, Gießen

**Produkte:** Mikroelektroden, auch für Hirnforschung und Neurochirurgie  
**MNI-Aktivitäten:** Multi-Mikroelektroden-Aufnahmetechnik

[www.thomasrecording.com](http://www.thomasrecording.com)

## 7.1.7 Zulieferfirmen, weitere relevante Aktivitäten

### Ahlbrandt System GmbH, Lauterbach

**Produkte:** Anlagen für Oberflächentechnik, Corona-Entladung  
**MNI-Aktivitäten:** Verbesserungen an Kunststoffen, Papier, Folien, Textilien, Anlagen für Behandlung, Beschichtungen, Reinigung

[www.ahlbrandt.de](http://www.ahlbrandt.de)

### arteos GmbH, Seligenstadt

**Produkte:** Handhabungsgeräte, Montagegeräte und Service  
**MNI-Aktivitäten:** Manipulation von Nanodrähten

[www.arteos.de](http://www.arteos.de)

### BS-Partikel GmbH, Wiesbaden

**Produkte:** Polysterol-Partikel bis 180 nm

[www.bs-partikel.de](http://www.bs-partikel.de)

### Dockweiler Chemicals GmbH, Marburg

**Produkte:** Hersteller von Metallorganika zum Wachstum von III/V-Halbleitern  
**MNI-Aktivitäten:** Basis für Mikroelektronik und Optoelektronik (LEDs, Laser)

[www.dockweiler-chemicals.com](http://www.dockweiler-chemicals.com)

### Evonik Industries AG, Darmstadt, Hanau

**Produkte:** Spezialchemie, Carbon-Black-Produktion (1,4 Mio. t pro Jahr), etwa für technische Gummiartikel, Reifen, als Pigmente. Nano-Oxide AEROSIL  
**MNI-Aktivitäten:** Projekthaus, Ausgründung Creavis für Pigmente in druckbarer Elektronik oder Lithium-Ionen-Batterien, nanoskalige Materialien Zinkoxid, Ceroxid, Indium-Zinn-Oxid

[www.evonik.com](http://www.evonik.com)

#### Ferro GmbH, Hanau

**Produkte:** 3 Geschäftsbereiche „Inorganic Specialities“ (mit Spezialgläsern, Farben und Additiven), „Organic Specialities“ (mit Kunststoff-Komponenten, Farbstoffen, Additiven) und „Electronic Materials“ (mit Edelmetall-Pulvern, Oxidmaterialien).

**MNI-Aktivitäten:** Electronic Materials, Nano-Metall-Pulver: wie Ag, Au, etwa für antibakterielle Beschichtungen

[www.ferro.com](http://www.ferro.com)

#### Focus GmbH, Hünstetten

**Produkte:** Verdampfer, REM-Zubehör, Vertrieb über Omicron, Taunusstein

[www.focus-gmbh.com](http://www.focus-gmbh.com)

#### Hollingsworth&Vose GmbH, Hatzfeld

**Produkte:** Filter und Vliesstoffe, auch Nanofasern für Spezialfilter. Ausgezeichnet mit dem Hessischen Innovationspreis 2004 des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

**MNI-Aktivitäten:** Geringer Druckverlust von Filtern bei hoher Partikel-Abscheiderate durch Nanofasernetz

[www.hovo.com](http://www.hovo.com)

#### Merck KGaA, Darmstadt

**Produkte:** Unternehmensbereiche Pharmaka und Chemie, mit weltweiter Marktführerschaft in Flüssigkristallen, Spezialpigmente, Analytische Reagenzien

**MNI-Aktivitäten:** Nanopartikel, wie Ferrite, Oberflächenmodifikationen, Nanokomposite, Tensidchemie

[www.merck.de](http://www.merck.de)

#### Pall GmbH, Dreieich

**Produkte:** Filtrations-, Separations- und Purifikations-techniken für Halbleitertechnik, Biotechnik

**MNI-Aktivitäten:** Total Fluid Management Systeme

[www.pall.com](http://www.pall.com)

#### Pfeiffer Vacuum GmbH, ABlar

**Produkte:** Vakuumtechnik für Dünnschichtprodukte

[www.pfeiffer-vacuum.net](http://www.pfeiffer-vacuum.net)

#### Provac GmbH, Oestrich-Winkel

**Produkte:** Vakuum-Beschichtungsanlagen, Messtechnik

[www.provac-gmbh.de](http://www.provac-gmbh.de)

#### Schäfer Technologie GmbH, Langen

**Produkte:** Technische Ausrüstungen für Oberflächentechnik und Nanotechnik

**MNI-Aktivitäten:** Rastersondenmikroskope, Raster-Tunnel- und -Kraft-Mikroskope, Optische Profilometer, Nanotester, Nano-Partikelanalyse

[www.schaefer-tec.com](http://www.schaefer-tec.com)

#### sgt Sensorberatung Dr. Guido Tschulena, Wehrheim

**Produkte:** Beratung zu Markt und Technik, Anwendungen und Fertigung

**MNI-Aktivitäten:** Beratung zu Sensorik, Mikrosystemtechnik, Mikrooptik und Nanotechnik

[www.sgt-sensor.de](http://www.sgt-sensor.de)

#### Tectra GmbH, Frankfurt

**Produkte:** Vertrieb Vakuumkomponenten

**MNI-Aktivitäten:** Mini-Elektronenstrahl-Verdampfer

[www.tectra.de](http://www.tectra.de)

#### Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang

**Produkte:** Materialien, Pigmente, Katalysatoren

**MNI-Aktivitäten:** Spezialwerkstoffe (auch nanofines TiO<sub>2</sub>, ZnO), Recycling von Nanomaterialien (etwa Platin-Katalysatoren)

[www.umicore.de](http://www.umicore.de)

#### Varian Deutschland GmbH, Darmstadt

**Produkte:** Vakuumtechnik für Halbleitertechnik, Analytische Instrumentierung, Industrieprozesse

[www.variainc.com](http://www.variainc.com)

#### Wafer & Glassubstrate GmbH & Co. KG, Linsengericht

**Produkte:** Trennschleifen, Sägen von Glas, Keramik, Silizium

**MNI-Aktivitäten:** Aufträge für Chip-Herstellung

[www.wgdicing.de](http://www.wgdicing.de)

# 7.2 Auswahl von Forschungseinheiten im Bereich Mikro-Nano-Integration

## 7.2.1 Forschungseinrichtungen und Zentren

Deutsches Kunststoff Institut, Abteilungen  
Technologie und Chemie, Darmstadt

**Kompetenzen generell:** Herstellung, Charakterisierung und Verarbeitung neuartiger Polymerarchitekturen

**MNI-Aktivitäten:**

- Nanopartikel in Kunststoff für Spritzguss integrieren um Brechzahl anzupassen. → Hochbrechende (mikro)-optische Linsen im Spritzguss; Spritzguss von mikrostrukturierten Bauteilen: Partikelverteilung in gefüllten Kunststoffen.
- Mit Hilfe von Latex-Opalen Photonische Kristalle aus Siliziumdioxid herstellen

[www.dki-online.de](http://www.dki-online.de)

MATFORM-TUD

**Sonderforschungsbereich 595, Darmstadt**

**Kompetenzen generell:** Schichtsysteme, Werkstoffverbunde: Werkstoffe für die Katalyse, neue Konstruktionswerkstoffe, Funktionswerkstoffe

**MNI-Aktivitäten:** Synthese, Charakterisierung, Modellierung der Bauteileigenschaften von piezoelektrischen Aktoren und organischen Leuchtdioden

[www.sfb595.tu-darmstadt.de](http://www.sfb595.tu-darmstadt.de)  
[www.matform.tu-darmstadt.de](http://www.matform.tu-darmstadt.de)

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung  
GmbH, Bereich Materialforschung, Darmstadt

**Kompetenzen generell:** Neben physikalischer Grundlagenforschung zu Ionen-Festkörperwechselwirkungen und Ionen-induzierten Materialveränderungen auch Herstellung von Nanokanälen durch Ionenbeschuss und nasschemische Verfahren; Wachstum von Nanodrähten durch Abscheidung von Metallen in den Nanokanälen

**MNI-Aktivitäten:** nanodrahtbasierte Sensoren und Katalysatoren; Herstellung von Filtern, Membranen mit Nanoporen, Biosensoren; kalte Feldemitter (Bauelemente für elektron., optoelektron., sensorische und thermoelektrische Module)

[www.gsi.de](http://www.gsi.de)

Karl-Winnacker-Institut der DECHEMA e.V.  
Bereich Technische Chemie, Frankfurt

**Kompetenzen generell:** Grundlagenorientierte und vorwettbewerbliche Forschung auf den Gebieten Chemische Technik, Biotechnologie, Umwelttechnik, Apparate- und Anlagenbau sowie Werkstoffwissenschaften

**MNI-Aktivitäten:** Zink / Luft-Mikrobrennstoffzelle mit hochporösen Keramiksichten; Kohlenstoff-Nanoröhren als Katalysatorträger für die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle DMFC

<http://kwi.dechema.de>

Center for Interdisciplinary Nanostructure Science  
and Technology - CINSaT, Kassel

**Kompetenzen generell:** Synthese von Nanostrukturen (Selbstorganisation, lichtinduzierte Prozesse, Lithographie)

**MNI-Aktivitäten:** siehe Universität Kassel, Institut für Nanostrukturtechnik und Analytik (INA)

[www.cinsat.uni-kassel.de](http://www.cinsat.uni-kassel.de)

Photonik Zentrum Hessen in Wetzlar AG Wetzlar

**Kompetenzen generell:** NanoImprint-Technologie, Bauwerksmonitoring, Innovative Produktentwicklungen, Optische Messtechnik

**MNI-Aktivitäten:** Kostengünstige, industrielle Fertigung von mikro- und nanostrukturierten optischen Komponenten; Produktportfolio: bspw. optische Beugungsgitter, Wellenleiterstrukturen, maßgeschneiderte Diffusoren, Diffraktive Optische Elemente (DOEs); Kleinserienfertigung mit Serienstückzahlen von einigen 1000 bis 10 000 St. / Jahr

[www.pzh-wetzlar.de](http://www.pzh-wetzlar.de)

#### Mikro- und Nanostrukturierungslabor, Gießen

**Kompetenzen generell:** Zentrale Einrichtung für die Nano- und Materialwissenschaften: Nanostrukturen in Top-Down-Technik erzeugen; Vorstrukturierung von Substraten für Herstellung von Nanostrukturen in Bottom-Up-Technik

**MNI-Aktivitäten:** Integration von Nanostrukturen in Bauelementen

[www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/einrichtungen/mikro-und-nanostrukturierungslabor](http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/einrichtungen/mikro-und-nanostrukturierungslabor)

#### NanoImprint Konsortium Hessen, Kassel, Wetzlar, Gießen

**Kompetenzen generell:** Weiterentwicklung und Anwendung der NanoImprint-Technologie.

**MNI-Aktivitäten:** Reduktion der lateralen Strukturgrößen; Verfeinerung der 3-D-Template-Technologie; Aufbringen einer funktionellen monomolekularen Schicht auf die Template z. B. als Antihaf-Beschichtung; Verbesserung der lokalen Präzision zur periodischen Quantenpunkt-Anordnung

[www.nanoimprint-hessen.de](http://www.nanoimprint-hessen.de)

## 7.2.2 Universitäten und Hochschulen

#### Technische Universität Darmstadt

##### Chemie - Eduard-Zintl-Institut für Anorganische und Physikalische Chemie

Prof. Dr. Rolf Schäfer

[www.tu-darmstadt.de/fb/ch/cluster/schaefer.tud](http://www.tu-darmstadt.de/fb/ch/cluster/schaefer.tud)

**Kompetenzen generell:** Untersuchung von Materie im Übergangsbereich zwischen Atomen und Festkörpern

**MNI-Aktivitäten:** Mit mikromechanischen Analysemethoden physikalisch-chemische Eigenschaften nanoskaliger Systeme untersuchen

##### Chemie - Eduard-Zintl-Institut für Anorganische und Physikalische Chemie

Prof. Dr. Jörg J. Schneider

[www.tu-darmstadt.de/fb/ch/Fachgebiete/AC/AKSchneider](http://www.tu-darmstadt.de/fb/ch/Fachgebiete/AC/AKSchneider)

**Kompetenzen generell:** Synthese von Metallclustern und Organometall-Verbindungen; Synthese von Hochtemperatur-Spezies für präparative Zwecke in der synthetischen Chemie; Molekulare Vorläufer zur Herstellung von nanoskaligen Metallen und Metalloxiden; Kohlenstoff-basierte Mikro- und Nanomaterialien mit Anwendungspotenzial für neue Applikationen

**MNI-Aktivitäten:** Feldemissionsquellen, Heterogene Katalyse, Gassensorik

##### Elektrotechnik und Informationstechnik - Mikroelektronische Systeme / Integrierte Elektronische Systeme

Prof. Dr. Klaus Hofmann

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Manfred Glesner

[www.microelectronic.e-technik.tu-darmstadt.de](http://www.microelectronic.e-technik.tu-darmstadt.de)

**Kompetenzen generell:** Entwicklung neuer CAD-Verfahren für den effizienten Entwurf von integrierten Hardware- / Softwaresystemen und gemischter analog / digitaler Systeme

**MNI-Aktivitäten:** Eignungsuntersuchung von CNTs für den Einsatz in Transistoren und Sensoren, Organische Elektronik für gedruckte Elektronik, Aufbau einer europäischen Graduiertenschule Nanoelektronik

##### Elektrotechnik und Informationstechnik - Institut EMK - Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme (M+EMS)

Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

[www.institut-emk.de](http://www.institut-emk.de)

**Kompetenzen generell:** Entwicklung und Aufbau von Systemen der Mikro- und Feinwerktechnik (Analytische Beschreibung, Simulation, Mikrofertigung, Charakterisierung), Mikroaktoren, Mikrosysteme (MEMS) mit Nanomaterialien, Tiefenlithographie, Dielektrische Elastomeraktoren, Anwendungen in der medizinischen Gerätetechnik

**MNI-Aktivitäten:** Entwicklung von Nanopartikelgefüllten Photolacken zur UV-Tiefenlithographie → erhöhte thermische / elektrische Leitfähigkeit, Aufbau eines Mikro-Nano-Integrierten Gasströmungssensors [www.institut-emk.de/inanomik](http://www.institut-emk.de/inanomik), Leistungssteigerung von dielektrischen Polymeraktoren durch Nanofüllstoffe in Silikon

## Elektrotechnik und Informationstechnik

### - Regenerative Energien

Prof. Dr.-Ing. Thomas Hartkopf

[www.re.e-technik.tu-darmstadt.de](http://www.re.e-technik.tu-darmstadt.de)

**Kompetenzen generell:** Forschung und Entwicklung bzgl. neuartiger Energiewandler zur Nutzung regenerativer Energien; Effiziente Verwendung elektrischer und thermischer Energie

**MNI-Aktivitäten:** Entwicklung einer miniaturisierbaren Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC) mit Kohlenstoff-Nanoröhren als Katalysatorträger

## Elektrotechnik und Informationstechnik - Hochfrequenztechnik / Höchsthfrequenzelektronik

Prof. Dr.-Ing. Dimitris Pavlidis

[www.hfe.tu-darmstadt.de](http://www.hfe.tu-darmstadt.de)

**Kompetenzen generell:** Fertigung und Charakterisierung von Hochfrequenz- bzw. Höchsthfrequenzkomponenten für einen breitbandigen Frequenzbereich bis zu THz; Epitaktisches Wachsen; Bearbeiten und Charakterisieren von Halbleiterkomponenten

**MNI-Aktivitäten:** Integration von CNTs in die Mikroumgebung zum Aufbau eines MNI-Gassensors; Charakterisierung des Gassensors

## Elektrotechnik und Informationstechnik

### - Optische Nachrichtentechnik

Prof. Dr.-Ing. Peter Meißner

[www.ont.tu-darmstadt.de/index.php?id=23](http://www.ont.tu-darmstadt.de/index.php?id=23)

**Kompetenzen generell:** Simulatorische und experimentelle Untersuchung optischer Kommunikationssysteme, optisch aktiver und passiver Komponenten und Anwendungen dieser Komponenten in der Sensorik

**MNI-Aktivitäten:** Mikromechanisch abstimmbare Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL),

[www.subtune.eu](http://www.subtune.eu)

## Material- und Geowissenschaften

### - Chemische Analytik

Prof. Dr. Dr. h. c. Ralf Riedel

[www.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/df](http://www.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/df)

**Kompetenzen generell:** Herstellung neuartiger multifunktionaler anorganischer Materialien mit nanoskaligem Aufbau; Synthese molekularer und polymerer Precursoren (Hybridpolymere)

**MNI-Aktivitäten:** Entwicklung von Nanopartikelgefüllten Photolacken zur UV-Tiefenlithographie.

## Material- und Geowissenschaften

### - Chemische Analytik

Prof. Dr. W. Ensinger

[www.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/ca/](http://www.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/ca/)

**Kompetenzen generell:** Kombination von Synthese, Modifizierung und Charakterisierung moderner Materialien, einschließlich der qualitativen, semi-quantitativen und quantitativen Analytik der Elementzusammensetzung und Charakterisierung der chemischen Bindung in festen und flüssigen Proben.

**MNI-Aktivitäten:** Gemeinsam mit der GSI: Nano-drahtbasierte Sensoren und Katalysatoren; Herstellung von Filtern; Membranen mit Nanoporen; Biosensoren

## Material- und Geowissenschaften

### - Gemeinschaftslabor Nanomaterialien

Prof. Dr.-Ing. Horst Hahn

[www.nano.tu-darmstadt.de/gl\\_nanomaterialien](http://www.nano.tu-darmstadt.de/gl_nanomaterialien)

**Kompetenzen generell:** Synthese von Nanopulvern und metallorganische oder organische Funktionalisierung

**MNI-Aktivitäten:** Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit in Mikrosensoren und Mikrokatalysatoren

## Physik - Institut für Angewandte Physik

Prof. Dr. Theo Tschudi

[www.physik.tu-darmstadt.de/ito](http://www.physik.tu-darmstadt.de/ito)

**Kompetenzen generell:** Optische Informationsverarbeitung; diffraktive Optik; Holographie; Bragg-Gitter; optische Speicher

**MNI-Aktivitäten:** Nanoschichten für Mikro-Halbleiter-Laser und Femtosekunden-Laser; Nanostrukturen für photonische Kristalle in optischen Mikrosystemen

## Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

### Biochemie, Chemie und Pharmazie

#### - Analytische Chemie

Prof. Dr. Bernd O. Kolbesen

[www.chemie.uni-frankfurt.de/aac/ak\\_kolbesen/index.html](http://www.chemie.uni-frankfurt.de/aac/ak_kolbesen/index.html)

**Kompetenzen generell:** Grundlagenforschungen mit Relevanz für Anwendungen im Bereich der Elektronik und Analytik, Strukturaufklärung und Oberflächencharakterisierung auf Silizium-Wafern; Aufbau dünner Schichten

**MNI-Aktivitäten:** Erzeugen von Nanoschichten (1...100 nm) mittels RTP auf Siliziumsubstraten

### Biochemie, Chemie und Pharmazie - Biochemie

Prof. Dr. Robert Tampé, Prof. Dr. Jacob Piehler

[www.biochem.uni-frankfurt.de/index\\_d.html](http://www.biochem.uni-frankfurt.de/index_d.html)

**Kompetenzen generell:** Nanotechnologische Fragestellungen mit Kernkompetenzen im Bereich der Nanobiotechnologie im Grenzbereich zwischen Physik, Chemie und Biologie; mikro- und nanostrukturierte Protein-Chips und künstliche Membranen

**MNI-Aktivitäten:** „Schreiben“ von Nanostrukturen mit Proteinen auf einem Chip; Protein-Chips mit Oberflächen für die Immobilisierung von Proteinen aus Silizium, Siliziumoxiden oder Gold

### Physikalisches Institut - Dünne Schichten

Prof. Dr. Michael Huth

[www.pi.physik.uni-frankfurt.de/thinfilm/index.html](http://www.pi.physik.uni-frankfurt.de/thinfilm/index.html)

**Kompetenzen generell:** Forschungen zur Präparation dünner Schichten und Schichtsysteme sowie metallischer, ferromagnetischer und supraleitender Nanostrukturen

**MNI-Aktivitäten:** Elektronenstrahlinduzierte Deposition (EBID) von Nanoschichten auf Mikrostrukturen; Mikro-/Nanomagnetismus

## Fachhochschule Gießen-Friedberg

### Fachbereich Elektro- und Informationstechnik

#### - KOMPETENZZENTRUM Nanotechnik und

#### Photonik (seit 2008)

Prof. Dr. Ubbo Ricklefs (Koordinator)

Prof. Dr.-Ing. Werner Bonath

Prof. Dr. Alexander Klös

[www.fh-giessen-friedberg.de/nano](http://www.fh-giessen-friedberg.de/nano)

**Kompetenzen generell:** Fragestellungen im Bereich Chipentwicklungen, analogen CMOS, mixed-Signal ASICs und integrierten optoelektronischen Systemen, sowie lasergestützte Vermessungen von flächigen Verformungen.

**MNI-Aktivitäten:** Entwicklung, Rechnergestützte Simulation und Fertigung von Schaltungen der Mikro- und Nano-Elektronik.

## Justus-Liebig-Universität Gießen

### Biologie und Chemie

#### - Physikalisch-Chemisches Institut

Prof. Dr. Jürgen Janek

[www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/chemie/physchem/prof1](http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/chemie/physchem/prof1)

**Kompetenzen generell:** Elektrochemie fester Stoffe; Materialien für elektrochemische Energietechnologien und deren Reaktionen bzw. Langzeitstabilität

**MNI-Aktivitäten:** Nano-Ionik (Herstellung metallischer Nanodrähte; Fernziel: Integration von Miniaturbrennstoffzellen auf Halbleiterchips)

### Biologie und Chemie

#### - Institut für Organische Chemie

Prof. Peter R. Schreiner

[www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/chemie/organische-chemie/AgSchreiner](http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/chemie/organische-chemie/AgSchreiner)

**Kompetenzen generell:** Einsatz von funktionalisierten Nanodiamanten als Pharmazeutika, zur Beschichtung und Passivierung von Oberflächen (Glas, Metall), als hochfeste Polymerbausteine

**MNI-Aktivitäten:** Deckschicht für Silizium-Wafer: transparent, unempfindlich; Synthese von Nano-Elektronikbauteilen (Dioden, Transistoren)

### Biologie und Chemie

#### - Anorganische und Analytische Chemie

Dr. Michael Tiemann

[www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/chemie/iaac/tiemann](http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb08/chemie/iaac/tiemann)

**Kompetenzen generell:** Synthese und Charakterisierung von neuen porösen Materialien, vor allem geordneten nanoporösen Metalloxiden

**MNI-Aktivitäten:** Halbleiter-Geruchs-Mikrosensoren auf Basis nanoporöser Sensorschichten

### Mathematik und Informatik, Physik, Geographie

#### - Institut für Angewandte Physik

Prof. Dr. Dieter Kohl, Prof. Dr. Derck Schlettwein

[www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/einrichtungen/institut-fur-angewandte-physik/](http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/einrichtungen/institut-fur-angewandte-physik/)

**Kompetenzen generell:** Sensorik und molekulare Materialien (Geruchserkennung - Gaschromatographie, Massenspektroskopie, Dünnschichtpräparation, elektrische und elektrochemische Charakterisierung)

**MNI-Aktivitäten:** Halbleiter-Gas-Mikrosensoren auf Basis nanoporöser Sensorschichten; Dioden, Feldeffekttransistoren; Photokatalyse; Optoelektronik, Herstellung und Charakterisierung von Nano-Lotpasten für die Mikroverbindungstechnik in biomedizinischen Produkten

**Mathematik und Informatik, Physik, Geographie  
- Mikro- und Nanostrukturphysik**

Prof. Peter J. Klar

[www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/i-physikalisches-institut/mina/abt-mina-klar](http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/i-physikalisches-institut/mina/abt-mina-klar)

**Kompetenzen generell:** Magnetotransportmessungen und optische Messungen, insbesondere Ramanstreuung, an neuartigen Materialien, die auf der Mikro- oder Nanoskala strukturiert sind

**MNI-Aktivitäten:** Halbleiter-Gas-Mikrosensoren auf Basis nanoporöser Sensorschichten

**Mathematik und Informatik, Physik, Geographie  
- Molecular Beam Epitaxy (MBE)**

Prof. Dr. Martin Eickhoff

[www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/i-physikalisches-institut/molecular-beam-epitaxy-mbe](http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/fb07/fachgebiete/physik/i-physikalisches-institut/molecular-beam-epitaxy-mbe)

**Kompetenzen generell:** Halbleiterheterostrukturen für elektronische und optoelektronische Anwendungen (Gruppe III-Nitride, Gruppe II-Oxide); Selbstassembliertes Wachstum von Halbleiter-Nanostrukturen; Biosensorik und Bioelektronik mit „wide-bandgap“ Halbleitern; Halbleiter-Nanostrukturen für chemische Sensoren; Oberflächenfunktionalisierung

**MNI-Aktivitäten:** Halbleiter-Gas-Mikrosensoren auf Basis nanoporöser Sensorschichten

Universität Kassel

**Fachbereich Elektrotechnik - Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik (INA),  
Fachgebiet Technische Elektronik**

Prof. Dr. Hartmut Hillmer

<http://te.ina-kassel.de>

**Kompetenzen generell:** Forschung und Entwicklung von optischen und optoelektronischen Bauelementen mittels Mikro- und Nanostrukturtechnologien

**MNI-Aktivitäten:** Mikroelektromechanisch verstimmbare Fabry-Pérot-Filter mit Nanoschichtstapel; Photonische Kristalle im Fabry-Pérot-Filter; Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) für den UV-Bereich; Höchstauflösende 3-D-Nano-Imprint-Stempel und NanoImprint-Technologie; Neuartige hochempfindliche Sensortechnologie für die Gasanalyse (NanoNase); Mikrospiegelanordnungen zur Tageslichtlenkung; Hochauflösendes, miniaturisiertes Spektrometer für mobile Anwendungen (Nanospektrometer)

**Fachbereich Naturwissenschaften – Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik (INA),  
Fachgebiet Technische Physik**

Prof. Dr. J. P. Reithmaier

<http://tp.ina-kassel.de>

**Kompetenzen generell:** Weiterentwicklung von Halbleiter-Nanostrukturierungsverfahren (top-down & bottom-up); neuartige Bauelementkonzepte in der Mikro-/Nanosystemtechnik, in der Optoelektronik bzw. Nanophotonik und Nano-Analytik

**MNI-Aktivitäten:** Selbstorganisationsprozesse während Materialabscheidung zur Herstellung von Nanostrukturen im Mikrosystem; Mikro-Hochleistungs-Laser mit Nano-Quantenpunktstrukturen; neuartige Bauelemente für die optische Kommunikationstechnik

**Fachbereich Naturwissenschaften  
- Fachgebiet Makromolekulare Chemie und Molekulare Materialien**

Prof. Dr. Josef Salbeck

[www.chemie.uni-kassel.de/mmc](http://www.chemie.uni-kassel.de/mmc)

**Kompetenzen generell:** Synthese und Charakterisierung von molekularen Materialien, Anwendung in der Organischen Elektronik/Optoelektronik

**MNI-Aktivitäten:** Mikroelektronische Bauelemente aus organischen Materialien, die z. T. mit nanopartikulären oder nanoporösen Halbleitern kombiniert werden (organische Phototransistoren, organische Leuchtdioden, organische Festkörperlaser, organische und hybride Solarzellen)

**Fachbereich Naturwissenschaften - Fachgebiet Funktionale dünne Schichten und Physik mit Synchrotronstrahlung**

Prof. Dr. Arno Ehresmann

[www.physik.uni-kassel.de/ehresmann.html](http://www.physik.uni-kassel.de/ehresmann.html)

**Kompetenzen generell:** Herstellung und Charakterisierung von magnetischen und nichtmagnetischen funktionalen Dünnschichtsystemen (z. B. Hartstoffschichten); Herstellung und Anwendung lateraler und schaltbarer magnetischer Nanostrukturen

**MNI-Aktivitäten:** Strukturierung magnetischer Dünnschichtsysteme für magnetische Speichertechnik, magnetische Logiken, Positionierung und Transport funktionalisierter magnetischer Nanopartikel in  $\mu$ TAS

## Philipps-Universität Marburg

### Fachbereich Chemie

#### - Fachgebiet Metallorganische Chemie

Prof. Dr. Jörg Sundermeyer

[www.uni-marburg.de/fb15/ag-sundermeyer](http://www.uni-marburg.de/fb15/ag-sundermeyer)

**Kompetenzen generell:** Design von molekularen Metallverbindungen und anderen Funktionsmolekülen für technisch relevante katalytische und materialwissenschaftliche und (opto-) elektronische Anwendungen

**MNI-Aktivitäten:** Integration von Tantalnitrid (TaN) als Diffusionsbarriereschicht in mikroelektronischen Komponenten zwischen Silizium-Wafer und Cu-Leiterbahn; Entwicklung neuartiger organisch-anorganischer Hybridmaterialien für Photorezeptoren und -leiter

### Fachbereich Chemie

#### - Fachgebiet Makromolekulare Chemie

Prof. Dr. Joachim H. Wendorff

Prof. Dr. Andreas Greiner

[www.uni-marburg.de/fb15/ag-wendorff](http://www.uni-marburg.de/fb15/ag-wendorff)

**Kompetenzen generell:** Entwicklung und Herstellung von Nanofasern, -röhren und -stäben aus verschiedenen Polymeren mit definiertem Durchmesser und Achsenverhältnis

**MNI-Aktivitäten:** Nanoröhren mit eingebrachten Halbleitermaterialien für photonische Anwendungen; Nanoröhren mit ferro- bzw. piezoelektrischen Eigenschaften; Nanoröhren als Katalysator

### Fachbereich Pharmazie

#### - Institut I Pharmazeutische Chemie

Prof. Dr. Michael Keusgen

[www.uni-marburg.de/fb16/ipc/ag\\_keusgen](http://www.uni-marburg.de/fb16/ipc/ag_keusgen)

**Kompetenzen generell:**

Oberflächenbeschichtung und -strukturierung

**MNI-Aktivitäten:** Entwicklung von Lab-on-a-Chip Systemen, Biochips, Analyse-Handgerät mit verkleinerter Oberflächenplasmonen-Resonanztechnik SPR

## Fachhochschule Wiesbaden

### Fachbereich Physikalische Technik,

#### Fachbereich Umwelttechnik

#### - Institut für Mikrotechnologien IMtech

Prof. Dr. Hans-Dieter Bauer

Prof. Wolfgang Jacoby

Prof. Dr. Wolfgang Kleinekofort

Prof. Dr. Uwe Langbein

Prof. Dipl.-Phys. Heinrich Reisinger

Prof. Dr. Günter Stein

Prof. Dr. Friedemann Völklein

Prof. Dr. rer. nat. Klaus Michael Indlekofer

[www.imtech-fhw.org](http://www.imtech-fhw.org)

**Kompetenzen generell:** Entwicklung und Anpassung von Mikrostrukturierungsprozessen; Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen; Anwendungen in den Bereichen Photonik und Sensorik; Mikrostrukturierung von Gläsern (optische Systeme, mikrofluidische Systeme)

**MNI-Aktivitäten:** Diffraktiv-optische Elemente (DOE); Aufbau eines Mikro-Nano-Integrierten Gasströmungssensors; Charakterisierung und Handhabung von Nano-Drähten; Multi-Quantum-Well-Strukturen (MQW) für thermoelektrische Energieumwandlung im Mikrosystem; Herstellung und Charakterisierung von Funktionsschichten für Mikrosysteme; Simulation mikrosystemtechnischer und optischer Komponenten; Herstellung und Charakterisierung von Funktionsschichten für elektrische, mechanische und optische Mikrosysteme.

## 7.3 Auswahl von regionalen Aktivitäten und Netzwerke

### Hessen-Nanotech

Hessen Nanotech

[www.hessen-nanotech.de](http://www.hessen-nanotech.de)

- Lotsenfunktion in allen Fragen der Nanotechnologien in Hessen
- Darstellung der hessischen Kompetenzen im Bereich Nanotechnologie und in angrenzenden Technologiebereichen wie der Material- und Oberflächentechnologie, Mikrosystemtechnik und der Optischen Technologie
- Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft hessischer Einrichtungen und Unternehmen, insbesondere kleiner und mittlerer Unternehmen dieser Wirtschaftssektoren
- Vernetzung von Technologie-Anbietern und -Anwendern, z. B. durch Veranstaltungen, Studien und Broschüren der Schriftenreihe Hessen-Nanotech

### Mikrosystemtechnik-Netzwerk Rhein-Main e.V.



[www.mst-rhein-main.de](http://www.mst-rhein-main.de)

- Förderung der Kompetenz in der Mikrosystemtechnik (MST) und Erschließung von Marktpotenzialen
- Vermittlung von Know-how und Technologietransfer generieren
- Schaffung einer Plattform für Informationsaustausch und Weiterbildung
- Plattform zur Kooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik
- Initiierung von Kooperations- und Förderprojekten
- Unterstützung der europäischen Forschungskooperationen in Südosteuropa (Rumänien)

AG Mikro-Nano-Integration:

[www.mst-netzwerk.de/arbeitskreise/mikro-nano-integration/](http://www.mst-netzwerk.de/arbeitskreise/mikro-nano-integration/)

### NanoNetzwerkHessen (NNH)



[www.nanonetzwerkessen.de](http://www.nanonetzwerkessen.de)

- Kooperation zwischen Forschern aus verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen und anderen Fächern auf dem Gebiet der Nanowissenschaft
- Inhaltliche Abstimmung von Aktivitäten in Forschung und Lehre und gemeinsame Nutzung von Geräten und Infrastruktur zur Innovation durch Kooperation

### TechnologieTransferNetzwerk (TTN-Hessen)

Hessen TTN

[www.ttn-hessen.de](http://www.ttn-hessen.de)

- Zusammenschluss der hessischen Hochschulen und führender hessischer Wirtschaftsverbände zur Bündelung und Vermarktung von Transfer-Aktivitäten von Wissenschaft und Wirtschaft
- Erleichterter Zugang für kleine und mittelständische Unternehmen durch intensivierten Austausch mit der Forschung
- Engerer Kontakt zwischen Hochschulen und Wirtschaft für gezielte Forschungsdienstleistungen und bessere Arbeitsmarktperspektiven für Absolventen

## Hessische Industrie- und Handelskammern



[www.itb-hessen.de](http://www.itb-hessen.de)

- Zusammenschluss der hessischen Industrie- und Handelskammern zu einer Arbeitsgemeinschaft zur gemeinsamen, überregionalen Problemlösung
- Unternehmens- und praxisnaher Service für kleine und mittelständische Unternehmen
- Förderung des Austausches zwischen Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik

## HIPO - Professionelle Patentverwertung in Hessen



[www.hipo-online.net](http://www.hipo-online.net)

- H-IP-O (Hessische Intellectual Property Offensive): Zusammenschluss von zehn staatlichen Hochschulen Hessens, zur Vermarktung von Produkt- und Verfahrens-Innovationen
- Förderung von Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen an Hochschulen
- Steigerung des Transfers zwischen wissenschaftlichen Erkenntnissen und wirtschaftlicher Praxis

## Optence



[www.optence.de](http://www.optence.de)

- Schaffung eines innovationsfreundlichen Umfeldes
- Umsetzung innovativer Geschäftsideen
- Förderung von Kooperationen mit Anbietern und Nutzern Optischer Technologien in der Region
- Vertretung der Interessen der Mitglieder in Politik und Öffentlichkeit.
- Nachhaltige Förderung der Optischen Technologien in Hessen / Rheinland-Pfalz
- Unterstützung der Aus- und Weiterbildung im Bereich Optische Technologien

## Innomag



[www.innomag.org](http://www.innomag.org)

- Bildung eines Netzwerkes zur Zusammenführung der Interessen und Potenziale von Herstellern, Dienstleistern und Anwendern von magnetischen Mikrosystemen
- Neue Chancen, insbesondere für den innovativen Mittelstand

## Materials Valley

### materials valley

[www.materials-valley-rheinmain.de](http://www.materials-valley-rheinmain.de)

- Profilierung der Region Rhein Main als High Tech-Standort für Materialforschung und Werkstofftechnologie
- Verein zur Förderung von Technologie, Wirtschaft und Privatpersonen als Zusammenschluss von Industrieunternehmen, Hochschulen, Forschungsinstituten und Institutionen der Länder
- Ausbau von vorhandenen Wissensnetzen zu einem langfristig angelegten Forschungsverbundnetz zwischen den wissenschaftlichen Instituten und Unternehmen der Region sowie zwischen Unternehmen als Grundlage für Kooperationen, gemeinsame Forschung und Entwicklung
- Kommunikationsplattform für Wirtschaft und Wissenschaft

# 7.4 Literatur und Quellen

## 7.4.1 Quellen

- [Bagdahn2008] Bagdahn, J. et al: Abschlusspräsentation des MNI-Projekts RetiBon: *Fügen von Halbleitermaterialien mit reaktiven metallischen Zwischenschichten*.
- [BMBFVeranst2008] VDI | VDE | IT: Öffentliche BMBF Abschluss-Veranstaltung Mikro-Nano-Integration für die Mikrosystemtechnik „Der Zugang zur Nanowelt“ am 13. und 14. März 2008 in Berlin. [www.mstonline.de/mikrosystemtechnik/mikro-nano-integration](http://www.mstonline.de/mikrosystemtechnik/mikro-nano-integration), [www.mikro-nano.de](http://www.mikro-nano.de)
- [BMBFBericht2009] VDI | VDE | IT: Der gemeinsame Abschlussbericht zur Mikro-Nano-Integration für die Mikrosystemtechnik „Der Zugang zur Nanowelt“ wird in der Technischen Informationsbibliothek TIB in Hannover sowie in der BMBF Bibliothek Forschung und Technologie in Bonn recherchierbar sein.
- [Braun2008] Braun, T. et al: Abschlusspräsentation des MNI-Projekts NanoMOIST: *Nanopartikel gefüllte Polymere mit verbesserten Diffusionsbarrieren für die Aufbau- und Verbindungstechnik*.
- [CANAPE] Technische Universität Darmstadt, Prof. Hartkopf: EU-Projekt IP CANAPE *Carbon Nanotubes for Applications in Electronics, Catalysis, Composites and Nano-Biology*.
- [Cornelius2008] Cornelius, T.W.; Trautmann, C.; Neumann, R.; Korb, W.; Reith, H.; Völklein, F.: *Preparation and electrical/thermal characterization of nanowires and their application for gas flow sensors*: Conference proceedings: Nanofair 2008. Dresden. 2008.
- [Coskina2007] Coskina, P.: *Mikro-Nano-Integration für die Mikrosystemtechnik*: Conference proceedings: Mikrosystemtechnik Kongress 2007. Dresden. 2007. S. 369.
- [Fiedler2008] Fiedler, S.; Müller, T.; Zwanzig, M.; Jäger, M.S.; Böttcher, M.; Csáki, A.; Fritzsche, W.; Howitz, S.; Schmitt, D.; Hampp, N.; Scheel, W.; Fuhr, G.R.; Reichl, H.: *Touch Less Component Handling – Towards Converging Assembly*: mst | news 3 | 2008. Berlin, Ulm. 2008. S. 25–28.
- [Gerlach2006] Gerlach, G.; Dötzel, W.: *Einführung in die Mikrosystemtechnik*: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl.. München. 2006.
- [Hanemann2005] Hanemann, T.: *Polymerbasierte Mikro- und Nanokomposite für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik*: Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 7184. November 2005.
- [HMWVL1] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung: *LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz*: Broschüre. Juli 2007.
- [HMWVL2] Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung: *Förderoptionen für technologieorientierte Unternehmen in Hessen*: Broschüre.
- [Ionescu2008] Ionescu, E.; Greiner, P. F.; Ngoumeni Yappi, R. B.; Martinez-Crespiera, S.; Schlaak, H. F.; Riedel, R.: *Thermally Conductive SU-8-Composites using Ceramic Nano-Powders*: Conference proceedings: Nanofair 2008. Dresden. 2008. S. 205.
- [ISOTS2008] DIN CEN ISO / TS 27687:2008-11: *Nanotechnologien – Terminologie und Begriffe für Nanoobjekte – Nanopartikel, Nanofaser und Nanoplättchen*: Beuth Verlag. Berlin. 2008.
- [Jungmann2004] Jungmann, M.; Matysek, M.; Schlaak, H. F.: *Electrostatic Solid-State Actuators with Elastic Dielectric and Multilayer Fabrication-Technology*. Conference proceedings: Actuator 2004, 9<sup>th</sup> International Conference on New Actuators & 3rd International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 14-16 June 2004. Bremen. 2004. S. 686–689.

- [Kamin2006] VDI | VDE | IT: *Mikro-Nano-Integration*: Berliner Kamingsgespräche zur Mikro-systemtechnik. Berlin. Herbst 2006.
- [Knese2007] Knese, K.; Armsbruster, S.; Benzel, H.; Seidel, H.: *Neue oberflächenmikromechanische Technologie zur Herstellung kapazitiver Sensoren auf Basis von porösem Silizium*: Conference proceedings: Mikrosystemtechnik Kongress 2007. Dresden. 2007. S. 131-134.
- [Kögel2007] Kögel, B.: *Simultaneous Spectroscopy of NH<sub>3</sub> and CO Using a >50 nm Continuously Tunable MEMS-VCSEL*: IEEE Sensors J., vol. 7, no. 11. 2007. S. 1483-1489.
- [Kohl2008] Schnakenberg, U.; Noyong, M.; Kohl, C. D.: Abschlusspräsentation des MNI-Projekts NanoTEM / Nano-Past: *Nano-Lotpasten für die Mikroverbindungstechnik*.
- [Koker2006] Koker, T.: *Konzeption und Realisierung einer neuen Prozesskette zur Integration von Kohlenstoff-Nanoröhren über Handhabung in technische Anwendungen.*: Dissertation, Universitätsverlag Karlsruhe. Karlsruhe. 2006.
- [Koker2008] Koker, T.; Kolew, A.; Gengenbach, U.; Bretthauer, G.: Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts INNTKA: *Integration von Kohlenstoff-Nanoröhren in Mikrostrukturen mit Potenzial für industrielle Anwendbarkeit*.
- [Kreuziger2007] Zitat durch D. Kreuziger: Statuserhebung Mikro-Nanotechnik in Hessen (2005), Vortrag „Mikrosystemtechnik im Rhein-Main-Gebiet und in Hessen“, Jahrestagung des mst-Netzwerk Rhein-Main e.V. in Frankfurt. 2007.
- [Kunsch2007] Kunsch, J. et al: *MEMS-based Infrared Emitters Based on Nano-amorphous Carbon, Laser Components*: Datenblatt Firma INTEX, Tucson Arizona, USA. Sensor. 2007.
- [Lotz2008] Lotz, P.; Matysek, M.; Lechner, P.; Hamann, M.; Schlaak, H. F.: *Dielectric elastomer actuators using improved thin film processing and nanosized particles: Smart Structures/NDE*. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) X. Proceedings of SPIE, Bd. 6927. 2008.
- [Matysek2008] Matysek, M.; Lotz, P.; Flittner, K.; Schlaak, H. F.: *New Electrode Materials and Technologies for Enhanced Performance of Stacked Dielectric Elastomer Actuators*: Conference proceedings: Actuator 2008, 11th International Conference on New Actuators and 5th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 9-11 June 2008. Bremen. 2008. S. 872-875.
- [MerckLab2008] MerckLab 2008: [www.chemie.tu-darmstadt.de/forschung\\_5/mercklab/tudmercklab.de.jsp](http://www.chemie.tu-darmstadt.de/forschung_5/mercklab/tudmercklab.de.jsp), Stand: 14.11.2008
- [Paschen2004] Paschen, H. et al.: *Nanotechnology*: Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2004.
- [Quandt2008] Sylvia Quandt Research GmbH: *Nanotechnology - Small Scale High Potential Industrial Tool Box*. Mai 2008.
- [Schieferdecker1998] Dr. J. Schieferdecker: *Sensortechnik, Handbuch für Praxis und Wissenschaft, Kapitel 15: Infrarot-Strahlungssensoren zur berührungslosen Temperaturmessung*, Hrsg: H.-J. Tränkler, E. Obermeier, Springer Verlag. 1998.
- [Schneider1] Schneider, J.; Rikowski, E.: *Nanostrukturierte Materialien als aktive Bausteine in mikrostrukturierten Sensoren*: Hessen Nanotech NEWS 5|2007. 2007. S. 6.
- [Schneider2] Schneider, J.: *Nanostrukturierte Materialien als aktive Bausteine in mikrostrukturierten Sensoren*: Jahrestagung des Mikrosystemtechnik Netzwerks Rhein-Main e.V. 2007. IHK Frankfurt. 2007.
- [Schneider3] Yilmazoglu, O.; Popp, A.; Kaldirim, O.; Pavlidis, D.; Schneider, J.J.: *CNT-Based Gas Sensors with Integration-friendly Micro-nano Features*: International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS). 2008.

## 7.4.2 Weiterführende Literatur

- [Schneider4] Schneider, J.J.: Abschlusspräsentation des MNI-Projekts MNI-CNTs: *Hochgeordnete mikro-nano-integrierte Kohlenstoffnanoröhren (CNTs) als chemische Sensoren*.
- [Schneider5] Schneider, J.J.: Technische und wirtschaftliche Potenziale der Nano-Mikro-Integration: 4. Nanotechnologieforum Hessen „What's next for International Nanomarkets“, 22. und 23. November 2007, Messe Frankfurt, Halle 4: Perspektivgespräch, Dienstag 22. November 2007 um 14.30 Uhr im Forum 1.
- [Tschulena1] Tschulena, G.: *Forschungsförderung für die Sensorik*, SENSOR MAGAZIN 3. 2008. S. 31-33.
- [Tschulena2] sgt Sensorberatung Guido Tschulena: *Organisation zu Sensorik-relevanten Förderprogrammen in Europa und in Deutschland: Förderworkshop, SENSOR + TEST 2008*. Nürnberg. 2008.
- [Wolter2006] Wolter, K.-J.; Zerna, T.: *Trends in der Systemintegration: Vortrag 48*. SAET: 2006.
- [Zöllmer2008] Zöllmer, V.; Busse, M.: Abschlusspräsentation des MNI-Projekts NANOSKALA / Nanotinten: *Nanomaterialien für eine skalenübergreifende Aufbau- und Verbindungstechnik*
- [ZVEI2005] Fachverband Electronic Components and Systems im ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronik e.V.: *Produktionstechnik für eine Aufbau- und Verbindungstechnik in der Nanoelektronik*. 2005.
- Bhushan, B.: *Springer handbook of nanotechnology*: Springer. Berlin. 2007.
- Bourne, M.: *A Consumer's Guide to MEMS and Nanotechnology*: Bourne Research LLC. Scottsdale, Ariz., USA. 2007.
- GMM (VDE / VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik): *Mikro-Nano-Integration: Workshop 12.-13. März 2009*. Seeheim. [www.mikro-nano-integration.de](http://www.mikro-nano-integration.de)
- Jones, Richard A.L.: *Soft Machines: nanotechnology and life*: Oxford University Press. August 2004.
- Menz, W.; Mohr, J.; Paul, O.: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*: Wiley-VCH, 3. Auflage. Weinheim. April 2005.
- mst-Netzwerk Rhein-Main: 3. Jahrestagung 2007 „Mikro-Nano-Integration“: Frankfurt. 4.7.2007. [www.mst-rhein-main.de](http://www.mst-rhein-main.de)
- IET (The Institute of Engineering and Technology): *Micro & Nano Letters*: <http://ietdl.org/MNL>
- Tiemann, M.: *Porous Metal Oxide as Gas Sensors*: Wiley-VHC, Chemistry - A European Journal, Vol.13. Weinheim. 2007.
- Tschulena, G.: *Mikrosystemtechnik - Grundlagen, Praxis, Trends*: Hüthig-Verlag. Heidelberg. 1999.
- VDI / VDE-IT: *Micro and Nano Materials and Micro-Nano Integration*: mstnews 3 | 2008: Berlin, Ulm. 2008. [www.mstnews.de](http://www.mstnews.de)
- Werner, M.; Fecht, H.-J.: *Nano Micro Integration: Quo vadis?*: mst news 4 | 2006: Micro-Nano Integration. Berlin, Ulm. 2006



**Atlas** Kompetenz- und Infrastrukturatlas  
Nanotechnologien in Hessen  
Competence and Infrastructure Atlas  
Nanotechnologies in Hessen

**Atlas** Kompetenzatlas Photonik in Hessen  
Competence Atlas Photonics in Hessen

**Band 1** Einsatz von Nanotechnologie  
in der hessischen Umwelttechnologie  
Innovationspotenziale für Unternehmen  
**Uses of Nanotechnology in  
Environmental Technology in Hessen**  
Innovation potentials for companies

**Band 2** Nanomedizin  
Innovationspotenziale in Hessen für Medizintechnik  
und Pharmazeutische Industrie

**Band 3** Nanotechnologie im Auto  
Innovationspotenziale in Hessen für die Automobil-  
und Zuliefer-Industrie  
**Nanotechnologies in Automobiles**  
Innovation Potentials in Hesse for the Automotive  
Industry and its Subcontractors

**Band 4** NanoKommunikation  
Leitfaden zur Kommunikation von Chancen und  
Risiken der Nanotechnologien für kleine und  
mittelständische Unternehmen in Hessen  
**Supplement zum Leitfaden NanoKommunikation**  
Innovationsfördernde Good-Practice-Ansätze zum  
verantwortlichen Umgang mit Nanomaterialien

**Band 5** Nanotechnologien für die optische Industrie  
Grundlage für zukünftige Innovationen in Hessen

**Band 6** NanoProduktion  
Innovationspotenziale für hessische Unternehmen  
durch Nanotechnologien im Produktionsprozess

**Band 7** Einsatz von Nanotechnologien  
in Architektur und Bauwesen

**Band 8** NanoNormung  
Normung im Bereich der Nanotechnologien  
als Chance für hessische Unternehmen

**Band 9** Einsatz von  
Nanotechnologien im Energiesektor  
**Nanotechnology Applications in the Energy Sector**

**Band 10** Werkstoffinnovationen aus Hessen  
Potenziale für Unternehmen

**Band 11** Sichere Verwendung von  
Nanomaterialien in der Lack- und Farbenbranche  
Ein Betriebsleitfaden

**Band 12** Nanotech-Kooperationen  
Erfolgreiche Kooperationen für kleine und mittlere  
Nanotechnologie-Unternehmen

**Band 13** Mikro-Nano-Integration  
Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik

**Band 14** Materialeffizienz  
durch den Einsatz von Nanotechnologien  
und neuen Materialien

**Band 15** Nanotechnologie in Kunststoff  
Innovationsmotor für Kunststoffe, ihre Verarbeitung  
und Anwendung

**Band 16** NanoAnalytik  
Anwendung in Forschung und Praxis

**Band 17** Nanotechnologie für den Katastrophenschutz  
und die Entwicklungszusammenarbeit  
**Nanotechnologies for emergency management  
and development cooperation**

**Band 18** Material formt Produkt  
Innovations- und Marktchancen erhöhen  
mit professionellen Kreativen

**Materials Shape Products**  
Increase innovation and market opportunities  
with the help of creative professionals

**Band 19** Patentieren von Nanotechnologien

**Band 20** Nanotechnologie in der Natur  
- Bionik im Betrieb

**Web-Pub 1** Intelligente Materiallösungen  
zum Erhalt von Werten



Hessen

Nanotech

[www.hessen-nanotech.de](http://www.hessen-nanotech.de)



Projekträger der Aktionslinie **Hessen-Nanotech**  
des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft,  
Verkehr und Landesentwicklung



**HessenAgentur**

HA Hessen Agentur GmbH

Das Projekt wird kofinanziert aus  
Mitteln der Europäischen Union



EUROPÄISCHE UNION:  
Investition in Ihre Zukunft  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung