

Empfehlung für einen weiterbildenden Masterstudiengang Nanotechnologie

Markus Biesalski,
Wolfgang Harneit,
Simone Herth,
Thomas Kraska,
Angelika Kühnle,*
Robert Stark

Zukunftsforum Nanotechnologie der DECHEMA e.V.

Dezember 2007

* Anfragen und Kommentare zu diesem Papier richten Sie bitte an die korrespondierende Autorin:

Dr. Angelika Kühnle
Universität Osnabrück
Fachbereich Physik
Barbarstraße 7
D-49076 Osnabrück
kuehnle@uos.de

Inhalt

I. Einführung	5
II. Grundideen	5
III. Empfehlung für ein Curriculum in der Nanotechnologie	6
IV. Übersicht über die Pflicht- und Wahlmodule	8
IV.1. Pflichtmodule	8
IV.2. Wahlpflichtmodule	9
IV.3. Industrie-/Laborpraktikum und Schlüsselqualifikationen	9
IV.4. Masterarbeit	9
V. Beschreibung der Inhalte der Pflichtmodule	11
VI. Beschreibung der Inhalte der Wahlpflichtmodule	23
VII. Glossar	25

I. Einführung

Nanotechnologie ist eine Schlüsseltechnologie, die weltweit zunehmend an Bedeutung in Industrie und Forschung gewinnt. Auf diesem Gebiet ist qualifiziertes Fachpersonal entlang der Wertschöpfungskette von der Grundlagen- und angewandten Forschung bis hin in die Industrie unabdingbare Voraussetzung. Nur so kann im internationalen Vergleich im jeweiligen Bereich eine Spitzenpositionen eingenommen werden. Besondere Bedeutung hat dabei die Interdisziplinarität der Nanotechnologie, die vernetztes Denken durch das Vermitteln von Systemzusammenhängen und problemorientiertem Denken schult. Dies erfordert gut ausgebildete Kommunikations- und Präsentationsfähigkeit zusammen mit der ständigen Bereitschaft, sich auf neue Sichtweisen einzulassen. Die Arbeit an einem wissenschaftlich-technischen Problem darf nicht an den Grenzen eines Fachgebietes aufhören. Vielmehr sollen die Studierenden befähigt werden, unabhängig von Disziplingrenzen problemorientierte Lösungen zu entwickeln.

Im Rahmen des Bologna-Prozesses werden gegenwärtig unterschiedliche Masterstudiengänge im Bereich der Nanotechnologie und Nanowissenschaften eingerichtet. Ziel der vorliegenden Empfehlung ist es, eine gemeinsame Basis für die Ausbildung zu definieren, um das Kompetenzprofil Nanotechnologie zu schärfen.

Dieses Positionspapier spricht Empfehlungen für eine interdisziplinäre Ausbildung in der Nanotechnologie aus, die zukünftiges Fachpersonal adäquat auf die anspruchsvollen und vielseitigen Anforderungen im Bereich der Nanotechnologie vorbereitet. Diese Empfehlung ist auf die Diskussion des weiterbildenden Masterstudiengangs (*Master of Science/Technology*) beschränkt.

Im Zuge der fortschreitenden Profilbildung der Hochschulen sehen wir mit diesem Positionspapier eine Chance, innerhalb der ingenieur- und naturwissenschaftlichen Ausrichtung gezielt neue Wege im Bereich der Lehre in der Nanotechnologie zu gehen.

II. Grundideen

Nanotechnologie repräsentiert ein höchst vielseitiges Forschungs- und Technologiefeld, das auf den Erkenntnissen der Natur- und Ingenieurwissenschaften basiert. Aus diesem Grund empfehlen wir eine solide Ausbildung aus einem der Bereiche Physik, Chemie, Biologie, Werkstoffwissenschaften, Elektrotechnik, Maschinenbau oder Verfahrenstechnik als Eingangsvoraussetzung für den Masterstudiengang Nanotechnologie.

Das im Folgenden beschriebene Curriculum beschränkt sich auf die Ausarbeitung einer Empfehlung für einen **weiterbildenden Masterstudiengang** Nanotechnologie. Die Empfehlung ist so angelegt, dass ein Bachelorabsolvent eines natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Studiengangs das Curriculum erfolgreich durchlaufen kann. Um Unterschiede in den Qualifikationen der Studierenden zu Beginn des Masterstudiengangs anzugleichen, können im ersten Semester studienbegleitend fehlende Kenntnisse aus anderen Disziplinen individuell erworben werden.

Die Module im Masterstudiengang bestehen aus Kursen, die zentrale Aspekte der Nanotechnologie thematisieren. Die Fähigkeit der Absolventen, in verschiedenen Fachsprachen erfolgreich zu kommunizieren, stellt eines der herausragenden Ziele dieses interdisziplinären Studiengangs dar. Insbesondere wird eine Verzahnung zwischen Natur- und Ingenieurwissenschaften angestrebt. Deshalb kann es sinnvoll sein, einige Veranstaltungen fakultätsübergreifend zu organisieren und zu lehren. So kann das Zukunftspotenzial, das die interdisziplinäre Ausbildung über Fachbereichsgrenzen hinweg bietet, voll genutzt werden.

Neben der wissenschaftlichen Qualifikation halten wir sowohl Praxiserfahrung als auch die Schulung von Präsentationskompetenz und Kommunikationsfähigkeit für elementare Bestandteile der Ausbildung. Im folgenden Text wird dies als „Schlüsselqualifikationen“ bezeichnet. Je nach Ausrichtung des Studiengangs kann Praxiserfahrung entweder im Rahmen eines Industriepraktikums oder als Laborpraktikum erworben werden, das idealerweise im Ausland absolviert wird.

III. Empfehlung für ein Curriculum in der Nanotechnologie

Ausgehend von diesen prinzipiellen Überlegungen ergibt sich ein vierstufiger Aufbau des Masterstudiengangs aus Pflichtmodulen, Wahlpflichtmodulen, einem Industrie- oder Laborpraktikum und der abschließenden Masterarbeit.

Die Pflichtmodule umfassen 33 ECTS¹ Punkte und werden in den ersten beiden Semestern absolviert. Inhaltlich sollen die Pflichtmodule wesentliche Kenntnisse und Arbeitsmethoden der Nanotechnologie vermitteln. Die Auswahl der Themen ist dabei bewusst breit angelegt, um interdisziplinäre Zusammenhänge zu vermitteln.

Für die Wahlpflichtmodule wird ein Gesamtumfang von etwa 36 ECTS empfohlen. Es ist sinnvoll, die Wahlpflichtfächer aus maximal zwei Modulen zu wählen, um so eine Vertiefung zu ermöglichen. Dies kann zum Beispiel durch eine Aufteilung von 24 ECTS im ersten und 12

¹ Abkürzungen siehe Glossar

ECTS im zweiten Wahlpflichtmodul erreicht werden. In den Wahlpflichtmodulen sollen die Studierenden vertiefte Kenntnisse erwerben, mit denen die Masterarbeit und eine spätere berufliche Tätigkeit in Forschung und Entwicklung vorbereitet wird. Die Wahlpflichtmodule sollten deshalb das Forschungsprofil der jeweiligen Hochschule widerspiegeln. Im Folgenden wurden beispielhaft Vorschläge zu Wahlpflichtmodulen ausgearbeitet, in denen die Bereiche „Materialien in der Nanotechnologie“, „Vertiefung in die Theoretische Nanotechnologie“, „Lebenswissenschaften und Nanotechnologie“ und „Bauelemente in der Nanotechnologie“ intensiv behandelt werden. Selbstverständlich sind hier weitere Themen in Abhängigkeit der Ausrichtung der Hochschule möglich und im Sinne der Profilbildung erwünscht.

Das Labor- oder Industriepraktikum (15 ECTS) dient als Vorbereitung zur Masterarbeit und sollte im dritten Semester durchgeführt werden. Es wird empfohlen, dieses Praktikum im Ausland zu absolvieren. Ebenso ist ein Modul zur Schulung von Schlüsselqualifikationen im Umfang von 6 ECTS vorgesehen. Daran schließt sich im vierten Semester die Masterarbeit mit 30 ECTS an. In Summe werden somit mindestens 120 ECTS im Masterstudiengang erworben.

Da ein solcher Masterstudiengang von Studierenden verschiedener Fachrichtungen besucht werden soll, ist es bei der Verteilung der Vorlesungen auf die einzelnen Semester sinnvoll, zusätzlich den Besuch von grundlegenden Vorlesungen im ersten Semester zu ermöglichen. Aus diesem Grund sind im nachfolgenden Plan für das erste Semester insgesamt lediglich 24 ECTS vorgesehen. Damit soll die Gelegenheit gegeben werden, ergänzende Inhalte individuell nachzuholen. Diese ergänzenden Inhalte sind studienbegleitend zu erwerben und gehen nicht in die Benotung des *Masters of Science/Technology* ein. Diese Regelung wird dem Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 12.06.2003² gerecht, nach dessen Maßgabe die Verleihung des Mastergrades für einen weiterbildenden Studiengang nur dann erlaubt sein soll, wenn dieser in seinen Anforderungen einem konsekutiven Masterstudiengang gleichwertig ist. Bachelorabsolventen, die ihre Ausrichtung im Masterstudiengang Nanotechnologie stark ändern wollen (zum Beispiel bei einer Kombination von Biologie im Bachelorstudiengang zum Schwerpunkt Theoretische Nanotechnologie im Masterstudiengang), werden unter Umständen die Freiräume im Bachelorstudiengang nutzen müssen, um die benötigten Grundvoraussetzungen für ihre neue Ausrichtung zu erwerben.

² 10 Thesen zur Bachelor- und Masterstruktur in Deutschland
Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 12.06.2003

IV. Übersicht über die Pflicht- und Wahlmodule

Im Folgenden ist ein Vorschlag für die Aufteilung der Inhalte in Pflicht- und Wahlmodule gegeben.

IV.1. Pflichtmodule

Modul „Größenabhängige Phänomene“
bestehend aus 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übungen
insgesamt 8 ECTS

Modul „Herstellung und Charakterisierung von nanoskaligen Materialien“
bestehend aus zwei Veranstaltungen je 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung
insgesamt 8 ECTS

Modul „Theoretische Nanotechnologie“
bestehend aus zwei Veranstaltungen je 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung
insgesamt 8 ECTS

Modul „Bionanotechnologie“
bestehend aus 2 SWS Vorlesung
insgesamt 3 ECTS

Modul „Nanotechnik“
bestehend aus 2 SWS Vorlesung
insgesamt 3 ECTS

Modul „Praktikum“
bestehend aus 6 SWS Versuchen, die sich aus den Inhalten der Pflichtvorlesungen zusammensetzen
insgesamt 3 ECTS

IV.2. Wahlpflichtmodule

„Materialien in der Nanotechnologie“

„Vertiefung in die Theoretische Nanotechnologie“

„Lebenswissenschaften und Nanotechnologie“

„Bauelemente in der Nanotechnologie“

bestehend aus 24 ECTS im zweiten und 12 ECTS im dritten Semester

Zusätzlich zu den genannten Wahlpflichtmodulen können selbstverständlich noch weitere Wahlpflichtmodule in Abhängigkeit des Profils der Universität/Fachbereiche ergänzt werden.

IV.3. Industrie-/Laborpraktikum und Schlüsselqualifikationen

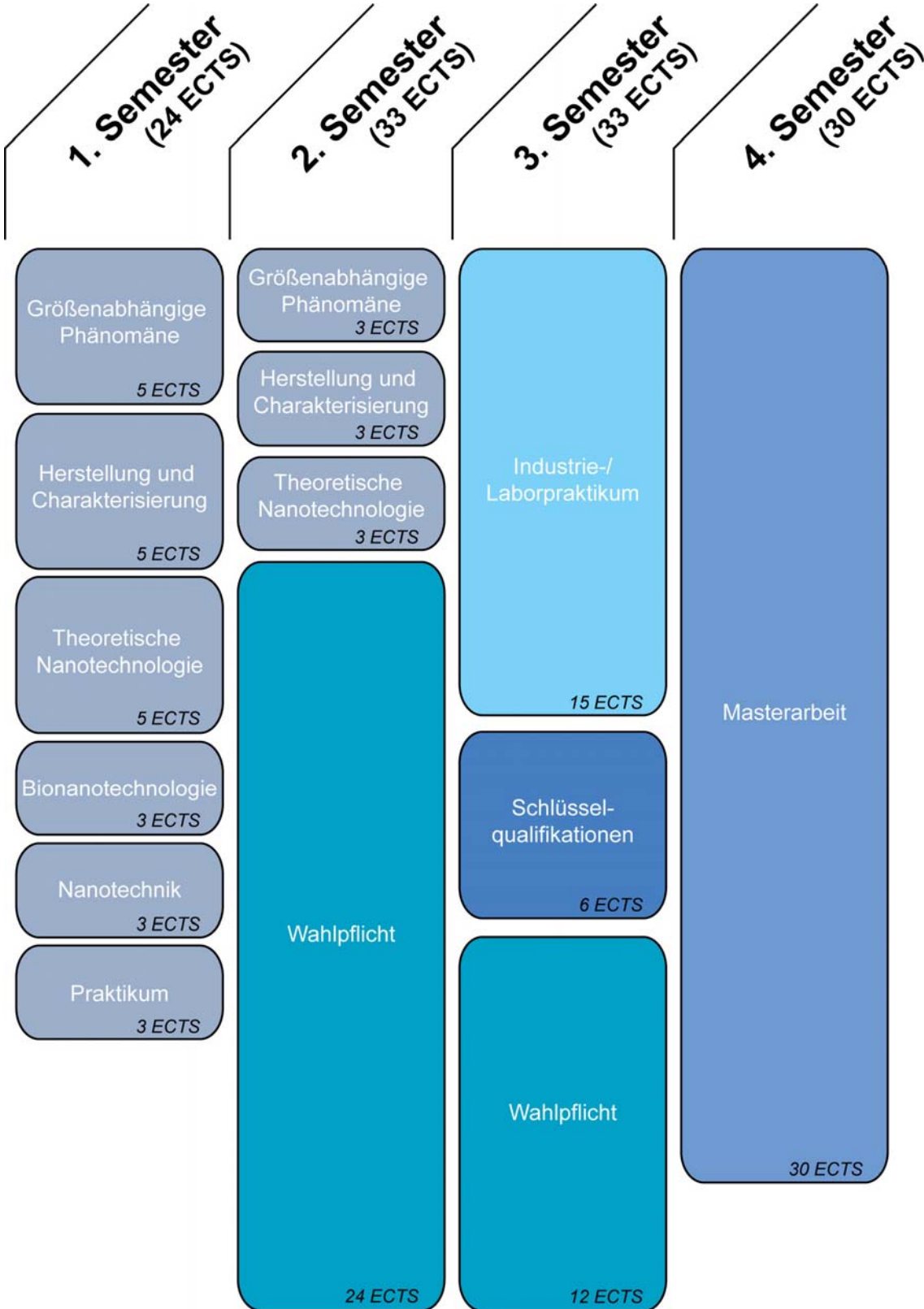
Industrie-/Laborpraktikum (idealerweise im Ausland) 15 ECTS

Schlüsselqualifikationen 6 ECTS

IV.4. Masterarbeit

Masterarbeit im Umfang von 30 ECTS

Die folgende Übersicht zeigt eine mögliche Aufteilung der Module auf die vier Semester des Masterstudiengangs. Ein Quadrat entspricht dabei einem ECTS. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im 2. Semester insgesamt 24 ECTS im Wahlbereich vorgesehen sind, die aus den genannten Modulen ausgewählt werden können. Im 3. Semester sind insgesamt 12 ECTS im Wahlbereich vorgesehen.



V. Beschreibung der Inhalte der Pflichtmodule

Modul „Größenabhängige Phänomene“

bestehend aus 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übungen

insgesamt 8 ECTS

In diesem Modul sollen die Größenabhängigkeit physikalischer und chemischer Eigenschaften sowie neuartige Phänomene auf der Nanoskala behandelt werden. Dieses Modul beinhaltet unter anderem eine Einführung in Quanteneffekte sowie eine Beschreibung der Eigenschaften von Kohlenstoffnanoröhren und Clustern. Neben der Vermittlung von Grundlagen der Nanotechnologie werden die Lehrinhalte vor dem Hintergrund möglicher Anwendungen der Phänomene in der Industrie diskutiert.

Inhalte:

Nanopartikel und Nanoobjekte

- Quantenpunkte und halbleitende Nanopartikel
- Magnetische Nanopartikel und ihre medizinischen Anwendungen
- Struktur von Clustern und Kohlenstoffnanoröhren sowie Anwendungen

Grenz- und Oberflächen

- Oberflächeneigenschaften
- Thermodynamik von Oberflächen
- Oberflächenkräfte
- Effekte eingeschränkter Geometrie (*confinement* Effekte)

Nanomaterialien

- Defekte und mechanische Eigenschaften
- Photonische Kristalle und Metamaterialien
- Elektrische Eigenschaften (Einfluss von Defekten, Solarzellen, Nano-Pinning von Hochtemperatursupraleitern)
- Chemische Eigenschaften (Ionenleitfähigkeit, Gassensoren, Wasserstoffspeicher)

Modul „Herstellung und Charakterisierung von nanoskaligen Materialien“

bestehend aus insgesamt 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übungen

insgesamt 8 ECTS

Im Modul „Herstellung und Charakterisierung von nanoskaligen Materialien“ soll ein umfassender Einblick in die Herstellungs- und Syntheseverfahren von nanoskaligen Systemen gegeben werden. Dabei ermöglicht es dieses Modul in besonderer Weise, die Grenzen zwischen den klassischen Disziplinen in der Lehre aufzuweichen. So können zum Beispiel bei der Einführung in die Herstellung von Nanopartikeln die verschiedenen Strategien aus Chemie (Präzipitation, Polymerisation), Physik (Deposition, Nukleation) und Biologie (Biomineralisation, Selbstassemblierung) gemeinsam berücksichtigt und übergreifende, wiederkehrende Konzepte diskutiert werden.

Dieses Modul besteht aus zwei Teilen:

(A) Vorlesung Herstellung (2 SWS) mit Übungen (1 SWS) entsprechend 4 ECTS

(B) Vorlesung Charakterisierung (2 SWS) mit Übungen (1 SWS) entsprechend 4 ECTS

Wir geben mögliche Themen an, aus denen eine Auswahl getroffen werden kann. Es können wahlweise eine integrierte Veranstaltung zu Herstellung und Charakterisierung oder zwei unabhängige Veranstaltungen angeboten werden, je nach geplantem Umfang, Profilbildung und organisatorischen Gesichtspunkten (z.B. Beteiligung mehrerer Fachbereiche). Für eine integrierte Veranstaltung empfehlen wir eine didaktische Abstimmung der Charakterisierungs- und der Herstellungsmethoden.

(A) Herstellung

bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übungen
insgesamt 4 ECTS

Einordnung der Nanostrukturen

- a) Nanopartikel
 - Kohlenstoffhaltig (Fullerene, Nanotubes, Ruß)
 - Metalloxide (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , ZnO , ...)
 - Halbleiter (CdTe, II-VI, I-III-VI₂, Si, ...)
 - Metalle (Au, Ag, Fe, ...)
- b) Nanodrähte und -strukturen (metallisch, halbleitend...)
- c) Nanoschichten (Pufferschichten, Templatbildung, ...)
- d) Nanoporöse Netzwerke (Zeolithe, metallorganische Netzwerke, organische Zeolithe, Dämmstoffe)

Herstellungsverfahren und Zuordnung zu den o.g. Nanostrukturen a) bis d):

Nasschemische Syntheseverfahren – (a)

- Kristallwachstum: Flux-, Elektro- und Laserkristallisation, Präzipitation
- Hydrothermalsynthese im Autoklaven (instabile Phasen wie Anatas, Cetineite = leitfähige Zeolithe)
- Polyolverfahren
- Sol-Gel Verfahren

Gasphasenprozesse – (a)

- Aerosolprozess: Dynamik flüssiger und fester Partikel in Gasen: Nukleation, Koagulation, Kondensation, Transport und Deposition
- Arc-Discharge, Laserplasma, Verbrennung für Fullerene und Nanotubes

Schichtdepositionsverfahren – (c)

- im Vakuum: (*metalorganic*) *vapour phase epitaxy*, *molecular beam epitaxy*, (*metalorganic*, *plasma-enhanced*) *chemical vapour deposition*, *Sputtern*, *pulsed laser deposition*
- aus Flüssigkeiten: Elektrodeposition, Sol-Gel, SILAR, ILGAR

Selbstorganisation auf Oberflächen – (a, b und c)

- Selbstorganisiertes Wachstum (z.B. Quantenpunkte durch fehlangepasste Heteroepitaxie)
- Template auf Oberflächen (z.B. molekulare Template)

Soft Matter und biologische Verfahren – (überwiegend c und d)

- Mizellen
- Polymere
- biologische Makromoleküle

Top-Down Strukturierungsverfahren – (b und c)

- Lithografieverfahren: optisch, Elektronen, Ionen, ...
- Schichtstrukturierung (Prozesskette in der Mikroelektronik)
- μ -Contactprinting

Nanoporöse Systeme – (d)

- Synthese volumenartiger Template (z.B. Nanoröhren, Poren, Zeolithe, Metallorganische Netzwerke)
- Füllen volumenartiger Template (ILGAR/SILAR, Elektrodeposition, ...)

(B) Charakterisierung nanoskaliger Systeme

bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übungen

insgesamt 4 ECTS

Mikroskopische Methoden

- optische Mikroskopie
- Elektronenmikroskopie
- Rastersondenmikroskopie

Methoden der Partikelanalytik

- statische Lichtstreuung
- dynamische Lichtstreuung

Partikelmesstechnik in der Verfahrenstechnik und Online-Verfahren

- Überblick über wichtige verfahrenstechnische Methoden
- Verfahren zur Messung der Partikelgrößenverteilung
- Einfluss von Partikeleigenschaften auf die Verarbeitbarkeit

andere optische Verfahren und Beugungsmethoden zur Strukturaufklärung

- *small angle X-ray scattering*
- *wide angle X-ray scattering*
- Reflektometrie (Röntgen und/oder Neutronen)
- optische Schichtdickenmessung, Ellipsometrie

Spektroskopische Verfahren / Verfahren zur chemischen Analytik an nanoskaligen Materialien

- Überblick über ausgewählte spektroskopischen Methoden in der Analytik an nanoskaligen Materialien (zum Beispiel UV-Vis Spektroskopie Infrarot-Spektroskopie, Raman-Spektroskopie, surface-enhanced Raman Spektroskopie)
- Fluoreszenzspektroskopie
- ausgewählte elektronenspektroskopische Methoden (zum Beispiel Auger, Röntgen/UV Ultraviolet Photoelektronen Spektroskopie)

Methoden der Massenspektrometrie

- Quadrupolmassenspektrometrie
- Sekundärionenmassenspektrometrie

Modul „Theoretische Nanotechnologie“

bestehend aus insgesamt 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übungen

insgesamt 8 ECTS

Im Modul Theoretische Nanotechnologie sollen theoretische Methoden behandelt werden, die für die Untersuchung und Modellierung von nanoskaligen Systemen relevant sind. Die in den Grundideen formulierten Ziele des Studiengangs sollen sich auch in diesem Modul widerspiegeln. Die darin geforderte Interdisziplinarität bedeutet, dass theoretische Methoden aus unterschiedlichen Disziplinen in dem Modul enthalten sein sollen. Neben einer Einteilung der Methoden nach Fachbereichen lassen sich die Methoden auch nach der Größenskala kategorisieren, für die sie anwendbar sind. Die aktuelle Entwicklung der theoretischen Konzepte hin zur skalenübergreifenden Modellierung ist ein weiterer Aspekt des theoretischen Moduls.

Bei der Zusammenstellung der Inhalte dieses Moduls wurde eine ausgewogene Balance zwischen Methodenvielfalt auf der einen Seite und ausführlicher Behandlung der Themen auf der anderen Seite angestrebt. Damit soll den Studierenden vermittelt werden, welche Methoden für welche Fragestellung geeignet sind.

Die Voraussetzungen für dieses Modul sind bei Bachelorabsolventen in Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften gegeben: Im Physik- sowie im Chemiebachelor werden u.a. Quantenmechanik und statistische Thermodynamik gelehrt. Absolventen eines Bachelor in Ingenieurwissenschaften sind mathematisch gut ausgebildet und mit Kontinuumsmethoden vertraut. Diese Bachelorabsolventen können ihre Kompetenzen hinsichtlich der Anwendung auf dem Gebiet der Nanotechnologie ausbauen und komplementäre Methoden ergänzen. Absolventen anderer Bachelorstudiengängen sollten gegebenenfalls vorbereitende oder ergänzende, nicht in die Benotung eingehende Veranstaltungen in den theoretischen Gebieten der Physik, Chemie oder Ingenieurwissenschaften belegen, wie sie in dieser Empfehlung für das erste Semester vorgesehen sind.

Das theoretische Modul besteht aus zwei Vorlesungen:

(A) Vorlesung Theoretische Nanotechnologie I (2 SWS) mit Übungen (1 SWS) entsprechend 4 ECTS

(B) Vorlesung Theoretische Nanotechnologie II (2 SWS) mit Übungen (1 SWS) entsprechend 4 ECTS

(A) Theoretische Nanotechnologie I

bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übungen

insgesamt 4 ECTS

Inhalte:

Quantenmechanik

- Übersicht über Lösungsmethoden, Vereinfachungen und Anwendbarkeit der verschiedenen Methoden
- Anwendungsbeispiele: Quantenpunkte, -töpfe und -drähte sowie Kohlenstoffnanoröhren

Theoretische Festkörperphysik

- Eigenschaften im nanoskaligen Bereich: Bändermodell, Metalle, Isolatoren, Magnetismus, etc.
- Größenabhängige Eigenschaften

(B) Theoretische Nanotechnologie II

bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übungen

insgesamt 4 ECTS

Inhalte:

Statistische Thermodynamik

- Theoreme, Statistiken, Zustandssummen, Ensembles
- Statistische Thermodynamik kleiner Systeme

Molekulare Simulationen

- Methoden: MC, MD, Ensembles, Potentialmodelle
- MD Simulationen von Nanosystemen: Partikel, Komposite, Tubes, nanoporöse Systeme, dünne Schichten, etc.
- Quantenmechanik/*Molecular Modelling* (QM/MM) Kopplung, Car-Parrinello MD

Mesoskopische Simulationen

- ausgewählte Methoden: *Dissipative Particle Dynamics*, *Lattice Boltzmann Methode*, Phasenfeld-Simulationen
- Anwendungen im Bereich Soft Matter: Polymere, Kolloide
- Kopplung mit molekularen Simulationen

Modul „Bionanotechnologie“

bestehend aus 2 SWS Vorlesung

insgesamt 3 ECTS

Die Bionanotechnologie bezeichnet Technologien basierend auf den physikalischen, chemischen und systemischen Vorgängen in lebenden Organismen. Sie verbindet molekulare Struktur- und Funktionsbiologie mit den molekularen Nanowissenschaften. Inhalt dieses Moduls ist die Vermittlung von Grundlagen im Bereich der Mikro-/Nanofluidik, biologischer Transportprozesse und biosynthetischer Moleküle (DNA, Proteine etc.) zum Beispiel für den Einsatz in der Biosensorik.

Inhalte:

Biologische Transportphänomene

- Fluide und Transportphänomene: Hydrodynamische Gesetzmäßigkeiten (Navier-Stokes, Mikrohydrodynamik, Laminarität, Grenzflächen)
- Biologische Fluide (im besonderen Fluid Mechanics: Macro- versus Micro-flow)
- Transportphänomene in der Biologie (Massetransport, Energietransport, Membranen, Transmembrantransport, Pharmacokinetik, Brownsche Ratschensysteme)

Biosynthetische Systeme in den Nanowissenschaften

- Peptide, Proteine: Rekombinationstechnologien
- DNA, Polymerase-Kettenreaktion für Nanobausteine
- Anwendung in der Material- und Wirkstoffsynthese

Oberflächen und Oberflächenfunktionalisierung in der Bionanotechnologie

- Adsorption von biologischen Molekülen
- Anbindung/Einbindung von funktionalen Biomolekülen (DNA, Peptide, Proteine)

Biosensorik

- biologische Sondenmoleküle, Ausleseverfahren
- DNA-Chips (Herstellungsverfahren, Einsatz)
- Protein- und Metabolomikchips (Antikörper, Immobilisierungsreaktionen, Einsatz, Dynamik und Limitierungen)
- Zellchips (Zell-Matrix-Adhäsion, zielgerichtete Adhäsion, chemische- und topographische Manipulation der Zelladhäsion, Einsatz von Zellchips)

Modul "Nanotechnik"

bestehend aus 2 SWS Vorlesung

insgesamt 3 ECTS

Das Pflichtmodul Nanotechnik führt in die Entwicklung und Herstellung von funktionellen Bauteilen für die Nano-/Mikrosystemtechnik ein. Grundlegende Lehrinhalte, die hier vermittelt werden sollen, reichen von der Reinraum- und Vakuumtechnik über Dünnschichtprozesse, bis zur Mikromechanik und der Lithographie. Der Bereich Nanotechnik ist stark ingenieurwissenschaftlich ausgerichtet und hat einen direkten Bezug zu zukünftigen Technologien, in welchen nanoskalige Materialien zu funktionellen Bauelemente integriert werden.

Inhalte:

Einordnung der Mikrosystemtechnik sowie Materialien der Mikrosystemtechnik

- Historisches
- Silizium
- Kunststoffe für Mikrosysteme

Reinraum und Vakuumtechnik

- Anforderungen an die Mikroelektronik – minimale Strukturgrößen
- Aufbau eines Reinraums und Reinraumklassifizierung
- Vakuum: Zustandsgrößen von Gasen, Gasdynamik, Vakuumerzeugung, Vakuummessung

Dünnschichtprozesse

- Oxidation
- Dotierung
- CVD, PVD
- Ätzen

Oberflächenmikromechanik (OMM) - Bulk Mikromechanik

- Unterschiede OMM zum Volumen
- Opferschichttechnologien

Lithographie

- Resisttechnologie
- Optische Lithographie
- Röntgenlithographie
- Elektronenstrahlithographie

- SU8 Technologien und Trockenresists
- Imprint-, Embossing und Moldingverfahren

Aufbau und Verbindungstechnik

- Waferbonden
- Chipmontagetechniken
- Hybrid-Integration

Modul "Praktikum"

bestehend aus 6 SWS Praktikum

insgesamt 3 ECTS

Das Praktikum ergänzt und vertieft ausgewählte Themen der Pflichtvorlesungen. Dabei sollen experimentelle und theoretische Themen behandelt werden. Da die Auswahl der Praktikumsversuche zum Ausbildungsprofil der jeweiligen Hochschule beiträgt, werden hier beispielhaft mögliche Versuchsthemen vorgeschlagen. Neben fachwissenschaftlichen Themen sind auch Arbeitsmethodik und Fragen der Arbeitssicherheit Inhalte dieses Moduls. Im experimentellen Teil des Praktikums sollen ausgewählte Aspekte der Nanotechnologie im Labor vermittelt werden. Aus dem Bereich der theoretischen Nanotechnologie sollen ausgewählte Inhalte der Vorlesungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Größenskalen anhand konkreter Computersimulationen mit vorhandenen Programmen behandelt werden.

Mögliche Versuche:

Größenabhängige Phänomene

- Optisches Nahfeld
- Spektroskopie an Quantenpunkten
- größenabhängige Schmelzpunktbestimmung

Herstellung und Charakterisierung

- Bestimmung der Korngrößen durch Röntgendiffraktion
- Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie
- Oberflächencharakterisierung mit Rastersondentechniken
- Herstellung einer Lotus-Oberfläche
- Partikelsynthese

Nanotechnik

- Spintronik: Versuche zu magnetischen Nanostrukturen
- Nanooptoelektronik: Charakterisierung eines Quantenpunktlasers
- Charakterisierung einer Mikro- oder Nanoelektromechanischen Resonators
- Charakterisierung laminarer Strömungen und von Mischern in mikrofluidischen Systemen
- Nanofabrikation mit Hilfe des Nanoimprint-Verfahrens

Nanobiotechnologie

- Oberflächenanalytik in biotechnologischen Mikrosystemen
- Umgang mit Zellkulturen, Gentransfektion

- DNA- und Protein-Arraytechnologie
- Zelladhäsionassay an Oberflächen
- Elektrophysiologie an Gehirnschnitten

Theoretische Nanotechnologie

- quantenmechanische Berechnungen (DFT/Car-Parrinello MD) für kleine Cluster, Röhren, etc.
- molekulardynamische Simulationen zur Nanopartikeln/Agglomeration, Koaleszenz
- mesoskopische Simulationen, *Dissipative Particle Dynamics*: Nanostrukturierten Kopolymersystemen oder Kolloide, *Lattice Boltzmann* Methode
- Kontinuumsimulationen, Partikel in Gasströmung, mechanische Eigenschaften auf der Nanometerskala

VI. Beschreibung der Inhalte der Wahlpflichtmodule

Materialien in der Nanotechnologie

In diesem Modul sollen die Eigenschaften verschiedendimensionaler, nanoskaliger Materialien zusammen mit den entsprechenden Herstellung- und Charakterisierungsverfahren behandelt werden. Diese Veranstaltung eignet sich besonders für Studierende, die eine Vertiefung in der Materialforschung anstreben. Beispiele für vertiefende Lehrinhalte sind im Folgenden aufgeführt.

- Null- und eindimensionale nanoskalige Objekte
- Grenzflächenphänomene
- Eigenschaften von nanostrukturierten Materialien
- Herstellung von Nanopartikeln
- Dünnschichtverfahren
- Nanostrukturierung von Materialien
- Physikalische Charakterisierungsmethoden
- Chemische Charakterisierungsmethoden

Vertiefung in die Theoretische Nanotechnologie

Bereits behandelte Methoden sollen vertieft werden, weitergehende Methoden sowie Einsatz der Rechenmethoden für spezielle Systeme soll vermittelt werden. Diese Vertiefung soll zur praktischen Anwendung der Methoden befähigen. Beispiele für vertiefende Lehrinhalte sind im Folgenden aufgeführt.

- Entwicklung unterschiedlicher Potentialmodelle
- Nichtgleichgewichtssimulationen
- Simulation biochemischer Systeme
- Hybridsysteme, Komposite
- Mechanik nanostrukturierter Systeme
- Kontinuumssimulationen: Stoff- und Energiebilanzen, Populationsbilanzen
- Skalenübergreifende Modellierung
- Nanofluid Simulationen

Lebenswissenschaften und Nanotechnologie

Das Wahlpflichtmodul "Lebenswissenschaften und Nanotechnologie" vermittelt unter anderem die Entwicklung neuartiger Materialien in der Nanomedizin (z.B. *targeted drug delivery*); Herstellung templatisierter/selbstorganisierter Materialien; Biosensorik, *Biocomputing* und Energiegewinn/-umsatz in miniaturisierten Bauteilen (z.B. DNA-basierte elektronische Bauteile und Biobrennstoffzellen) sowie die Entwicklung moderner Biomaterialien („intelligente“ Implantatbeschichtungen und bakterizide Oberflächen). Beispiele für vertiefende Lehrinhalte sind im Folgenden aufgeführt.

tissue engineering und Nanomedizin

Materialien und Biokompatibilität

biologische Materialien für Elektronentransport und *Computation*

biologische Materialien für Energieerzeugung, -transport und -speicherung

Selbstorganisierte Bionanomaterialien

Toxikologie von nanoskaligen Materialien

Proteine an Oberflächen

Mikro-/Nanomanipulation und Elektrophysiologie

Bauelemente in der Nanotechnologie

Im Wahlpflichtmodul "Bauelemente in der Nanotechnologie" werden ausgewählte Kapitel der Entwicklung und Herstellung von funktionellen Bauteilen für die Nano-/Mikrosystemtechnik gelehrt. Aufbauend auf dem Pflichtmodul Nanotechnik, sollen insbesondere neue Ansätze zur Integration nanoskaliger Materialien in funktionellen Mikrosystemen (Bauteilen) vermittelt werden. Beispiele für vertiefende Lehrinhalte sind im Folgenden aufgeführt.

MEMS / NEMS

CMOS

Optoelektronik

Nanopositioniertechniken

Nano-/Mikrofluidische bzw. Dispenser Bauelemente

MOEMS

Replikationstechniken

Aufbau und Verbindungstechnik: Mikro-Nano-Integration

VII. Glossar

CMOS	complementary metal oxide semiconductor
CVD	chemical vapour deposition
DFT	Dichtefunktionaltheorie
DNA	Desoxyribonukleinsäure
<i>ECTS</i>	<i>European Credit Transfer System</i> im Text üblicherweise im Sinne von ECTS Punkten verwendet 1 SWS Praktikum = 0,5 ECTS 1 SWS Übung = 1 ECTS 1 SWS Vorlesung = 1,5 ECTS
ILGAR	ion layer gas reaction
μ	Mikro- (als Vorsilbe)
MBE	molecular beam epitaxy
MC	Monte-Carlo
MD	Molekulardynamik
MEMS	micro electromechanical systems
MOEMS	micro-opto electromechanical systems
NEMS	nano electromechanical systems
OMM	Oberflächenmikromechanik
PVD	physical vapour deposition
QM	Quantenmechanik
SILAR	successive ionic layer adsorption and reaction
SU8	ein epoxidbasierter Photoresist
SWS	Semesterwochenstunden

Die Autoren



Dr. Markus Biesalski hat an der Universität Mainz Chemie studiert und 1999 am MPI für Polymerforschung (Mainz) seine Doktorarbeit abgeschlossen. Von 2000-2002 war er Postdoc in der Gruppe von Prof. M. Tirrell am Dept. of Chemical Engineering, der UC Santa Barbara (USA). Seit 2002 ist er Hochschulassistent am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK, Universität Freiburg), in der Gruppe von Jürgen Rühle und leitet seitdem eine Emmy-Noether

Nachwuchsgruppe der DFG. Seit 2004 ist er Stipendiat des Elitenachwuchsprogramms der Landesstiftung Baden Württemberg und hat 2008 einen Ruf auf eine W3-Professur für Makromolekulare Chemie & Papierchemie an die TU Darmstadt erhalten.

Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Synthese von funktionalen Polymeren, Biologisch-Synthetischen Polymer Hybridmaterialien sowie der Darstellung von maßgeschneiderten Oberflächen für technologische und biomedizinische/physikalische Applikationen.



Dr. Simone Herth studierte Materialwissenschaft an der TU Darmstadt und promovierte anschließend am Institut für Nanotechnologie des Forschungszentrums Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart im Fach Physik. Nach ihrem zweijährigen Postdoc-Aufenthalt am Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, NY, USA bei Prof. Dr. Richard W. Siegel nahm sie eine Stelle

als Akademische Rätin an der Fakultät für Physik der Universität Bielefeld an. Sie beschäftigt sich dort mit der Manipulation von biologischen Filamenten und magnetischen Partikeln und setzt diese Methoden für Anwendungen im Bereich der Biologie und Medizin ein. Für den Bachelor- und Masterstudiengang Nanowissenschaft der Universität Bielefeld lehrt sie die Vorlesungen Nanostrukturphysik I und II.



Dr. Angelika Kühnle hat an der Freien Universität Berlin Physik studiert und anschließend in der Arbeitsgruppe von Prof. F. Besenbacher an der Universität Aarhus (Dänemark) promoviert. Dort untersuchte sie die Selbstorganisation organischer Moleküle mit dem Rastertunnelmikroskop. Im Jahre 2003 trat sie der BASF Aktiengesellschaft in Ludwigshafen als Laborleiterin in der Polymerphysik bei. Im Jahre 2005 erhielt sie ein Emmy Noether-Stipendium der DFG

und etablierte damit eine Nachwuchsgruppe an der Universität Osnabrück. Seither ist sie Leiterin dieser Arbeitsgruppe, die die Untersuchung molekularer Selbstorganisation auf dielektrischen Oberflächen mit hochaufgelöster Rasterkraftmikroskopie zum Schwerpunkt hat. Neben grundlagenorientierten Forschung untersucht Frau Kühnle weiterhin auch anwendungsorientierte Fragestellungen in Kooperationen mit der Industrie.



Wolfgang Harneit studierte Physik und Philosophie an der Universität Hamburg. Nach seiner Diplomarbeit über supraleitende Bauelemente promovierte er in Grenoble am Centre National de la Recherche Scientifique über magnetische Eigenschaften von Hochtemperatur Supraleitern.

Nach einem Postdoc-Aufenthalt am Hahn-Meitner-Institut Berlin, wo er sich mit Solarzellen und endohedralen Fullerenen beschäftigte, gründete er mithilfe des NanoFutur Preises des BMBF in 2003 eine eigene Arbeitsgruppe an der Freien Universität Berlin. Die AG Harneit arbeitet auf den interdisziplinären Gebieten der molekularen Spinelektronik und der Quanteninformationsverarbeitung.



Priv.-Doz. Dr. Thomas Kraska studierte Chemie an der Ruhr-Universität Bochum mit Spezialisierung in theoretischer physikalische Chemie. Nach Diplomarbeit und Promotion auf den Gebieten Phasenverhalten und statistische Thermodynamik ging er mit einem BASF Postdoc-Stipendium der Studienstiftung für zwei Jahre an die Cornell University. Nach einem halbjährigen Aufenthalt an der UC Berkeley habilitierte er sich mit einem Habilitandenstipendium der DFG

an der Universität zu Köln. Im Jahr 2001 erhielt er einen Forschungspreis des Landes NRW für Arbeiten auf dem Gebiet der Partikelbildung aus der Gasphase. Zu seinen aktuellen Forschungsthemen zählen molekulardynamische Simulationen der Partikelbildung in der Gasphase, in überkritischen Lösungen und an Oberflächen sowie die molekulare Modellierung von fluiden Mischungen.



Nach seinem Physikstudium an der LMU München promovierte **Dr. Robert Stark** bei Wolfgang Heckl über die Nanoanalytik biologischer Materialien mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie. Im Rahmen eines zweijährigen Forschungsaufenthaltes an der ETH Zürich bei Andreas Stemmer befasste er sich mit neuen regelungstechnischen Konzepten für die Nanomanipulation. Seit 2003

leitet er die Arbeitsgruppe ‚Nanobiomat‘ an der LMU München. Für seine Arbeiten wurde er 2004 mit dem BMBF-Nachwuchspreis ‚Nanofutur‘ ausgezeichnet. Seine aktuelle Forschungsarbeit konzentriert sich auf angewandte Themen der Bionanotechnologie, wie beispielsweise mikro- und nanostrukturierte funktionale Oberflächen für die Bio-Mikrofluidik oder bio-medizinische Anwendungen der Raman-spektroskopie.