

Empfehlung zu einem weiterbildenden Masterstudiengang Nanotechnologie

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

Zukunftsforum Nanotechnologie der DECHEMA e.V.

Oktober 2007, erste Ausgabe

März 2009, überarbeitete Ausgabe

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

Prof. Dr. Angelika Kühnle

Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Fachbereich Chemie

Jakob-Welder-Weg 11

D-55099 Mainz

kuehnle@uni-mainz.de

Inhalt

I.	Einführung	3
II.	Grundideen	4
III.	Empfehlung für ein Curriculum in der Nanotechnologie	4
IV.	Übersicht über die Pflicht-, Wahlpflicht- und Wahlmodule	6
IV.1.	Pflichtmodule	6
IV.2.	Wahlpflichtmodule	6
IV.3.	Wahlmodule	7
IV.4.	Industrie-/Laborpraktikum und Schlüsselqualifikationen	7
IV.5.	Masterarbeit	7
V.	Beschreibung der Inhalte der Pflichtmodule	9
VI.	Beschreibung der Inhalte der Wahlpflichtmodule	12
VII.	Beschreibung der Inhalte der Wahlmodule	16
VIII.	Beispiel eines existierenden Masterstudiengangs "Nanotechnologie"	19

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. In der vorliegenden Empfehlung wird **nicht** die grundsätzliche Frage **diskutiert, ob die Einrichtung eines Studienganges Nanotechnologie sinnvoll** ist. Es wird **vielmehr** aufgezeigt, **wie** ein vergleichbarer Nanotechnologie-**Studiengang aussehen könnte, wenn die Entscheidung, einen solchen einzurichten, bereits gefallen ist.** Ziel der 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.

Die vorliegende Version des Positionspapiers ist eine überarbeitete Fassung der im Juli 2007 verabschiedeten Empfehlung, in der die vielseitigen Kommentare und Anregungen der Fachkollegen berücksichtigt sind.

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, Verfahrenstechnik oder Umwelttechnik 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 des weiterbildenden Masterstudiengangs (auch im Weiteren beziehen sich alle Semesterangaben auf den weiterbildenden Studiengang) 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 fünfstufiger Aufbau des Masterstudiengangs aus Pflichtmodulen, Wahlpflichtmodulen, Wahlmodulen, einem Industrie- oder Laborpraktikum und der abschließenden Masterarbeit.

Die Pflichtmodule umfassen insgesamt 27 ECTS¹ Punkte und werden in den ersten beiden Semestern absolviert. Inhaltlich sollen die Pflichtmodule wesentliche Kenntnisse und Arbeitsmethoden der Nanotechnologie vermitteln. Davon können im Wahlpflichtbereich zweimal je 4 ECTS Punkte aus den drei Fächern „Theoretische Nanotechnologie“, „Bionanotechnologie“ und „Umwelt und Toxikologie“ gewählt werden, deren Themen dabei bewusst breit angelegt sind, um interdisziplinäre Zusammenhänge zu vermitteln.

Für die Wahlmodule wird ein Gesamtumfang von 42 ECTS empfohlen. Es ist sinnvoll, die Wahlfächer aus maximal drei Modulen zu wählen, um so eine Vertiefung zu ermöglichen. Dies kann zum Beispiel durch eine Aufteilung von 24 ECTS im ersten, 12 ECTS im zweiten und 6 ECTS im dritten Wahlmodul erreicht werden. In den Wahlmodulen sollen die Studierenden vertiefte Kenntnisse erwerben, mit denen die Masterarbeit und eine spätere berufliche Tätigkeit in Forschung und Entwicklung vorbereitet wird. Die Wahlmodule sollten deshalb das Forschungsprofil der jeweiligen Hochschule widerspiegeln. Im Folgenden wurden beispielhaft Vorschläge zu Wahlmodulen ausgearbeitet, in denen die Bereiche „Materialien in der Nanotechnologie“, „Vertiefung in die Theoretische Nanotechnologie“, „Lebenswissenschaften und Nanotechnologie“, „Umwelt und Toxikologie“ 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

¹ Leistungspunkte (European Credit Transfer System) mit 1 SWS Praktikum = 0,5 ECTS, 1 SWS Übung/Seminar = 1 ECTS, 1 SWS Vorlesung = 1,5 ECTS. SWS = Semesterwochenstunden

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

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.

IV. Übersicht über die Pflicht-, Wahlpflicht- und Wahlmodule

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

IV.1. Pflichtmodule

Modul „Eigenschaften von Nanomaterialien und Anwendungen der Nanotechnologie“
bestehend aus 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übungen
insgesamt 8 ECTS

Modul „Methoden der Nanotechnologie“
bestehend aus 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übung
insgesamt 8 ECTS

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

IV.2. Wahlpflichtmodule

Zur Schwerpunktsetzung innerhalb der Nanotechnologie dienen besonders die Wahlpflichtmodule, aus denen zwei von drei besucht werden sollten:

- a) Modul „Theoretische Nanotechnologie“
bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung
insgesamt 4 ECTS

- b) Modul „Bionanotechnologie“
bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 2 SWS Praktikum
insgesamt 4 ECTS

- c) Modul „Umwelt und Toxikologie“
bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Seminar/Exkursion
insgesamt 4 ECTS

IV.3. Wahlmodule

„Materialien in der Nanotechnologie“
„Verfahren in der Nanotechnologie“
„Vertiefung in die Theoretische Nanotechnologie“
„Lebenswissenschaften und Nanotechnologie“
„Umwelt und Toxikologie“

bestehend aus 30 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.

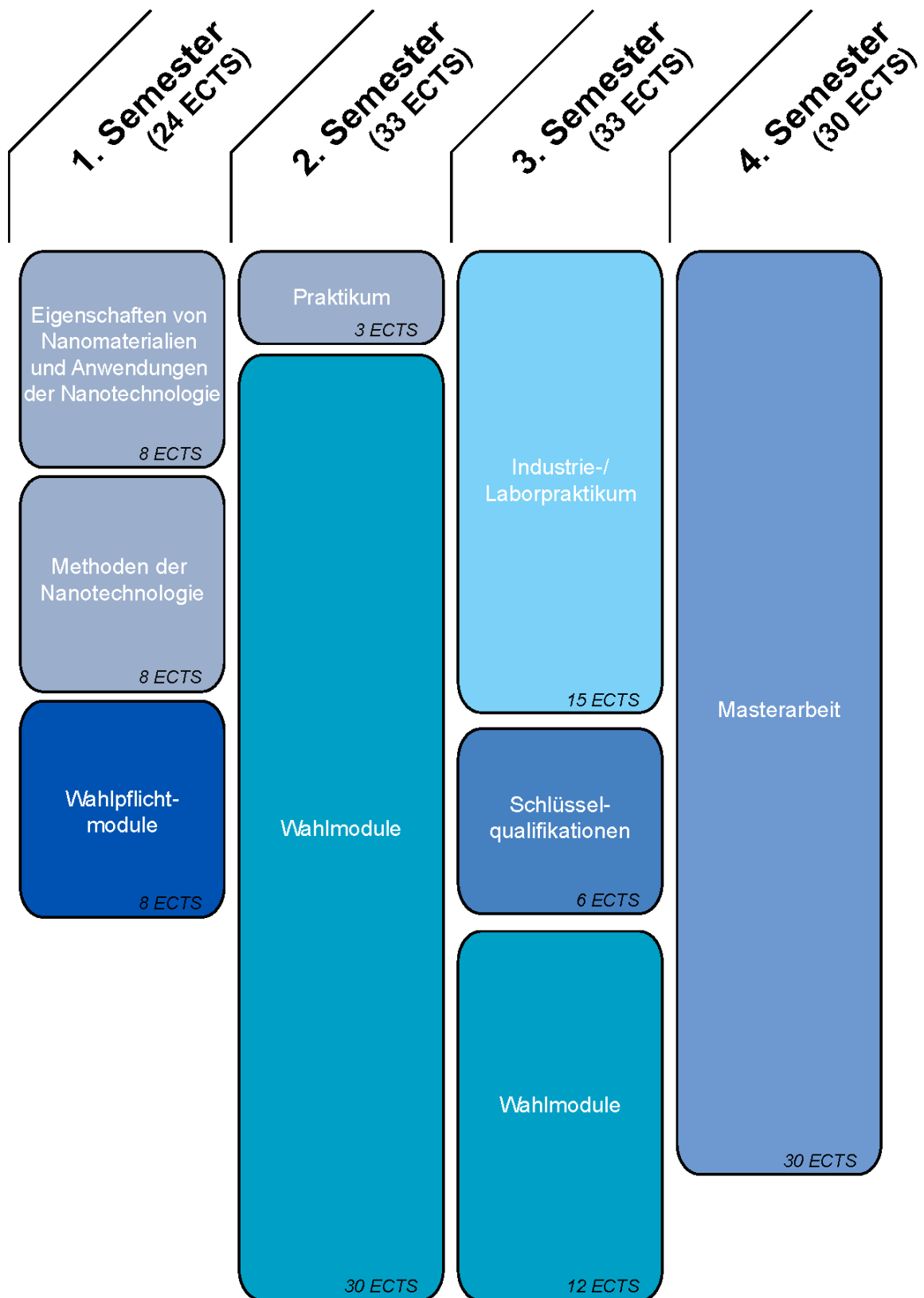
IV.4. Industrie-/Laborpraktikum und Schlüsselqualifikationen

Industrie-/Laborpraktikum (idealerweise im Ausland) 15 ECTS
Schlüsselqualifikationen 6 ECTS

IV.5. Masterarbeit

Masterarbeit im Umfang von 30 ECTS

Die folgende Übersicht zeigt eine mögliche Aufteilung der Module auf die vier Semester des Masterstudiengangs. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im 2. Semester insgesamt 30 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 „Eigenschaften von Nanomaterialien und Anwendungen der Nanotechnologie“

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 „Methoden der Nanotechnologie“

bestehend aus 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übungen

insgesamt 8 ECTS

Im Modul „Methoden der Nanotechnologie“ soll ein umfassender Einblick in die Herstellungs- sowie Synthese- und Strukturierungsverfahren 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.

Inhalte:

Einordnung der Nanostrukturen

Herstellungsverfahren:

- Nasschemische Syntheseverfahren
- Gasphasenprozesse
- Selbstorganisation auf Oberflächen
- Nanoporöse Systeme

Schicht- und Strukturierungsverfahren:

- Schichtdepositionsverfahren
- Top-Down Strukturierungsverfahren
- Lithographie

Charakterisierungsverfahren:

- Mikroskopische Methoden
- Methoden der Partikelanalytik (Lichtstreuung, Röntgenbeugung)
- Spektroskopische Verfahren
- Massenspektrometrie

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:

Eigenschaften von Nanomaterialien und Anwendungen der Nanotechnologie

- Optisches Nahfeld
- Spektroskopie an Quantenpunkten
- größenabhängige Schmelzpunktbestimmung

Methoden der Nanotechnologie

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

VI. Beschreibung der Inhalte der Wahlpflichtmodule

Modul „Theoretische Nanotechnologie“

bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung

insgesamt 4 ECTS

Im Modul Theoretische Nanotechnologie sollen die grundlegenden theoretischen Phänomene von besonderen Nanoobjekten behandelt werden. Diese Kenntnisse sind für eine nähere Beschäftigung mit z.B. Quantenpunkten, Kohlenstoffnanoröhren oder Clustern notwendig. Zusätzlich werden Thermodynamische und kinetische Effekte näher beschrieben, die einen entscheidenden Einfluss auf die Entstehung von nanostrukturierten Materialien haben.

Inhalte:

Quanteneffekte

- Quantenpunkte
- Coulombblockade
- Einzelelektronentransistor

Thermodynamische und kinetische Effekte

- Größenabhängige Eigenschaften
- Phasenübergänge in kleinen Systemen
- Partikelbildung und Wachstum
- Reaktivität

Kohlenstoffnanoröhren

- Bandstruktur
- Elektrische Eigenschaften
- Mechanische Eigenschaften

Cluster

- Mie-Oberflächenplasmonen
- Jellium-Modell
- Optische Eigenschaften
- Magnetische Eigenschaften

Modul „Bionanotechnologie“

bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 2 SWS Praktikum

insgesamt 4 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: Desoxyribonukleinsäure, 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)

Vorschlag für Versuche im Praktikum:

- Oberflächenanalytik in biotechnologischen Mikrosystemen
- Umgang mit Zellkulturen, Gentransfektion
- DNA- und Protein-Arraytechnologie
- Zelladhäsionassay an Oberflächen
- Elektrophysiologie an Gehirnschnitten

Modul „Umwelt und Toxikologie“

bestehend aus 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Seminar/Exkursion

insgesamt 4 ECTS

Für eine sichere Anwendung der Nanotechnologie und zur Sicherung der gesellschaftlichen Akzeptanz ist es wünschenswert, umwelt und toxikologische Aspekte in das Studium der Nanotechnologie einzubeziehen, auch wenn diese Gebiete teilweise erst in der Entstehung begriffen sind. Hier wird der zukünftige Bedarf nach Ausbildung auf diesem Gebiet deutlich. Dabei machen wir darauf aufmerksam, dass die hier genannten Inhalte nur eine mögliche Auswahl an Themen darstellt, die gerne den örtlichen Gegebenheiten, insbesondere in Hinblick auf eine mögliche Exkursion zu einem benachbarten Betrieb, angepasst werden kann.

Inhalte:

Grundlagen der Umwelttechnik

- Überblick über die Umwelttechnik
- Life Cycle Analysen

Nanoobjekte in der Umwelt und in Lebewesen

- Migrationswege von Nanoobjekten
- Anreicherung und Ausscheidung
- Auswirkungen auf lebende Organismen: Öko- und Humantoxikologie

Einteilung toxikologischer Wirkungen

- Prüfmethoden
- Reversible und Irreversible Interaktionen
- Struktur- bzw. Dosis-Wirkungsbeziehungen
- Kooperative Effekte
- Grenzwerte

VII. Beschreibung der Inhalte der Wahlmodule

Materialien in der Nanotechnologie

In diesem Modul sollen die Eigenschaften verschiedendimensionaler, nanoskaliger Materialien zusammen mit speziellen Nanoobjekten, wie Cluster oder Kohlenstoffnanoröhren 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

Cluster und Nanoröhren

Grenzflächenphänomene

Mechanische Eigenschaften von nanostrukturierten Materialien

Funktionelle Nanowerkstoffe

Molekulare Nanotechnologie

Verfahren in der Nanotechnologie

Im Wahlpflichtmodul "Verfahren in der Nanotechnologie" werden ausgewählte Kapitel der Synthese-, Charakterisierungs- und Strukturierungsverfahren einschließlich der Herstellung von Bauteilen für die Nano-/Mikrosystemtechnik gelehrt. Aufbauend auf dem Pflichtmodul Methoden der Nanotechnologie sollen neben Standardverfahren zur Herstellung und Charakterisierung auch neue Ansätze zur Integration nanoskaliger Materialien in funktionellen Mikrosystemen (Bauteilen) vermittelt werden. Beispiele für vertiefende Lehrinhalte sind im Folgenden aufgeführt.

Synthese von Nanopartikeln

Herstellung von Nanomaterialien

Dünnschichtverfahren

Nanostrukturierung von Materialien

Physikalische Charakterisierungsmethoden

Chemische Charakterisierungsmethoden

Mikrosystemtechnik

Optoelektronik

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. Bei der Zusammenstellung der Inhalte dieses Moduls wurde auf die Methodenvielfalt Wert gelegt. Es soll vermittelt werden, welche Methoden für welche Fragestellung geeignet sind. Beispiele für vertiefende Lehrinhalte sind im Folgenden aufgeführt.

Methoden

Dichtefunktionaltheorie

Molekulare Simulationen: Gleichgewichts- sowie Nichtgleichgewichtssimulationen

Mesoskopische Simulationen

Kontinuumssimulationen: Stoff- und Energiebilanzen, Populationsbilanzen

Skalenübergreifende Modellierung

Kraftfelder

Nanosysteme

Partikel, Röhren, nanoporöse Systeme, dünne Schichten, biochemische Systeme, Hybridsysteme, Komposite, Mechanik nanostrukturierter Systeme, Nanofluidе, Polymere, Kolloide

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

Proteine an Oberflächen

Mikro-/Nanomanipulation und Elektrophysiologie

Umwelttechnik und Toxikologie

Die Bereiche Umwelttechnik und Toxikologie sind sehr vielseitig und lassen sich in fast allen Teilgebieten mit der Nanotechnologie in Verbindung bringen. Im Folgenden sind deshalb nur ein paar mögliche Beispiele für eine vertiefende Veranstaltung genannt. Da diese Fachgebiete etwas weiter von der eigentlichen Nanotechnologie entfernt sind, empfehlen wir einen maximalen Umfang von 12 ECTS in diesem Wahlmodul.

Entsorgung

Luftreinhaltung

Wassertechnologie

Toxikologie von nanoskaligen Materialien

Biomonitoring

Ökotoxikologie

VIII. Beispiel eines existierenden Masterstudiengangs "Nanotechnologie"

Eine umfangreiche Beschreibung eines Masterstudiengangs "Nanotechnologie" existiert zum Beispiel an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover in einer Fassung vom 20.05.2008.

In diesem Curriculum sind Pflicht-Kompetenzfelder und Wahl-Kompetenzfelder definiert. Im Pflicht-Kompetenzfeld sind Methoden und Materialien der Nanotechnologie aus den unterschiedlichen Disziplinen zusammengefasst. Dieser Block setzt sich aus vier Veranstaltungen im Gesamtumfang von 16 Leistungspunkten zusammen. Daneben müssen drei Wahlkompetenzfelder gewählt werden, die ihrerseits aus je zwei Pflichtveranstaltungen im Gesamtumfang von 8 - 12 Leistungspunkten und ein bis drei Wahlveranstaltungen im Gesamtumfang von 4 - 8 Leistungspunkten bestehen. In Summe umfasst der Block der Wahl-Kompetenzfelder somit 24 – 36 Leistungspunkte an Wahlpflicht- und 12 – 24 Leistungspunkte an Wahlfächern. Es werden insgesamt neun mögliche Wahl-Kompetenzfelder definiert, die aus den natur- und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen stammen.

Diese Kompetenzfelder sind in Art und Umfang ungefähr vergleichbar mit den hier definierten Bereichen der Pflicht-, Wahlpflicht- und Wahlmodule mit jeweils 19, 8 und 42 Leistungspunkten, wobei im vorliegenden Positionspapier der Umfang der Wahlfächer gegenüber des Umfangs der Wahlpflichtfächer höher liegt.

Darüber hinaus wird eine Laborarbeit (12 Leistungspunkte), eine Fachexkursion (2 Leistungspunkte) und die Möglichkeit zum Studium Generale (12 Leistungspunkte) gegeben. Diese Bereiche finden sich ebenfalls in der vorliegenden Empfehlung in ähnlicher Weise, allerdings in leicht reduziertem Umfang (in Summe 21 statt 26 Leistungspunkte).

Die Autoren



Prof. 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 Mikrosystem-

technik (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. Im Jahre 2008 ist er einem Ruf auf eine W3-Professur für Makromolekulare Chemie & Papierchemie an die TU Darmstadt gefolgt. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Synthese von funktionalen Polymeren, Biologisch-Synthetischen Polymer Hybridmaterialien sowie der Darstellung von maßgeschneiderten Oberflächen für technologische und bio-medizinische/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.



Prof. 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, die die Untersuchung molekularer Selbstorganisation auf dielektrischen Oberflächen mit hochauflösender Rasterelektronenmikroskopie zum Schwerpunkt hatte. Im Juli 2009 folgte sie einem Ruf an die Universität Mainz, wo sie seither in der Physikalischen Chemie tätig ist. Neben grundlagenorientierten Forschung untersucht Frau Kühnle weiterhin auch anwendungsorientierte Fragestellungen in Kooperationen mit der Industrie.



Dr. 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 **Priv.-Doz. Dr. Robert Stark** bei Wolfgang Heckl über die Nanoanalytik biologischer Materialien mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie. 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 Ramanpektroskopie.