

**BZKG**



**Bayreuther Zentrum  
für Kolloide und Grenzflächen**





Prof. Dr. Stephan Förster

Geschäftsführender Direktor  
vom Bayreuther Zentrum für  
Kolloide und Grenzflächen - BZKG

### Kompetenzen bündeln, Kooperationen fördern!

Liebe Interessierte aus Forschung und Industrie,  
das Bayreuther Zentrum für Kolloide und Grenzflächen (BZKG) ist  
ein Zentrale Wissenschaftliche Einrichtung der Universität Bay-  
reuth. Gefördert durch die High-Tech-Offensive der Bayerischen  
Staatsregierung wurde es im Jahre 2000 gegründet. Das BZKG  
unterstützt Unternehmen der Region bei direkten Kooperati-  
onen mit der Universität Bayreuth. Es soll vor allem kleinen und  
mittelständigen Unternehmen Zugang zu modernsten Techno-  
logien, Materialien, und Analyseverfahren ermöglichen und so  
helfen, die nationale und internationale Wettbewerbsfähigkeit  
zu erhalten und auszubauen.

Die Thematik der Kolloide und Grenzflächen umfasst fächer-  
übergreifend Bereiche der Physik, Chemie, Biologie, Medizin und  
Ingenieurwissenschaften von der Grundlagenforschung bis hin

zu anwendungsorientierter Entwicklung. Als Kolloide bezeichnet  
man Partikel mit Durchmessern zwischen einem Nanometer und  
mehreren Mikrometern. Sie spielen eine große Rolle als Farbpig-  
mente, Katalysatoren, in Waschmitteln, Shampoos, Kosmetika,  
Lacken, Klebstoffen, Kunststoffen, Keramiken, Arznei- und Nah-  
rungsmittelformulierungen. Aber auch kleinste Tröpfchen und  
Bläschen in Emulsionen, Cremes, Sprays, Schäumen und porösen  
Materialien sind Gegenstand dieses Forschungszweigs. Bei all  
diesen Materialien spielen Oberflächen und Grenzflächen eine  
entscheidende Rolle. Die Untersuchung von Oberflächeneigen-  
schaften wie Struktur, Rauigkeit, Benetzung, Adhäsion, Härte  
und Biokompatibilität ist daher ebenfalls zentraler Forschungs-  
gegenstand. Zur Untersuchung dieser Systeme existiert im BZKG  
eine herausragende Kompetenz, Erfahrung und eine exzellente  
und sehr umfangreiche apparative Ausstattung auf einem auch  
im internationalen Vergleich modernsten Stand der Technik.  
Die Mitglieder des BZKG sind international herausragend aus-

gewiesene Wissenschaftler, viele mit renommierten nationalen  
und internationalen Forschungspreisen ausgezeichnet. Gemein-  
sam begleiten sie Forschungsprojekte, stellen Materialien und  
analytische Methoden zur Verfügung, unterstützen durch Be-  
ratung und Weiterbildung, und vermitteln national und inter-  
national Kontakte zu Experten und Forschungslabors. In dieser  
Broschüre stellen sie sich mit ihrem Forschungsfeld und ihren  
Expertisen vor.

Setzen Sie sich mit uns in Verbindung, wenn Sie weitere Informa-  
tionen oder unsere Unterstützung bei Ihren Projekten wünschen.

Prof. Dr. Stephan Förster  
Direktor des BZKG



Prof. Dr. Stephan Förster

„Kontrollierte Herstellung kolloidaler Systeme“

Prof. Dr. Seema Agarwal

„Biorelevante Polymere, antimikrobielle Polymere, intelligente Polymere, Nanostrukturen und Komposite“

Prof. Dr. Josef Breu

„Tonminerale als Basis für mikro-, nano- und mesoskopische Kompositmaterialien, Festkörper-chemie-Synthese, In-situ-Strukturanalytik am Übergang zwischen thermodynamischer und kinetischer Kontrolle“

Prof. Dr. Andreas Fery

„Charakterisierung und Modifizierung von Oberflächen“

Prof. Dr. Thomas Fischer

„Transportphänomene elastischer Materialien“

Prof. Dr. Stephan Gekle

„Simulation einzelner Moleküle und komplexer Strömungen“

Prof. Dr. Andreas Greiner

„Synthese und spezielle Verarbeitung von Polymeren, Eletrospinnen von Nanofasern, Metall-Nanopartikel Konjugate, Polymer Beschichtungen“

Prof. em. Dr. Heinz Hoffmann

„Micellen, Kolloide und ihre Anwendungen“

Prof. Dr. Matthias Karg

„Kolloidale Superstrukturen mit einstellbaren optischen Eigenschaften“

Prof. Dr. Rhett Kempe

„Polymergeträgerte nanopartikeläre (Edel-)Metallkatalysatoren“

Prof. Dr. Axel Müller

„Synthese nanoskopischer Polymersysteme; Analytik und Charakterisierung komplexer Polymerstrukturen“

Prof. Dr. Georg Papastavrou

„Polymere an Grenzflächen – Einzelmolekültechniken“

Prof. Dr. Markus Retsch

„Kolloidale Selbstanordnung und Partikellithographie zur Herstellung nano- und mesostrukturierter Funktionsmaterialien“

Prof. Dr. Thomas Scheibel

„Verständnis, Modifizierung und Herstellung von Biopolymeren und deren technische Anwendungen“

Prof. Dr. Hans-Werner Schmidt

„Vom Molekül zum Material – Synthese, Charakterisierung und Anwendung“

Prof. Dr. Jürgen Senker

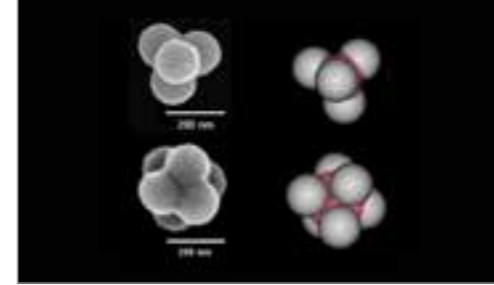
„Ab-initio Strukturaufklärung in amorphen, mikro- und semikristallinen Materialien sowie an Oberflächen“

Prof. Dr. Birgit Weber

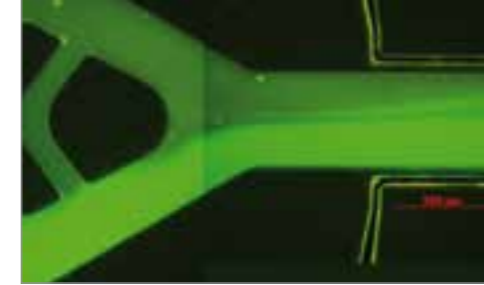
„Molekulare Schalter mit Memory-Effekt“



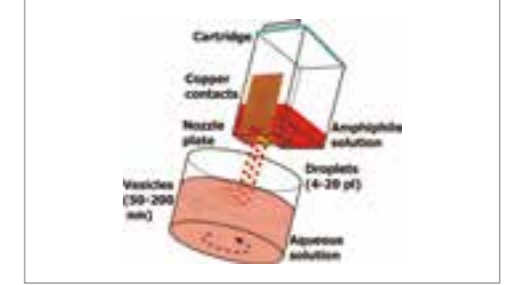
**Prof. Dr. Stephan Förster**  
LEHRSTUHL FÜR PHYSIKALISCHE CHEMIE I  
GESCHÄFTSFÜHRENDER DIREKTOR DES BZKG



Kontrollierte Selbstorganisation von kolloidalen Partikeln in Multiplets

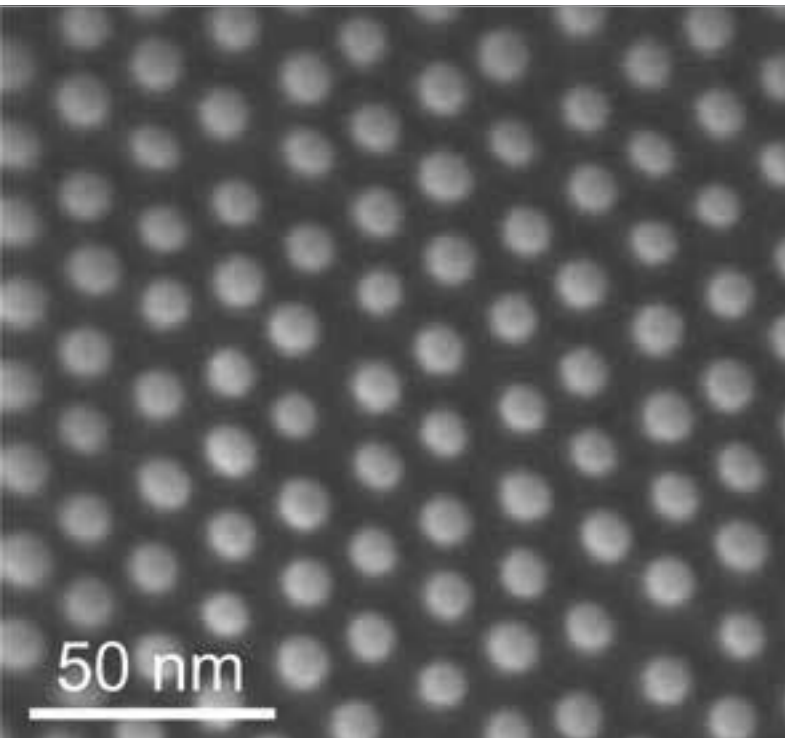


Mikrofluidisches Kanalsystem zur Auftrennung von elektrisch geladenen Kolloiden



Inkjet-Drucktechnik zur großengenau kontrollierten Herstellung von nanoskaligen Vesikeln, Tröpfchen und Partikeln

## „Kontrollierte Herstellung kolloidaler Systeme“



Durch eine spezielle Polymerbeschichtung können hochgefüllte Nanocomposites hergestellt werden. Die Abbildung zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme (SEM) eines magnetischen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Polystyrol-Nanocomposites.

Am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I werden Themen aus den Bereichen Kolloidale Lösungen, Gele und Polymermaterialien bearbeitet. Das Ziel der Forschungsarbeiten besteht in der kontrollierten Strukturierung von Kolloiden, Gelen und Polymeren auf der Nano- bis Mikrometerskala. Dabei werden Mechanismen der Selbstorganisation erforscht und genutzt, um auch komplexere Strukturhierarchien zu realisieren. Zur Charakterisierung solcher Strukturen steht im Arbeitskreis eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung. Dazu gehören Streumethoden (SLS, DLS, SAXS, SANS, GISAXS), abbildende Methoden (AFM, SEM, TEM, cryo-TEM, CLSM) und spektroskopische Methoden (FCS). Die am Lehrstuhl bearbeiteten Themen umfassen Nanocomposites, polymere Wirkstoffträger, Mikrofluidik und die Erforschung von Selbstorganisationsphänomenen.

### Nanocomposite

Nanocomposite bestehen aus einer mit Nanopartikeln gefüllten Polymermatrix. Seit der Entdeckung ihrer besonderen Eigenschaften werden sie intensiv untersucht. Sie haben bereits erste Anwendungen

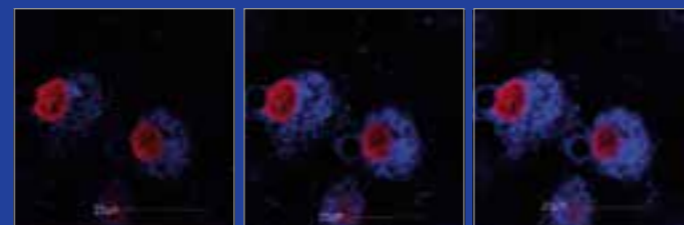
als mechanisch verstärkte Kunststoffe, Barrierefolien und brandhemmende Werkstoffe gefunden. Sie gehören zu den ersten kommerziell erfolgreichen Entwicklungen der Nanotechnologie.

In allen Anwendungsbereichen wird ein weiterer Entwicklungsschritt durch die ausgeprägte Aggregation der Nanopartikel in der Polymermatrix verhindert. Aggregation verringert die Effizienz der Nanopartikel und beeinträchtigt die Eigenschaften der Nanocomposites. Am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I wurden Methoden entwickelt, um Nanopartikel mit der Polymermatrix in jedem Verhältnis mischbar zu machen. Dazu werden die Nanopartikel mit einer speziellen Polymerschicht umhüllt. Dies führt zur höchstmöglichen Effizienz und Stabilität der Nanopartikel. So können mechanische Eigenschaften schon bei Füllgraden von 1% verbessert werden. Zudem können sehr hohe Füllgrade von über 60% erreicht werden, bei denen sich die Nanopartikel zu periodischen Gittern anordnen (s. Abbildung links). Solche Nanocomposites werden zurzeit in Hinblick auf Anwendungen in der magnetischen Datenspeicherung und der Photovoltaik untersucht.

### Polymere Wirkstoffträger

Amphiphile Polymere können sich in wässriger Lösung zu Mizellen und Vesikeln organisieren. Diese stellen aussichtsreiche Trägerstrukturen für diagnostische und therapeutische Anwendungen dar. In Mizellen können hydrophobe Stoffe, in Vesikeln hydrophobe und hydrophile Stoffe verkapselt werden. Am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I werden polymere Mizellen und Vesikel insbesondere für die Diagnostik und Therapie von Diabetes erforscht. Dazu werden Verfahren entwickelt, um die polymeren Träger mit Nanopartikeln zu beladen. Nanopartikel dienen der Kontrastgebung in bildgebenden tomographischen Verfahren. Für eine selektive Anbindung an bestimmte Zellen wird die Peripherie der Mizellen und Vesikel mit Zuckermolekülen oder Proteinen funktionalisiert.

Übertragung eines hydrophoben Wirkstoffs (blau) von Vesikeln auf A549-Zellen 5 (links), 10 (Mitte) und 15 Minuten (rechts) nach der Zugabe der Vesikel



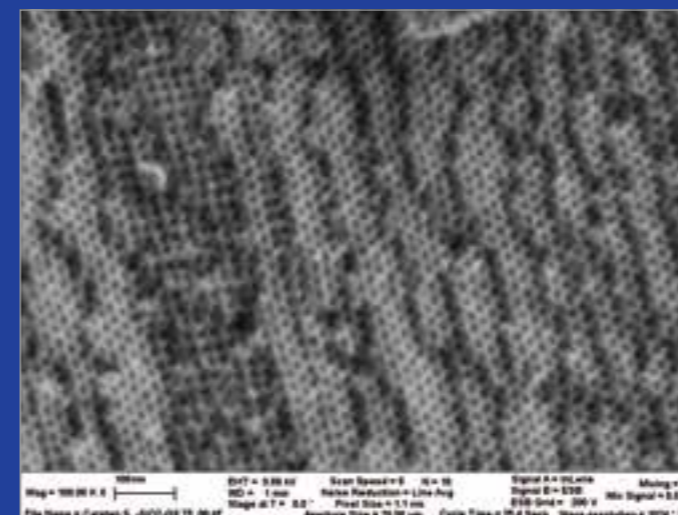
### Mikrofluidische Methoden

Die Mikrofluidik hat sich in den letzten Jahren zu einer ausgereiften Technologie entwickelt, mit deren Hilfe Flüssigkeiten und Volumina bis in den Bereich von Pikolitern gemischt und transportiert werden können. Am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I werden mikrofluidische Chips für die Herstellung kolloidaler Lösungen entwickelt. In mikrofluidischen Kanälen finden schnelle diffusionskontrollierte Mischprozesse statt, die eine Kontrolle über Keimbildungs- und Wachstumsprozesse ermöglichen. Dadurch wird die Größe kolloidaler Partikel vom Nano- bis in den Mikrometerbereich steuerbar. Nach dem gleichen Funktionsprinzip können mit Hilfe modifizierter Inkjetdrucker Geruchsstoffe, Geschmacksstoffe und pharmazeutische Wirkstoffe als kolloidale Formulierungen präpariert werden.

### Selbstorganisationsprozesse

Am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I werden Selbstorganisationsprozesse von Nanopartikeln und Polymeren intensiv erforscht. Sphärische Nanopartikel können gezielt zu Multiplets organisiert werden (s. Abb. oben). Amphiphile Polymere bilden eine Vielzahl von Strukturen unterschiedlichster Topologie und Symmetrie. Solche Strukturen können als Templates zur Erzeugung hochgeordneter mesoporöser Oxide verwendet werden (s. Abb. unten).

Mesoporöses Material hergestellt durch Templatierung eines geordneten Geltemplates



### ANALYTIK

- Streumethoden
  - Statische Lichtstreuung (SLS)
  - Dynamische Lichtstreuung (DLS)
  - Röntgenkleinwinkelstreuung (SAXS, GISAXS)
  - Neutronenkleinwinkelstreuung (SANS)
- Mikroskopische Methoden
  - Elektronenmikroskopie (TEM, cryo-TEM, SEM)
  - Rasterkraft-Mikroskopie (AFM)
  - Fluoreszenzmikroskopie
  - Raman-Mikroskopie
  - Konfokale Fluoreszenzmikroskopie (CLSM)
  - Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie (FCS)
- Weitere Charakterisierungsmethoden
  - Rheologie
  - Scheibenzentrifuge
  - DSC
  - TGA
  - Fluoreszenzspektroskopie
  - UV/Vis-Spektroskopie
  - Gelpermeationschromatographie (GPC)
- Spezielle Methoden
  - Inkjet-Technologie
  - Mikrofluidik
  - Kontrollierte Polymerisationsverfahren



**Prof. Dr. Seema Agarwal**  
LEHRSTUHL FÜR MAKROMOLEKULARE CHEMIE II



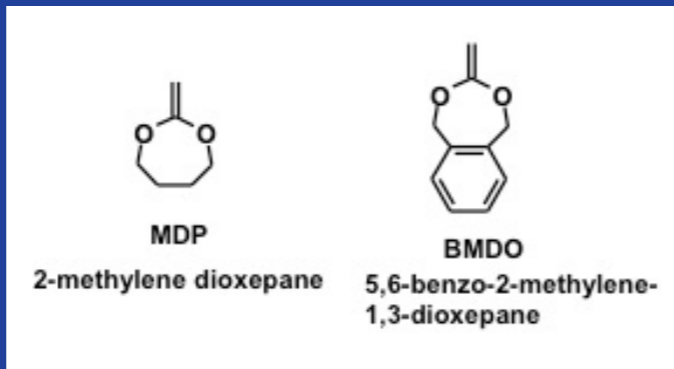
Bioabbaubare Polymere.

Die Kernkompetenzen der Arbeitsgruppe Agarwal am Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie II bestehen in der Synthese und Charakterisierung von Funktionsmaterialien auf Polymerbasis, insbesondere biorelevanten Polymeren, intelligenten Polymeren, der speziellen Polymerverarbeitung und der forensischen Polymeranalysen.

### Biorelevante Polymere

Biologisch abbaubare Polymere sind für viele Anwendungen von größter Bedeutung und beschränken sich nicht mehr nur auf Medizintechnik, Pharmazie und Agrartechnik sondern gewinnen aus ökologischen Gründen zunehmend an Bedeutung als Verpackungs- und Konstruktionsmaterialien. Durch radikalische ringöffnende Copolymerisation von zyklischen Ketenacetalen mit klassischen Vinylmonomeren konnte von der Arbeitsgruppe eine neue Klasse bioabbaubarer Polymere eröffnet werden. Diese erlauben Anwendungen als bioabbaubare Beschichtungen, als bioabbaubare Träger in der Gentransfektion, als bioabbaubare Additive oder als bioabbaubare Klebstoffe finden. Durch Variation der Comonomere und Kontrolle der Polymermikrostruktur kann die Bioabbaubarkeit der Polymere über einen weiten Bereich gezielt eingestellt werden. Mit radikalischer ringöffnender Homopolymerisation von MDP kann amorphes Poly-epsilon-caprolakton (PCL) hergestellt werden, das außerdem transparent ist. Im Gegensatz dazu ist PCL, ganz klassisch durch ringöffnende Polymerisation von epsilon-Caprolakton hergestellt, ein teilkristallines intransparentes Polymer. Da die Bioabbaubarkeit von Polymeren wesentlich von deren Festkörper-morphologie abhängt, kann durch Mischung des schnell-abbauenden amorphen PCL mit dem teilkristallinen PCL die Abbauzeiten und die Transparenz der Polymere maßgeschneidert eingestellt werden. Hieraus ergeben sich vollkommen neue Anwendungsperspektiven.

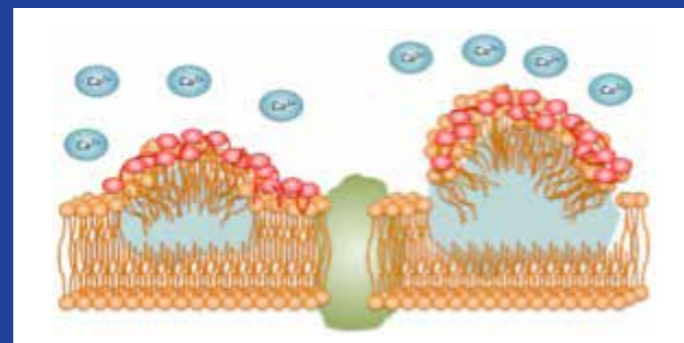
Positiv geladene Polymere mit Ammoniumgruppen bilden mit Desoxyribonukleinsäuren Polyelektrolytkomplexe, die potentiell in der Gentherapie durch Gentransfektion einsetzbar sind. Durch Copolymerisation mit Ketenacetalen sind jetzt auch positiv geladene Polymere zugänglich, die nach der Gentransfektion in Zellkerne bioabbaubar sind, wodurch eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz in der Gentherapie erfüllt wird.



Zyklische Ketenacetale als Grundlage für neuartige und vielseitige bioabbaubare Polymere

### Antimikrobielle Polymere

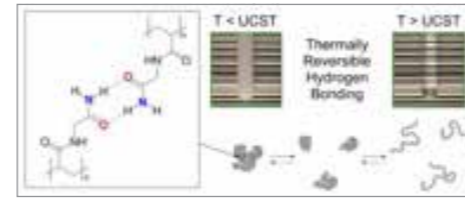
Positiv geladene Polymere werden in der Arbeitsgruppe auch umfangreich als antimikrobielle Polymere untersucht. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf Polyguanidinen, die sich durch besonders hohe und schnelle Wirksamkeit bei niedrigen Toxizitäten gegenüber Zellen auszeichnen. Ein weiteres besonderes Merkmal von Polyguanidinen ist, dass im Gegensatz zu Silbernanopartikeln oder Antibiotika, keine systemische Abgabe erfolgt, was ein großer Vorteil im Hinblick auf Bioverträglichkeit und Langzeitwirkung darstellt. Der Wirkmechanismus von positiv geladenen Polymeren unterscheidet sich grundsätzlich von Silbernanopartikeln und Antibiotika.



Prinzip der antibakteriellen Wirkung positiver geladener Polymere.



Bakterien auf Filmen mit thermisch schaltbare antibakteriellen Eigenschaften



UCST-Polymere und thermisch induzierte Änderung der Transparenz wässriger UCST-Polymer Lösungen



Polymer Nanosprings durch Elektrospinnen mit komplexen Elektrodengeometrien

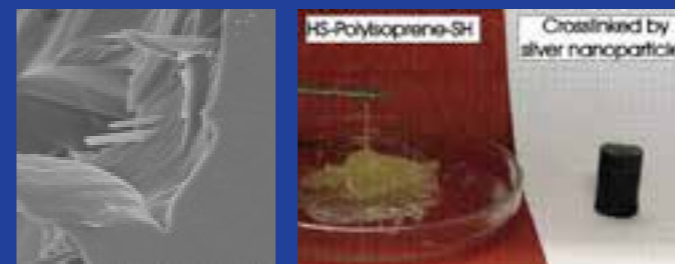
## „Biorelevante Polymere, antimikrobielle polymere, intelligente Polymere, Nanostrukturen und Komposite“

### Intelligente Polymere

Ein weiterer Schwerpunkt sind intelligente Polymere, auch Smart Polymers genannt. Intelligente Polymere sind Polymere, die ihre Eigenschaften, z. B. die Löslichkeit oder Farbe, unter dem Einfluss eines externen Feldes, z. B. der Temperatur, dem pH-Wert, der Konzentration oder von Licht sprunghaft ändern. Mit intelligenten Polymeren werden vollkommen neue Anwendungsgebiete z. B. in der Medikamentenfreisetzung, der Zelladhäsion oder der Membrantechnologie eröffnet. Durch Kombination von intelligenten und antibakteriellen Strukturelementen in einem Polymer konnten Filme mit thermisch schaltbaren antibakteriellen Eigenschaften erhalten werden. Durch präzise Kontrolle des polymerchemischen Aufbaus gelang neben üblichen Polymeren mit Lower Critical Solution Temperature (LCST) auch die Herstellung von Polymeren mit Upper Critical Solution Temperature (UCST) in Wasser, d. h. die Polymere lösen sich in Wasser erst bei erhöhter Temperatur. Diese komplexen Polymersynthesen werden am Lehrstuhl durch eine hervorragende polymer-analytische Infrastruktur ermöglicht, die auch von der Arbeitsgruppe zur forensischen Polymeranalyse eingesetzt wird. Unbekannte Polymersysteme werden systematisch auf ihre Zusammensetzung analysiert, was neben den wissenschaftlichen Fragen auch für technische Fehleranalysen oder Patentfragen außerordentlich wichtig ist.

Mechano-responsive Polymer sind ein weiterer wichtiger Schwerpunkt der Arbeitsgruppe. Durch komplexen Elektrodendesign gelang die Präparation polymerer Nanofasern mit spiralförmigen Struktur – als Nanosprings bezeichnet. Nanosprings geben deutlich bessere Eigenschaften als herkömmliche Nanofasern.

Nanokomposite sind eine weitere Kernkompetenz der Arbeitsgruppe. Mit elektrogenesponnen Nanofasern konnten hervorragende Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften klassischer Polymere, z. B. Polyimiden erreicht werden. Mit Nanokompositen aus Silbernanopartikeln und Polyisopren werden vollkommen neuartige thermoplastisch Elastomere bereit gestellt.



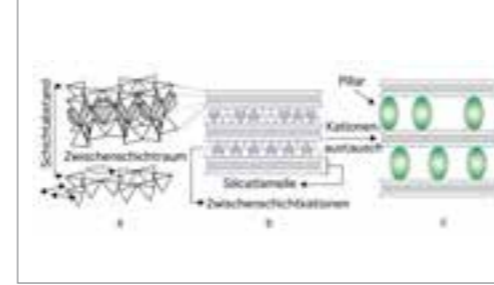
Nanokomposite aus Poly-imid-Nanofasern in Polyimid-Filmen

Thermoplastisches Elastomer auf Basis von Silbernanopartikel-Poly-isopren Nanokompositen

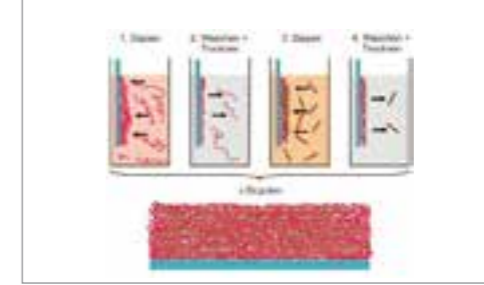
- Polymerisationsmethoden
  - Freie radikalische Polymerisation
  - ATRP und RAFT Polymerisation
  - Radikalische Ringöffnungspolymerisation
  - Metallkatalysierte Ringöffnungspolymerisation
  - Photopolymerisation
- Polymeranalytik (KeyLab für Polymersynthese und Charakterisierung)
  - Gelpermeationschromatographie
  - <sup>1</sup>H- und <sup>13</sup>C-NMR Spektroskopie
  - Infrarotspektroskopie
  - Matrix-Unterstützte Laser Desorption/Ionisation
  - GC/MS mit Thermodesorption und Headspace
  - Thermogravimetrische Analyse
  - Lösungviskosimetrie
  - Trübungstitration
  - Rotationsrheometer
  - Differential Scanning Calorimetry
  - Film- und Faser Zug-Dehnungsmessung
  - Nanofaser Zug-Dehnungsanalysator
  - Kontakt / Rollwinkelmessung
  - Tribometer
  - Porosimeter
  - Glanzmessung
  - Optisches Mikroskop mit Heizbank
  - Digitales Mikroskop
  - Hochgeschwindigkeitskamera
  - Biolabor (antibakterielle / Zytotoxizität)
- Komplexe funktionale Polymermaterialien
  - Bioabbaubare und biokompatible Polymere
  - Antibakterielle Polymermaterialien
  - Intelligente Polymere
  - Biobasierende Polymere
  - Polymer Nanokomposite
  - Komplexe Polymer-Nanofasern



**Prof. Dr. Josef Breu**  
LEHRSTUHL FÜR ANORGANISCHE CHEMIE I



Mikroporöse Hybridmaterialien: Schema der Intercalation von Abstandshaltern (Pillars) in den Zwischenschichtraum eines Smectits



Mesotechnologie: Layer-by-Layer-Assembly zur Generierung perlmuttartiger Strukturen



Polymorph Screening: Dimorphe von Benzamid

## „Tonminerale als Basis für mikro-, nano- und mesoskopische Kompositmaterialien, Festkörperchemie-Synthese, In-situ-Strukturanalytik am Übergang zwischen thermodynamischer und kinetischer Kontrolle“



Das Skull-Melting-Verfahren erlaubt tiegfremde Synthesen (ein Teil der Reaktionsprodukte bilden den „Tiegel“) mit Substanzmengen im Bereich von 200 g und bei Temperaturen bis 1750 °C.

Im Fokus unserer Forschung steht im weitesten Sinn die hierarchische Strukturierung fester Materie durch programmierte „Selbstorganisation“. Die Strukturierung erstreckt sich über mehrere Längenskalen von der nm- bis zur mm-Skala. In dem Grad wie es gelingt, die Diversität chemischer Verbindungen mit der komplexen Strukturierung zu ergänzen, die man von biologischen Systemen kennt, werden sich neue Materialien mit bisher nicht gekannten Funktionen erschließen lassen.

### „Chemical Tailoring“ von Tonmineralen

Tonminerale sind das Verwitterungsprodukt von Primärgesteinen und deshalb auf der Erdoberfläche die häufigsten Minerale. Hohes Adsorptionsvermögen, Kationenaustauschkapazität, katalytische Aktivität, gute abdichtende Wirkung gegenüber Wasser und hervorragende rheologische Eigenschaften machen natürliche Tonminerale zu einem der wichtigsten Industriemineralien. Wir konzentrieren uns auf die Schmelzsynthese von Tonmineralen als vielseitiges anorganisches Grundmaterial für die technische Anwendung. Dabei wird sowohl auf klassische Festkörpermethoden zurückgegriffen als auch auf neuartige hochskalierbare Methoden (Skull-Melting-Verfahren), vor allem auch im Hinblick auf die spätere industrielle Anwendbarkeit.

### Mikroporöse Hybridmaterialien

Poröse Materialien stoßen aufgrund ihrer vielseitigen und herausragenden Eigenschaften – z.B. als Speichermedien, Molsiebe oder (gestalt-)selektive Katalysatoren und Sensoren – auf sehr großes Interesse in Bereichen der Chemie, Physik und Materialwissenschaften. Die mikroporösen Materialien in unserer Arbeitsgruppe basieren auf synthetischen Schichtsilicaten. Physisorptionsmessungen von solchen Intercalationsverbindungen synthetischer Smectite mit molekularen Abstandshaltern („Pillared Clays“) belegen eine monomodale Mikroporosität. Die Porengröße lässt sich über die Ladung der Abstandshalter und die Ladungsdichte des Wirtsgitters über weite Bereiche durchstimmen. Über die Wahl der Abstandshalter lässt sich eine Vielzahl an Funktionalitäten einführen.

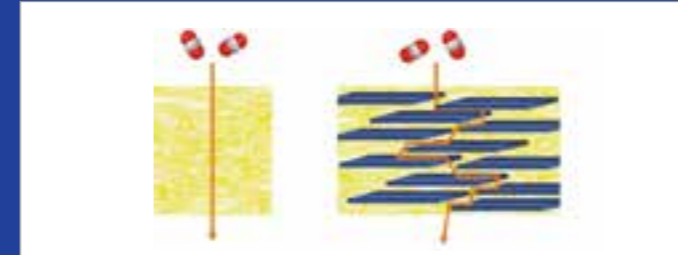
### Nanocomposite

Die ersten „Nanocomposite“ wurden schon Mitte des 19. Jahrhunderts produziert: „Einfacher“ Ruß wird seit dem Zeitalter der Industrialisierung Gummimischungen zugesetzt. Bei Verwendung nanoskopischer Füllstoffe generiert man große Grenzflächen mit der Kunststoffmatrix und erzielt so bereits bei niedrigen Füllstoffgehalten ausgeprägte Effekte. Die Palette nanoskaliger Füllstoffe hat sich gerade in den letzten Jahrzehnten stark verbreitert. Wir konzentrieren uns auf die Synthese und Modifikation „klassischer“ anorganischer Füllstoffe: Schichtsilicate (Clays) und gemischte schichtartige Metallhydroxide (LDHs). Ziel ist es, Nanocomposite mit verbesserten Eigenschaften (Gasbarriere, mechanische Kenngrößen und Flammeigenschaften) gegenüber dem reinen Polymer zu kreieren, ohne die Verarbeitbarkeit sowie optische oder elektronische Eigenschaften zu verschlechtern.

### Mesotechnologie

Die Mesotechnologie stellt das Bindeglied zwischen der makroskopischen Welt und der Nanotechnologie dar. Mit maßgeschneiderten Nanoteilchen lässt sich eine Art Chemie betreiben und es lassen sich „Kristalle“ aus kolloidalen Bausteinen aufbauen. Durch Exfolierung lassen sich Schichtsilicate mit hohem Aspektverhältnis gewinnen. Schichtweises Aufziehen alternierender Lagen aus kationischen Polymeren und Schichtsilicat (Layer-by-Layer-Assembly) führt sehr effizient zu stark orientierten Proben. Über diesen einfachen biomimetischen Ansatz entstehen künstliche Perlmutter-Analoga mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften.

Der automatische Laborreaktor LabMax (Firma Mettler-Toledo) mit IR- und FBRM-Sonde (Partikelgrößen) ermöglicht die Isolation eines metastabilen Polymorphs in mikrokristalliner Form durch gezieltes Induzieren der Keimbildung.



Gasbarriere im Nanokomposit: Kohlendioxid wird durch ein Schichtsilicat als Füllstoff in der Polymermatrix einer Kunststoffflasche an der Diffusion durch die Wand gehindert.

### Polymorph Screening

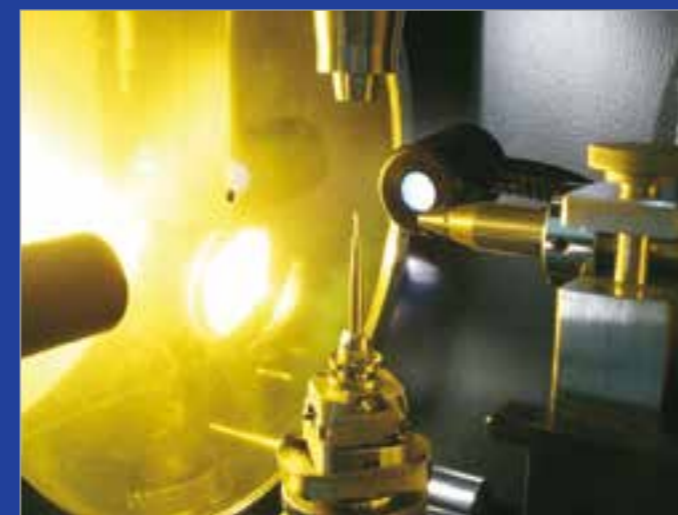
Der Patentschutz, z. B. eines Wirkstoffs, bezieht sich in der Regel auf eine bestimmte Kristallstruktur. Vor der Einreichung eines Patentbesitzes ist somit das Wissen über alle möglichen metastabilen Polymorphe und das thermodynamisch stabile Polymorph essentiell. Um metastabile Ostwaldprodukte mikrokristallin fassen zu können, muss nicht nur die Keimbildung des gewünschten Polymorphs gezielt induziert, sondern zusätzlich die Keimbildung konkurrierender Polymorphe unterdrückt werden können.

Neueste Online-Sensoren verknüpft mit einem automatischen Laborreaktor erlauben uns eine exakte und reproduzierbare Kristallisationsführung und damit eine zeitnahe Detektion der Keimbildung.

### Ausstattung und Infrastruktur

Spezifische Oberflächen sowie Porengröße und Porenart bestimmen wir mittels Physi- und Chemisorption (Autosorb-1) unter Verwendung verschiedener Adsorbentien wie Stickstoff, Argon, Krypton oder Kohlenmonoxid.

Das Image Plate Diffraction System der Fa. STOE ermöglicht die exakte und komplette Analyse des reziproken Raums mittels Röntgenbeugung. So erhält man die dreidimensionale Kristallstruktur der Substanz.



Neben der konventionellen Röntgenstrukturanalyse sind in der Gruppe In-situ-Pulvermessungen bei definierter Luftfeuchte sowie unter kontrollierten Temperatur- und Gasdruckbedingungen etabliert. Ferner besteht über Kontakte vor Ort Zugang zu weiteren wichtigen Analysemethoden: EDX (IMA, Bayreuth), ICPOES (BGI, Bayreuth), Mikrosonde (BGI, Bayreuth), Impedanzspektroskopie (FAN, Bayreuth).

Über eine Kooperation mit der TU München werden v. a. die Fe-haltigen Schichtsilicate mit Mössbauerspektroskopie untersucht.

Alle Instrumente werden auch in der Grundlagenforschung eingesetzt und werden von qualifizierten Mitarbeitern (Wissenschaftlern und technischen Angestellten) betreut, so dass stets kompetente Ansprechpartner zur Verfügung stehen.

### UNSERE AUSSTATTUNG IM ÜBERBLICK

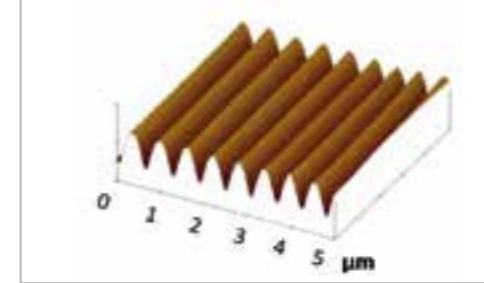
- STOE StadiP Pulverdiffraktometer (Cu-Strahlung)
- Siemens D 5000 Pulverdiffraktometer (Cu-Strahlung)
- PANalytical X 'Pert Pro Reflexions-Pulverdiffraktometer
- STOE IPDS I Einkristalldiffraktometersystem (Mo-Strahlung)
- Linseis DSC L 63
- Linseis DTA/TG L 61
- Quantachrome Autosorb-1 (Physi- und Chemisorption)
- Microfluidics Inc. Microfluidizer M110Y
- Particle Metrix StabiSizer Strömungspotenzialmessgerät
- Mettler Toledo LabMax (mit ReactIR und FBRM-Sonde, Lasentec)
- Bruker ifs 66v FTIR
- Cary 5 UV-Vis/ NIR
- SurfaceNet GmbH Skull-Schmelzanlage
- Linn HighTherm Graphitofen mit Drehrohr HT 1900
- Hüttinger Hochfrequenzofen 20 kW TIG 20/300
- Büchi Rührautoklav für Polymerisationsreaktionen

### FERNER BESTEHT ZUGANG ZU DIVERSEN, ZENTRAL GENUTZTEN EINRICHTUNGEN:

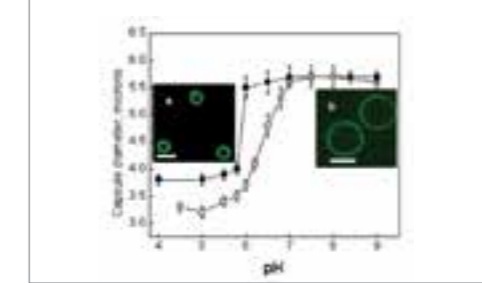
- Energiedispersive Röntgenspektroskopie EDX (IMA, Bayreuth)
- Mikrosonden-Untersuchungen (BGI, Bayreuth)
- Inductively coupled plasma optical emission spectrometer ICP-OES (BGI, Bayreuth)



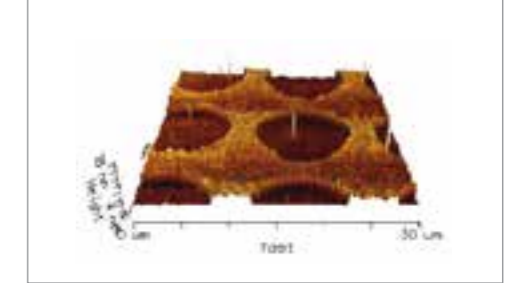
**Prof. Dr. Andreas Fery**  
LEHRSTUHL FÜR PHYSIKALISCHE CHEMIE II



Mikrostrukturierung durch Faltenbildung

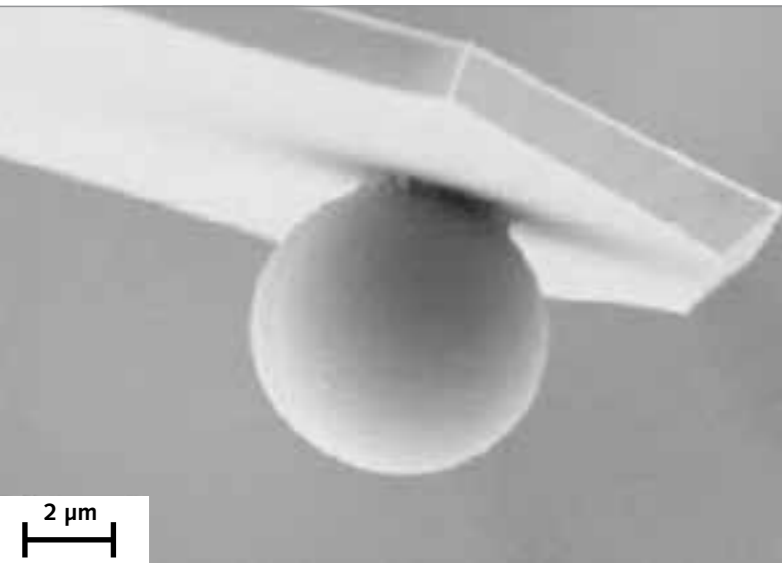


pH-Sensitive Mikrokapseln



Chemische Oberflächenstrukturierung

## „Charakterisierung und Modifizierung von Oberflächen“



Mit Techniken wie der Colloidal Probe Kraftspektroskopie können Wechselwirkungskräfte zwischen Mikropartikeln und Oberflächen direkt gemessen werden.

Moderne optische Fluoreszenz-Mikroskopie-Techniken, wie die konfokale Laser-Scanning Mikroskopie zur dreidimensionalen Abbildung oder die Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie zur Untersuchung von Transportvorgängen, ergänzen das Methodenspektrum.

### Wechselwirkungen und Mikromechanik

Eine Erweiterung von kraftmikroskopischen Methoden ist die Kraft-Spektroskopie, bei der nicht die Abbildung einer Oberfläche, sondern die präzise Messung von Kräften zwischen Oberflächen oder von Deformationskräften im Mittelpunkt steht. Kolloidale Partikel, Fasern oder andere Mikro-Objekte können direkt, wie in der Abbildung links gezeigt, an mikroskopische Balkenfedern geklebt werden. Dadurch können die Adhäsion oder Reibung einzelner Partikel mit anderen Partikeln oder Oberflächen exakt vermessen werden.

Ähnlich sind auch mechanische Eigenschaften von Beschichtungen zugänglich. Für die Untersuchung von Mikrokapseln oder Fasern stehen weltweit einzigartige Apparaturen und Know-how bezüglich der Modellierung zur Verfügung.

In-Situ-Kombination von Kraftspektroskopie und optischer Mikroskopie zur Kapselcharakterisierung



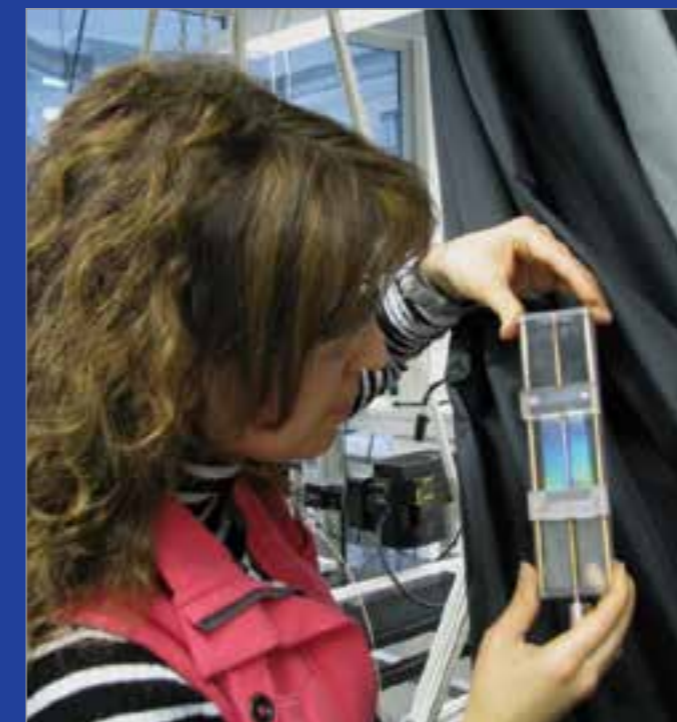
### Beschichtete und strukturierte Oberflächen

Polymere eignen sich zur Beschichtung verschiedenster Oberflächen und im LS PCII existiert besonders im Bereich der Polyelektrolyt-Multilagen und Blockcopolymerfilme langjährige Erfahrung. Schichtdicken und Zusammensetzung lassen sich in diesen Systemen auf der Nanoskala kontrollieren. Auch Kompositbeschichtungen aus Polymeren und inorganischen Nanopartikeln sind realisierbar. Neben homogenen Beschichtungen können durch Kontaktdruckverfahren oder kontrollierte Faltenbildung Oberflächen chemisch oder topographisch gemustert werden, ohne dass aufwändige und kostspielige Lithographieschritte nötig sind. Diese Bausteine erlauben die Herstellung (multi-)funktioneller und responsiver Beschichtungen unterschiedlichster Art.

### Maßgeschneiderte Partikel und Mikrokapseln

Partikel können besonders mit der Polyelektrolyt-Multilagen-Technik analog wie oben beschrieben beschichtet werden, wodurch ihre kolloidale Stabilität und ihre Wechselwirkungen mit der Umgebung maßgeschneidert werden können. Dieser Ansatz erlaubt auch die Verkapselung von Wirkstoffen und deren kontrollierte Freisetzung.

Farbenspiel durch optische Interferenzeffekte auf einer Mikrostrukturierten Polymerprobe



### ANALYTIK

- Rasterkraftmikroskopie
  - Flüssigkeitsabbildung
  - Phasenkontrast
  - Reibungskraftmikroskopie
  - chemische Kraftmikroskopie
  - Nanotomographie
- Optische Mikroskopie
  - Phasenkontrast
  - Differentieller Phasenkontrast
  - Fluoreszenzmikroskopie
  - Konfokale Fluoreszenzmikroskopie
  - Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie
- Kraftspektroskopie
  - Nanoindentation
  - Kolloidale Kraftspektroskopie
  - Mikromechanik
  - Kolloidale Reibungs- und Adhäsionsmessungen
- Ellipsometrie
  - Nullellipsometrie
  - Spektroskopische Ellipsometrie
- Zeta-Potentialmessung
- Optische Spektroskopie (ATR-FTIR, UV-Vis,...)

Zugang zu weiteren Methoden wie Röntgen und Neutronenstreuung, Röntgenmikroskopie, usw. innerhalb von Kooperationen.

Die Kernkompetenzen des Lehrstuhls Physikalische Chemie II liegen in der Modifikation/Beschichtung von Partikeln und Grenzflächen sowie der Untersuchung von Oberflächenkräften und Mikromechanik grenzflächen-dominierter Systeme.

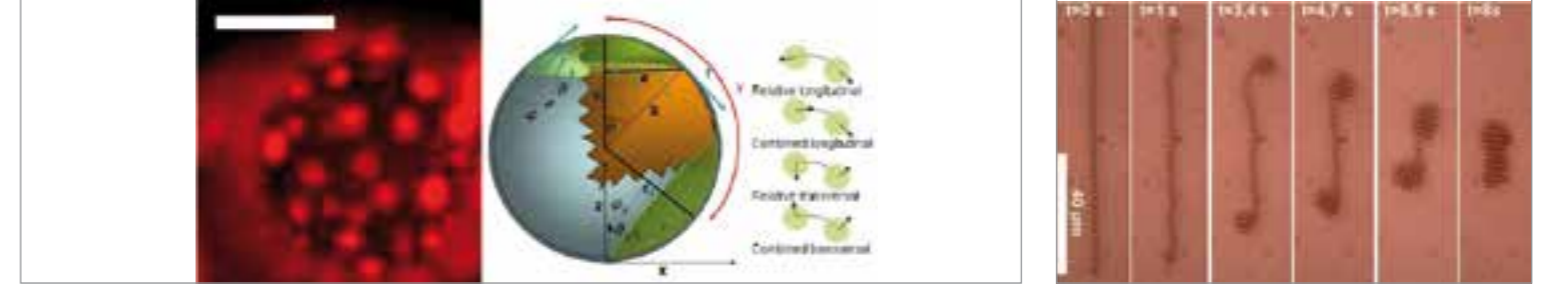
Die Eigenschaften von Mikropartikeln, Mikrokapseln oder Mikrofasern werden durch ihre Oberfläche bestimmt. Doch auch für makroskopische Objekte sind Benetzbarkeit, Adhäsion, Reibung, Haptik oder Wechselwirkung mit Zellen/Gewebe von makroskopischen Objekten in der Regel durch eine Grenzschicht von weniger als einem Tausendstel Millimeter Dicke dominiert. Moderne Beschichtungstechniken sind also ein Schlüssel zur Lösung zahlreicher Anwendungsprobleme. Dabei geht die Entwicklung neuer Materialien Hand in Hand mit der Erweiterung der Analytik, um die Mechanismen, die hinter den Wechselwirkungen stehen, aufzuklären.

### Mikroskopiemethoden

Das Rasterkraftmikroskop ist für die Untersuchung von Form, Wechselwirkungskräften und mechanischen Eigenschaften von Oberflächen maßgeschneidert. Oberflächenprofile können mit Nanometer-Auflösung an Luft oder unter Lösungsmittel abgetastet werden. Dabei können Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Dampfdruck, pH, usw. kontrolliert und gezielt verändert werden. Varianten dieser Technik erlauben chemische, mechanische oder Reibungseigenschaften abzubilden.



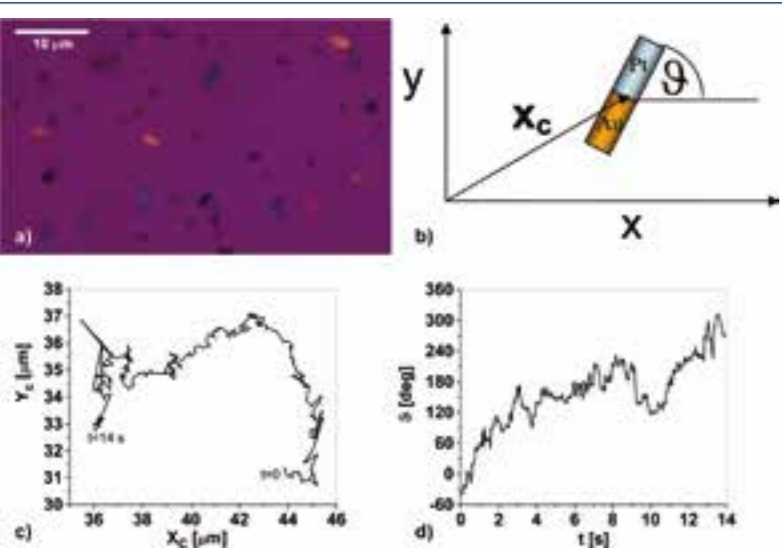
**Prof. Dr. Thomas Fischer**  
INSTITUT FÜR EXPERIMENTALPHYSIK V



Domänenrheologie in Vesikeln

Reibungskontrollierte Faltungsübergänge

## „Transportphänomene elastischer Materialien“



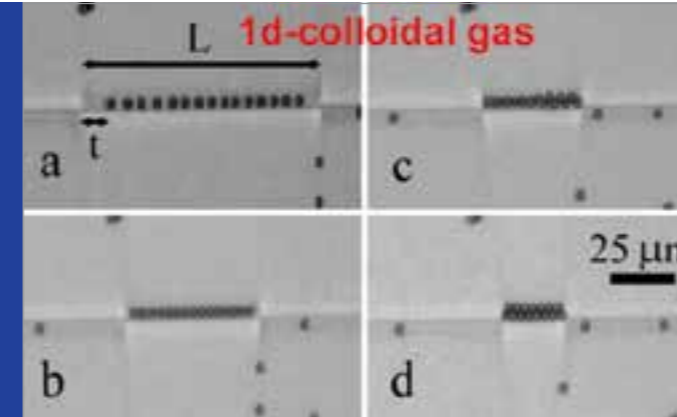
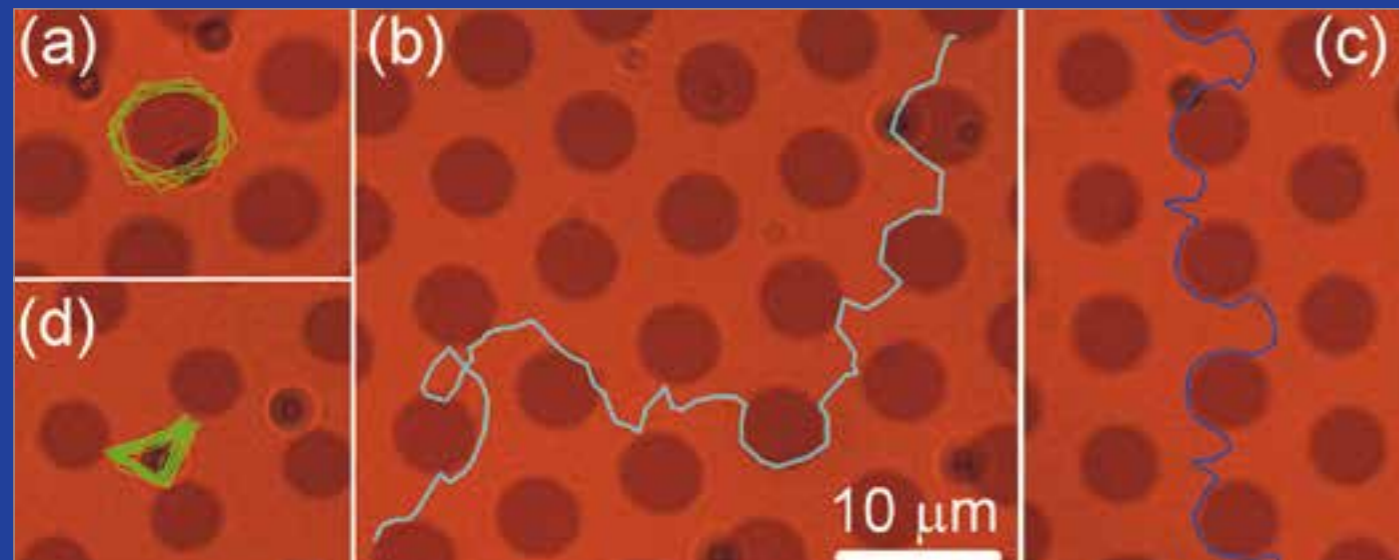
Kolloidale Motoren an Grenzflächen.  
Autonomer Transport katalytischer Gold-Platin Nanoröhrchen

### Micro-Motoren

Die Miniaturisierung chemischer Assays stößt in ein neues Regime der Fluid Dynamik vor, das in unserer Arbeitsgruppe untersucht und verstanden werden soll. In biologischen Zellen werden die essentiellen Zellfunktionen wie die Zellbewegung und der inter- und intrazelluläre Transport von hydrodynamischen Flüssen begleitet. Der Fluss wird von spezifischen Proteinen kreiert, die als aktive Motoren Energie verbrauchen und in hydrodynamischen Fluss umwandeln. Zwei Charakteristika unterscheiden kolloidale Motoren von ihrem makroskopischen Analogon: i) Die Motoren operieren in einer Umgebung, welche von Grenzflächen begrenzt wird. ii) Sie bewegen sich in einer räumlich heterogenen Umgebung, die oft zeitlich fluktuiert, so dass die Bewegung sich aus Perioden zusammensetzt, in welchen die Motoren lokal gefangen sind und sich anschließend wieder frei bewegen. Deshalb bewegen sich kolloidale Motoren nach hydrodynamischen Gesetzen, die sich signifikant von den Gesetzen für makroskopische Motoren unterscheiden. Inspiriert von den Lösungen dieser Problematik in der Natur, versuchen wir in unserer Arbeitsgruppe, natürliche Systeme zu imitieren, indem wir die Funktion durch supramolekulare Selbstassemblierung hergestellter aktiver hydrodynamischer Strukturen, Materialien und Devices untersuchen. Hierbei kommen mikroskopische zeitaufgelöste Techniken zum Einsatz, die mit statistischen Analyseverfahren kombiniert werden.

Kolloidaler Transport mit äußeren Feldern. Transportmoden magnetischer Kolloide auf magnetischen Granatfilmen

Die Kernkompetenz unserer Arbeitsgruppe liegt in der Entwicklung magnetisch, elektrisch und chemisch kontrollierter Transportsysteme von kolloidaler Materie nahe strukturierter Grenzflächen, welche extern angelegte homogene Felder in auf der kolloidalen Skala heterogene Felder umwandeln und so die individuelle massiv parallele Manipulation einzelner kolloidaler mit biochemischen Stoffen beladenen Teilchen in einem Ensemble auf einem Lab-on-the-chip erlauben.

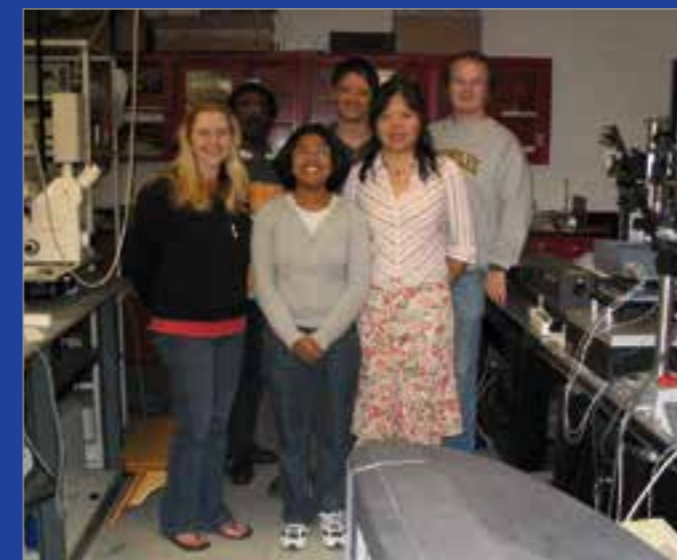


Dynamische Charakterisierung von Grenzflächen.  
Kraftmessung in einem magnetischen Squeezer

### Magnetische Kolloide

Eine interessante Klasse an kolloidalen Partikeln sind paramagnetische Kolloide, welche einen paramagnetischen Kern besitzen. Diese Kolloide haben viel Beachtung gefunden, da magnetische Felder mit normalen Flüssigkeiten und mit biologischem Material nur wenig wechselwirken, so dass äußere Magnetfelder nicht mit deren Funktion interferieren. Konventionelle Manipulationsverfahren paramagnetischer Kolloide verwenden extern angelegte Magnetfelder, die auf einer cm-Skala variieren. Die Entwicklung magnetischer Manipulationsverfahren, welche das volle Potenzial an Manipulations-

Mitarbeiter mit Know-how an der Schnittstelle zwischen Theorie und Experiment



möglichkeiten ausschöpfen ist auf magnetische Felder angewiesen, die auf der Längenskala der kolloidalen Partikel variieren. Magnetische Domänenstrukturen magnetischer Granatfilme erzeugen Magnetfelder, die genau auf der kolloidalen Skala heterogen sind. Mittels externer quasihomogener Felder können die Felder der Granatfilme so verändert werden, dass ein Ensemble magnetischer Partikel gezielt manipuliert werden kann. Die Konversion der Längenskalen mit Hilfe der Granatfilme erlaubt es in unserer Arbeitsgruppe, die gesamte Vielfalt an kolloidalen Transportmoden zu induzieren. Diffusion, anomale Diffusion, ballistischer Transport, digitaler Transport und stochastisch resonante Ballistik der Kolloide auf den Granatfilmen, sowie die Separation unterschiedlich funktionalisierter Kolloide lassen sich durch gezielte magnetische Modulation realisieren. In unserer Arbeitsgruppe entwickeln wir die Expertise für die kontrollierte Bewegung biochemisch funktionalisierter paramagnetischer Kolloide auf der mm-Skala bis hin zur Nanometerskala.

### Grenzflächenphänomene

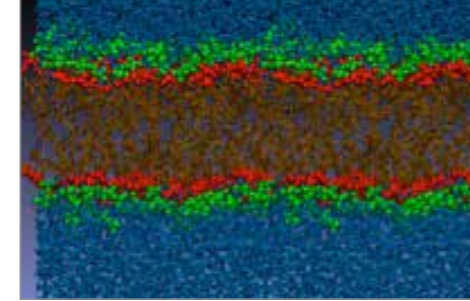
Das Verständnis dynamischer kolloidaler Prozesse an Grenzflächen beginnt mit ihrer zeitaufgelösten mikroskopischen Beobachtung. Hierzu steht eine Reihe optischer Durchlicht-, Fluoreszenz-, Brewsterwinkel- und Polarisationsmikroskopischer Aufbauten zur Verfügung. Die kolloidalen Systeme können mittels optischer Pinzetten, magnetischer Squeezer und magnetischer digitaler Shiftregister bewegt und manipuliert werden und die dabei entstehenden Kräfte im femto-pico-Newtonbereich gemessen werden. Besondere Kompetenz besteht in der Aufklärung komplexer dynamischer und hydrodynamischer Prozesse an Grenzflächen. Alle Instrumente kommen sowohl in der Grundlagenforschung als auch in den daraus entstehenden Anwendungen zum Einsatz und werden von qualifizierten Mitarbeitern betreut.

### UNSERE AUSSTATTUNG IM ÜBERBLICK

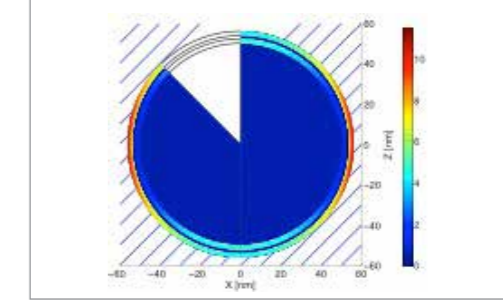
- Brewsterwinkelautokorrelationspektroskopie
- Kombinierte Filmwaage mit Fluoreszenzmikroskopie und optischer Pinzette
- Kombiniertes magnetischer Squeezer und Polarisationsmikroskop
- Kombiniertes magnetisches Shiftregister und Fluoreszenzmikroskop



**Prof. Dr. Stephan Gekle**  
 LICHTENBERG-JUNIORPROFESSUR  
 BIOFLUID SIMULATION AND MODELING

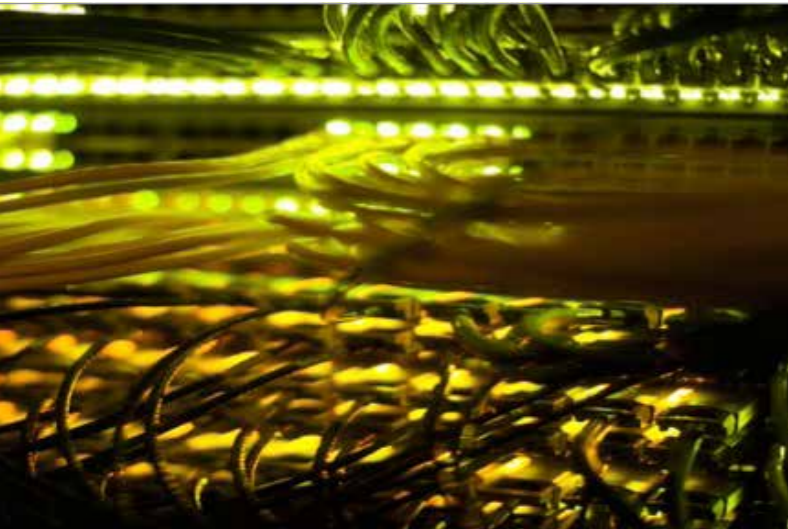


Molekulardynamik Simulation einer Zellmembran, die oben und unten von Wasser (blau) umgeben ist.



Verteilung der absorbierten Energie in einer Zelle bei Bestrahlung mit elektromagnetischem Feld

## „Simulation einzelner Moleküle und komplexer Strömungen“



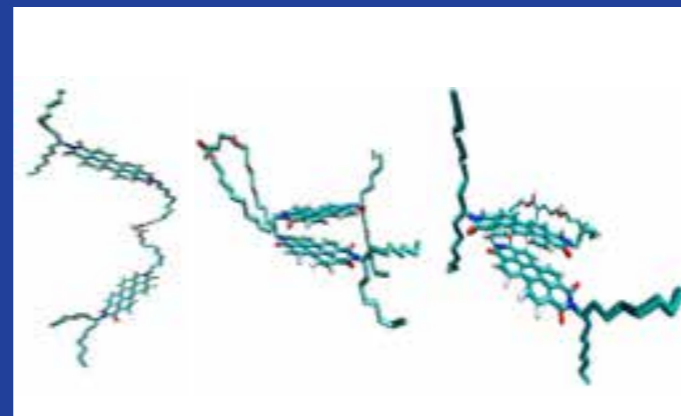
Schaltzschrank des neuen Bayreuther Supercomputers mit über 10000 Prozessoren.

### Molekulare Struktur und Dynamik weicher Materie

Für die Funktionalität von biologischen Molekülen ist neben der chemischen Zusammensetzung auch die Konformation, d.h. die räumliche Anordnung der Moleküle von entscheidender Bedeutung. Dies schließt sowohl die intramolekulare Struktur (z.B. die Faltung eines Proteins) als auch die supramolekulare Anordnung mehrerer Moleküle zueinander mit ein. Ein spektakuläres Beispiel für eine supramolekulare Ordnung ist die spontane Bildung einer Grenzfläche aus Lipid-Molekülen in Wasser durch hydrophobe Wechselwirkungen (siehe Abbildung rechts oben). Solche Prozesse können mit Hilfe von Molekulardynamiksimulationen, wie sie in unserer Arbeitsgruppe durchgeführt werden, untersucht und verstanden werden.

### Anwendungsbeispiel I: Organische Solarzellen aus Perylen-Farbstoffen

Perylene sind starke Farbstoffe, die Sonnenlicht effizient absorbieren. Daneben sind sie aber auch sehr gute Elektronenleiter, so dass die absorbierte Energie schnell und effizient durch das Material zu einer äußeren Kontaktstelle transportiert werden kann. Für diesen Ladungstransport spielt die supramolekulare Anordnung, das sogenannte Stacking, von Perylenen eine entscheidende Rolle. Mit Hilfe unserer Simulationen konnten wir die Existenz einer bisher unbekannt Struktur von Perylen-Dimeren nachweisen (siehe Abbildung unten) und damit spektroskopische Experimente der Arbeitsgruppen Köhler (Experimentalphysik IV) und Thelakkat (Makromolekulare Chemie I) erklären.



Ein Perylen-Dimer Molekül in seinen drei möglichen Konformationen: offen (links), parallel gefaltet (Mitte) und anti-parallel gefaltet (rechts).

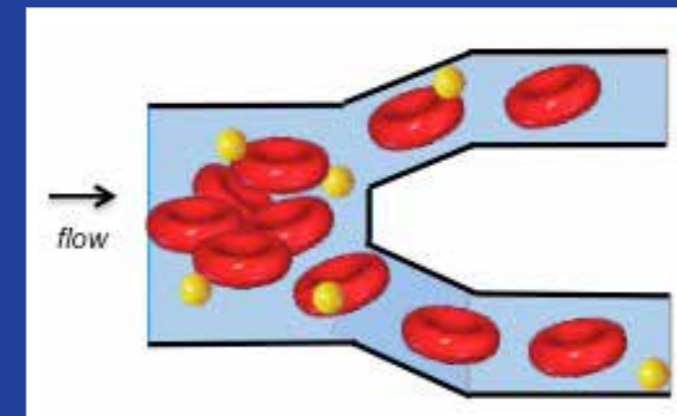
### Anwendungsbeispiel II: Absorption elektromagnetischer Strahlung an Zellmembranen

Die Frage, ob elektromagnetische Strahlung wie sie in der Telekommunikation verwendet wird, schädliche Auswirkungen auf den menschlichen Organismus haben kann, wird intensiv und kontrovers diskutiert. Mit Hilfe von MD-Simulationen konnten wir kürzlich das Absorptionsspektrum von Zellmembranen quantitativ berechnen (siehe Abbildung oben) und die resultierenden Temperaturgradienten innerhalb einer Zelle vorhersagen.

### Strömungsdynamik komplexer Fluide

Unter komplexen Fluiden versteht man Lösungen von Partikeln in einer Trägerflüssigkeit, wobei die einzelnen Partikel feste Objekte (Kolloide) wie Sandkörner, weiche Objekte wie biologische Zellen oder auch Tropfen einer zweiten, nicht mischbaren Flüssigkeit sein können. Aufgrund dieser Struktur verhalten sich komplexe Fluide teils wie ein elastischer Festkörper, teils wie eine viskose Flüssigkeit. Sie sind "viskoelastisch". Prominente Beispiele sind künstlich hergestellte Emulsionen wie Cremes oder Farben, aber auch natürlich vorkommende Substanzen wie Milch oder Blut.

In unserer Arbeitsgruppe wird das Strömungsverhalten komplexer Fluide detailliert untersucht. Aus den Simulationsrechnungen lassen sich einerseits makroskopische Größen wie z.B. die Viskosität bestimmen. Andererseits erlauben die Simulationen aber auch detaillierte Einblicke in die mikroskopische Dynamik wie z.B. die räumliche Verteilung der Partikel im Strömungskanal.



Mikrokapseln (gelb) werden von roten Blutzellen an die Gefäßwand der Arterie gedrückt.

### Anwendungsbeispiel III: Mikrokapseln in der Blutbahn

Zahlreiche Forschungsarbeiten befassen sich derzeit mit der Anwendung von synthetisch hergestellten Mikrokapseln als Wirkstoffvehikel. Hierbei wird ein medizinischer Wirkstoff zunächst in eine Kapsel verpackt, welche dann in die Blutbahn injiziert wird. Die Kapsel zirkuliert durch die Blutbahn bis zu ihrem Bestimmungsort (z.B. Tumorherd), wo sie gezielt zerstört und der Wirkstoff freigesetzt wird.

Mit Hilfe von Simulationen wie sie in unserer Gruppe durchgeführt werden, kann das Verhalten der Mikrokapseln während der Zirkulationsphase untersucht werden. Eine wichtige Frage ist hierbei, welche Faktoren (Oberflächenchemie, Form, Deformierbarkeit, etc.) das Strömungsverhalten am meisten beeinflussen (siehe Abbildung links unten) und ob sich an bestimmten Stellen im Kreislaufsystem möglicherweise Anhäufungen von Mikrokapseln bilden.

### SIMULATIONSMETHODEN

- Molekular Dynamik
  - Räumliche Anordnung komplexer Moleküle
  - Supramolekulare Strukturbildung
  - Dynamische Konformationsänderungen (Faltung)
- Lattice-Boltzmann/Boundary-Integral
  - Strömungen komplexer Fluide
  - Makroskopische Größen: Viskosität
  - Mikroskopische Größen: Dichteverteilung, Deformation einzelner Zellen/Tropfen

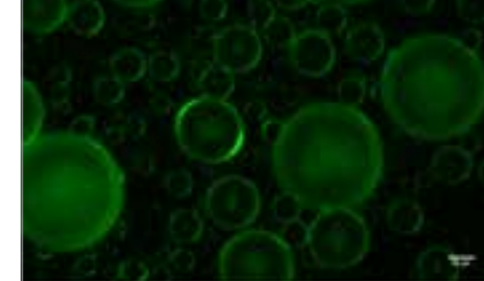




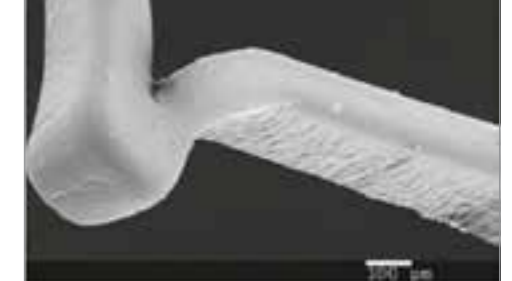
**Prof. Dr. Andreas Greiner**  
LEHRSTUHL FÜR MAKROMOLEKULARE CHEMIE II



Ultradispersionsstabiles wonder@silver®

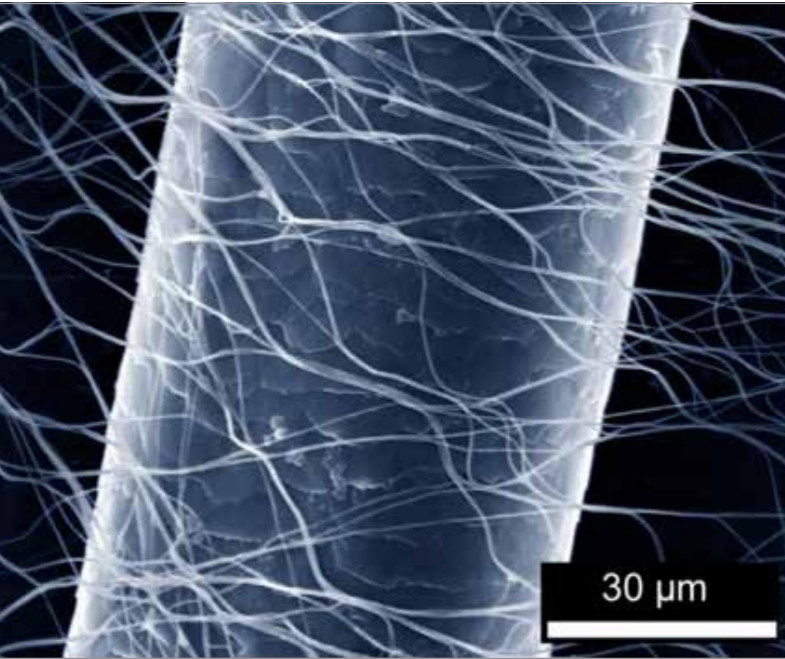


Grenzflächenchemie mit Silbernanopartikel



PPX als perfektes Barrierematerial auf Stentoberflächen

## „Synthese und spezielle Verarbeitung von Polymeren, Elektrospinnen von Nanofasern, Metall-Nanopartikel Konjugate, Polymer Beschichtungen“



Durch Elektrospinnen können Polymernanofasern als Vliese hergestellt werden, deren Durchmesser um ein Vielfaches kleiner ist als der Durchmesser eines menschlichen Haares.

Die Kernkompetenzen der Arbeitsgruppe Greiner am Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie II bestehen in der Synthese und Charakterisierung von Polymermaterialien sowie deren Verarbeitung zu dünnen Filmen, Nanofasern und Nanopartikel durch spezielle Techniken.

Einer der besonderen Schwerpunkte der Arbeitsgruppe sind Elektrospinnen von Nanofasern, die sich neben sehr großen Oberflächen durch vielfältige Funktionalisierungsmöglichkeiten auszeichnen. Hieraus resultieren zahlreiche Anwendungen u. a. im Bereich der Filtration, Textil- und Agrartechnik, der Katalyse, des Tissue Engineering, der Medikamentenfreisetzung und der Kompositentechnologie. Typisch für die Arbeiten der Arbeitsgruppe ist Entwicklung von Polymersystemen, die mit solchen speziellen Verarbeitungstechniken auch realitätsnah einsetzbar sind, was am Beispiel der Anwendung von Polymernanofasern im biotechnischen Pflanzenschutz sehr gut demonstriert werden kann. Der Einsatz pheromonbeladener Nanofaservliese zeigt in der Verwirrungstechnik von Schadinsekten sehr gute Erfolge. Jedoch wird das Elektrospinnen von Nanofasern direkt auf den Feldern erst dadurch ermöglicht, dass wasserunlösliche bioabbaubare Polymernanofasern durch Elektrospinnen aus Dispersionen hergestellt werden können. Der Trick zur eindimensionalen Verfilmung von Dispersionspartikeln besteht in der Ver-

wendung von Polymeren mit relativen niedrigen Glaspunkten und kleinen Mengen wasserlöslicher Polymere als Additive. Derartige maßgeschneiderte Systeme erlauben innovative Lösungsansätze für anwendungstechnische Problemstellungen mit polymer-chemischen Mitteln.



Traktor im Einsatz zum Elektrospinnen auf Agrarflächen.

Das Elektrospinnen von Dispersionen bietet andere zahlreiche Möglichkeiten zur Herstellung hochfunktionaler Polymernanofaservliese. Durch Elektrospinnen geladener Dispersionspartikel können Polymernanofasern hergestellt werden die durch einfaches Tauchen mit weiteren Funktionen versehen werden können. So können je nach Oberflächenladung selektiv Farbstoffe, Katalysatoren, Metallpartikel auf die Oberflächen derartiger Polymer-nanofasern aufgebracht werden und verändern dabei ähnlich wie ein Chamäleon ihre Oberflächen.



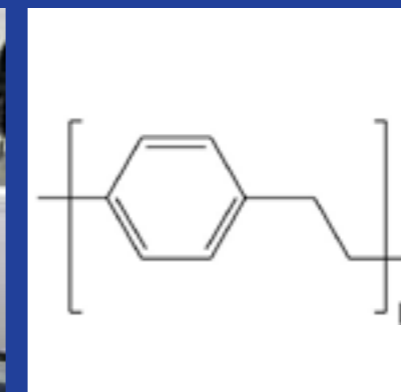
Chamäleonnanofasern selektiv mit verschiedenen Farbstoffen beschichtet.

Metall-Polymer Konjugate sind für Anwendungen als Katalysatoren, optischen Markern, antibakteriellen Stoffen, Rheomodifizier oder als Therapeutika von enormer Bedeutung. Durch chemische Bindung von Polymerketten auf Nanopartikeloberflächen kann die Dispersionsstabilität wesentlich erhöht werden. Mit Wonder@silver®, also Silber-Polymer Konjugaten, können klassische Polymerverarbeitungsmethoden wie Tauchen, Sprühen oder Extrusion bedenkenlos eingesetzt werden. Der Trick besteht darin, dass die Polymerketten bürstenartig auf den Nanopartikeloberflächen angeordnet werden und so durch Abstoßung die Aggregation der Nanopartikel verhindern. Eine vollkommen neuartige Chemie erlauben Zweiphasensysteme mit amphiphilen Polymeren und Nanopartikeln. Damit werden die Prinzipien und hohen selektiven Grenzflächenchemie Reaktionen ermöglicht.

Polymer Beschichtungen auf Metalloberflächen werden in der Arbeitsgruppe durch Gasphasenabscheidungspolymerisation (CVD) von Poly(p-xylylen) (PPX, Handelsname: Parylene) erreicht. Die CVD von PPX eine ganz besonders schonende Art von Polymerbeschichtungen, bei der ohne Lösungsmittel oder Katalysatoren bei Raumtemperatur auch äußerst empfindliche Substrate mit nahezu beliebig dicken konformen PPX-Filmen beschichtet werden können. Diese PPX Filme sind hervorragende Barrierematerialien, die einen exzellenten Korrosionsschutz bei bester Nasshaftung, optimaler Lösungsmittel- und Hydrolysestabilität und Biokompatibilität bieten. Daher werden PPX-Beschichtungen zum Schutz von mikroelektronischen Bauteilen oder für Implantatmaterialien z. B. Stents eingesetzt. Durch gezielte Variation der chemischen Struktur der PPX konnten vollkommen neuartige Eigenschaftskombinationen, z. B. superhydrophobe PPX-Beschichtungen erreicht werden.



CVD-Coater zur Beschichtung mit PPX

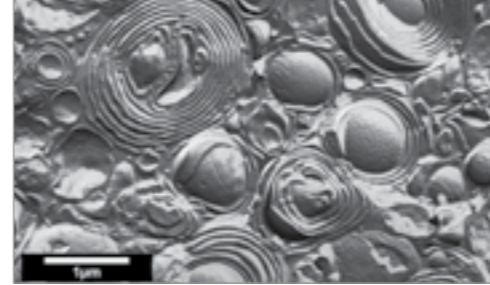


Die chemische Struktur von PPX

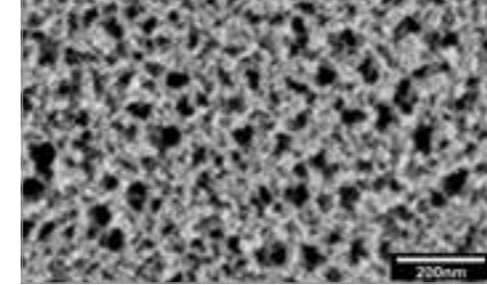
- Polymerisationsmethoden
  - Polykondensation
  - Anionische Polymerisation
  - Polyrekombination
  - CVD-Polymerisationen
  - Metallkatalysierte Polymerisationen
- Polymerisationsanlagen (KeyLab für Polymer Synthese und Charakterisierung)
  - Rührreaktoren 5 mL – 30,000 mL
  - Druckreaktoren
  - CVD-Reaktoren
  - Photoreaktoren
  - Ganzglas-Anionikanlage
  - Gefrierdrying
- Polymerverarbeitungsanlagen
  - Elektrospinnanlagen (Forschungs-, Pilotanlagen)
  - Entwicklungsextruder
  - CVD-Coater
  - Dispergieranlage
- Komplexe funktionale Polymermaterialien
  - Blockcopolymer
  - Polymer/Bakterien Komposite (Living Composites)
  - Polymer-Nanopartikel Konjugate
  - Flüssigkristalline Polymere
  - Elektrisch leitfähige Polymere, Polymere Isolatoren
  - Hydrogele
  - Polymere Dispersionen
  - Amphiphile Polymere
  - Superhydrophobe Polymere
  - Polymere Nanoreaktoren
  - Polymere Nanoröhren, Nanofasern, Nano- und Mikropartikel



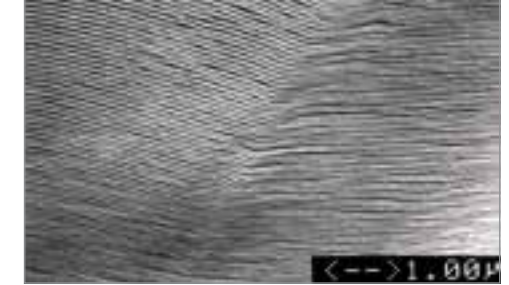
**Prof. em. Dr. Heinz Hoffmann**  
BAYCOLL



FF-TEM-Aufnahme einer Vesikelphase



REM-Aufnahme eines getrockneten Silikatgels



FF-TEM-Aufnahme einer lyotropen  $L_{\alpha}$ -Phase

## „Micellen, Kolloide und ihre Anwendungen“



Typische Partikelgrößen und -abstände in kolloidalen Lösungen liegen im Bereich der Wellenlänge sichtbaren Lichts und können deshalb je nach Betrachtungswinkel zu beeindruckenden Farbspielen führen.

BayColl wurde von Heinz Hoffmann nach seiner Emeritierung im Jahre 2003 gegründet, um anwendungsorientierte Forschung und Beratung verstärkt weiterführen zu können. BayColl arbeitet in Verbindung mit Mitgliedern des BZKG. Anfragen von Firmen aus der lokalen Umgebung und auch von weltweit arbeitenden Partnern werden zunächst vom praktischen Problem auf die physikalisch-chemischen Grundlagen zurückgeführt. Danach werden in den Laboren von BayColl und auch mit den Partnern praktische Lösungen entwickelt. Zurzeit sind sechs Mitarbeiter mit solchen Projekten beschäftigt. Die zur Verfügung stehenden experimentellen Methoden sind auf Anwendungen ausgerichtet.

Rheologie, Differentialthermoanalyse, Mikroskopie und auch reine Forschungsapparaturen gehören zur Ausstattung. Neue Werkstoffe mit Zement und Silikaten, Patentberatungen sind typische Beispiele für die Aktivitäten. Von den Tensiden aus haben sich bei BayColl die Fragestellungen auf nahezu alle Bereiche der Kolloidchemie ausgedehnt.

### Herstellung von kolloidalen Systemen

Das Phasenverhalten von Tensidsystemen hat noch immer eine zentrale Stellung im Forschungsfeld von BayColl. Durch definierte Komponentenwahl kann der Bereich von wasserviskosen Flüssigkeiten bis hin zu hochviskosen Materialien mit Fließgrenze durchschritten werden. Diese Flüssigkeiten und Phasen besitzen besondere rheologische Eigenschaften und lassen sich zur Optimierung verschiedener Formulierungen einsetzen, wie z.B. im Pflanzenschutz, in der Metallbearbeitung und bei Bohrlösungen.

### Charakterisierung von kolloidalen Systemen

Die Erklärung der makroskopischen Eigenschaften ist stets in den mikroskopischen Strukturen zu finden. Zu diesem Zweck hat BayColl eine Reihe von Methoden entwickelt, die wertvolle Informationen über die Mikrostrukturen komplexer Systeme liefern. Dabei kommen einfache Methoden wie Polarisationsmikroskopie und moderne Elektronenmikroskopie zur Anwendung. Für detaillierte Streuexperimente werden Kleinwinkelneutronenstreuung und Kleinwinkelröntgenstreuung in Zusammenarbeit mit verschiedenen Großforschungseinrichtungen durchgeführt. Zur Untersuchung anisometrischer Teilchen eignet sich die Elektrodoppelbrechung. Schwerpunkt ist die detaillierte Analyse rheologischer Daten. Diese lässt Rückschlüsse auf die Mikrostruktur zu. Häufig gibt jedoch erst die Kombination verschiedener Methoden Klarheit über die vorliegende Struktur.

### Optimierung von kolloidalen Systemen

Beispiele hierfür sind:

- Emulsionen und Dispersionen für Kosmetik und Agrochemie
- Viskoelastische Fluide für die Erdölindustrie
- Gelierung von Flüssigkeiten
- Mikroemulsionen für kosmetische Anwendungen
- Additive zur Optimierung von Zementeigenschaften
- Tensidlösungen und -phasen für die Agrochemie
- Proteine als Hilfsmittel für die Kosmetik
- Aerogele für Beschichtungen verschiedener Substrate
- Tensidlösungen zur Strömungsbeschleunigung
- Neue Hybridmaterialien für Beschichtungen für Lotus- und Antifoggingeffekt



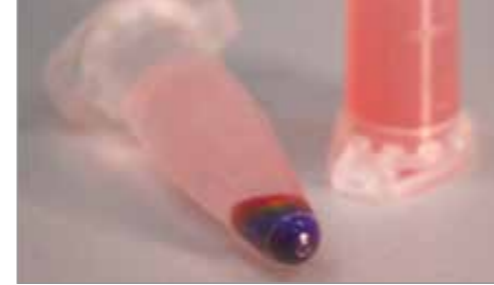
Polarisationsmikroskopische Aufnahme eines lyotropen Flüssigkristalls

### APPARATIVE AUSSTATTUNG

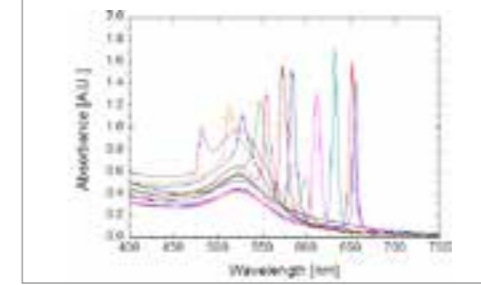
- Rheologie
- Strömungsdoppelbrechung
- Elektrodoppelbrechung
- Rasterelektronenmikroskopie
- Cryo-TEM und freeze-fracture in Kooperation mit Mitgliedern des BZKG
- Oberflächenspannung
- Grenzflächenspannung
- Klassische und dynamische Lichtstreuung in Kooperation
- Kleinwinkelröntgen- und Neutronenstreuung in Kooperation
- Zur speziellen Problemlösung besteht auch Zugang zu zentral genutzten Einrichtungen und Verbindung mit internationalen Forschergruppen



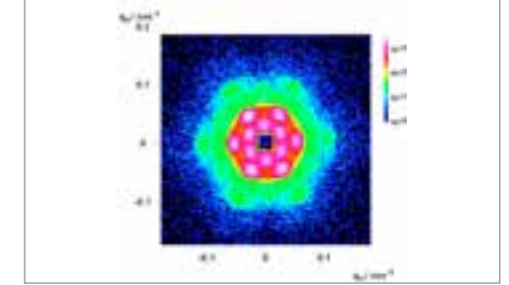
**Prof. Dr. Matthias Karg**  
PHYSIKALISCHE CHEMIE – KOLLOIDALE SYSTEME



Kolloidale Superstrukturen aus Gold-Polymer Kern-Schale Partikeln

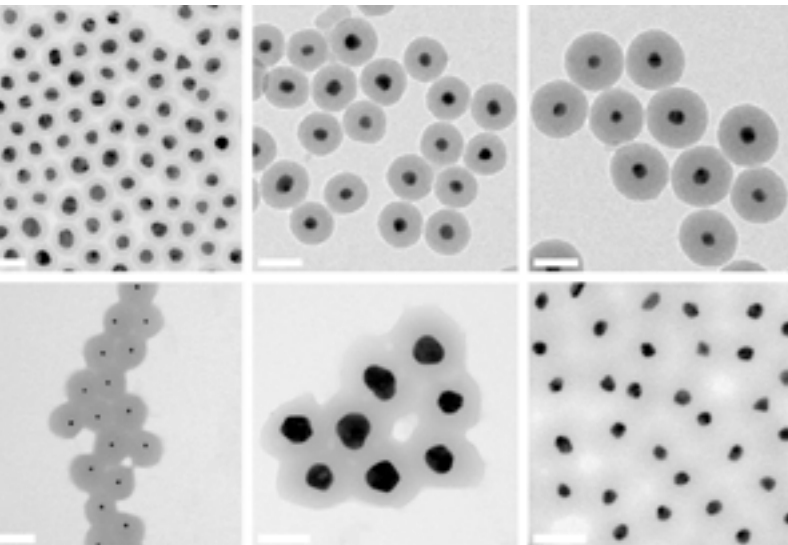


Bragg Reflexe kolloidaler Kristalle aus Gold-Polymer Kern-Schale Partikeln mit verschiedenen Volumenbrüchen



2D Detektor Bild (SANS) mit den, für eine FCC Struktur typischen, Bragg Reflexen

## „Kolloidale Superstrukturen mit einstellbaren optischen Eigenschaften“



Transmissions-Elektronenmikroskopie Aufnahme von Kern-Schale Kolloiden mit verschiedenen metallischen Kernen und dielektrischen Schalen

Unsere Forschungstätigkeiten fokussieren sich auf die Synthese und Charakterisierung neuartiger, multifunktionaler Kolloide, plasmonische Überstrukturen sowie Selbstordnungs-Phänomene.

### Kern-Schale Partikel

Die Umhüllung anorganischer Nanopartikel mit organischen Polymerschalen bietet einige interessante Aspekte:

- i) Die kolloidale Stabilität wird erhöht.
- ii) Das effektive Partikelvolumen wird vergrößert.
- iii) Hybrid-Materialien mit multifunktionalen Eigenschaften können aufgebaut werden.

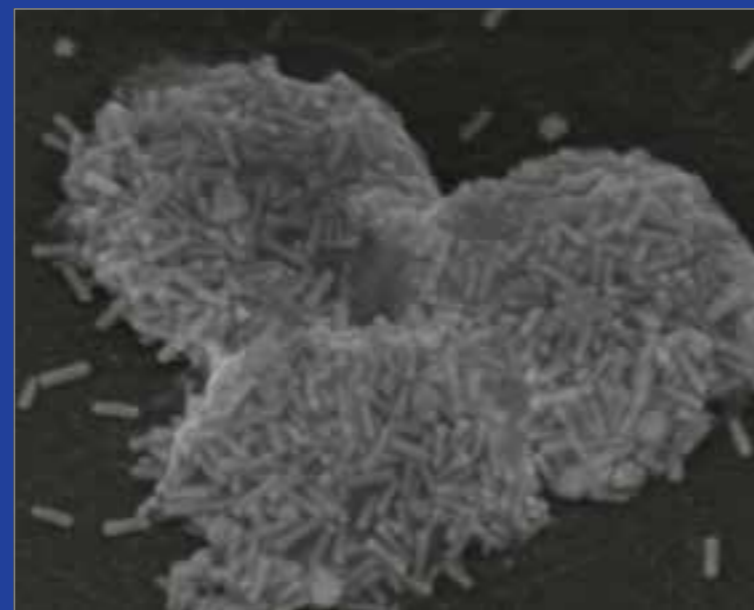
Ein Schwerpunkt unserer Forschung besteht in der Entwicklung von Einkapselungsstrategien für verschiedene anorganische Materialien. Als Kern Materialien kommen hierbei unter anderem Silica, Gold, Silber, Platin und Magnetit Nanopartikel zum Einsatz. Eine tragende Rolle für die erfolgreiche Umhüllung solcher Partikel kommt der Oberflächenfunktionalisierung der Nanopartikel zu, welche typischer Weise über Ligandenaustausch realisiert wird. Abhängig von der chemischen Beschaffenheit der Polymerhüllen, können multifunktionale Kern-Schale Kolloide präpariert werden. Verwendet man z.B. stimuli-responsive Polymere zur Einkapselung anorganischer Partikel, können Hybrid-Kolloide mit wohldefinierten Volumenphasenübergängen realisiert werden. In diesem Fall ist die Schalendicke der Hybride über externe Reize einstellbar.

### Plasmonresonanzkopplung und plasmonische Strukturen

Oberflächenplasmonresonanzen sind kollektive Oszillationen der Elektronenwolke metallischer Systeme. Diese Resonanzen sind energetisch lokalisiert wenn die Größe der Metallobjekte im nm-Bereich liegt. Die wohl bekanntesten Partikel, die solche lokalisierten Oberflächenplasmonresonanzen aufweisen sind Gold und Silber Kolloide, welche auf Grund ihrer starken Färbung bereits seit der Antike verwendet werden. Die Resonanzfrequenz hängt direkt von der Größe, Form und chemischen Zusammensetzung der Partikel, aber auch von der dielektrischen Umgebung ab. Für anisotrope Partikel ergibt sich zudem eine Polarisationsabhängigkeit.

In der PHYSIKALISCHEN CHEMIE – KOLLOIDALE SYSTEME interessieren wir uns im Besonderen für Plasmonenresonanz-Kopplungseffekte. Nähert man z.B. zwei individuelle Gold Nanopartikel einander an, so tritt eine Kopplung der Plasmonresonanzen auf, welche die Resonanzfrequenz, -intensität und -breite beeinflusst. Systeme, bei denen der Interpartikelabstand statisch oder dynamisch kontrolliert werden kann, ermöglichen daher die Präparation von Materialien mit schaltbaren optischen Eigenschaften. Einen Zugang zu solchen Materialklassen verfolgen wir über die Kombination stimuli-responsiver Polymere mit Gold und Silber Nanopartikeln.

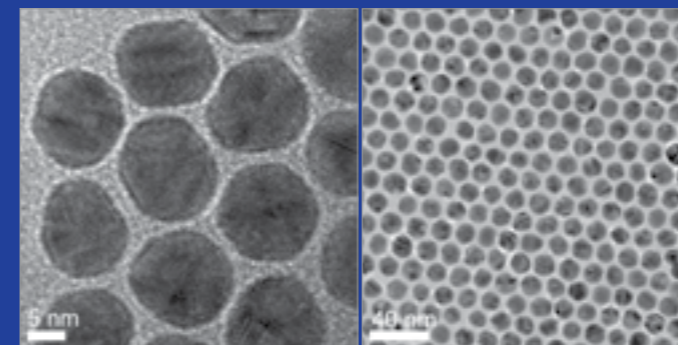
Raster-Elektronenmikroskopie Aufnahme von Copolymer-Mikrogelen beladen mit Gold-Nanostäbchen



### Kolloidale Selbstanordnung

Wie weit Selbstordnungskonzepte ausgereizt werden können, ist eine der Hauptfragestellungen mit der wir uns beschäftigen. Von besonderem Interesse ist für uns die Assemblierung nanoskaliger Bausteine wie z.B. Metall Nanopartikel. Um makroskopische 2D und 3D Strukturen aus solchen Partikeln aufbauen zu können, verwenden wir weiche, deformierbare Polymerhüllen/-liganden, welche sich als einstellbare Abstandhalter zwischen den Metall Nanopartikeln nutzen lassen und ungewöhnliche Struktur-symmetrien ermöglichen. Unsere Syntheseprotokolle können genutzt werden, um Schalendicken im Bereich von einigen Nanometern bis hin zu Mikrometern zu realisieren. Zusätzlich können wir die Oberflächenladung der weichen Hülle einstellen und darüber das Wechselwirkungspotential der Partikel manipulieren. Das Phasenverhalten solcher Kern-Schale Kolloide weicht auf Grund des weichen Charakters der Polymerhüllen deutlich von dem einfacher harter Kugeln ab.

Wir verwenden Streumethoden wie die Kleinwinkel-neutronenstreuung (SANS) und die Kleinwinkel-röntgenstreuung (SAXS) um die Morphologie und Zusammensetzung von Kern-Schale Kolloiden mit verschiedenen Architekturen zu untersuchen. Für kolloidale Superstrukturen liefern diese Streumethoden den Strukturfaktor, welcher ermöglicht die Kristallstruktur und die Gitterkonstanten zu bestimmen. Außerdem führen wir SANS und SAXS Experimente unter Scherung der Probe durch, wodurch es möglich wird kristalline Anordnung zu induzieren, orientieren oder zu zerstören.



Hochauflösende Transmissions-Elektronenmikroskopie Bilder von selbst-assemblierten, Alkylamin-stabilisierten Gold Nanopartikeln

### SYNTHESE UND CHARAKTERISIERUNG

- Anorganische Nanopartikel
  - Metall Partikel kontrollierter Größe und Form
  - Metall Nanopartikel mit maßgeschneiderten Plasmonresonanzen
  - Oberflächen-Funktionalisierung
  - Phasentransfer und Ligandenaustausch
- Polymere
  - Stimuli-sensitive Mikrogele
  - Kern-Schale Latex-Partikel
- Hybrid Kolloide
  - Kern-Schale Kolloide
  - Mikrogele als Nanopartikel-Trägersysteme
  - Komplexere, multifunktionale Systeme
- Charakterisierung
  - Dynamische Lichtstreuung
  - Statische Lichtstreuung
  - Kleinwinkellichtstreuung
  - Depolarisierte Lichtstreuung
  - UV-vis Spektroskopie

### EXPERTISE

- Lichtstreuung
- Neutronenstreuung
  - Kleinwinkel-Neutronenstreuung
  - Spin-Echo Spektroskopie
- Kleinwinkel-Röntgenstreuung



**Prof. Dr. Rhett Kempe**  
LEHRSTUHL FÜR ANORGANISCHE CHEMIE II

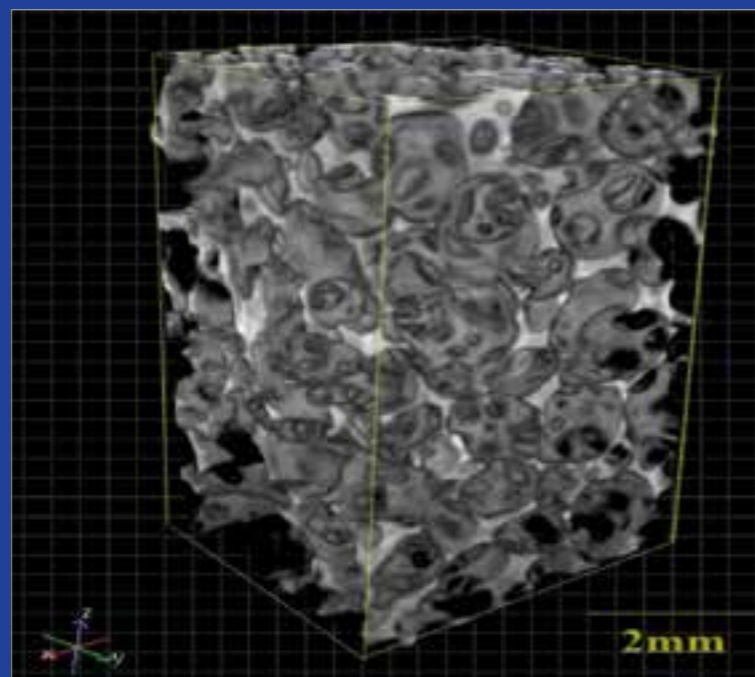
## „PolymergetrÄgerte nanopartikulÄre (Edel-)Metallkatalysatoren“



NMR, GC, GC-MS, HPLC und GPC – Produktanalytik für katalytische Reaktionen

Strukturen lassen sich ebenso in Keramiken erhalten, indem die Si-C-N-Precursoren (Polysilazane) vor ihrer Vernetzung mit Additiven oder Füllstoffen gemischt werden. Die Vernetzung der Polysilazane erfolgt bei bis zu 400°C, wobei die Zusätze erhalten bleiben. Jedoch bei der anschließenden Keramisierung bei bis 1100°C werden diese zerstört und entweichen als gasförmige Zersetzungsprodukte, wobei Poren entstehen.

3D- $\mu$ -CT-Aufnahme einer porösen Si-C-N-Keramik



Unfunktionalisierte MOFs lassen sich als Wasserstoffspeichermedien verwenden und zeigen eine Aufnahmekapazität von bis zu 1 wt% H<sub>2</sub> bei Raumtemperatur.

### Funktionalisierung poröser Strukturen

Die vorgestellten Strukturen können mit Metallnanopartikeln funktionalisiert werden. In die Poren der MOFs werden hierzu verdampfbare metallorganische Verbindungen (Palladium, Platin) im Hochvakuum eingebracht (Untersuchung dieser Spezies mit Festkörper-NMR-Techniken) und anschließend mit Wasserstoff reduziert. Dabei wird die Größe der Nanopartikel durch die Porengröße beeinflusst.

Die Funktionalisierung der Si-C-N-Precursorkeramiken findet auf ganz anderem Wege statt. Hierbei werden die Precursoren, also Polysilazane, mit Hilfe der Aminopyridinatometalchemie, für die in der Anorganischen Chemie II eine exzellente Expertise vorhanden ist, metallfunktionalisiert. Danach werden sie wie gewohnt vernetzt und anschließend keramisiert, wobei Metallpartikel in der Keramik (Kupfer, Platin, Palladium) abgeschieden werden.

### Anwendungen in der Katalyse

Metallpartikelfunktionalisierte MOFs versprechen in der Katalyse eine breite Anwendung. Besonders interessant sind Systeme mit chiralen Poren, denn sie sollten in der Lage sein, enantioselektive Reaktionen zu katalysieren. Ebenso ist eine Anwendung in der Wasserstoffspeicherung bei Raumtemperatur denkbar. Si-C-N-Precursorkeramiken

haben gegenüber thermisch wenig stabilen MOFs den Vorteil, dass sie sehr robust sind und unter extremen Bedingungen (Temperatur, aggressive Chemikalien) eingesetzt werden können. Dies besitzt besondere Relevanz für Reaktionen, in denen eine C-H-Bindung aktiviert werden muss und bei denen die Gleichgewichtslage im Niedrigtemperaturbereich ungünstig liegt.

Die Produktbildung der Katalysen wird mittels NMR, GPC-, GC- und HPLC-Techniken untersucht, wobei für Gasphasenreaktionen eine online-GC-Messmethodik zur Verfügung steht.

### AUSSTATTUNG IM ÜBERBLICK

- STOE IPDS II Einkristalldiffraktometer (Mo-Strahlung)
- Varian Unity Inova 300 MHz NMR
- Varian 400 MHz NMR mit Festkörpermesseinheit
- Bruker ARX 250 MHz NMR
- GCs mit Samplechanger und chiraler Säule sowie Online-Analytik
- GC-MS
- GPC + HT GPC
- HPLC
- Elementanalyse CHN
- Hochdruckautoklaven für katalytische Experimente
- Polymerisationsautoklaven
- React – IR
- ChemBET PULSAR
- NOVA 2200 e

Die Kernkompetenzen des Lehrstuhls Anorganische Chemie II liegen im Bereich Katalysatordesign. Hierzu zählen neben der Synthese poröser Systeme (MOFs = metal organic frameworks, Si-CN-Precursorkeramiken in Zusammenarbeit mit G. Motz [Lehrstuhl für keramische Werkstoffe]) sowie deren Funktionalisierung mit Metallpartikeln durch verschiedene Methoden (MOCVD = metal organic chemical vapor deposition, Einsatz von metallmodifizierten Precursoren, usw.) katalytische Anwendungen.

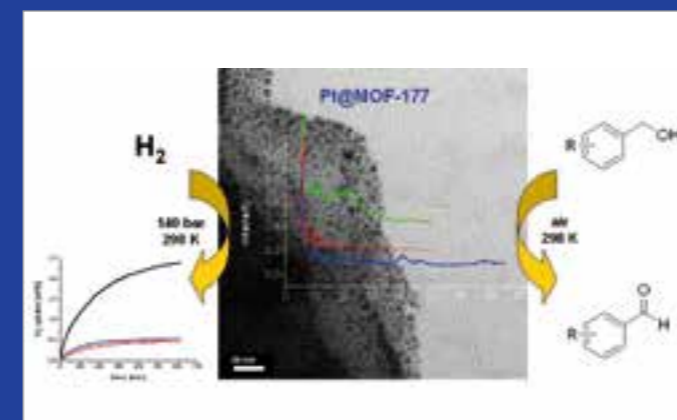
### Aufbau poröser Strukturen

Poröse Strukturen werden in der Anorganischen Chemie II zum einen durch 3D-netzwerkartige Koordinationspolymere (= MOFs) erzeugt. Dazu werden organische Polysäuren mit Übergangsmetallsalzen unter zumeist hydrothermalen Bedingungen umgesetzt. Dabei werden Poren mit Radien von wenigen Å bis einigen Nanometern erhalten, welche dreidimensionale Strukturen aufbauen. Poröse

### Einstellung von Porengrößen

Die Einstellung der Porengrößen und Geometrie in porösen Koordinationspolymeren lässt sich sehr leicht durch Variation der organischen Polysäuren (Linker) und der Metallsalze (SBU = secondary building unit) bewerkstelligen. Dies macht die Materialklasse der MOFs sehr vielseitig, da Poren auf konkrete Probleme zugeschnitten werden können (z. B. chirale Poren).

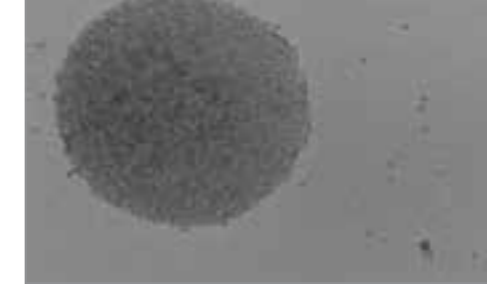
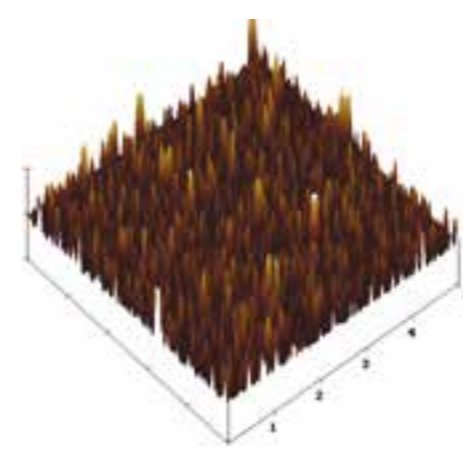
Porengrößen in Precursorkeramiken lassen sich durch Variation der Additive (ADC, Urea, Ammoniumthiocyanat) oder von Füllstoffen (verschiedene Polymere) und durch die Heizrate bei der Keramisierung einstellen.



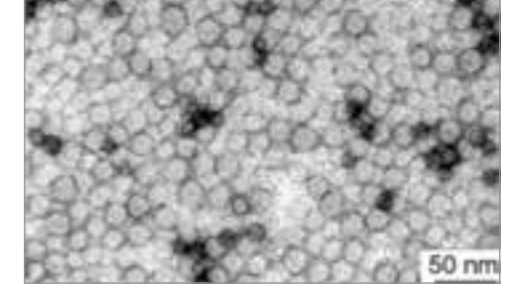
TEM-Aufnahme von Pt-Nanopartikeln in MOF-177



**Prof. Dr. Axel Müller**  
LEHRSTUHL FÜR MAKROMOLEKULARE CHEMIE II



REM-Aufnahme eines Agglomerats von Janusmicellen  
Rasterkraftmikroskopaufnahme einer polymermodifizierten Siliziumoberfläche



TEM-Aufnahme von Blockcopolymermicellen

## „Synthese nanoskopischer Polymersysteme; Analytik und Charakterisierung komplexer Polymerstrukturen“

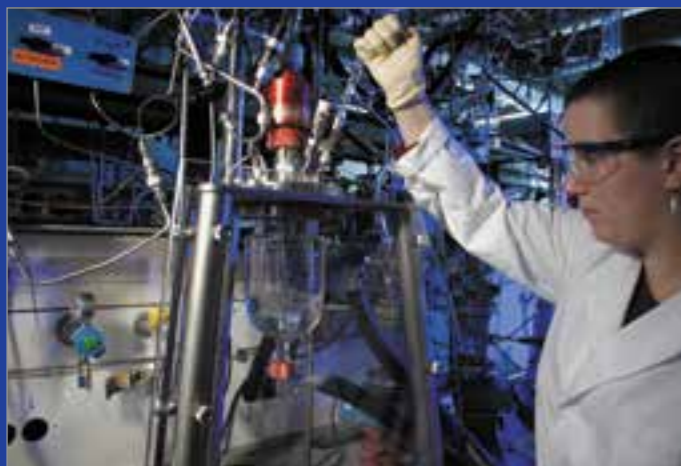


Die Röntgenstreuung dient zur Bestimmung des Ordnungsgrades von Polymerstrukturen.

Mit Hilfe modernster „lebender“ Polymerisationsverfahren synthetisieren wir komplexe Polymerstrukturen, z. B. selbstorganisierende amphiphile Blockcopolymere und Nanopartikel. Es stehen alle Methoden zur molekularen, strukturellen und thermischen Charakterisierung und zur Analytik von Polymeren zur Verfügung.

### Synthese nanoskopischer Polymerstrukturen

Wir benutzen „lebende“ Polymerisationsverfahren (anionische, kationische, kontrolliert-radikalische Polymerisation) zur gezielten



In Laborautoklaven werden Blockpolymere durch anionische Polymerisation synthetisiert.

Synthese von komplexen, selbstorganisierenden Polymerstrukturen im Gramm- bis Kilogramm-Maßstab. Hierzu benutzen wir Rührautoklaven (siehe Bild) von 250 ml bis 10 l und Strömungsrohrreaktoren.

Besondere Kompetenz besteht auf dem Gebiet der Synthese von linearen und (statistisch, kamm- und sternförmig) verzweigten Polymeren und Blockcopolymeren. Je nach Struktur bilden sie unterschiedliche Festkörper- und Lösungsstrukturen aus, die ihre mechanischen und Fließeigenschaften steuern. Sie finden Anwendung z. B. als thermoplastische Elastomere, Verträglichkeitsvermittler für Polymermischungen, Klebstoffe, Träger für Pharmaka, optische Datenspeicher oder als Viskositätsindexverbesserer in Motorölen. „Amphiphile“ Blockcopolymere besitzen hydrophile und hydrophobe Blöcke und bilden in Wasser Micellen unterschiedlicher Struktur (s. Bild). Sie können als Dispergatoren, z. B. für die Emulsionspolymerisation, für Farbpigmente oder in Kosmetika, Anwendung finden. Je nach Struktur können sie auch auf externe Stimuli (Temperatur, pH, Salze) reagieren und reversibel Netzwerke ausbilden. Diese finden Anwendung in Pharmaka und Kosmetika. Völlig neue Anwendungen ergeben sich aus der Verwendung von Blöcken aus natürlichen Polymeren, wie Zucker oder Proteine.

Großes Interesse gilt neuartigen Hybridstrukturen und Nanopartikeln. Zu letzteren gehören Janus-Micellen, die aus zwei Hemisphären unterschiedlicher Polarität bestehen (siehe Bild) und interessante Überstrukturen ausbilden. Amphiphile unimolekulare Zylindermicellen haben einen hydrophilen Kern und eine hydrophobe Schale (oder umgekehrt) und können als Nanoreaktoren für anorganisch-organische Hybridstrukturen dienen.

### Organisch-anorganische Hybridstrukturen

Durch die neuartige Methode der „selbstkondensierenden Vinylpolymerisation“ gelingt es, hyperverzweigte Polymere von kolloidalen Gold- oder Kieselgel-Partikeln wachsen zu lassen. Die hohe Zahl an (fast beliebig wählbaren) funktionellen Endgruppen auf der Oberfläche verleiht den Partikeln völlig neue Eigenschaften. Analog hierzu kann man die „Polymerbäume“ auch von planaren Oberflächen, z. B. Silizium, Glas oder Gold, wachsen lassen. Auf diese Weise kann die Oberfläche in ihren physikalischen (z. B. Rauigkeit, Reibung, Benetzung) und chemischen Eigenschaften (z. B. Sensorik, Anbindung von Biomaterialien) beliebig modifiziert werden. Durch vorherige Strukturierung der Oberfläche (Linien, Inseln) können die Funktionen gezielt an bestimmte Stellen aufgebracht werden.

### Analytik und Charakterisierung komplexer Polymerstrukturen

Es stehen modernste Methoden zur molekularen Charakterisierung von Homo- und Copolymeren und zur Analyse unbekannter Polymere zur Verfügung. Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung und der Molekulargewichtsverteilung gelingt durch Kombination von chromatographischen Verfahren (Größenausschluss- und Adsorptionschromatographie, 2D-Chromatographie, Feldflussfraktionierung) mit Lichtstreuung, Viskosität, Ultraviolett- und Infrarotspektroskopie sowie MALDI-TOF-Massenspektrometrie.



Die Charakterisierung der durch Selbstorganisation der Einzelmoleküle gebildeten Überstrukturen im Festkörper, in der Schmelze und in Lösung gelingt durch Streumethoden, wie Weit- und Kleinwinkelröntgenstreuung (WAXS, SAXS), statische und dynamische Lichtstreuung (SLS, DLS), durch abbildende Methoden, wie Transmissions- und Raster-Elektronenmikroskopie (TEM, REM), Rasterkraftmikroskopie (AFM), durch Rheologie und durch thermische Methoden: Differential-Wärmeflusskalorimetrie (DSC), Differentialthermoanalyse (TGA) und dynamisch-mechanisch-thermische Analyse (DMTA).

Transmissionselektronenmikroskopie zur Untersuchung von Blockpolymormorphologien

Mit Hilfe der dynamischen Lichtstreuung wird die Größenverteilung von Nanopartikeln bestimmt.



### UNSERE AUSSTATTUNG ZUR SYNTHESE

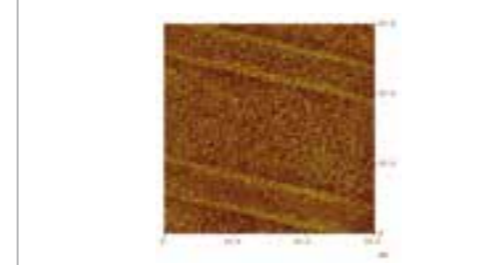
- 8 Rührautoklaven (Büchi) von 250 ml bis 10 l für Polymerisationen in Lösung und in Emulsion
- Strömungsrohrreaktoren für sehr schnelle Polymerisationen (Halbwertszeiten bis 0,01 s).
- FT-NIR-Sonden zur Online-Umsatzbestimmung
- Glove-Box (B.Braun) und 6 Vakuumlinien
- 2 Hydrierreaktoren (Büchi) bis 100 bar
- Gefriertrocknungsanlage (Christ)

### UNSERE AUSSTATTUNG ZUR POLYMERANALYTIK

- 250 MHz NMR-Spektrometer (Bruker AC250)
- FT-IR- und FT-NIR-Spektrometer (Bruker, Nicolet) mit ATR, Dichroismus-Apparatur, Durchflusszelle, Faseroptik-Tauchzellen, IR-Mikroskop
- UV-Spektrometer (Perkin Elmer).
- Polarisationsmikroskop (Zeiss)
- Automatisches Kapillarviskosimeter (Schott)
- Membran-Osmometer
- 4 Gelpermeationschromatographie-Anlagen (GPC) für organische Lösungsmittel und Wasser mit UV- und RI-Detektoren, z. T. gekoppelt mit Durchfluss-Viskosimeter (Viscotek), Mehrwinkellichtstreuung (Wyatt DAWN-DSP F), FTIR- und MALDI-Interface; eine Anlage mit vorgeschalteter Adsorptionschromatographie (= 2D-Chromatographie)
- Asymmetrische Fluss-Feldflussfraktionierung (AFFF, PostNova)
- MALDI-TOF-Massenspektrometer (Bruker Reflex III)
- Gaschromatograph (Fisons/ThermoQuest)
- statische und dynamische Lichtstreuung (Sofica, ALV)
- Klein- und Weitwinkel-Röntgenstreuung mit 2D-Detektor (Bruker AXS)
- Transmissionselektronenmikroskop (Zeiss CEM 902) mit Cryo-Ultramikrotom
- Rheologielabor (Rheometric Scientific: ARES; Stressrheometer, DMTA, Rheooptik)
- Differentialwärmeflusskalorimeter (Perkin Elmer DSC 7 und Pyris 1)
- Thermogravimetrische Analyse (Perkin-Elmer TGA7)



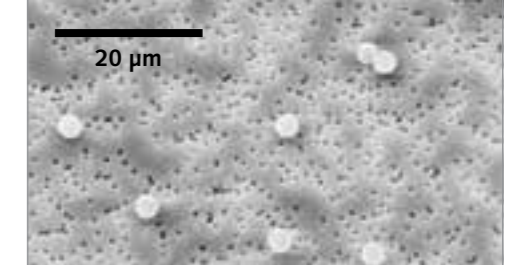
**Prof. Dr. Georg Papastavrou**  
LEHRSTUHL FÜR PHYSIKALISCHE CHEMIE II  
PHYSIKALISCHE CHEMIE / PHYSIK DER POLYMERE



Adsorption von Ferritin auf einer mikrostrukturierten Elektrodenoberfläche

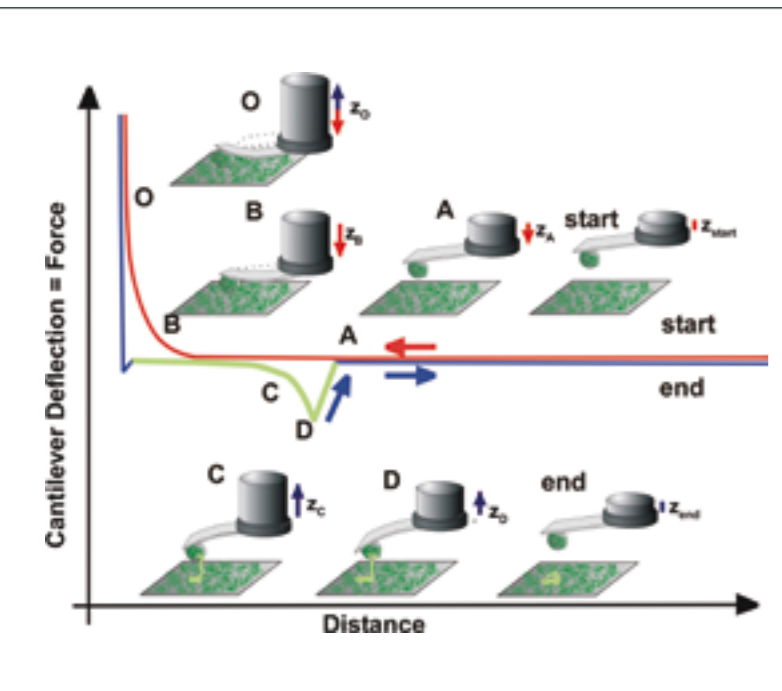


Einzelne PAMAM-Dendrimere adsorbiert auf einem Latexpartikel



Immobilisierung kolloidaler Partikel, deren elektrophoretische Mobilität untersucht wurde

## „Polymere an Grenzflächen – Einzelmolekültechniken“



Schematische Darstellung der Einzelmolekülkraftspektroskopie, bei der mit dem Rasterkraftmikroskop einzelne Polymerstränge gezogen werden

### Analytische Techniken

Eine wesentliche Technik für unsere Untersuchungen ist das Rasterkraftmikroskop. Mit dieser Technik können Oberflächen mit nm-Auflösung unter Umgebungsbedingungen untersucht werden. Die Messungen können hierbei sowohl unter kontrollierten atmosphärischen Bedingungen als auch in Flüssigkeiten durchgeführt werden.

Für die Messung in Flüssigkeiten steht ein System zur Verfügung, bei dem der pH-Wert, die Ionenstärke und Zusammensetzung der Flüssigkeit definiert verändert werden können.

Das Rasterkraftmikroskop erlaubt nicht nur die Bestimmung der Oberflächentopographie, sondern auch die hochauflösende Lokalisierung von Unterschieden in den Oberflächeneigenschaften, wie Reibung, Ladung, Elastizität oder funktionelle Gruppen. Weiterhin kann das Rasterkraftmikroskop zur Messung von Kräften verwendet werden, wobei diese Technik so sensitiv ist, dass die Streckung einzelner Polymere oder Kraftwechselwirkung zwischen zwei kolloidalen Partikeln bestimmt werden können.

Die Informationen auf der Einzelmolekülebene werden mit weiteren Techniken kombiniert, die über größere Oberflächenbereiche mitteln wie beispielsweise Ellipsometrie, Reflektometrie, Elektrochemie oder elektrophoretische Methoden.

### Adhäsion auf dem Einzelmolekülniveau

Wie schematisch in der oberen linken Abbildung gezeigt, ist es möglich, die Streckung einzelner Polymere, wie beispielsweise Polysacchariden, mit dem Rasterkraftmikroskop zu messen. Auf diese Weise sind die Elastizitätseigenschaften einzelner Polymerstränge und ihre Änderung durch externe Parameter direkt zugänglich. Auch

Kombination von Rasterkraftmikroskopie und Elektrochemie zur gezielten Untersuchung von Elektrodeneneigenschaften durch Kraftmessungen



können die Kräfte bei der Desorption einzelner Polymerstränge von Oberflächen bestimmt werden.

In Kombination mit der „Colloidal Probe“-Technik ist es möglich, hierbei auch langreichweitige Kräfte und eine definierte Wechselwirkungsgeometrie in die Untersuchung einzubeziehen. Komplizierte Adhäsionsereignisse durch das simultane Strecken und Ablösen eines Ensembles von Polymeren können hierbei auf die Einzelmolekülbeiträge zurückgeführt werden.

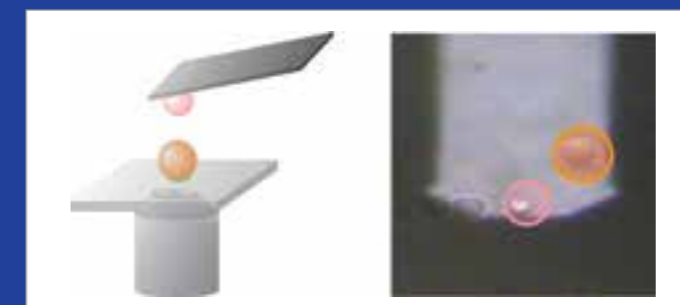
### Abbildung einzelner Polymere/Polymeradsorption

Um das Adsorptionsverhalten von Polymeren gezielt untersuchen zu können, stehen mehrere Techniken zur Verfügung. Die Konformation einzelner Polymere kann mit dem Rasterkraftmikroskop abgebildet werden, während über die Reflektometrie oder Ellipsometrie auch zeitaufgelöst die adsorbierte Masse bestimmt werden kann. Definierte Modelloberflächen, beispielsweise auf der Basis von Silanen oder Thiolen, können in unserem Labor hergestellt und charakterisiert werden. Hierbei können über verschiedene Verfahren auch Strukturierungen auf der Mikrometerebene erzielt werden. Für die Untersuchung und Entwicklung von einstellbaren Polymerschichten auf Elektrodenoberflächen können rasterkraftmikroskopische Verfahren mit Elektrochemie kombiniert werden.

### Messungen von Wechselwirkungskräften in Partikeln/Partikel-Geometrien

Die Rasterkraftmikroskopie erlaubt auch die direkte Bestimmung von Wechselwirkungskräften zwischen kolloidalen Partikeln in der „sphere-sphere“-Geometrie. Hierbei konnte beispielsweise der Einfluss der Oberflächenrauigkeit oder der Polymerbedeckung auf die Wechselwirkungskräfte demonstriert werden. Weiterhin ist ein Vergleich mit elektrophoretischen Methoden möglich.

Messung der Wechselwirkungskräfte zwischen Silica-Partikeln fixiert auf dem Hebelarm und der Probenoberfläche



### SPEZIELLE ANALYTISCHE TECHNIKEN UND KOMPETENZEN

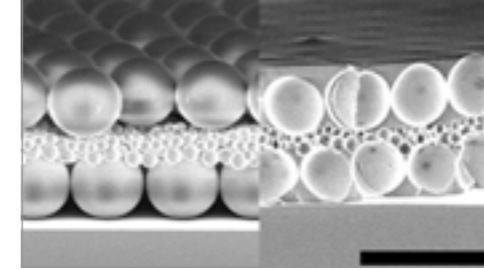
- Rasterkraftmikroskopie in Flüssigkeiten
  - Einzelmolekülabbildung
  - Reibungskraftmikroskopie
  - Chemische Modifizierung der Sondenspitze
  - Detektion von Ladungsverteilungen
  - Elastizitätseigenschaften
- Direkte Kraftmessungen
  - Einzelmolekülkraftspektroskopie
  - „Colloidal Probe“-Technik
  - Adhäsionsmessungen
  - Kombination mit Elektrochemie
- Charakterisierung von Polymerschichten
  - Ellipsometrie
  - Reflektometrie (im Aufbau)
  - Optische Mikroskopie
  - Kontaktwinkel
- Elektrophoretische Techniken
  - Bestimmung Zeta-Potential über Lichtstreuung
  - Zeta-Potential über Videomikroskopie
  - Strömungspotential (im Aufbau)



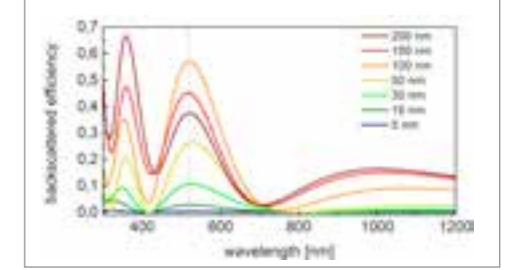
**Prof. Dr. Markus Retsch**  
JUNIORPROFESSUR FÜR POLYMERE SYSTEME



Ein hexagonaler Array hörnchenartiger Gold-Nanopartikel, der durch Partikellithographie hergestellt wurde.

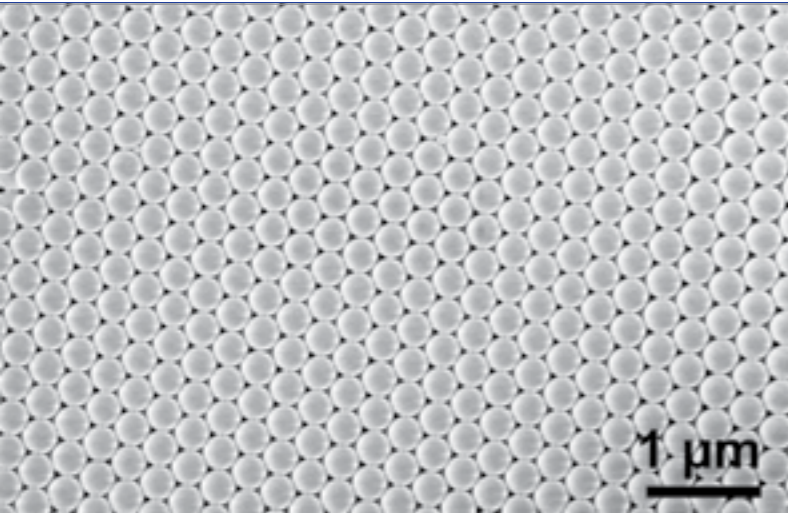


Ein Stapel von vier kolloidalen Monolagen und deren Silika-invertierte Struktur.



Simulierte Miestreuung von Silikahohlkugeln in Abhängigkeit der Schalendicke.

## „Kolloidale Selbstanordnung und Partikellithographie zur Herstellung nano- und mesostrukturierter Funktionsmaterialien“



Aufsicht auf einen Kolloidkristall bestehend aus Polystyrol Latexpartikeln mit 307 nm Durchmesser.

Unsere Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit periodisch geordneten und amorphen Nano- und Mesostrukturen, die aus einer Vielzahl von Materialien aufgebaut sein können. Wir verwenden hierfür hauptsächlich maßgeschneiderte kolloidale Partikel, die als fundamentale Bausteine für die Erzeugung definierter Nanostrukturen verwendet werden. Durch kontrollierte Selbstanordnung können wir diese Bausteine in zwei- und dreidimensionalen Überstrukturen überführen, wodurch nicht nur eine zusätzliche Längenskala der Strukturierung, sondern auch zusätzliche Funktionalität eingeführt wird. Wir haben einfache und zuverlässige Methoden entwickelt, wie kolloidale Partikel in periodischen Monolagen angeordnet werden können. Unser Interesse fokussiert sich auf optische, mechanische, und thermische Eigenschaften kolloidaler Strukturen, sowie deren Verwendung als Maske für die Herstellung poröser und plasmonischer Materialien.

### Monolagenanordnung an Grenzflächen

Monodisperse kolloidale Partikel lassen sich relativ einfach in hochgeordneten Überstrukturen anordnen – vorausgesetzt die richtigen Bedingungen werden gewählt. Kolloidale Monolagen sind hierbei von besonderem Interesse, da sie als Masken für die Erzeugung kleinster Nanostrukturen (< 100 nm) Verwendung finden. Sie stellen darüberhinaus einen alternativen Zugang zu Polymerdünnfilmen mit definierter Schichtdicke dar und beeinflussen z.B. auch die Reflektivität eines Substrates.

Wir haben eine einfache und skalierbare Methode entwickelt, mit

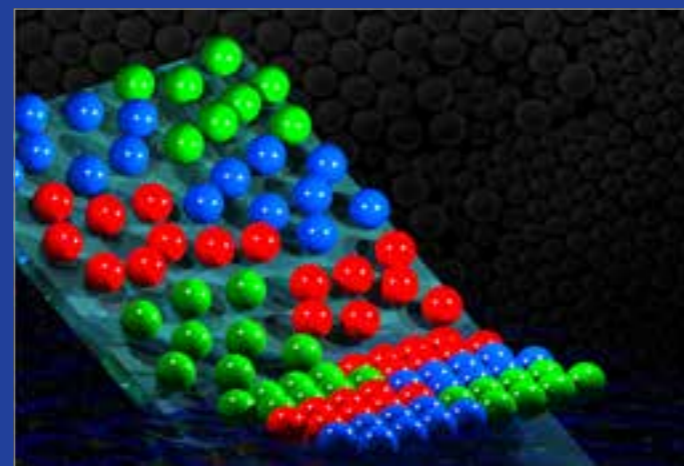
der es möglich ist kristalline oder amorphe Monolagen auf einer  $\text{cm}^2$  Skala herzustellen.

Diese Methode ist extrem flexibel und kann für polymere Nano- und Mesopartikel, sowie für Nanokristalle wie Magnetit- oder Goldnanopartikel verwendet werden. Ein großer Vorteil ist die Möglichkeit derartige Monolagen auf Zielsubstrate mit fast beliebiger Oberflächenfunktionalität und -topographie zu übertragen. Durch eine Kombination verschiedener Partikelsorten mit Inkjetdrucken sind darüberhinaus Heterostrukturen im  $\mu\text{m}$  Bereich ohne lithographisches Equipment zugänglich.

### Kolloidale Überstrukturen als Masken

Geordnete Kolloidstrukturen werden oft als Masken zur Erzeugung von Nano- und Mesostrukturen verwendet, die mit anderen Methoden wie klassischer Licht-Lithographie nur unter erheblichem Aufwand zugänglich wären. Wir haben derartige Methoden zur Strukturierung zwei- und dreidimensionaler Materialien verwendet. Unter Verwendung der von uns entwickelten Monolagenanordnungsmethode war es möglich großflächige Strukturen zu erzeugen. Mit dieser Partikellithographie erhält man Zugang zu hexagonalen Anordnungen von z.B. Silber- oder Goldnanopartikel mit runder, prismatischer, oder Hörnchen-Form. Aufgrund ihrer plasmonischen Resonanzeigenschaften können solche Strukturen als Sensoren verwendet werden. Dreidimensional geordnete Kolloidkristalle können z.B. durch konvektive Assemblierungsprozesse hergestellt werden. Infiltration der freien Zwischenräume mit anorganischen Prekursoren und Entfernung der polymeren Partikel durch Kalzinieren resultiert in hochdefinierten porösen Gerüsten. Diese können als Modellsysteme für Diffusionsstudien in eingeschränkten Geometrien verwendet werden.

Schema zur Herstellung von Heteromonolagen durch eine Kombination von Inkjetdrucken und Partikelanordnung an der Wasser-Luft Grenzfläche.



### Hohlkugeln

Auch individuelle kolloidale Partikel können als Strukturierungsmasken verwendet werden, wodurch Kapseln aus anorganischen Schalen (z.B.  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{TiO}_2$ ) mit vordefinierter Größe und Schalendicke zugänglich sind.

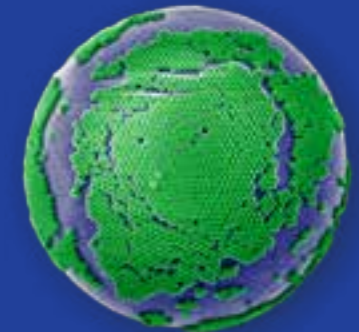
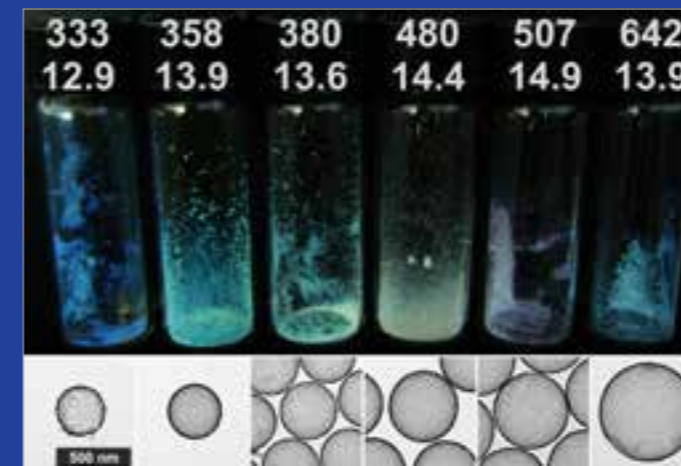
Derartige einfache, jedoch vielseitige Hohlkugeln waren über die letzten Jahre im Zentrum unserer Untersuchungen. Sie besitzen einzigartige optische Eigenschaften, wie aus dem Bild (Foto unten) ersichtlich ist. Der extrem geringe Brechungsindex reduziert Mehrfachstreuung in diesem ungeordneten Pulver erheblich, wodurch die inhärenten Mie Resonanzen direkt sichtbar werden.

Gleichzeitig besitzen kolloidale Hohlkugeln eine sehr geringe Dichte, wodurch sie attraktive Bausteine für zukünftige Leichtbau-Anwendungen werden können. Überstrukturen aus Mono- und Multilagen zeigen interessante kollektive mechanische Eigenschaften, welche mittels Nanoindentation charakterisiert wurden. Durch gezieltes Komprimieren wurde die Energiedissipationsdichte bestimmt.

### Thermische Leitfähigkeit

In unseren zukünftigen Studien wird unser Augenmerk auf thermischen Transportphänomenen in nano- und meso-strukturierten Materialien liegen. Überstrukturen aus kolloidalen Bausteinen sind durch die hohe Kontrolle über Längenskalen, Strukturhierarchien und Grenzflächen hierfür ideale Modellsysteme.

Foto eines ungeordneten Hohlkugelpulvers. Die Farben zeigen mit steigendem Partikeldurchmesser eine Rotverschiebung – eine direkte Beobachtung von Mie-Resonanzen.



180 nm Polystyrol Partikelmonolage auf einer 10  $\mu\text{m}$  Kugel.

### AUSSTATTUNG

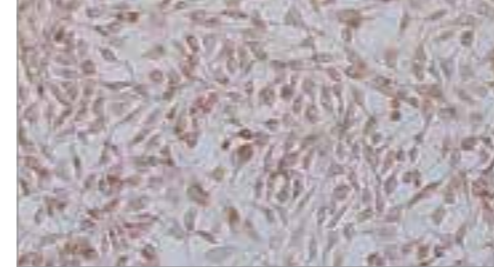
- Miniflecto Plasma Reiniger mit integriertem IR Thermometer sowie  $\text{Ar}/\text{O}_2$  Gasanschluss
- Nabertherm L5/11/P330 Muffelofen
- Biofuge Primo, Heraeus, Zentrifuge
- Dip coater
- XFA 500, Linseis, Wärmeleitfähigkeitsmessgerät  $-50^\circ\text{C} - 300^\circ\text{C}$ , Vakuum, Inertgas, Atmosphäre, Flüssigkeitszelle und in-plane Adapter
- Komplett ausgestattetes nasschemisches Labor

### EXPERTISE UND KOMPETENZEN

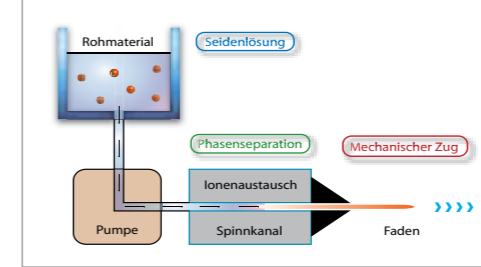
- Monodisperse Partikelsynthese: Latex,  $\text{SiO}_2$ , Kern-Schale
- Kolloidale Selbstanordnung: Monolagen, Kolloidale Kristalle,
- Hierarchische Strukturen
- Plasmaätzen: Oberflächenmodifikation, Größenreduktion
- Bildgebende Methoden: SEM, TEM, AFM
- Einzelpartikelspektroskopie
- Nanoindentation



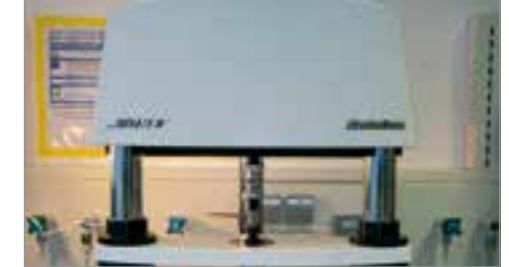
**Prof. Dr. Thomas Scheibel**  
LEHRSTUHL BIOMATERIALIEN



Hautzellen auf Seidenproteinfilm produzieren in-vitro Kollagen (Immunfärbung auf Kollagen I)



Schematische Darstellung des biomimetischen Spinnprozesses



Universaltestgerät zur mechanischen Charakterisierung von Biopolymeren

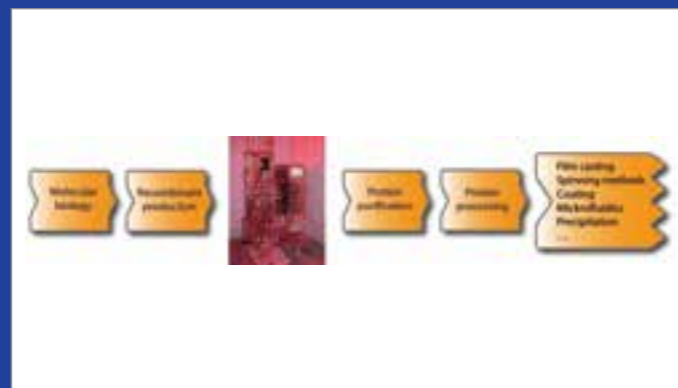
## „Verständnis, Modifizierung und Herstellung von Biopolymeren und deren technische Anwendungen“



Eine Radnetzspinne in ihrem Netz aus Seidenfasern

Goldenen Radnetzspinne (*Nephila clavipes*). Durch den Einsatz molekular-biologischer Methoden erstellen wir ein Setup rekombinanter Seidenspinnenproteine, deren Sequenzen von den natürlichen Proteinen abgeleitet sind. Diese mimetischen Proteine werden in verschiedenen Wirtssystemen (Bakterien, Hefen, tierische Zelllinien) biotechnologisch produziert, aufgereinigt und anschließend hinsichtlich ihrer physiko-chemischen Eigenschaften charakterisiert, um z. B. Verteilung von amorphen zu kristallinen Domänen und unterschiedliches mechanisches Verhalten von Fasern besser zu verstehen. Zusätzlich werden bei uns Bildung und Eigenschaften nicht natürlich vorkommender Morphologien wie Filme, Hydrogele, Schäume, Nanofibrillen und Kapseln hinsichtlich ihrer potentiellen Nutzung als Neue Materialien untersucht.

Vorgehensweise der rekombinanten Seidenprotein-Herstellung



### Modifikation und Strukturanalyse von Biopolymeren

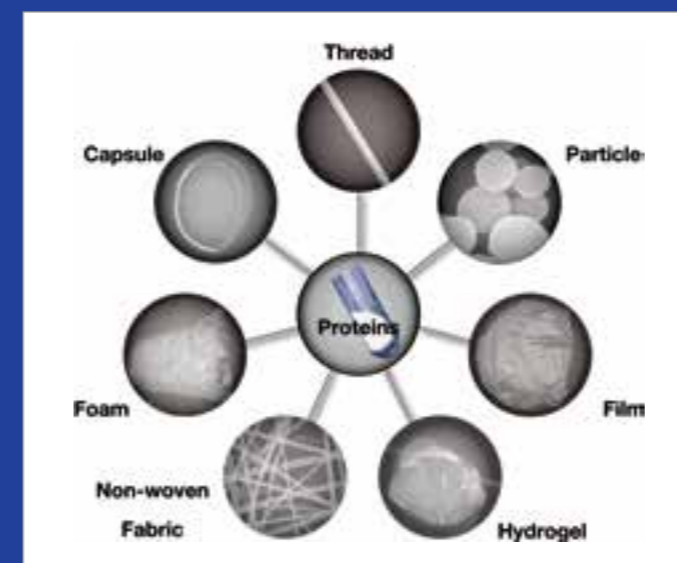
Biopolymere werden von uns sowohl mit molekular-biologischen als auch mit verschiedenen chemischen Methoden wie z.B. ortsspezifischer chemischer Ligation von natürlichen und synthetischen Aminosäuren, Click-Chemie oder Anbindung von Peptid-Tags modifiziert. Dies ermöglicht es, Eigenschaften wie biologische Biokompatibilität, Reaktivität oder Löslichkeit für verschiedene technische und medizintechnische Anwendungen maßzuschneidern. Im Anschluss werden chemische Zusammensetzung, Reinheit und Struktureigenschaften der Proteine oder bislang nicht aufgeklärter Biopolymere mit state-of-the-art spektroskopischen Methoden (CD, FT-IR, UV-Vis, Fluoreszenz) und bildgebenden Verfahren (REM, AFM) analysiert. Hierdurch können molekulare Interaktionen zwischen den Proteindomänen bzw. Molekülen aufgeklärt und wichtige Rückschlüsse auf Zusammensetzung, Faltungs- und Assemblierungsprozesse gezogen werden.

### Faserspinn-Prozesse

Die Assemblierung von Spinnenseide läuft unter kontrollierten physiko-chemischen Bedingungen ab, die ein komplexes Zusammenspiel von Ionenaustausch, pH-Wert-Senkung, Entwässerung der Proteinlösung, Elongationsfluss und mechanischem Zug am Ende des Spinnkanals darstellen. Die mechanischen Eigenschaften der Fäden hängen u. a. von der Molekülorientierung (beeinflusst durch die Spinnengeschwindigkeit) ab, da die globale Ausrichtung der kristallinen Regionen auf der Größe und Dauer der aufgewendeten Kraft und dem Wassergehalt (Superkontraktion) beruht. Es kommen verschiedene technische Spinn-Prozesse zum Einsatz, die zu Fasern mit unterschiedlichen Eigenschaften führen. Zu den Verfahren zählen u. a. Elektro-Spinnen, Nass-Spinnen und Mikrofluidik. Zudem wird am Lehrstuhl ein biomimetischer Spinnprozess entwickelt, der es ermöglicht, Fasern aus wässriger Proteinlösung analog dem natürlichen Spinnprozess an Luft zu ziehen, während über eine Membran die jeweiligen Prozessparameter eingestellt werden können.

### Medizintechnische Anwendungen

Die möglichen Anwendungen von Biopolymeren sind vielfältig. Extrem dünne und gleichzeitig sehr reißfeste Fäden können in der Chirurgie für Wundnähte und Seidenvliese als Wundabdeckungen eingesetzt werden. Seidenfilme können als Oberflächenbeschichtungen oder als dünne und stabile Membranen verwendet werden,



Verarbeitungsmöglichkeiten von rekombinanten Seidenproteinen

während Schäume oder Hydrogele besonders für Zellträgersysteme im Bereich des Tissue Engineering interessant sind. Funktionalisierte Mikrokapseln aus Seidenproteinen eignen sich gut als Träger zur gezielten Wirkstofffreisetzung (Drug delivery). Proteine besitzen aufgrund ihrer relativ einfachen Verarbeitung in unterschiedlichste Morphologien sowie deren vielfältiger Anbindung an existierende Materialien ein hohes Zukunftspotential.

### MODERNSTE APPARATIVE AUSSTATTUNG

- Chromatographie: FPLC (Äkta/GE), HPLC (FP-2020/Jasco, 1100 Series/Agilent), Asym. Feldflussfraktionierung (Eclipse 3 + Dawn Eos/Wyatt)
- Spektroskopie: CD (J-815/Jasco), UV-Vis + Fluoreszenz (UV-2075, FP-6500/Jasco, Cary 50/Varian), FT-IR (Hyperion + Tensor 27 inkl. ATR-Einheit, Bruker Optik)
- Fermentation: 2,5 l (Minifors/Infors HT), 2/5/30 l (Biostat Bplus, Cplus/Sartorius Stedim), Kugelmühle (LabStar LS1/Netzsch), Homogenisator (NS 1001L Panda 2K/Niro Soavi, M110S/Microfluidics)
- Fluoreszenzmikroskop (DMI 3000B/Leica)
- Universaltestmaschine (ElectroForce 3200/Bose)
- Faserspinnanlagen (Elektro-Spinnen, Nass-Spinnen, biomimetisches Spinnen, Mikrofluidik)

### ZUGANG ZU ZENTRAL GENUTZTEN EINRICHTUNGEN

- AFM
- Elektronenmikroskopie (REM, TEM)

### KOMPETENTE ZUSAMMENARBEIT MIT PARTNERN AUS WISSENSCHAFT UND INDUSTRIE

- FuE
- FDA-zugelassene Analytik
- Auftragsforschung

### Die Kernkompetenzen

Die Kernkompetenzen des Lehrstuhls für Biomaterialien liegen in der Charakterisierung von Biopolymeren, insbesondere von Strukturproteinen, deren Modifizierung für technisch relevante Produktanforderungen und Produktion im Technikumsmaßstab. Natürliche Materialien weisen oft optimierte Eigenschaften auf, welche die von künstlich hergestellten Produkten weit übertreffen. Dies macht u.a. Proteine als Ideengeber für die innovative Entwicklung von Neuen Materialien für den Einsatz z.B. in der Biomedizin oder Nanobiotechnologie sehr attraktiv. Einen zentralen Punkt der Forschung nimmt dabei das Verständnis der molekularen Wechselwirkungen und Assemblierungsmechanismen von faserförmigen Strukturproteinen auf deren Struktur-Funktionsbeziehungen und Eigenschaften ein (Selbstassemblierung, Einfluss von Umweltfaktoren, post-spinning Prozesse, mechanisches Verhalten etc.).

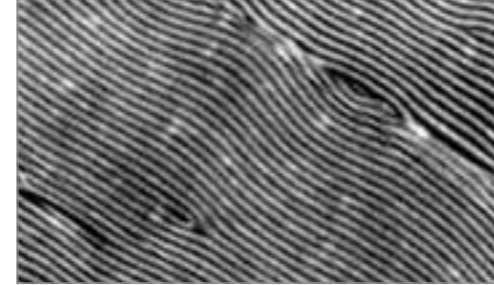
### Herstellung und Charakterisierung von rekombinanten Seidenproteinen und Prozessierung in verschiedene Morphologien

Spinnenseide wird von Menschen schon lange zum Jagen, Fischen oder als Wundverband verwendet, da sie aus sehr stabilen und zugleich extrem dehnbaren Proteinfasern besteht und außerdem antiallergen, antimikrobiell und biokompatibel ist. Wir untersuchen hauptsächlich die feste Dragline-Seide der Gartenkreuzspinne (*Araneus diadematus*) und die elastische Flagelliform-Seide der





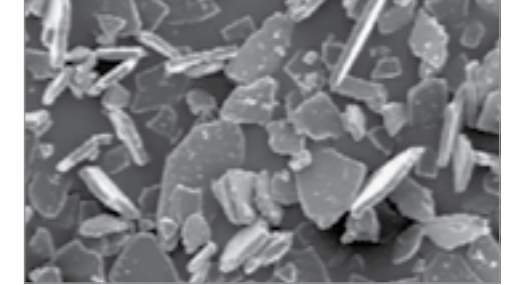
**Prof. Dr. Hans-Werner Schmidt**  
LEHRSTUHL FÜR MAKROMOLEKULARE CHEMIE I



Schichtstruktur eines cholesterischen Pigments

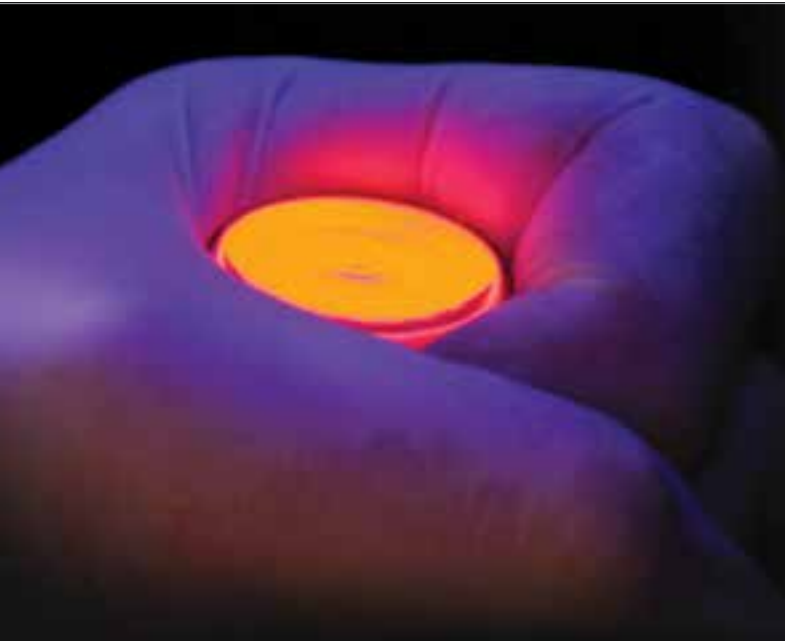


Photovernetzte cholesterische Netzwerke



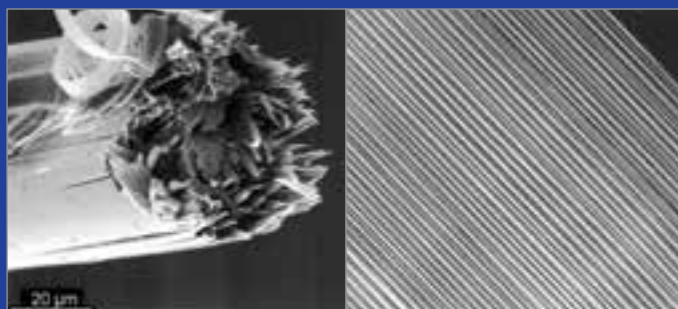
Gemahlene Pigmentpartikel

## „Vom Molekül zum Material – Synthese, Charakterisierung und Anwendung“



Materialien mit Festkörperfluoreszenz

Am Lehrstuhl Makromolekulare Chemie I werden neuartige Monomere und Polymere synthetisiert und mit modernen Methoden der Polymeranalytik charakterisiert. Der Schwerpunkt unserer Arbeit liegt hier in der Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Funktions-, Struktur- und Biomaterialien mit makroskopischer Ordnung, hierarchischer Überstruktur und/oder definiertem Schichtaufbau. Um das jeweilige Eigenschaftsprofil zu erreichen, kommen neben Prinzipien der Makromolekularen Chemie auch Konzepte der Flüssigkristallforschung und der Supramolekularen Chemie zum Einsatz. Häufig arbeiten wir dabei in enger Kooperation mit der Physikalischen Chemie und Experimentalphysik der Universität Bayreuth, in- und ausländischen Hochschulen sowie der Industrie.



Thermotrope Hauptkettenpolymere, Hochmodulfasern

Lyotrope Lösungen, Orientierte Polyimide, Orientierungsschichten

### Hi-Tech Spezialkunststoffe

Polymere werden wegen ihrer grundlegenden physikalischen Eigenschaften wie mechanischer Festigkeit, niedriger Dichte und thermoplastischer Verarbeitung als Strukturwerkstoffe in vielseitiger Art und Weise eingesetzt. Um diese Einsatzmöglichkeiten zu erweitern, beschäftigen wir uns mit temperaturstabilen Polymeren, Thermosets, thermotropen und lyotropen aromatischen Hauptkettenpolymeren und Blockcopolymeren mit flüssig-kristallinen Segmenten.

### Funktionspolymere mit Anwendungen in der Optik, Display-technologie, Informationsspeicherung und Photovoltaik

Der rasante Fortschritt im Bereich der Kommunikations- und Speichertechnologie erfordert die Entwicklung von Spezialpolymeren mit gezielten Eigenschaftskombinationen. Wichtige Themenfelder sind daher Synthese, Charakterisierung und Anwendung von: Ladungstransport- und Emittermaterialien für organische Leuchtdioden, Materialien zur Ladungstrennung für Anwendungen in organischen Solarzellen, Polymere zur Informationsspeicherung, photoadressierbare Polymere, polymere Elektretmaterialien und neue Materialien für die Photolithographie.

### Kombinatorische Chemie und Methodik in den Materialwissenschaften

Die kombinatorische Chemie und Methodik ist eine effiziente Strategie, um Deviceaufbauten, Materialkombinationen und Materialentwicklungen unter vergleichbaren Bedingungen schnell voranzutreiben. In diesem Zusammenhang untersuchen wir den Einsatz von kombinatorischen Methodiken u. a. für den Aufbau von organischen Leuchtdioden, Solarzellen und zur Optimierung von komplexen Additivkombinationen und Formulierungen.



Kombinatorische Aufdampftechniken

### Polymeradditive

Das Eigenschaftsprofil und die Verarbeitung von Polymeren werden entscheidend durch Additive beeinflusst, denn in der Regel sind Polymere ohne Additive nicht einsetzbar. Wir beschäftigen uns mit der Herstellung von und Verarbeitungshilfsmitteln für technische Thermoplaste und der kontrollierten Freigabe von Wirkstoffen aus Polymeren. Um die gewünschten Funktionen zu erreichen, setzen wir auch in diesem Bereich Konzepte der supramolekularen Chemie und der Flüssigkristallforschung ein.

### Polymere im Bereich Biomaterialien und Kosmetik

Bio-relevante Makromolekülsysteme nehmen einen immer höheren Stellenwert ein. Deshalb arbeiten wir an synthetischen Lipiden mit Polyethylenglykosegmenten, die spezifische Erkennungsgruppen zur Wechselwirkung mit natürlichen Proteinen enthalten. Anwendung finden solche Biokonjugate z. B. in der nicht-viralen Gentherapie. Im Bereich der Kosmetik synthetisieren wir niedermolekulare und polymere Gelbildner, die für kosmetische Anwendungen einsetzbar sind.

### Polymerverarbeitung und Prüfkörperherstellung

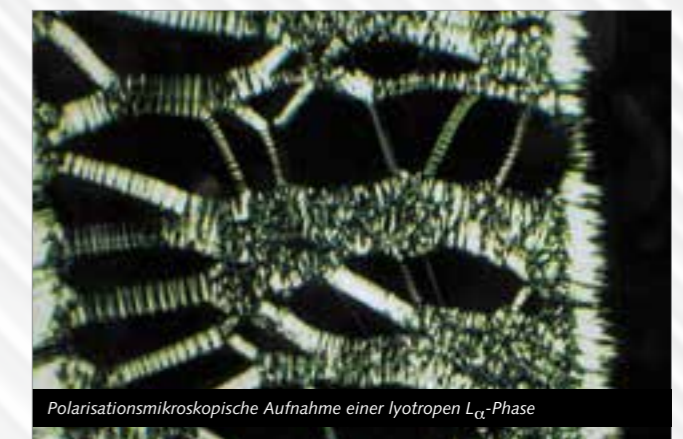
Dem Lehrstuhl ist ein Labor für Polymerverarbeitung und Prüfkörperherstellung angegliedert. Ziele dieses Labors sind die Verarbeitung von Polymeren im Gramm-Maßstab aus der Schmelze und aus Lösung zu Fasern, Filmen sowie Beschichtungen und Laminaten. Weitere Schwerpunkte liegen in der Herstellung von Polymerblends und der Einmischung von Additiven. Die Materialuntersuchung umfasst die Herstellung von Prüfkörpern und deren mechanische, thermische und morphologische Charakterisierung. Für die verschiedenen Verarbeitungstechniken wie Vorbehandlung (Mahlen, Trocknen), Verarbeitung von Polymeren aus Lösung und Schmelze und Herstellung von orientierenden Schichten und Nachbehandlung (Verstrecken, Tempern) steht eine Vielzahl von Geräten zur Verfügung.

### MODERNE AUSSTATTUNG ZUR MONOMER- UND POLYMERSYNTHESE, POLYMERANALYTIK, POLYMERVERARBEITUNG, DÜNNSCHICHT- UND DEVICE-HERSTELLUNG

- Syntheselabors Polymerisationsreaktoren (10 kg bis 0,5 kg) (Hoch-, Tieftemperaturenreaktoren, Druckreaktoren)
- Polymercharakterisierung aus Lösung (GPC, HPLC, Membran- und Dampfdruckosmose, Viskosimetrie)
- Spektroskopische Methoden (IR-, UV/Vis-, NMR-, Fluoreszenz-Spektroskopie)
- Thermische Charakterisierung DSC, TGA, DMTA
- Optische Charakterisierung Polarisationsmikroskopie, Transmissions- und Trübungs-messungen
- Kombinatorische „Physical and Chemical Vapor Deposition“ Techniken, Filmherstellung aus Lösung
- Polymerverarbeitung im Gramm-Maßstab

### FERNER BESTEHT ZUGANG ZU DIVERSEN, ZENTRAL GENUTZTEN EINRICHTUNGEN

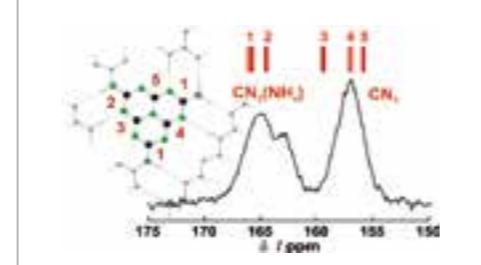
- Rasterelektronenmikroskope mit Feldemissionsquellen (REM)
- Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)
- Röntgenstreuungsmethoden (WAXS, SAXS, 2D-Detektor, temperaturabhängige Guinier Kamera)



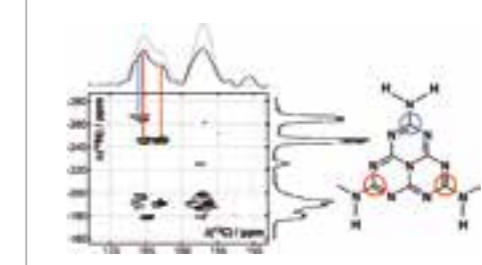
Polarisationsmikroskopische Aufnahme einer lyotropen  $L_{\alpha}$ -Phase



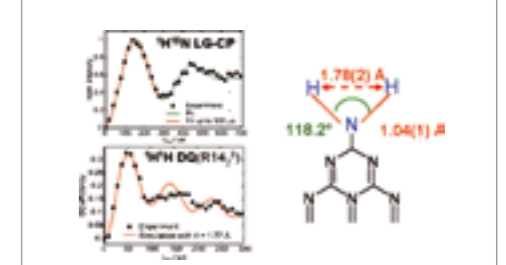
**Prof. Dr. Jürgen Senker**  
LEHRSTUHL FÜR ANORGANISCHE CHEMIE I



Zuordnung von  $^{13}\text{C}$  Resonanzen basierend auf quantenmechanischen Rechnungen auf DF-Niveau



HETCOR-Spektroskopie ( $^{15}\text{N}$ - $^{13}\text{C}$ -iDCP) zur Bestimmung der Konnektivitäten



Bestimmung von Abständen basierend auf quantitativen Multipulssequenzen ( $^1\text{H}/^1\text{H}$ : R14;  $^1\text{H}/^{15}\text{N}$ : LGCP)

## „Ab-initio Strukturaufklärung in amorphen, mikro- und semikristallinen Materialien sowie an Oberflächen“



Festkörper-FT-NMR-Spektrometer mit Zubehör für hochauflösende Messungen in kristallinen und amorphen Materialien und Hyperpolarisiertem Xenon für Experimente an Oberflächen

2D Methoden ein dynamischer Bereich von 14 Dekaden zugänglich. Es können charakteristische Bauelemente identifiziert und Konnektivitäten, Orientierungskorrelationen sowie Atomabstände bis hin zu Längenskalen einiger Nanometer vor allem auch in ungeordneten Systemen bestimmt werden.

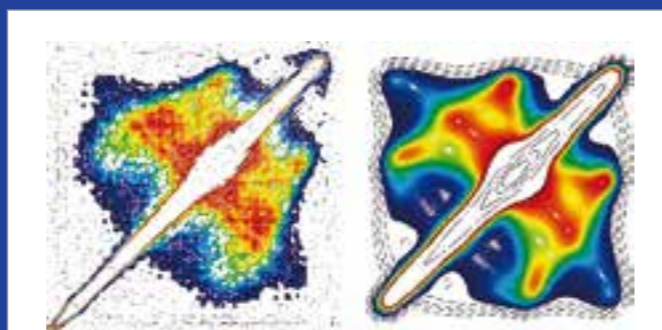
Damit ist die FK-NMR maßgeschneidert für die Untersuchung intermediärer Strukturbildungsphänomene sowie die Analyse der Dynamik der gebildeten Cluster. Die Verwendung von Hyperpolarisationstechniken ermöglicht oberflächenspezifische Merkmale und Wechselwirkungen herauszuarbeiten. Auf intermediären Längenskalen erreicht die FK-NMR eine hohe Genauigkeit und ist alternativlos.

### Polymorphie und Keimbildung

In vielen Systemen treten in Abhängigkeit von Temperatur und Druck verschiedene Phasen mit gleicher chemischer Zusammensetzung, aber unterschiedlicher räumlicher Anordnung auf. Die physikalischen und rheologischen Eigenschaften der Polymorphe sowie ihre Bioverfügbarkeit unterscheiden sich oft signifikant. Es ist daher essentiell, ihre Bildungsmechanismen zu verstehen und steuern zu können.

Im Frühstadium der Kristallisation existiert eine ganze Reihe strukturell unterschiedlicher subkritischer Keime, deren räumliche Ausdehnung nur wenige Nanometer beträgt. Jedoch wachsen nur wenige bestimmte Keime, so dass experimentell nur wenige Polymorphe beobachtet werden. Gelingt es jedoch, alternative Keime zu stabilisieren, könnten neue Polymorphe gewonnen werden. Für eine gezielte Einflussnahme fehlt es jedoch an grundlegenden strukturellen Informationen der subkritischen Keime.

2D  $^{13}\text{C}$  FK-NMR Austauschspektren zum Nachweis subkritischer Keime bei der Kristallisation des organischen Glasbildners Triphenylphosphit aus der unterkühlten Schmelze. Simulationen basierend auf quantenmechanischen Rechnungen zeigen, dass die mittlere Clustergröße kleiner als vier Moleküle ist.



**Messung Simulation**

Die Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe Senker liegen in der Untersuchung von Keimbildung und -wachstum aus Lösungen und Schmelzen sowie von Phasenumwandlungen zwischen verschiedenen amorphen bzw. flüssigen Phasen in einem frühen Stadium. Darüber hinaus beschäftigen wir uns mit der Synthese funktionalisierter, poröser Netzwerke sowie dem Studium spezifischer Gast-Wirtwechselwirkungen an diesen Systemen und an Oberflächen. Gast-Wirtwechselwirkungen bilden die Grundlage zur Realisierung substanzspezifischer Erkennung, wie sie in der Sensorik von enormer Bedeutung ist.

Unsere Arbeiten fußen auf der Entwicklung und Erweiterung von Analysestrategien, die es erlauben, Strukturdaten auf lokalen und intermediären Längenskalen abzuleiten. Im Zentrum stehen hierbei die Festkörper-NMR-Spektroskopie, Diffraktion und Computerchemie.

### Festkörper-NMR-Spektroskopie

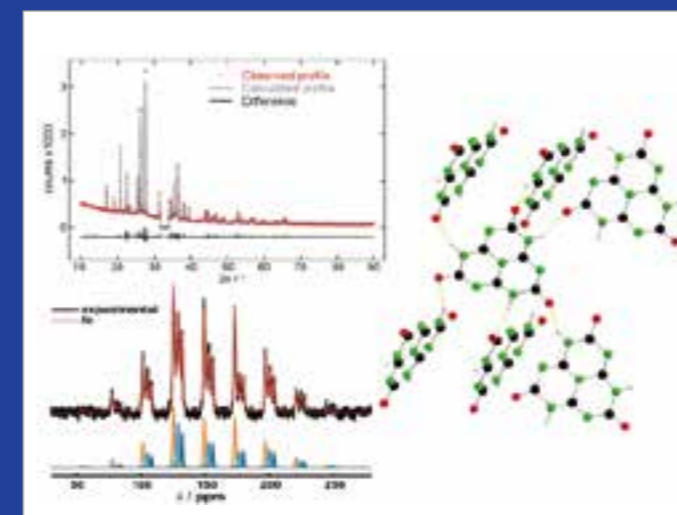
Die FK-NMR erfasst elementspezifisch und zerstörungsfrei sowohl dynamische Prozesse als auch strukturelle Eigenschaften. Durch die Kombination von Relaxationsmessungen, Linienformanalysen und

### Poröse Materialien

Poröse Materialien eignen sich in idealer Weise für den Einsatz in der Gasspeicherung und -trennung. Metallorganische (MOF) und Kovalentorganische (COF) Netzwerke erlauben es, die Größe und Form des Porenraums in weiten Bereichen einzustellen, um so eine Gestaltselektivität zu gewährleisten. Die von uns angestrebte Funktionalisierung und postsynthetische Modifizierung der Linker eröffnet zusätzlich die Möglichkeit einer chemischen Differenzierung der Gäste z. B. durch mehrfache H-Brückensysteme, die auf dem Schlüssel-Schloss-Prinzip beruhen.

### Kohlenstoffnitride

2D Kohlenstoffnitridnetzwerke zeigen interessante Parallelen zu Graphen-analogen Materialien. Der partielle Ersatz von Kohlenstoff gegen Stickstoff geht demgegenüber mit einer drastischen Änderung der makroskopischen Eigenschaften einher. Während Graphenschichten den elektrischen Strom leiten, sind CN-Netzwerke Halbleiter mit einer Bandlücke im optischen Bereich. Dies macht sie zu potentiellen Kandidaten für Anwendungen in der Optoelektronik und der Photokatalyse. Bedingt durch den hohen Fehlerrandcharakter der Schichten sind jedoch kaum strukturelle Daten über diese wichtige Materialklasse bekannt.



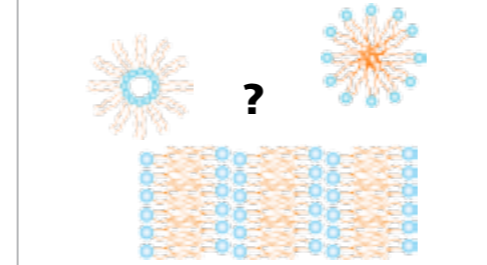
Ab-initio-Strukturlösung einer molekularen mikrokristallinen Verbindung mit Hilfe simultaner Auswertungen von FK-NMR-Spektren und Röntgenpulverdiffraktogrammen

### AUSSTATTUNG IM ÜBERBLICK

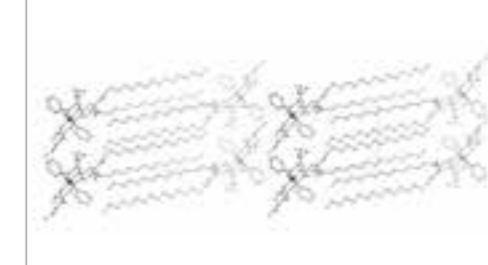
- Avance II 300 FT Festkörper-NMR-Spektrometer
  - Hochauflösung: - 2.5mm MAS-Tripleresonanzsonde
    - $\nu_{\text{rot}} < 35 \text{ kHz}$ ,  $-50^\circ\text{C} \leq T \leq +70^\circ\text{C}$
    - X,Y:  $^{15}\text{N} - ^{31}\text{P}$ ; H:  $^1\text{H} + ^{19}\text{F}$
  - 4.0mm MAS-Tripleresonanzsonde
    - $\nu_{\text{rot}} < 15 \text{ kHz}$ ,  $-150^\circ\text{C} \leq T \leq +200^\circ\text{C}$
    - X,Y:  $^{15}\text{N} - ^{31}\text{P}$ ; H:  $^1\text{H} + ^{19}\text{F}$
  - 7.0mm MAS-Tripleresonanzsonde
    - $\nu_{\text{rot}} < 7 \text{ kHz}$ ,  $-150^\circ\text{C} \leq T \leq +200^\circ\text{C}$
    - X,Y:  $^{15}\text{N} - ^7\text{Li}$ ; H:  $^1\text{H}$
- Breitlinien: - 5mm Doppelresonanzsonde
  - X:  $^{15}\text{N} - ^{31}\text{P}$ ; H:  $^1\text{H} + ^{19}\text{F}$
  - $-120^\circ\text{C} \leq T \leq +400^\circ\text{C}$
- Zugriff auf Avance III 400 FT Festkörper-NMR-Spektrometer
  - Hochauflösung: - 4.0mm MAS-Doppelresonanzsonde
    - $\nu_{\text{rot}} < 15 \text{ kHz}$ ,  $-150^\circ\text{C} \leq T \leq +200^\circ\text{C}$
    - X:  $^{15}\text{N} - ^{31}\text{P}$ ; H:  $^1\text{H}$
  - Breitlinien: - 5mm Doppelresonanzsonde
    - X:  $^{15}\text{N} - ^{31}\text{P}$ ; H:  $^1\text{H}$
    - $-120^\circ\text{C} \leq T \leq +200^\circ\text{C}$
  - 5mm Doppelresonanzsonde + Cryoeinheit
    - X:  $^{13}\text{C} - ^{31}\text{P}$ ; H:  $^1\text{H}$
    - $-270^\circ\text{C} \leq T \leq \text{RT}$
- Zugriff auf Röntgenpulverdiffraktometer / Software zum Lösen von Strukturen und für Rietveldverfeinerungen
  - STOE StadiP ( $\text{Cu}_{K\alpha 1}$ -Strahlung)
  - Siemens D5000 ( $\text{Cu}_{K\alpha 1}$ -Strahlung) mit Kühleinheit
  - PANalytical X'Pert Pro ( $\text{Cu}_{K\alpha 1}$ -Strahlung) mit Reaktions- und Feuchtekammer
- Software für die Durchführung von quantenmechanischen Rechnungen auf HF- und DFT-Niveau, semiempirischen Modellierungen und Kraftfeldbasierten Simulationen
- Zusammenarbeit mit Großforschungseinrichtungen
  - Neutronendiffraktion
  - Quasi- und inelastische Neutronenbeugung



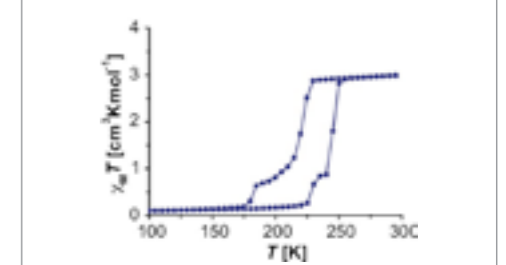
**Prof. Dr. Birgit Weber**  
ANORGANISCHE CHEMIE – MOLEKULARE SCHALTER



Mögliche Szenarien der Selbstanordnung von amphiphilen Molekülen.

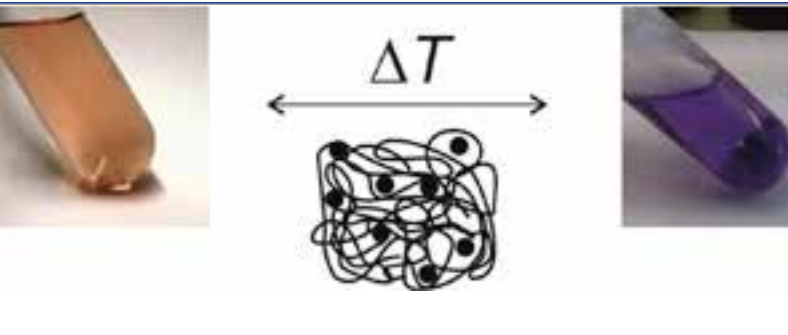


Einkristall-Strukturanalyse eines amphiphilen Komplexes bei dem es zur Ausbildung einer lipidschichtartigen Struktur kommt.



Ergebnis der magnetischen Messung an dem Komplex. Eine Hysterese wird beobachtet.

## „Molekulare Schalter mit Memory-Effekt“



Der Spin-Crossover geht häufig mit einem charakteristischen Farbwechsel einher. Deswegen werden solche Verbindungen z.B. für einen Einsatz als Temperatur- und/oder Drucksensoren mit einfacher optischer Auslesbarkeit diskutiert. Bei einem Spin-Crossover-System mit Hysterese fungiert das System nicht nur als Sensor und Anzeige, sondern verfügt über einen Memory-Effekt, durch den ein einmaliges Ereignis gespeichert werden kann.

Die Forschungsinteressen im Arbeitskreis Weber fokussieren sich auf die Synthese, Charakterisierung und Nanostrukturierung von molekülbasierten Schaltern.

### Spin-Crossover

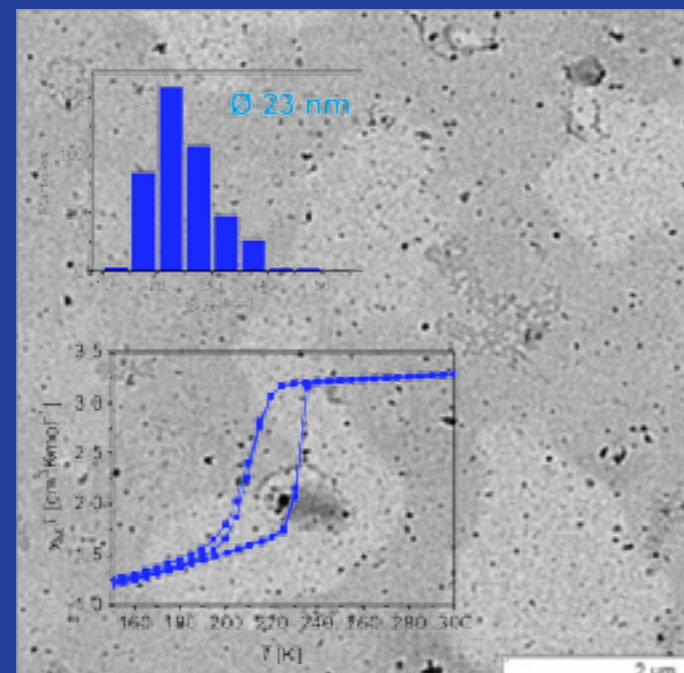
Spin-Crossover (SCO)-Materialien sind eine Klasse von schaltbaren Verbindungen mit einem breiten Anwendungspotential in der Informationstechnologie oder als Sensoren. Durch eine externe Störung (z.B. Änderung von Temperatur, Druck, Einstrahlung von Licht) wird ein Spinübergang von einem high-spin- in einen low-spin-Zustand ausgelöst, der mit einer Veränderung der Materialeigenschaften (Farbigkeit, Magnetismus, Größe) einhergeht. Für eine technische Anwendung dieser Materialien ist es essentiell, ihre Eignung als Bestandteile von Kompositen bzw. für die Miniaturisierung auszuloten. Dazu werden verschiedene Strategien zur Darstellung und Mesostrukturierung von SCO-Nanopartikeln untersucht. Ziel ist die Synthese von SCO-Nanopartikeln unter Erhalt der im Festkörper beobachteten SCO Eigenschaften (Hysterese = Memory Effekt oder Stufen). Unterschiedliche Konzepte werden für das Auftreten von Hysteresen oder Stufen beim Spinübergang verantwortlich gemacht und es soll herausgefunden werden, welches dieser Konzepte sich auf partikuläre Systeme übertragen lässt.

### Synthese von Spin-Crossover Nanopartikeln

Eine Möglichkeit zur Darstellung von Spin-Crossover-Nanopartikeln ist die inverse Mizellen-Technik (Wasser in Öl-Emulsion). Die Mizellen dienen dabei als Nano-Reaktoren für die Synthese der SCO-Verbindungen und die Partikelgröße lässt sich über die Größe der Mizelle kontrollieren.

Dabei ist nicht nur der Einfluss der Partikelgröße und Morphologie auf die Spin-Crossover-Eigenschaften von Interesse, sondern auch die Bedeutung von zwischenpartikulären Wechselwirkungen und Partikel-Matrix-Wechselwirkungen wird untersucht. Letztere könnten einen neuartigen Zugang zu einer genauen Temperaturkontrolle beim SCO ermöglichen – ein Faktor der für die zukünftige Anwendung dieser Verbindungen von größtem Interesse ist.

Transmissions-Elektronenmikroskopie-Aufnahme von Spin-Crossover-Nanopartikeln mit einer mittleren Größe von 23 nm. Die unten links abgebildete Magnetmessung zeigt deutlich, dass die Hysterese beim Spin-Übergang bei dieser Partikelgröße erhalten bleibt.

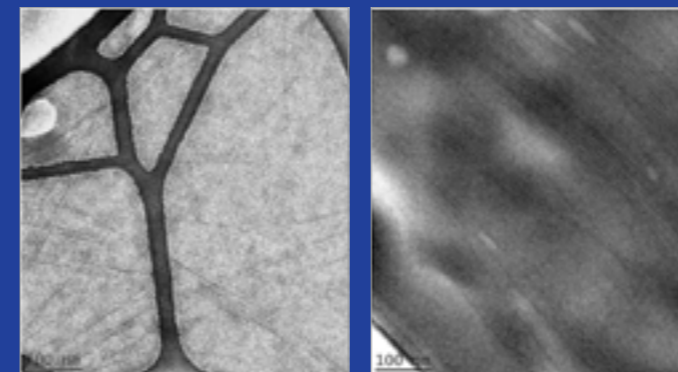


### Selbstanordnung von amphiphilen Komplexen

Die Synthese von Liganden mit amphiphilem Charakter ermöglicht einen neuen Zugang zu mesostrukturierten Systemen. Bei solchen Systemen ist die Ausbildung von verschiedenen Überstrukturen denkbar (lamellar oder mizellar). Die in unserem Arbeitskreis entwickelten Liganden sind für die Synthese von Spin-Crossover-Komplexen geeignet. Über die Alkylketten lässt sich die Selbstorganisation der Komplexe im Festkörper beeinflussen und zum Teil dominieren, wobei bisher vor allem Lipidschicht-Strukturen erhalten wurden.

Die Ausbildung von lamellaren und mizellaren Strukturen in Lösung ist denkbar und sollte sich über die Alkylketten steuern lassen. Versuche mit Kupfer(II)-Komplexen dieses Ligandentyps zeigen, dass Selbstorganisationsphänomene in Lösung auftreten, die bei einigen Komplexen zur Ausbildung von thixotropen Gelen in Abhängigkeit des eingesetzten Lösemittels führen.

Zur Charakterisierung der Komplexe und deren Nanopartikel führen wir magnetische Messungen an einem SQUID-Magnetometer durch. Die Empfindlichkeit des Gerätes ist so hoch, dass selbst kleinste Probenmengen oder magnetisch stark verdünnte Proben untersucht werden können. Die Nanopartikel und selbstassemblierten Strukturen amphiphiler Komplexe werden mittels Transmissions-Elektronenmikroskopie und Lichtstreuung charakterisiert.



Cryo-Transmissions-Elektronenmikroskopie-Bilder eines selbst-assemblierten Kupferkomplexes der thixotrope Gele ausbildet.

### SYNTHESE UND CHARAKTERISIERUNG

- Synthese von responsiven Spin-Crossover-Komplexen
  - Komplexe mit Hysterese (Memory-Effekt)
  - amphiphile responsive Komplexe
  - Arbeiten unter Schutzgas
- Ligandendesign
  - neue Liganden für Spin-Crossover-Komplexe
  - Liganden für multifunktionale Komplexe
- Anorganische Nanopartikel
  - inverse Mizellen-Technik
  - Einbau von Komplexen in Polymere
- Charakterisierung
  - Magnetismus (SQUID-Magnetometer)
  - Mössbauer Spektroskopie
  - NMR Spektroskopie an Komplexen
  - Kristallstrukturanalyse
  - UV-Vis Spektroskopie

### EXPERTISE

- Magnetismus
- Koordinationschemie
- Molekulare Schalter

# KONTAKT

Kontakt und Links für weitere Informationen und zu den Lehrstühlen der Mitglieder von BZKG

**Prof. Dr. Stephan Förster**  
**LEHRSTUHLINHABER PHYSIKALISCHE CHEMIE I**  
**GESCHÄFTSFÜHRENDER DIREKTOR DES BZKG**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 2760 | Fax: +49(0)921 55 2780  
E-Mail: [stephan.foerster@uni-bayreuth.de](mailto:stephan.foerster@uni-bayreuth.de)  
[www.chemie.uni-bayreuth.de/pci](http://www.chemie.uni-bayreuth.de/pci)

**Prof. Dr. Seema Agarwal**  
**LEHRSTUHL MAKROMOLEKULARE CHEMIE II**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel.: +49(0)921 55 3397 | Fax: +49(0)921 55 3393  
E-Mail: [agarwal@uni-bayreuth.de](mailto:agarwal@uni-bayreuth.de)  
[www.mcii.uni-bayreuth.de](http://www.mcii.uni-bayreuth.de)

**Prof. Dr. Josef Breu**  
**LEHRSTUHLINHABER ANORGANISCHE CHEMIE I**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 2530 | Fax: +49(0)921 55 2788  
E-Mail: [josef.breu@uni-bayreuth.de](mailto:josef.breu@uni-bayreuth.de)  
[www.ac1.uni-bayreuth.de/de/2way/index.html](http://www.ac1.uni-bayreuth.de/de/2way/index.html)

**Prof. Dr. Andreas Fery**  
**LEHRSTUHLINHABER PHYSIKALISCHE CHEMIE II**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 2753 | Fax: +49(0)921 55 2059  
E-Mail: [andreas.fery@uni-bayreuth.de](mailto:andreas.fery@uni-bayreuth.de)  
[www.pcii.uni-bayreuth.de/chair\\_pccii/en/index.html](http://www.pcii.uni-bayreuth.de/chair_pccii/en/index.html)

**Prof. Dr. Thomas Fischer**  
**INSTITUT EXPERIMENTALPHYSIK V**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 3342 | Fax: +49(0)921 55 3647  
E-Mail: [thomas.fischer@uni-bayreuth.de](mailto:thomas.fischer@uni-bayreuth.de)  
[www.staff.uni-bayreuth.de/~btp945](http://www.staff.uni-bayreuth.de/~btp945)

**Prof. Dr. Stephan Gekle**  
**JUNIORPROFESSUR BIOFLUID SIMULATION**  
**AND MODELING**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 4462  
E-Mail: [stephan.gekle@uni-bayreuth.de](mailto:stephan.gekle@uni-bayreuth.de)  
[www.gekle.physik.uni-bayreuth.de](http://www.gekle.physik.uni-bayreuth.de)

**Prof. Dr. Andreas Greiner**  
**LEHRSTUHLINHABER MAKROMOLEKULARE CHEMIE II**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 3399 | Fax: +49(0)921 55 3393  
E-Mail: [greiner@uni-bayreuth.de](mailto:greiner@uni-bayreuth.de)  
[www.mcii.uni-bayreuth.de](http://www.mcii.uni-bayreuth.de)

**Prof. em. Dr. Heinz Hoffmann**  
**BAYCOLL**

Gottlieb-Keim-Straße 60  
D-95448 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 50 73 61 35 | Fax: +49(0)921 50 73 61 39  
E-Mail: [heinz.hoffmann@uni-bayreuth.de](mailto:heinz.hoffmann@uni-bayreuth.de)  
E-Mail: [heinz.hoffmann@nmbgmbh.de](mailto:heinz.hoffmann@nmbgmbh.de)

**Prof. Dr. Matthias Karg**  
**LEHRSTUHL PHYSIKALISCHE CHEMIE –**  
**JUNIORPROFESSUR KOLLOIDALE SYSTEME**

Universitätsstr. 30, 95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 3920 | Fax: +49(0)921 55 2780  
Email: [matthias.karg@uni-bayreuth.de](mailto:matthias.karg@uni-bayreuth.de)  
Web: <http://www.karg.uni-bayreuth.de>

**Prof. Dr. Rhett Kempe**  
**LEHRSTUHLINHABER ANORGANISCHE CHEMIE II**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 2540 | Fax: +49(0)921 55 2157  
E-Mail: [kempe@uni-bayreuth.de](mailto:kempe@uni-bayreuth.de)  
[www.ac2.uni-bayreuth.de](http://www.ac2.uni-bayreuth.de)

**Prof. Dr. Axel Müller**  
**MAKROMOLEKULARE CHEMIE II UND INSTITUT FÜR**  
**ORGANISCHE CHEMIE UNIVERSITÄT MAINZ**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 4475

Universität Mainz  
D-55099 Mainz  
Tel: +49(0)6131 39 22 372  
E-Mail: [axel.mueller@uni-mainz.de](mailto:axel.mueller@uni-mainz.de)  
[www.chemie.uni-bayreuth.de/mcii](http://www.chemie.uni-bayreuth.de/mcii)

**Prof. Dr. Georg Papastavrou**  
**LEHRSTUHL PHYSIKALISCHE CHEMIE II**  
**PHYSIKALISCHE CHEMIE / PHYSIK DER POLYMERE**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 2335 | Fax: +49(0)921 55 2059  
E-Mail: [georg.papastavrou@uni-bayreuth.de](mailto:georg.papastavrou@uni-bayreuth.de)  
[www.pcii.uni-bayreuth.de/rg\\_papastavrou/en/index.html](http://www.pcii.uni-bayreuth.de/rg_papastavrou/en/index.html)

**Prof. Dr. Markus Retsch**  
**LEHRSTUHL PHYSIKALISCHE CHEMIE –**  
**JUNIORPROFESSUR POLYMERE SYSTEME**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 27 76 | Fax: +49(0)921 55 27 80  
E-Mail: [markus.retsch@uni-bayreuth.de](mailto:markus.retsch@uni-bayreuth.de)  
[www.retsch.uni-bayreuth.de](http://www.retsch.uni-bayreuth.de)

**Prof. Dr. Thomas Scheibel**  
**LEHRSTUHLINHABER BIOMATERIALIEN**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 7360 | Fax: +49(0)921 55 7346  
E-Mail: [thomas.scheibel@uni-bayreuth.de](mailto:thomas.scheibel@uni-bayreuth.de)  
[www.fiberlab.de](http://www.fiberlab.de)

**Prof. Dr. Hans-Werner Schmidt**  
**LEHRSTUHLINHABER MAKROMOLEKULARE CHEMIE I**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 3200 | Fax: +49(0)921 55 3206  
E-Mail: [hans-werner.schmidt@uni-bayreuth.de](mailto:hans-werner.schmidt@uni-bayreuth.de)  
[www.chemie.uni-bayreuth.de/mci](http://www.chemie.uni-bayreuth.de/mci)

**Prof. Dr. Jürgen Senker**  
**LEHRSTUHLINHABER ANORGANISCHE CHEMIE III**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel: +49(0)921 55 2532 | Fax: +49(0)921 55 2788  
E-Mail: [juergen.senker@uni-bayreuth.de](mailto:juergen.senker@uni-bayreuth.de)  
[www.senker.uni-bayreuth.de](http://www.senker.uni-bayreuth.de)

**Prof. Dr. Birgit Weber**  
**LEHRSTUHL ANORGANISCHE CHEMIE –**  
**MOLEKULARE SCHALTER**

Universität Bayreuth  
D-95440 Bayreuth  
Tel.: +49(0)921 55 2555 | Fax: +49(0)921 55 2157  
E-Mail: [weber@uni-bayreuth.de](mailto:weber@uni-bayreuth.de)  
<http://www.ac2-weber.uni-bayreuth.de>

**BZKG**

**Bayreuther Zentrum  
für Kolloide und Grenzflächen**  
Universität Bayreuth  
Universitätsstraße 30 • 95440 Bayreuth

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