

Jahrbuch der  
Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf

*Heinrich Heine*  
HEINRICH HEINE  
UNIVERSITÄT  
DÜSSELDORF

2005/2006

*Heinrich Heine*



**Jahrbuch der  
Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf  
2005/2006**



**Jahrbuch der  
Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf  
2005/2006**

**Herausgegeben vom Rektor  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Univ.-Prof. Dr. Dr. Alfons Labisch**

**Konzeption und Redaktion:  
em. Univ.-Prof. Dr. Hans Süßmuth**

© Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 2006  
Einbandgestaltung: Wiedemeier & Martin, Düsseldorf  
Titelbild: Schloss Mickeln, Tagungszentrum der Universität  
Redaktionsassistentz: Georg Stüttgen  
Beratung: Friedrich-K. Unterweg  
Satz: Friedhelm Sowa, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Herstellung: WAZ-Druck GmbH & Co. KG, Duisburg  
Gesetzt aus der Adobe Times  
ISBN 3-9808514-4-3

## Inhalt

<b>Vorwort des Rektors</b> .....	11
<b>Gedenken</b> .....	15
<b>Rektorat</b> .....	17
ALFONS LABISCH (Rektor)	
Die Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf ist eine Forschungsuniversität ..	19
HILDEGARD HAMMER	
Der Bologna-Prozess – Chancen und Schwächen einer erzwungenen Studienreform .....	29
CHRISTOPH AUF DER HORST	
Das Studium Universale der Heinrich-Heine-Universität zwischen „akademeia“ und „universitas“ .....	41
<b>40 Jahre Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf</b>	
HERMANN LÜBBE	
Universitätsjubiläen oder die Selbsthistorisierung der Wissenschaften .....	53
<b>Medizinische Fakultät</b>	
<i>Dekanat</i> .....	65
<i>Neu berufene Professorinnen und Professoren</i> .....	69
WOLFGANG H. M. RAAB (Dekan) und SIBYLLE SOBOLL	
Forschung und Lehre in der Medizinischen Fakultät .....	73
JÜRGEN SCHRADER	
Systembiologie – Neue Perspektiven für die Medizin? .....	79
ORTWIN ADAMS und HARTMUT HENGEL	
Husten, Schnupfen, Heiserkeit – Über alte und neue Respirationstraktviren .....	85
WILFRIED BUDACH und EDWIN BÖLKE	
Strahlende Zukunft – Radioonkologie 2010 .....	103
HILDEGARD GRASS und STEFANIE RITZ-TIMME	
Frauen- und Geschlechterforschung, Gewaltopfer und Rechtsmedizin .....	107
GESINE KÖGLER und PETER WERNET	
Die José Carreras Stammzellbank Düsseldorf – Entwicklung, klinische Ergebnisse und Perspektiven .....	119

NIKOLAS HENDRIK STOECKLEIN und WOLFRAM TRUDO KNOEFEL Disseminierte Tumorzellen bei gastrointestinalen Karzinomen – Molekular- genetische Analyse der relevanten Tumorzellen zum Aufsuchen therapeu- tischer Zielstrukturen für effektive adjuvante Therapien .....	137
---	-----

### **Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät**

<i>Dekanat</i> .....	151
<i>Neu berufene Professorinnen und Professoren</i> .....	153
PETER WESTHOFF (Dekan) Die Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät – Der Weg im Jahr 2005 .....	159
JÖRG BREITKREUTZ Arzneizubereitungen für Kinder .....	161
STEFAN U. EDELHAAF Weiche Materie – Treffpunkt von Physik, Chemie und Biologie .....	173
THOMAS HEINZEL Nanoelektronik und mesoskopischer Transport .....	185
MICHAEL LEUSCHEL und JENS BENDISPOSTO Das ProB-Werkzeug zur Validierung formaler Softwaremodelle .....	199
CHRISTINE R. ROSE Doppelt hält besser – Elektrische und chemische Signalgebung in Gehirnzellen .....	209

### **Philosophische Fakultät**

<i>Dekanat</i> .....	227
<i>Neu berufene Professorinnen und Professoren</i> .....	229
BERND WITTE (Dekan) Die Philosophische Fakultät auf dem Weg in die entgrenzte Wissensgesellschaft .....	231
ANDREA VON HÜLSEN-ESCH, WILHELM G. BUSSE und CHRISTOPH KANN Das Forschungsinstitut für Mittelalter und Renaissance .....	237
SABINE KROPP Institutionenbildung in postsowjetischen Ländern – Entwurf eines Analysekonzepts .....	245
KARL-HEINZ REUBAND Teilhabe der Bürger an der „Hochkultur“ – Die Nutzung kultureller Infrastruktur und ihre sozialen Determinanten .....	263

SHINGO SHIMADA Wozu „Modernes Japan“? Zur Konzeptualisierung des Lehrstuhls „Modernes Japan II mit sozialwissenschaftlichem Schwerpunkt“ .....	285
<b>Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät</b>	
<i>Dekanat</i> .....	293
CHRISTOPH J. BÖRNER (Dekan) Bachelor und Master in der Betriebswirtschaftslehre – Der Düsseldorfer Ansatz .....	295
HEINZ-DIETER SMEETS und H. JÖRG THIEME Demographische Entwicklung und Globalisierung – Ökonomische Konsequenzen .....	311
HORST DEGEN und PETER LORSCHIED „Euro = Teuro“ – Lässt sich diese Gleichung statistisch belegen? .....	329
BERND GÜNTER und LUDGER ROLFES Wenn Kunden lästig werden – Kundenbewertung und Umgang mit unprofitablen Kundenbeziehungen durch Unternehmen .....	345
BERND GÜNTER Über den Tellerrand hinaus – „Studium laterale“ .....	359
<b>Juristische Fakultät</b>	
<i>Dekanat</i> .....	367
HORST SCHLEHOFER (Dekan) Das Bachelor-Master-System – Ein Modell für die Juristenausbildung? .....	369
ANDREAS FEUERBORN Der integrierte deutsch-französische Studiengang der Juristischen Fakultäten der Université de Cergy-Pontoise und der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf .....	379
ULF PALLME KÖNIG Die rechtliche Einordnung der Kooperationsvereinbarung zwischen Uni- versität und Universitätsklinikum nach nordrhein-westfälischem Recht .....	387
<b>Gesellschaft von Freunden und Förderern der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf e.V.</b>	
GERT KAISER Die Freundesgesellschaft der Heinrich-Heine-Universität .....	401
OTHMAR KALTHOFF Jahresbericht 2005 .....	405

## **Sonderforschungsbereiche der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

- CHRISTEL M. MARIAN und WILHELM STAHL  
 Der Sonderforschungsbereich 663  
 „Molekulare Antwort nach elektronischer Anregung“ ..... 409

## **Forscherguppen der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

- VICTORIA KOLB-BACHOFEN, MIRIAM CORTESE, JÖRG LIEBMANN,  
 SABINE KOCH und NICOLE FITZNER  
 Regulation der Entzündungsreaktion –  
 Eine wichtige Rolle für Stickstoffmonoxid ..... 421

- DIRK SCHUBERT und JOCHEN F. STAIGER  
 Die Analyse von „Was“ und „Wo“ in neuronalen Netzen  
 des primären somatosensorischen Kortex ..... 433

## **Graduiertenkollegs der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

- OSWALD WILLI  
 Das Graduiertenkolleg 1203  
 „Dynamik heißer Plasmen“ ..... 453

- AXEL GÖDECKE  
 Proteininteraktionen und -modifikationen im Herzen –  
 Das Graduiertenkolleg 1089 auf dem Weg  
 in das postgenomische Zeitalter ..... 459

## **Zentrale wissenschaftliche Einrichtungen der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

### *Humanwissenschaftlich-Medizinisches Forschungszentrum*

- DIETER BIRNBACHER  
 Das Humanwissenschaftlich-Medizinische Forschungszentrum  
 der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf ..... 475

- DIETER BIRNBACHER und LEONORE KOTTJE-BIRNBACHER  
 Ethische Fragen bei der Behandlung von Patienten  
 mit Persönlichkeitsstörungen ..... 477

## **Biotechnologie – Ein gemeinsamer Forschungsschwerpunkt der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf und des Forschungszentrums Jülich**

- KARL-ERICH JAEGER  
 Das Zentrum für Mikrobielle Biotechnologie ..... 491

CHRISTIAN LEGGEWIE, THOMAS DREPPER, THORSTEN EGGERT, WERNER HUMMEL, MARTINA POHL, FRANK ROSENAU und KARL-ERICH JAEGER Molekulare Enzymtechnologie – Vom Gen zum industriellen Biokatalysator .....	501
JÖRG PIETRUSZKA, ANJA C. M. RIECHE, NIKLAS SCHÖNE und THORSTEN WILHELM Naturstoffchemie – Ein herausforderndes Puzzlespiel .....	519
<b>Institute an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf</b>	
<i>Institut für umweltmedizinische Forschung</i>	
JEAN KRUTMANN Das Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf gGmbH .....	535
<b>Institute in Zusammenarbeit mit der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf</b>	
<i>Düsseldorfer Institut für Dienstleistungs-Management</i>	
WINFRIED HAMEL Das Düsseldorfer Institut für Dienstleistungs-Management – Eine virtuelle Forschungseinrichtung .....	561
<i>Institut für Internationale Kommunikation</i>	
CHRISTINE SCHWARZER und MATTHIAS JUNG Universitätsnah wirtschaften – Das Institut für Internationale Kommunikation in Zusammenarbeit mit der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf e.V. ....	573
<b>Zentrale Einrichtungen der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf</b>	
<i>Universitäts- und Landesbibliothek</i>	
IRMGARD SIEBERT und CAROLA SPIES Aufbruch in die Zukunft – Der 94. Deutsche Bibliothekartag in Düsseldorf .....	589
<i>Universitätsrechenzentrum</i>	
STEPHAN OLBRICH, NILS JENSEN und GABRIEL GAUS EVITA – Effiziente Methoden zur Visualisierung in tele-immersiven Anwendungen .....	607



**STEFAN U. EGELHAAF**

## **Weiche Materie – Treffpunkt von Physik, Chemie und Biologie**

### **Was ist „weiche Materie“?**

Die Physik hat in den letzten etwa 100 Jahren durch die Entwicklung der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie beeindruckende Fortschritte erzielt. Dadurch hat sich unser Verständnis sowohl der kleinsten Bausteine der Materie als auch unseres Universums enorm erweitert. Im Gegensatz zu diesen extrem kleinen bzw. großen Dimensionen ist die typische Längenskala von weicher Materie fast „alltäglich“. Sie liegt im Bereich von Nanometern: Etwa 1 nm bis 1.000 nm, dies ist ein Millionstel bis ein Tausendstel eines Millimeters.

Was ist dann das Besondere an weicher Materie? Systeme, die der weichen Materie zugerechnet werden, bestehen aus sehr vielen Teilchen oder Strukturen. Deren Anzahl liegt typischerweise in der Größenordnung der Avogadro-Zahl, also etwa  $10^{23}$  Teilchen. Durch die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen und die damit verbundene gegenseitige Beeinflussung ergeben sich völlig neue Eigenschaften. Ein klassisches Beispiel sind Aggregatzustände. Diese können für ein einzelnes Teilchen (bzw. Atom oder Molekül) nicht definiert werden, sondern ergeben sich erst aus dem Wechselspiel und der relativen Anordnung vieler Teilchen. Weiche Materie geht dabei über die klassischen Aggregatzustände – gasförmig, flüssig und fest – hinaus. Diese Systeme bestehen oft aus einer Mischung verschiedener Aggregatzustände, typischerweise einer unstrukturierten (gewöhnlich flüssigen) und einer strukturierten (festen) Komponente. Die Größe der einzelnen Komponenten, zum Beispiel die Größe fester Teilchen suspendiert in einer Flüssigkeit, liegt im Bereich von Nanometern, der oben erwähnten typischen Längenskala weicher Materie.

Das Wechselspiel zwischen den Teilchen und deren Ordnung wird durch die Wechselwirkung zwischen den Teilchen vorgegeben. Die Größe der Wechselwirkungsenergie und ihre Abhängigkeit vom Teilchenabstand sind daher für die Eigenschaften weicher Materie entscheidend. Die Wechselwirkungsenergie liegt typischerweise im Bereich der thermischen Energie  $kT$ , also der den einzelnen Teilchen nach dem Gleichverteilungssatz zur Verfügung stehenden Energie. Die „physikalischen Bindungen“ zwischen den einzelnen Teilchen können daher relativ einfach gebrochen und wieder geknüpft werden. Im Gegensatz dazu involviert das Brechen oder Knüpfen von chemischen Bindungen die etwa 100-fache Energie und spielt deshalb in der Untersuchung von weicher Materie keine Rolle. Daraus ergibt sich eine schwache Verbindung der einzelnen Teilchen. Dies begründet die Bedeutung der Entropie in Systemen der weichen Materie. Die Dominanz der thermischen Energie erfordert letztendlich die oben erwähnte Längenskala: Die Teilchen oder Strukturen müssen so klein sein, dass ihre thermische Energie größer als ihre potenzielle Energie ist. Diese Anforderung wird normalerweise von Teilchen mit einer Größe von unter etwa

1.000 nm erfüllt. Um eine Kontinuumsbeschreibung zu ermöglichen, sollten die Teilchen andererseits deutlich größer sein als einzelne Atome oder Moleküle, d. h. mindestens 1 nm.

Warum ist weiche Materie weich? „Weichheit“ kann durch den Schermodul  $G$  beschrieben werden. Der Schermodul  $G$  quantifiziert die zu einer Deformation benötigte Kraft pro Fläche oder – gleichbedeutend – die Energie pro Volumeneinheit. Die charakteristische Energie ist für Festkörper wie auch für weiche Materie die thermische Energie  $kT$ . Allerdings ist die typische Volumeneinheit bei Festkörpern das Volumen eines Atoms oder Moleküls, also etwa  $(1 \text{ nm})^3$ , während sie bei Strukturen der weichen Materie bis etwa  $(1.000 \text{ nm})^3$  reicht. Die wesentlich größeren Volumeneinheiten führen zu deutlich kleineren Schermoduln für weiche Materie im Vergleich zu Festkörpern und begründen die Weichheit der weichen Materie.

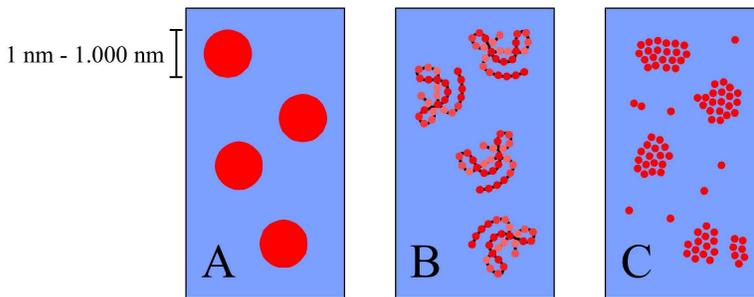


Abb. 1: Weiche Materie kann in drei Klassen eingeteilt werden: (A) Kolloide, (B) Polymere und (C) Tensidsysteme.

Es wurde bereits erwähnt, dass Systeme, die der weichen Materie zugerechnet werden, meistens Mischungen aus mindestens zwei Komponenten sind, wobei eine der Komponenten die für weiche Materie typische Längenskala im Bereich von Nanometern besitzt. Oft handelt es sich um Teilchen oder Strukturen, die in einer Flüssigkeit suspendiert sind. Diese Teilchen können sehr unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Trotzdem können sie in drei Klassen eingeteilt werden (Abb. 1): Kolloide, Polymere und Tensidsysteme. Kolloide können viele verschiedene Formen besitzen; sie können zum Beispiel als Kugeln, Scheiben oder Stäbchen auftreten. Unabhängig von der speziellen Form sollte jedoch unter Einwirkung einer Energie, die maximal in der Größenordnung der thermischen Energie liegt, weder eine deutliche Verformung noch eine Veränderung der inneren Struktur auftreten. Dies ist bei Polymeren anders. Polymere sind lange lineare oder verzweigte Ketten aus kleineren Einheiten, den Monomeren. Diese Ketten verformen sich unter dem Einfluss der thermischen Energie ständig. Trotzdem bleiben die chemischen Bindungen, die die Monomere zusammenhalten, und damit die Ketten, intakt. Hier liegt der Unterschied zu Tensidaggregaten. Diese bestehen auch aus kleineren Einheiten, den Tensidmolekülen. Die einzelnen Tensidmoleküle werden aber nicht durch chemische Bindungen zusammengehalten, sondern durch wesentlich schwächere „physikalische Bindungen“, deren Bindungsenergie nur im Bereich der thermischen Energie liegt. Tensidaggregate unterliegen

deshalb einem dauernden Austausch von Tensidmolekülen und befinden sich somit in einem kontinuierlichen Auf-, Ab- und Umbauprozess.

Die Messmethoden, die zur Untersuchung der Struktur und Dynamik von weicher Materie verwendet werden können, werden durch die Längenskala der weichen Materie bestimmt. Dabei fallen die üblichen Techniken in zwei große Klassen: direkte, abbildende Methoden und indirekte Streumethoden. Relativ große Strukturen liegen in der Größenordnung des sichtbaren Lichts und können daher mit optischer Mikroskopie abgebildet werden, wobei die konfokale Mikroskopie speziell für quantitative Untersuchungen zusehends an Bedeutung gewinnt. Die Auflösung der optischen Mikroskopie reicht allerdings nicht aus, um kleinere Strukturen (unter ein paar Hundert Nanometern) zu beobachten. Dies ist die Domäne der Elektronen- und in Zukunft vermutlich auch der Röntgenmikroskopie. Die Situation bei den Streumethoden ist entsprechend: Für größere Strukturen kann Lichtstreuung benutzt werden, während für kleinere Strukturen aufwändigere Neutronen- oder Röntgenstreuung eingesetzt werden muss. Für eine makroskopische Charakterisierung von weicher Materie, beispielsweise deren mechanischer, optischer, elektrischer oder grenzflächenaktiver Eigenschaften, werden zahlreiche weitere Methoden angewendet.

Im Folgenden sollen die obigen Ausführungen durch eine – notwendigerweise subjektive – Auswahl an Beispielen illustriert werden.

## **Kolloide als „Modellatome“**

In welchem Aggregatzustand ein Stoff vorliegt, wird einerseits durch die thermodynamischen Größen Temperatur, Druck und Konzentration, aber auch durch die Wechselwirkungen zwischen den Atomen oder Molekülen bestimmt. Die Wechselwirkungen hängen von der Art der Atome oder Moleküle ab und lassen sich daher nicht völlig frei wählen. Im Gegensatz dazu können die Wechselwirkungen zwischen Kolloiden praktisch beliebig eingestellt werden (Abb. 2). Betrachtet man Kolloide als große „Modellatome“ und behandelt man die suspendierende Flüssigkeit als unstrukturiertes Medium, so stellen kolloidale Suspensionen ein ideales Modellsystem dar, um Fragen der statistischen Physik experimentell zu untersuchen.

Mit verschiedenen Herstellungsverfahren lässt sich fast die gesamte Bandbreite zwischen harten und weichen Kugeln abdecken. Während eine Überlappung zweier Teilchen immer ausgeschlossen ist, ist dies bei harten Kugeln die einzige gegenseitige Beeinflussung (Abb. 2, rote Linie), wohingegen bei weichen Kugeln die gegenseitige Abstoßung bereits vor dem eigentlichen Kontakt ansteigt. Diese Wechselwirkung ist im Wesentlichen durch die Chemie der Teilchen festgelegt. Sie kann jedoch zusätzlich modifiziert werden. Beispielsweise kann eine anziehende Wechselwirkung durch Zugabe von nicht-adsorbierenden Polymeren hervorgerufen werden (Abb. 2, orange Linie): Dies wird dadurch verursacht, dass die Polymere nicht zwischen zwei Teilchen gelangen können, die sich näher gekommen sind als die Größe der Polymere (Abb. 2, grünes Gebiet). Dadurch stoßen die Polymere nur noch von den jeweils abgewandten Seiten auf die beiden benachbarten Teilchen. Dies führt zu einer Gesamtkraft in Richtung auf das jeweils benachbarte Teilchen und damit zu einer effektiven Anziehung zwischen den Teilchen. Die Reichweite und Stärke dieser anziehenden Wechselwirkung lässt sich durch die Größe und Konzentration des Polymers kontrollieren. Außerdem können Ladungen auf den Teilchen zu ei-

ner Abstoßung führen, deren Reichweite durch Zusatz von Salz kontrolliert werden kann (Abb. 2, blaue Linie). Dies sind nur zwei Beispiele, wie anziehende und abstoßende Wechselwirkungen induziert werden können. Es gibt zahlreiche weitere Möglichkeiten, um die Wechselwirkungen zu beeinflussen.

Außer der Möglichkeit, die Wechselwirkungen fast beliebig zu kontrollieren, haben kolloidale Teilchen durch ihre Größe weitere Vorteile: Sie sind relativ einfach zu beobachten und ihre Dynamik läuft langsamer ab und ist damit Untersuchungen besser zugänglich.

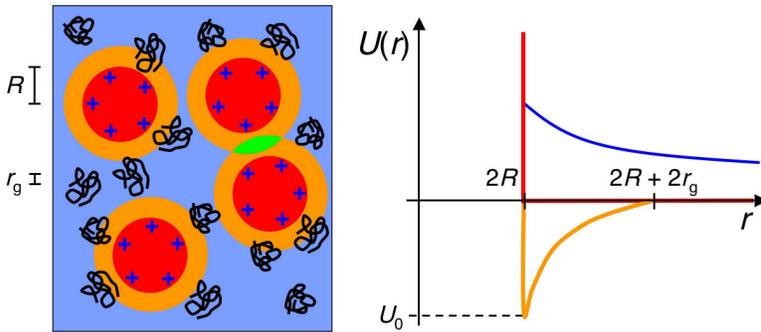


Abb. 2: Das einfache Wechselwirkungspotenzial  $U(r)$  harter Kugeln (rote Linie) kann durch Zugabe von nicht-adsorbierenden Polymeren (orange Linie) oder Aufbringen von Ladungen (blaue Linie) modifiziert werden.

Wie erwähnt, werden kolloidale Teilchen als „Modellatome“ benutzt, um das Phasenverhalten in Abhängigkeit von den Wechselwirkungen zu untersuchen (Abb. 3). Betrachten wir zunächst das einfachste System: harte Kugeln. Hier ist die einzige freie Variable die Volumensfraktion  $\Phi$  der Teilchen (Abb. 3, Volumensfraktionsachse). Für Volumensfraktionen unter 0,494 liegt eine kolloidale Flüssigkeit vor, d. h., die Teilchen sind ungeordnet. Dagegen werden für Volumensfraktionen über 0,545 kolloidale Kristalle mit einer regelmäßigen Anordnung der Teilchen beobachtet.<sup>1</sup> Obwohl es mehr Möglichkeiten gibt, Teilchen ungeordnet als geordnet vorzufinden, ist die Entropie einer kristallinen Ordnung höher, da die einzelnen Teilchen dann ein größeres freies Volumen zur Verfügung haben. Hier handelt es sich also um einen Ordnungsübergang, der durch Entropie verursacht wird. Wird jetzt durch die Zugabe von nicht-adsorbierendem Polymer eine anziehende Wechselwirkung induziert, so kann – unter geeigneten Bedingungen – zusätzlich eine Koexistenz von verdünnten, ungeordneten kolloidalen Gasen mit konzentrierteren, aber ebenfalls auf größeren Längenskalen ungeordneten, kolloidalen Flüssigkeiten beobachtet werden. Kolloidale Systeme – im Gegensatz zu atomaren oder molekularen Systemen – erlauben nun, die Bildung dieser beiden Phasen in Abhängigkeit von den Wechselwirkungen detailliert und quantitativ zu studieren. Studien<sup>2</sup> zeigten, dass Gas und Flüssigkeit nur gemeinsam existieren können, falls die anziehende Wechselwirkung eine Reichweite von mindestens etwa einem Drittel der Teilchengröße besitzt.

<sup>1</sup> Für Volumensfraktionen zwischen 0,494 und 0,545 findet man eine Koexistenz von Flüssigkeit und Kristall.

<sup>2</sup> Vgl. beispielsweise Ilett *et al.* (1995).

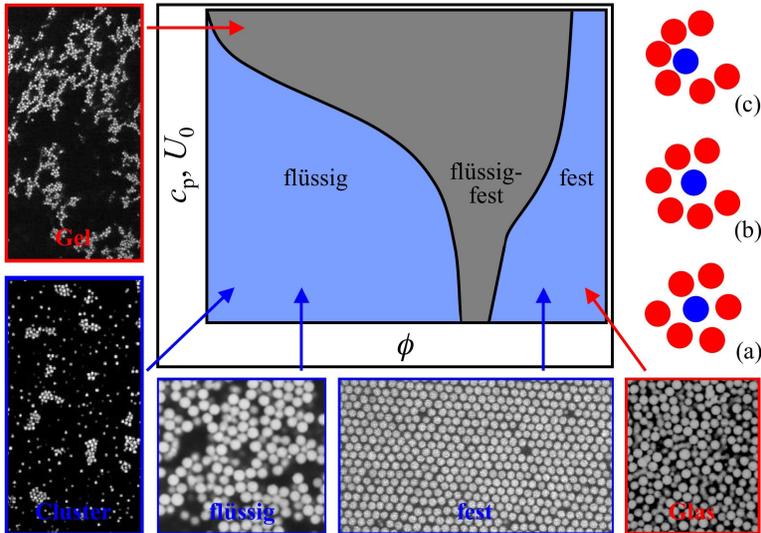


Abb. 3: In Abhängigkeit von der Volumensfraktion  $\Phi$  und der Stärke der Anziehung  $U_o$  bilden sich verschiedene Gleichgewichtsphasen, wie Flüssigkeit, Festkörper und Cluster (blauer Rand), und Nichtgleichgewichtszustände, wie Gläser und Gele (roter Rand). Konfokale Mikroskopieaufnahmen zeigen Beispiele für die Struktur der entsprechenden Proben. Die Stärke der Anziehung  $U_o$  wird durch die Konzentration des Polymers  $c_p$  kontrolliert, wobei es sich hier um ein relativ kleines Polymer und daher um eine kurzreichweitige Wechselwirkung handelt. Die Sequenz von Strukturen, wie sie bei der Zugabe von Polymer bei hohen Volumensfraktionen beobachtet wird, ist rechts schematisch dargestellt (a-c) mit „abstoßendem Glas“ (a) und „attraktivem Glas“ (c).

Neben diesem Gleichgewichtsverhalten richtet sich das Interesse vermehrt auf Nichtgleichgewichtszustände. Für harte Kugeln stellen ab einer Volumensfraktion von 0,545 bis zur dichtesten Kugelpackung bei einer Volumensfraktion von 0,74 kolloidale Kristalle den thermodynamisch günstigsten Zustand dar. Für Volumensfraktionen über 0,58 wird jedoch eine ungeordnete, flüssigkeitsähnliche Struktur beobachtet (Abb. 3). Die einzelnen Teilchen sind in einem Käfig aus Nachbarpartikeln gefangen (Abb. 3a) und behindern sich dadurch gegenseitig in ihrer Bewegungsfreiheit. Deshalb können sie ihre Gitterplätze nicht erreichen und verharren stattdessen in einem thermodynamisch ungünstigeren, ungeordneten Zustand. Dieser Zustand wird als Glas bezeichnet. Was passiert, wenn nun zusätzlich eine anziehende Wechselwirkung durch Zugabe von nicht-adsorbierendem Polymer induziert wird? Man könnte erwarten, dass die Teilchen noch stärker an ihre Käfige gebunden werden, sich damit ihre Beweglichkeit weiter reduziert und sich die Situation „verschlechtert“. Dies ist jedoch interessanterweise nicht der Fall. Durch die anziehende Wechselwirkung rücken die Nachbarn, die den Käfig bilden, näher zueinander. Dadurch entstehen im Käfig Lücken, durch die gefangene Teilchen entkommen und ihre Gitterplätze aufsu-

chen können (Abb. 3b). Ein kolloidaler Kristall kann gebildet werden. Was beobachten wir bei einer weiteren Erhöhung der Polymerkonzentration und damit einer Verstärkung der anziehenden Wechselwirkung? Die Lücken werden weiter vergrößert. Jetzt entweicht das gefangene Teilchen jedoch nicht, sondern bleibt durch die verstärkte Anziehung in der Nähe seiner Nachbarn und damit im Käfig (Abb. 3c). Insgesamt finden wir daher für hohe Volumensfraktionen  $\Phi$ , dass mit stärker werdender Anziehung (d. h., wir bewegen uns in Abb. 3 entlang dem rechten Rand nach oben) zunächst ein so genanntes „abstoßendes Glas“, dann ein kolloidaler Kristall und schließlich ein „attraktives Glas“ gebildet wird. Diesen Glas-Glas-Übergang konnten wir erstmals vor wenigen Jahren beobachten.<sup>3</sup>

Nichtgleichgewichtszustände können jedoch nicht nur bei hohen, sondern auch bei kleinen Volumensfraktionen auftreten. Sind die anziehenden Wechselwirkungen stark und kurzreichweitig (also bei hohen Konzentrationen relativ kleiner Polymere), so können bei geringen Volumensfraktionen fraktale Netzwerke aus kolloidalen Teilchen beobachtet werden, die die ganze Probe durchspannen (Abb. 3). Diese kolloidalen Gele bilden sich anstelle der thermodynamisch günstigeren Koexistenz von Kristall und Flüssigkeit. Sie können jedoch durch geeignete äußere Einwirkungen, wie leichte Scherung, in kolloidale Kristalle überführt werden.

Bei kolloidalen Gelen erstrecken sich die Netzwerke aus Teilchen über die gesamte Probe. Dies ändert sich, wenn die kurzreichweitige Anziehung, die zu den Gelen führt, mit einer langreichweitigen Abstoßung kombiniert wird, was durch das Aufbringen von Ladungen realisiert werden kann. Diese Abstoßung verhindert, dass die aus den Teilchen gebildeten Aggregate beliebig groß werden können. Es bilden sich deshalb einzelne Aggregate, so genannte Cluster (Abb. 3).<sup>4</sup> Im Gegensatz zu kolloidalen Gelen befinden sich Cluster im Gleichgewicht.

Diese Beispiele sollen illustrieren, dass Kolloide ein relativ einfach zu handhabendes und in einem weiten Bereich kontrollierbares Modellsystem für „große Atome“ sind. Die Analogie zwischen Atomen und kolloidalen Teilchen hat bereits zu sehr interessanten, fundamentalen Entdeckungen geführt und unser Verständnis von komplexen Systemen deutlich erweitert. Dies beruht auch auf einem sehr fruchtbaren Zusammenspiel zwischen Experiment, Theorie und Computersimulation.

## Nichtgleichgewichtsverhalten von Tensiden

Tenside sind Moleküle, die aus einem Wasser liebenden (hydrophilen) und einem Öl liebenden (lipophilen) Teil bestehen, die durch eine chemische Bindung miteinander verknüpft sind. Diese Bindung verhindert eine makroskopische Separation der beiden Teile, wie es bei der Mischung zweier getrennter Moleküle – beispielsweise Wasser und Fett beim Aufrahmen von Milch – der Fall wäre. Werden mehrere Tensidmoleküle in eine Flüssigkeit, zum Beispiel Wasser, gegeben, dann lagern sie sich zu einem Tensidaggregat zusammen. In diesen Aggregaten bilden die Öl liebenden Teile einen „Öltropfen“, der durch die Wasser liebenden Teile umgeben und damit vom Wasser abgeschirmt wird. Damit befinden sich beide Teile in einer für sie günstigen Umgebung. Diese „physikalische Bindung“ ist wesentlich schwächer als typische chemische Bindungen und kann deshalb

---

<sup>3</sup> Vgl. Pham *et al.* (2002).

<sup>4</sup> Vgl. Stradner *et al.* (2004).

leicht gebrochen, geknüpft oder umgelagert werden. Bei Tensidaggregaten handelt es sich daher um supramolekulare Strukturen mit einer enormen Dynamik. Außerdem werden ihre Größe und Form nicht nur von der chemischen Zusammensetzung der Tensidmoleküle bestimmt, sondern hängen auch von Parametern wie der Temperatur, der Konzentration, dem pH-Wert, der Ionenstärke oder der Gegenwart und Konzentration von Kotsiden ab. Dies erfordert einerseits eine genaue Kontrolle dieser Bedingungen, erlaubt aber andererseits eine gezielte Beeinflussung der Größe, Form und Dynamik von Tensidaggregaten. Ihre Form ist sehr vielfältig und schließt kleinere kugelförmige, scheibenförmige und mehr oder weniger flexible, polymerähnliche zylindrische Aggregate, so genannte Mizellen, genauso ein wie große, flache Doppelmembranen. Bei höheren Konzentrationen können diese Aggregate komplexere Strukturen, beispielsweise ein hexagonales Gitter zylindrischer Aggregate oder riesige Stapel von Doppelmembranen, bilden. Außerdem können Tensidaggregate teilweise enorme Mengen an Fetten, Ölen oder anderen wasserunlöslichen Stoffen aufnehmen und je nach Bedingung stabile Mikroemulsionen oder langlebige, aber instabile Emulsionen bilden. Daraus ergibt sich ihre Verwendung als Reinigungsmittel. Weitere, sehr interessante, zum Beispiel mechanische, optische oder grenzflächenaktive Eigenschaften begründen ihre allgemeine technologische Bedeutung.

Das Verständnis von Tensidaggregaten unter Gleichgewichtsbedingungen – wie oben beschrieben – hat sehr große Fortschritte gemacht. Hingegen sind wir bei der Untersuchung von strukturellen Umwandlungen zwischen verschiedenen Aggregatformen und den Möglichkeiten ihrer Kontrolle erst am Anfang. Zwei aktuelle Projekte sollen dies veranschaulichen.

Tenside sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Wir benutzen sie täglich, insbesondere zu Reinigungszwecken, in der Form von Waschmittel, Spülmittel, Shampoo, Seife, Bodenreiniger usw. Dabei benutzen wir in der Regel konzentrierte Produkte, die kurz vor oder während des Gebrauchs mit Wasser verdünnt werden. Dies stellt einen Nichtgleichgewichtsvorgang dar, der – trotz seiner enormen industriellen Bedeutung – noch erstaunlich schlecht verstanden ist. Wir interessieren uns besonders für die Vorgänge, die nach dem Kontakt von Doppelmembranenstapeln, so genannter lamellarer Phase, mit Wasser ablaufen.<sup>5</sup> Dabei können an der Grenzfläche erstaunlich komplexe und faszinierende Strukturen, so genannte Myeline, auftreten (Abb. 4A). Myeline sind zylinderförmig mit einem äußeren Durchmesser von einigen hundertstel Millimetern und einer lauchähnlichen Struktur mit zahlreichen konzentrischen Doppelmembranen. Weder der Grund für ihre Bildung noch die Ursachen für ihre teilweise außergewöhnlichen Formen sind bekannt. Wir versuchen zum besseren Verständnis sowohl der Myeline als auch der Auflösung von Tensidaggregaten im Allgemeinen beizutragen. Wir haben inzwischen Hinweise auf die Parameter, die das Wachstum der Myeline und anderer Strukturen bestimmen. Damit können wir beginnen, das anfängliche Wachstum von „Tensidtropfen“ quantitativ zu verstehen und auch vorauszusagen.

Während das obige Projekt der Auflösung von Stapeln von Doppelmembranen gewidmet ist, untersuchen wir auch die Bildung von Doppelmembranen. Zellmembranen stellen natürliche Beispiele für Doppelmembranen dar und sind mit für das große internationale Interesse an Doppelmembranen verantwortlich. Sie müssen vielfältige Aufgaben erfüllen,

---

<sup>5</sup> Vgl. Buchanan *et al.* (2000).

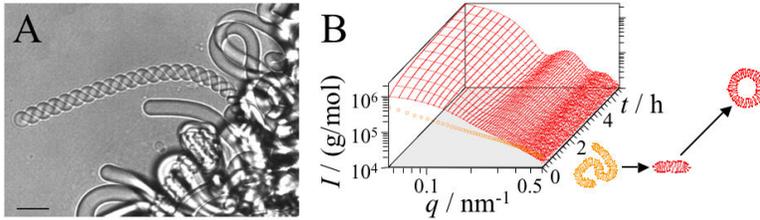


Abb. 4: (A) Nach dem Kontakt von lamellarer Phase (rechts) mit Wasser (links) können Instabilitäten an der Grenzfläche, so genannte Myeline, beobachtet werden. Der Balken entspricht 20  $\mu\text{m}$ . (B) Der Übergang von zylindrischen Mizellen zu Vesikeln kann mit zeitaufgelöster Kleinwinkelneutronenstreuung verfolgt werden. Die Entwicklung der Streuintensität  $I(q)$  als Funktion des Streuvektors  $q$  mit der Zeit  $t$  erlaubt Rückschlüsse auf die Sequenz intermediärer Strukturen.

darunter die Signalweitergabe, die Aufnahme von Nährstoffen oder die Verhinderung von Viren- oder Toxininkorporation. Diese Aufgaben erfordern unterschiedliche strukturelle Umwandlungen der Zellmembran und damit Nichtgleichgewichtsvorgänge. Wir untersuchen einfache Modelle für Zellmembranen, so genannte Vesikel. Vesikel sind geschlossene Doppelmembranen, d. h. Kugelschalen, in deren Innerem sich Lösungsmittel befindet. Wir interessieren uns besonders für die Bildung von Vesikeln – und damit Doppelmembranen – aus kleinen kugelförmigen oder zylindrischen Mizellen. Die Kleinwinkelneutronenstreuung ist eine sehr leistungsfähige Messmethode, um diese Aggregate zu untersuchen. Durch technische Weiterentwicklungen konnte die Zeitauflösung von Neutronenstreuexperimenten so weit verbessert werden, dass wir den Übergang von Mizellen zu Vesikeln mit zeitaufgelöster Neutronenstreuung verfolgen konnten (Abb. 4B).<sup>6</sup> Inzwischen konnten wir diese experimentellen Ergebnisse durch ein theoretisches Modell erklären, das diesen Übergang quantitativ beschreibt.<sup>7</sup> Während diese Vesikel nur ein einziges Lipid enthalten, bestehen Zellmembranen aus zahlreichen verschiedenen Lipiden. Gemischte Doppelmembranen, insbesondere die Anordnung und Dynamik der verschiedenen Lipide innerhalb der Doppelmembran, versprechen noch zahlreiche, interessante physikalische Überraschungen bereitzuhalten, denen wir uns vermehrt widmen.

## Biomoleküle

Wichtige Biomoleküle, wie Proteine, DNA<sup>8</sup> und Lipide, fallen aus Sicht der Physik in den Bereich der weichen Materie. Warum gelingt es, biologische Systeme trotz ihrer Komplexität mit den relativ einfachen Konzepten der weichen Materie erfolgreich zu beschreiben? Wenn wir die Eigenschaften von Kolloiden oder Tensiden beschreiben, berücksichtigen wir – wie oben ausgeführt – deren chemische Zusammensetzung nicht oder nur sehr eingeschränkt. Trotz oder gerade wegen dieser starken Einschränkung oder „Vergrößerung“ gelingt es, die wesentlichen Eigenschaften dieser teilweise enorm komplexen Systeme

<sup>6</sup> Vgl. Egelhaaf und Schurtenberger (1999).

<sup>7</sup> Vgl. Leng *et al.* (2003).

<sup>8</sup> Desoxyribonukleinsäure

erfolgreich zu erfassen. Diese grundlegenden physikalischen Konzepte lassen sich dann auf ganze Klassen von Systemen anwenden. Ähnlich ist das Vorgehen bei Biomolekülen, wenn Proteine als Kolloide, DNA als Polymer und komplexe Mischungen aus Lipiden als Tensidsysteme behandelt werden. Inzwischen wird bereits versucht, Eigenschaften von ganzen Zellen oder Bakterien so zu beschreiben. Diese Vergrößerung liefert nicht nur wichtige Information über die wesentlichen Charakteristika von biologischen Systemen, sondern kann auch Hinweise auf deren Besonderheiten geben, wenn die Vergrößerung nicht gelingt.

Das Wechselspiel zwischen den Lebenswissenschaften und der Physik der weichen Materie findet auf verschiedenen Ebenen statt, deren Grenzen allerdings oft verschwimmen. Einerseits können in der Physik entwickelte Messtechniken und Konzepte auf Fragestellungen der Lebenswissenschaften angewendet werden, um mit Hilfe der Physik zu deren Lösung beizutragen. Zwei Beispiele werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt. Andererseits können biologische Systeme als gut definierte Modellsysteme zur Beantwortung physikalischer Fragestellungen benutzt werden. Dies ist beispielsweise bei den oben erwähnten Vesikeln der Fall. Außerdem haben wir Untersuchungen zum oben beschriebenen Phasenverhalten nicht nur mit den erwähnten synthetischen Kolloiden durchgeführt, sondern auch mit Proteinlösungen, die im Gegensatz zu synthetischen Kolloiden aus vollständig identischen Teilchen bestehen. Dabei profitiert die Physik von einem idealen Modellsystem, das von der Biologie bereitgestellt wird. Gleichzeitig fördern diese Studien unser Wissen über das Phasenverhalten von Proteinlösungen, insbesondere über die Bedingungen für Proteinkristallisation.<sup>9</sup> Biologische Fragestellungen können auch zu interessanter „biologieinspirierter Physik“ führen, die nicht mehr unbedingt von direkter Relevanz für die Lebenswissenschaften ist. Die oben vorgestellten Untersuchungen zur Struktur und Dynamik von Vesikeln, insbesondere solche an Modellsystemen, die aus Lipidmischungen bestehen, werden maßgeblich durch biologische Systeme inspiriert, können aber auch innerhalb der Physik als völlig eigenständige, faszinierende Fragestellungen bestehen.

Das *Proliferating Cell Nuclear Antigen* (PCNA) ist ein Protein, das als Trimer DNA umschließen kann und dann als „bewegliche Plattform“ für andere Proteine dient. Es wurde angenommen, dass PCNA in Lösung als Monomer vorliegt und erst in der Gegenwart von DNA Trimere gebildet werden, die dann diese DNA umschließen. Dies wäre ein einfacher Mechanismus, um Positionen innerhalb einer üblicherweise sehr langen DNA zu erreichen. Wir haben diesen Mechanismus mit Hilfe der Kleinwinkelneutronenstreuung an Lösungen von humanem PCNA überprüft.<sup>10</sup> Aber selbst bei Abwesenheit von DNA konnten wir nur Trimere finden. Deren Streuintensität wurde als Funktion des Streuwinkels genau bestimmt (Abb. 5A), um Informationen über die Struktur des Trimers in Lösung zu erhalten. Basierend auf der bekannten Kristallstruktur von Hefe-PCNA haben wir die erwartete Streukurve errechnet (Abb. 5A, blaue Kurve), die zwar im Wesentlichen mit der gemessenen Streukurve übereinstimmt, aber dennoch signifikante Abweichungen zeigt. Diese Abweichungen können entweder auf Unterschieden zwischen Hefe- und humanem PCNA oder zwischen Kristall- und Lösungsstruktur beruhen. Eine eindeutige Zuordnung der Abweichungen ist durch die Komplexität der Proteinstruktur mit ihren etwa 10.000

---

<sup>9</sup> Vgl. Tanaka *et al.* (2004).

<sup>10</sup> Vgl. Schurtenberger *et al.* (1998).

Atomen jedoch sehr schwierig. Hier kann die beschriebene Methode der Vergrößerung weiterhelfen. Jedes PCNA-Molekül besteht aus zwei sehr ähnlich gefalteten Domänen, so dass für das Trimer eine sechsfache Symmetrie erwartet wird. Das einfachste Modell, das die für das Trimer charakteristische Eigenschaft der sechsfachen Symmetrie beinhaltet, ist ein Hexamer-Modell. Die Streukurve für das Hexamer-Modell zeigt, von einer kleinen Abweichung abgesehen, eine verblüffende Übereinstimmung mit den Neutronenstreudaten (Abb. 5A, grüne Kurve). Die Abweichung bei  $q \sim 3 \text{ nm}^{-1}$  lässt sich auf die angenommenen Kontaktpunkte – anstelle von realistischeren Kontaktflächen – zwischen den Kugeln des Hexamer-Modells zurückführen. Die erfolgreiche Untersuchung der Lösungsstruktur eines Proteins wurde hier durch die Anwendung einer physikalischen Messtechnik und der entsprechenden Auswertungsmethode ermöglicht.

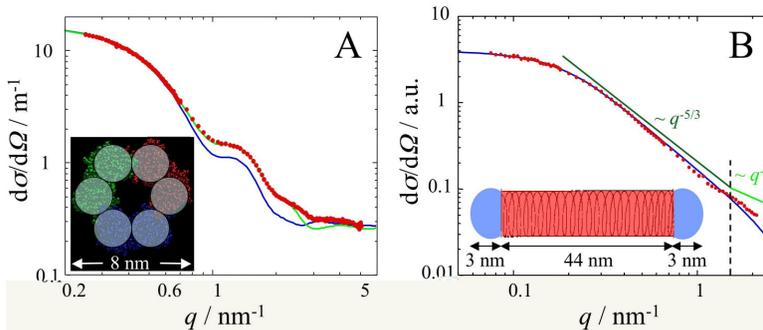


Abb. 5: Die Kleinwinkelneutronenstreuung erlaubt die Bestimmung der Lösungsstruktur von Biomolekülen. Die Abbildungen zeigen die normalisierte Streuintensität  $d\sigma/d\Omega$  als Funktion des Streuvektors  $q$ . (A) Die Streudaten von humanem PCNA (rote Punkte) wurden mit den Daten verglichen, die aufgrund der Kristallstruktur von Hefe-PCNA (blaue Linie) bzw. einem einfachen Hexamer-Modell (grüne Linie) berechnet worden waren. (B) Die Streudaten des Mittelteils von Gluten wurden mit Hilfe von Konzepten, die in der Polymerphysik entwickelt wurden, ausgewertet. Für ein flexibles Polymer mit ausgeschlossenen Volumen fällt die Intensität proportional zu  $q^{-5/3}$  ab, während für einen steifen Zylinder oder – wie hier – für ein Polymer auf Längenskalen unter der Persistenzlänge die Intensität proportional zu  $q^{-1}$  abfällt.

Das Protein Gluten ist einer der Hauptbestandteile von Brot. Es besteht aus einem zylindrischen Mittelteil, der von zwei globulären Domänen flankiert wird. Die globulären Enden verschiedener Proteine sind durch Disulfidbrücken miteinander verbunden und bilden so ein elastisches Netzwerk. Es wurde davon ausgegangen, dass der etwa 50 nm lange, zylindrische Mittelteil steif sei. Wir untersuchten diese Annahme mit Hilfe der Kleinwinkelneutronenstreuung detailliert<sup>11</sup> und stellten fest, dass das Gegenteil der Falls ist: Der zylindrische Mittelteil ist sehr flexibel. Eine genaue Auswertung unserer Streudaten (Abb. 5B) mit Hilfe moderner Methoden der Polymerphysik erlaubte es uns, die Flexibilität, den Durchmesser und die Konturlänge des Mittelteils quantitativ zu bestimmen. Basierend auf diesen Werten und Theorien der Elastizität von Polymernetzwerken können

<sup>11</sup> Vgl. Egelhaaf *et al.* (2003).

wir nun versuchen, die mechanischen Eigenschaften von Glutennetzwerken quantitativ zu verstehen. Hier werden daher nicht nur Messmethoden aus der Physik für ein biotechnologisches Problem benutzt, sondern auch Theorien und Konzepte, die in der Physik der weichen Materie entwickelt wurden, in enger Zusammenarbeit mit Lebenswissenschaftlern angewendet.

## Zusammenfassung

Die Physik der weichen Materie ist ein relativ junges Gebiet der Physik, in dem versucht wird, komplexe Systeme mit Strukturen in der Größenordnung von Nanometern besser zu verstehen. Dabei richtet sich das internationale Interesse vermehrt auf komplizierte Systeme, beispielsweise Mischungen aus verschiedenartigen Teilchen, oder komplizierte Bedingungen, insbesondere Nichtgleichgewichtsbedingungen.<sup>12</sup> Letztere schließen den Einfluss äußerer Kräfte ebenso ein wie Übergänge zwischen verschiedenen Gleichgewichtszuständen, wobei die Übergänge – wie bei den oben erwähnten Gläsern – nicht zwingend vollständig ablaufen müssen, sondern auch zu instabilen, aber sehr langlebigen Zuständen führen können.

Außer synthetischen Systemen werden auch verschiedene Biomoleküle, wie Proteine, DNA oder Zellmembranen, mit den Messtechniken und Konzepten, die in der Physik der weichen Materie entwickelt wurden, studiert. Insbesondere das zunehmende Interesse an immer komplexeren Systemen sowie Nichtgleichgewichtsbedingungen erhöht die Relevanz für Fragestellungen der Lebenswissenschaften. Sowohl die Lebenswissenschaften als auch die Physik können von diesen Wechselwirkungen profitieren.

Durch die „alltägliche“ Größenordnung von Systemen, die der weichen Materie zugeordnet werden, schließen diese auch zahlreiche Produkte, besonders Nahrungsmittel, Reinigungsmittel, Kunststoffe und andere moderne Werkstoffe, ein. Dies begründet die technologische Bedeutung der weichen Materie. Auch dabei sind oft Nichtgleichgewichtsbedingungen besonders interessant, da diese in industriellen Prozessen und zahlreichen Produkten angetroffen werden.

Das Gebiet der weichen Materie lebt von diesem interdisziplinären Wechselspiel, das sich von der Physik bis zur Chemie und Biologie, aber auch zur Medizin und Pharmazie erstreckt. Außerdem reicht es von sehr grundlegenden Fragestellungen bis zu vielfältigen technologischen Anwendungen. Es ist nicht zuletzt diese sich gegenseitig ergänzende Vielfalt, die den Bereich der weichen Materie zu einem faszinierenden interdisziplinären Forschungsgebiet macht, das sich im Moment sehr dynamisch entwickelt.

## Literatur

- BUCHANAN, Mark, Stefan U. EGELHAAF und Michael E. CATES. „Dynamics of interface instabilities in nonionic lamellar phases“, *Langmuir* 16 (2000), 3718-3726.
- EGELHAAF, Stefan U. und Peter SCHURTENBERGER. „Micelle-to-vesicle transition: a time-resolved structural study“, *Physical Review Letters* 82 (1999), 2804-2807.

---

<sup>12</sup> Vgl. Löwen (2001).

- EGELHAAF, Stefan U., Eric VAN SWIETEN, Tjibbe BOSMA, Esther DE BOEF, Alard A. VAN DIJK und George T. ROBILLARD. „Size and shape of the repetitive domain of high molecular weight wheat gluten proteins. I. Small-angle neutron scattering“, *Biopolymers* 69 (2003), 311-324.
- ILETT, Steve M., Alison ORROCK, Wilson C. K. POON und Peter N. PUSEY. „Phase behaviour of a model colloid-polymer mixture“, *Physical Review E* 51 (1995), 1344-1352.
- LENG, Jacques, Stefan U. EGELHAAF und Michael E. CATES. „Kinetics of the micelle-to-vesicle transition: aqueous lecithin-bile salt mixtures“, *Biophysical Journal* 85 (2003), 1624-1646.
- LÖWEN, Hartmut. „Colloidal soft matter under external control“, *Journal of Physics: Condensed Matter* 13 (2001), R415-R432.
- PHAM, Khoa N., Antonio M. PUERTAS, Johan BERGENHOLTZ, Stefan U. EGELHAAF, Abdellatif MOUSSAID, Peter N. PUSEY, Andrew B. SCHOFIELD, Michael E. CATES, Matthias FUCHS und Wilson C. K. POON. „Multiple glassy states in a simple model system“, *Science* 296 (2002), 104-106.
- SCHURTENBERGER, Peter, Stefan U. EGELHAAF, Robert HINDGES, Giovanni MAGA, Zophonías O. JÓNSSON, Roland P. MAY, Otto GLATTER und Ulrich HÜBSCHER. „The solution structure of functionally active human proliferating cell nuclear antigen determined by small-angle neutron scattering“, *Journal of Molecular Biology* 275 (1998), 123-132.
- STRADNER, Anna, Helen SEDGWICK, Frédéric CARDINAUX, Wilson C. K. POON, Stefan U. EGELHAAF und Peter SCHURTENBERGER. „Equilibrium cluster formation in concentrated protein solutions and colloids“, *Nature* 432 (2004), 492-495.
- TANAKA, Shinpei, Stefan U. EGELHAAF und Wilson C. K. POON. „Crystallization of a globular protein in lipid cubic phase“, *Physical Review Letters* 92 (2004), 128102-1-128102-4.



