

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg  
**Herausgeber:** Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles  
**Band:** 91 (2002)  
  
**Artikel:** Weiche Materie : die Physik von Seife, Wasser und Oel  
**Autor:** Schurtenberger, Peter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-308826>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 29.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Weiche Materie – Die Physik von Seife, Wasser und Öl

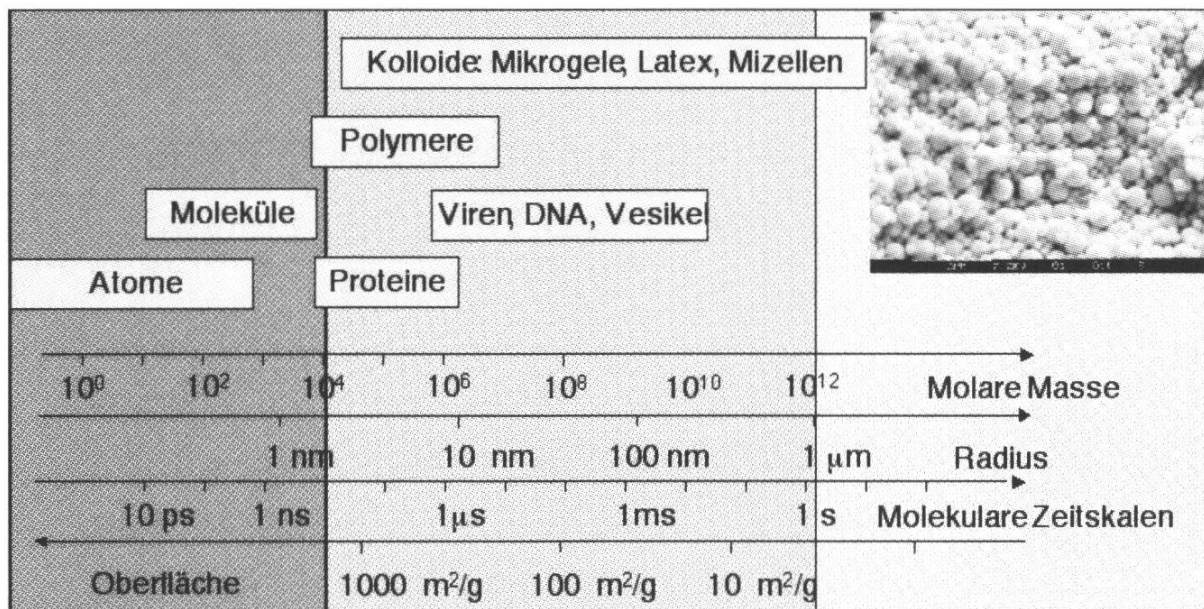
Peter SCHURTENBERGER, Departement für Physik,  
Universität Freiburg, 1700 Freiburg  
(<http://www.unifr.ch/physics/mm/>)

## 1. Einleitung

«Weiche kondensierte Materie» (engl. «*soft condensed matter*») steht für einen international sehr schnell expandierenden Wissenschaftsbereich, in dem primär drei komplementäre Gebiete untersucht werden: Kolloide, Polymere und sogenannte Assoziationskolloide (oder selbstorganisierende Systeme von Tensiden). Wie der Name schon andeutet, handelt es sich dabei um weiche Materialien, d.h. sie lassen sich leicht durch eine äussere Spannung oder sogar reine thermische Fluktuationen deformieren. Die relevante Längenskala für diese Materialien ist dabei typischerweise viel grösser als die entsprechenden atomaren oder molekularen Dimensionen, und die Struktur und Dynamik auf mesoskopischen Längenskalen bestimmt ihre makroskopischen Eigenschaften [1,2]. In Figur 1 sind einige Beispiele für die typischen Längen- und Zeitskalen von Systemen aus der Physik der weichen kondensierten Materie dargestellt.

Seit dem Sommer 1999 ist im Departement für Physik der Universität Freiburg eine neue Gruppe entstanden, die sich mit diesem Thema befasst. Ziel ist dabei das Verständnis der Bildungsprozesse, der Struktur und der funktionellen Eigenschaften der sich bildenden supramolekularen Systeme, die eine wichtige Rolle im realen Leben spielen. Dabei konzentrieren wir uns ganz besonders auf kolloidale Suspensionen und deren Rolle in Grundlagen- und angewandter Forschung.

Kolloide sind kleine Teilchen (fest, flüssig oder gasförmig) mit einer Grösse zwischen 1 nm und 1  $\mu$ m, dispergiert in einem Medium (Gas, Flüssigkeit oder Festkörper). Typische Beispiele für Kolloide sind feste Partikel in wässrigen oder nicht-wässrigen Medien (Keramiken, Lacke, ...), wie sie in der modernen Werkstoffherstellung immer mehr verwendet werden, oder kleine Flüssigkeitströpfchen dispergiert in einer Flüssigkeit (Milch, Mayonnaise, Butter, Bier, Kosmetika, ...), wie wir sie aus unserem täglichen Leben kennen. Kolloide tauchen in nahezu allen Bereichen unseres Lebens auf, und es existiert eine Fülle von technischen Anwendungen wie z.B. in der Werk-

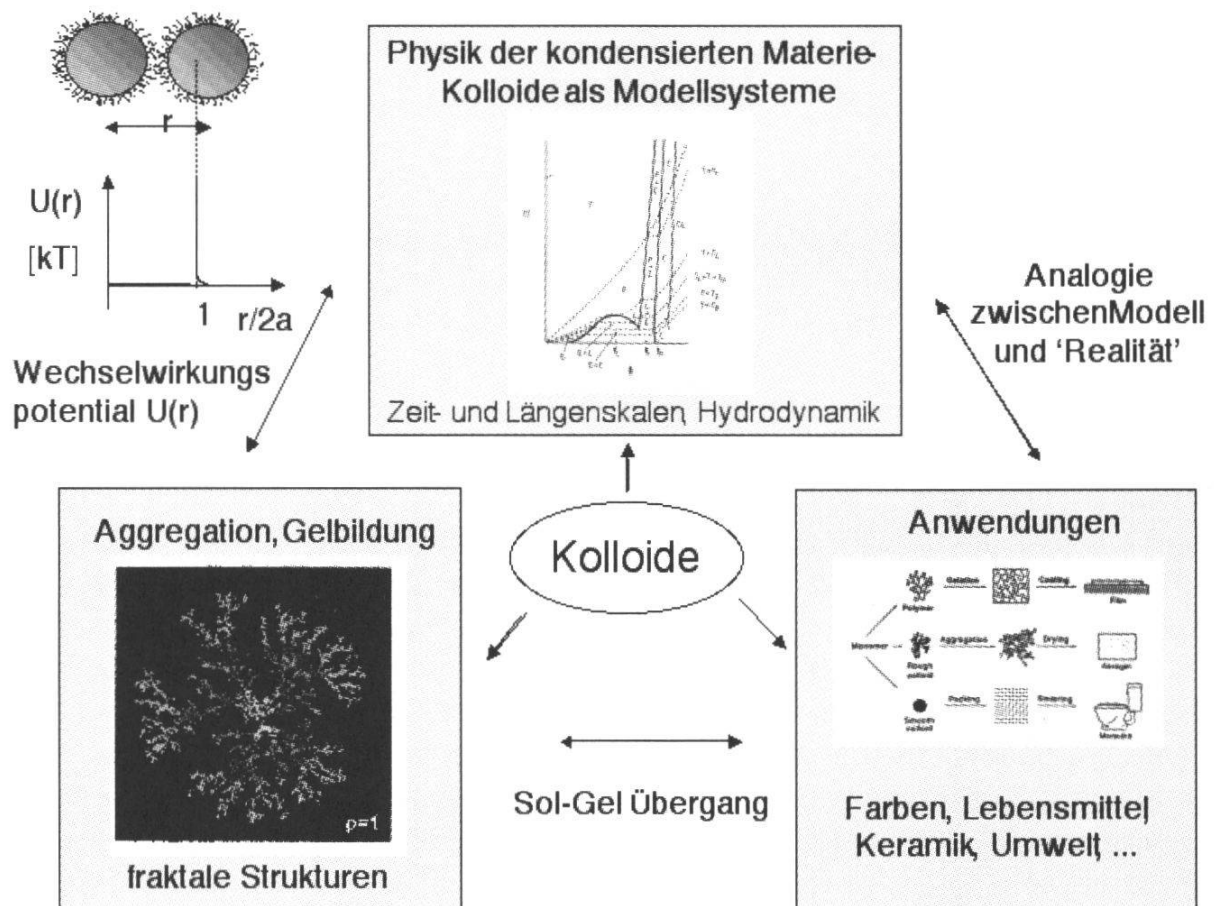


**Fig. 1** Die typischen Zeit- und Längenskalen von Systemen aus der Physik der weichen kondensierten Materie im Vergleich zu denjenigen atomarer oder molekularer Systeme.

stoffentwicklung, Rohstoffaufbereitung, bei Waschprozessen, der tertiären Erdölförderung, umwelttechnologischen Problemen wie der Entfernung von Schwebeteilchen, in der Lebensmitteltechnologie, aber auch in vielen Gebieten der Biologie, Pharmazie und Medizin.

Während vieler Jahre war die Kolloidforschung eine reine Domäne der Chemiker und Ingenieure. Seit den 80er Jahren kann man jedoch eine eigentliche Renaissance der Kolloidwissenschaften beobachten, und die Physiker spielen dabei eine immer wichtigere Rolle [2]. Dazu beigetragen haben einerseits die Verfügbarkeit neuer experimenteller Techniken für die Charakterisierung der Struktur und Dynamik kolloidaler Systeme im Nanometerbereich wie neue Streutechniken (Röntgen- und Neutronenstreuung, dynamische Lichtstreuung), mikroskopische Verfahren (Elektronenmikroskopie, Videomikroskopie in allen Varianten wie z.B. der konfokalen Mikroskopie, verschiedenste Sondentechniken wie Atomkraft- oder Tunnelmikroskopie), und andererseits die Anwendung von neuen theoretischen Konzepten. So haben sich Kolloide als ideale Modellsysteme für Anwendungen der fraktalen Geometrie, Computersimulationen (Monte Carlo, Brown'sche Dynamik oder Molekulardynamiksimulationen), Perkulationsmodelle und viele weitere Methoden der statistischen Physik erwiesen. Desweiteren wurde erkannt, dass kolloidale Suspensionen als ideale Modellsysteme für die Untersuchung einer ganzen Reihe von Problemen aus der Physik der kondensierten Materie verwendet werden können [1,3]. Dazu gehören Ordnungs-Unordnungs-Übergänge (Bildung von Flüssigkristallen oder Kristallen, Schmelzprozesse), Glasbildung, Phasenübergänge oder die Dynamik komplexer statistischer

Systeme, da sich dabei im Gegensatz zu atomaren Systemen die entsprechenden Wechselwirkungspotentiale, Zeit- und Längenskalen fast beliebig variieren lassen. Dieses Wechselspiel zwischen dem Gebrauch kolloidaler Suspensionen als Modellsysteme für die Untersuchung fundamentaler Prozesse in kondensierter Materie, der Untersuchung transientser Phänomene wie der Aggregation und Gelbildung, und der Anwendung auf Prozesse aus der modernen Werkstoff- oder Lebensmitteltechnologie ist schematisch in Figur 2 dargestellt.



**Figur 2:** Verschiedene Anwendungsbereiche von Kolloiden in der Untersuchung fundamentaler Eigenschaften der kondensierten Materie, der Beobachtung aggregierender und gelierender Systeme oder in den modernen Materialwissenschaften und Lebensmitteltechnologie.

In unserer Arbeitsgruppe in Freiburg haben wir uns deshalb das Ziel gesetzt, diese neuen und einzigartigen Möglichkeiten auszunützen und den Einfluss der Wechselwirkungen auf das Phasenverhalten und die Mikrostruktur und Dynamik dieser Systeme zu untersuchen und dabei auch Analogien

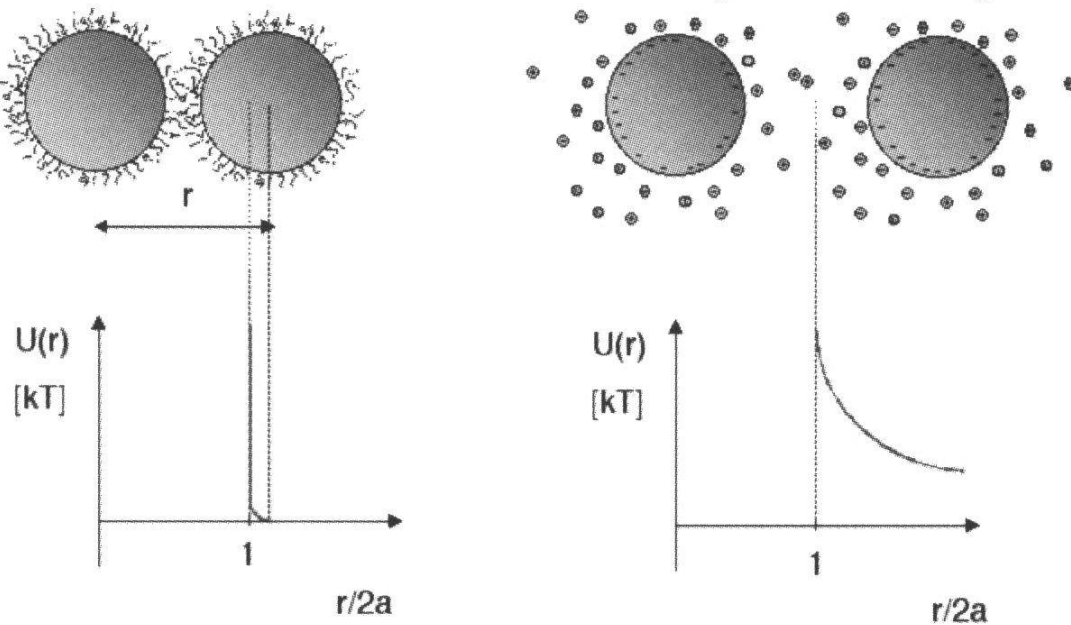
zum Verhalten atomarer und molekularer Systeme zu ziehen. Besondere Anstrengungen unternehmen wir hier, um die diffusive Bewegung der Partikel sowohl in stabilen konzentrierten Suspensionen als auch den Beginn der Aggregation und den sogenannten Sol-Gel Übergang in destabilisierten Systemen zu charakterisieren und zu verstehen. Das Fernziel ist dabei die Herstellung einer Verbindung zwischen der mikroskopischen Struktur und Dynamik und den resultierenden makroskopischen elastischen Eigenschaften dieser faszinierenden Nanomaterialien. Dazu kombinieren wir experimentelle (z.B. Streuexperimente, Rheologie, Mikroskopie) und theoretische (z.B. Brownian dynamics, Monte Carlo) Methoden.

## **2. Kolloide als Modellsysteme für stark korrelierte Flüssigkeiten und Gläser**

Die relevanten Grössen in kolloidalen Suspensionen sind typischerweise viel grösser als atomare oder molekulare Längenskalen. Die Struktur und die Dynamik auf dieser mesoskopischen Skala bestimmt denn auch die makroskopischen physikalischen Eigenschaften. Deshalb sind kolloidale Suspensionen ideal dazu geeignet, Phasenübergänge oder die Dynamik metastabiler Zustände wie Gläser zu untersuchen, da die entsprechenden Längen- (einige hundert Nanometer – Mikrometer) und Zeitskalen (Mikrosekunden – Stunden) eine Beobachtung sehr viel einfacher machen als in klassischen atomaren oder molekularen Systemen. Ausserdem kann in kolloidalen Systemen sowohl die Stärke als auch die Reichweite der Wechselwirkungen zwischen den Teilchen einfach verändert werden [1,3]. Damit wird es möglich, den Einfluss der Form, der Stärke und der Reichweite der Wechselwirkungen auf das Phasenverhalten und die Mikrostruktur und Dynamik zu untersuchen. Wir können z.B. kolloidale Partikel mit Polymeren beschichten und auf diese Weise auf Grund der sogenannten sterischen Repulsion ein nahezu ideales Modellsystem für harte Kugeln erreichen [4]. Auf der anderen Seite können wir geladene Kolloide mit relativ hohen Oberflächenladungsdichten synthetisieren, und nach Zugabe eines Ionentauschers Suspensionen mit sehr niedriger Ionenstärke herstellen, in denen die Partikel sich durch schwach abgeschirmte und entsprechend langreichweitige elektrostatische Wechselwirkungen stark abstossen, d.h. das entsprechende Potential entspricht dann einem sogenannten Yukawa-Potential [3]. Dies ist in Figur 3 schematisch dargestellt.

Mit diesen Systemen lassen sich eine Reihe von interessanten Experimenten durchführen, in denen die strukturellen und dynamischen Eigenschaften kolloidaler Systeme untersucht und mit denen von klassischen atomaren Flüssigkeiten, Kristallen und Gläsern verglichen werden können. Besonders geeignet dazu sind Streuexperimente, die uns eine zerstörungsfreie in-situ Beobachtung der Form und Grösse der Partikel (Formfaktor  $P(q)$  der Teil-

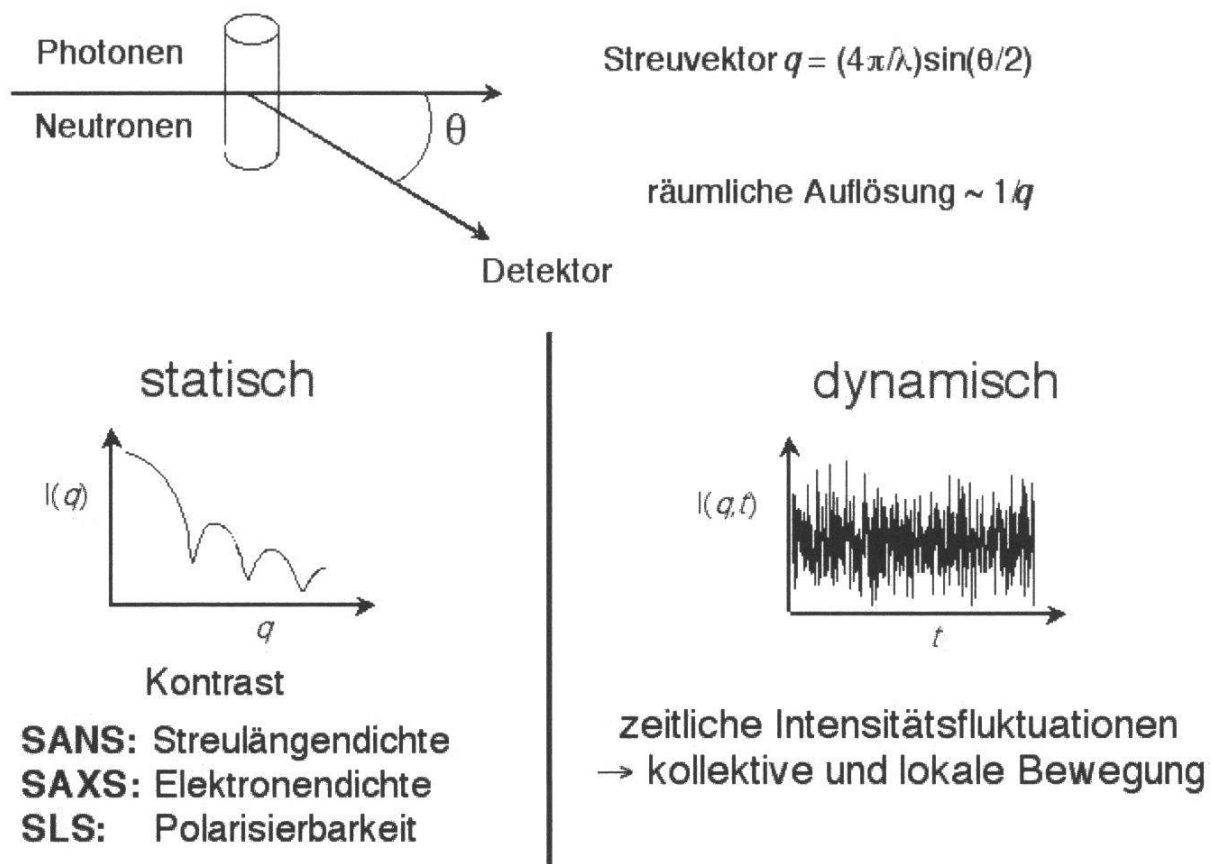
harte Kugeln: Polymerbeschichtete Teilchen "Yukawa" Teilchen: geladene Partikel



**Figur 3:** Wechselwirkungspotentiale für sterisch (= harte Kugeln) und elektrostatisch (Yukawa-Teilchen) stabilisierte Kolloide als Funktion des mit dem Teilchendurchmessers ( $2a$ ) normierten Abstandes.

chen), der Wechselwirkungseffekte, der daraus resultierenden Struktur (statischer Strukturfaktor  $S(q)$  der Teilchen) und der Dynamik (dynamischer Strukturfaktor  $S(q,t)$ ) erlauben [5,6]. Dies ist schematisch in Figur 4 dargestellt.

Dabei können wir einerseits sogenannte statische oder elastische Streuexperimente durchführen, indem wir die Intensität der gestreuten Photonen oder Neutronen als Funktion des Streuwinkels  $\theta$  oder des Streuvektors  $q$  messen. Der Streuvektor  $q$  liefert uns gleichzeitig das «Auflösungsvermögen» des Streuexperimentes, entspricht doch die charakteristische Längenskala, auf der Strukturen aufgelöst werden können, der Beziehung  $L \approx 2\pi/q$ . Andererseits können wir in einem sogenannten dynamischen oder quasielastischen Streuexperiment, in dem wir die zeitlichen Fluktuationen der Streuintensität bei verschiedenen Streuvektoren analysieren, Informationen über die Dynamik des Systems auf der charakteristischen Längenskala  $2\pi/q$  erhalten. Besonders interessant für die Untersuchung der weichen Materie sind dabei die Möglichkeiten, die uns die Verwendung unterschiedlicher Strahlung wie Licht, Röntgenstrahlung und Neutronen bieten. Dabei kann sowohl die Auflösung über die unterschiedliche Wellenlänge (Licht  $\lambda \approx 500$  nm, X-ray  $\lambda \approx 0.1$  nm, Neutronen  $\lambda \approx 0.1 - 1$  nm) als auch der Streukontrast sehr stark variiert und so gerade bei inhomogenen Materialien unterschiedliche Teilbereiche gezielt studiert werden.

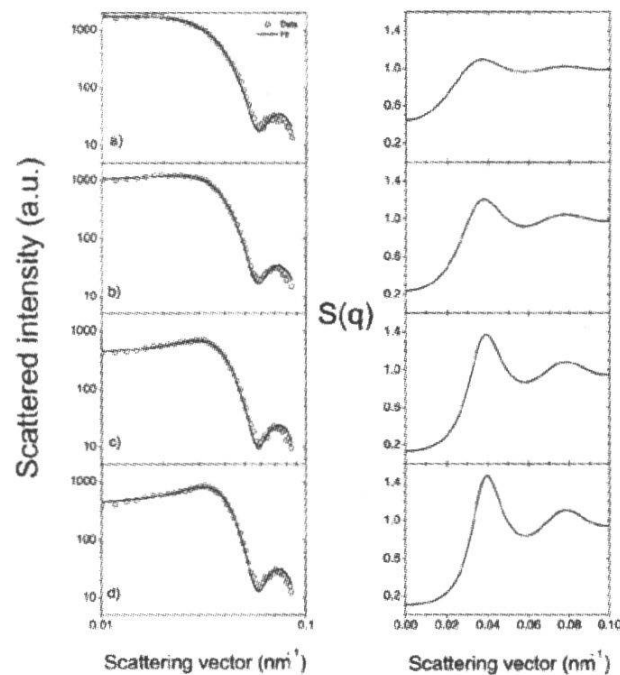


**Figur 4:** Schematische Darstellung eines Streuexperimentes, in dem Licht, Röntgenstrahlung oder Neutronen an einer kolloidalen Suspension gestreut und die resultierende Streuintensität entweder als Funktion des Streuvektors  $q$  zeitlich gemittelt gemessen oder ihre durch die Systemdynamik hervorgerufenen zeitlichen Fluktuationen analysiert werden.

Die Möglichkeiten, die uns Streuexperimente in der Untersuchung fundamentaler Eigenschaften kolloidaler Suspensionen bieten, sind an einem Beispiel in Figur 5 illustriert [7]. Hier ist der sogenannte statische Strukturfaktor  $S(q)$  einer kolloidalen Suspension bei verschiedenen Kolloidkonzentrationen dargestellt.  $S(q)$  ist dabei ein Mass für die Ordnung oder Struktur in einem Vielteilchensystem, und es stellt eine wichtige Grösse dar, die sowohl über Computersimulationen oder klassische Theorien für einfache Flüssigkeiten theoretisch berechnet als auch direkt und eingriffsfrei mit Streuexperimenten bestimmt werden kann [3].

Wir sehen hier, wie mit zunehmender Konzentration die Ordnung im System, ausgedrückt durch ein deutliches Maximum der Streuintensität bei einem Wert des Streuvektors  $q$ , der der charakteristischen Distanz  $d$  zwischen nächsten Nachbarn  $q \approx 2\pi/d$  entspricht, verstärkt auftritt. Die Suspension weist eine Struktur auf, die derjenigen einer stark unterkühlten Flüssigkeit entspricht. Ein Vergleich mit den entsprechenden theoretischen Berechnungen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experi-

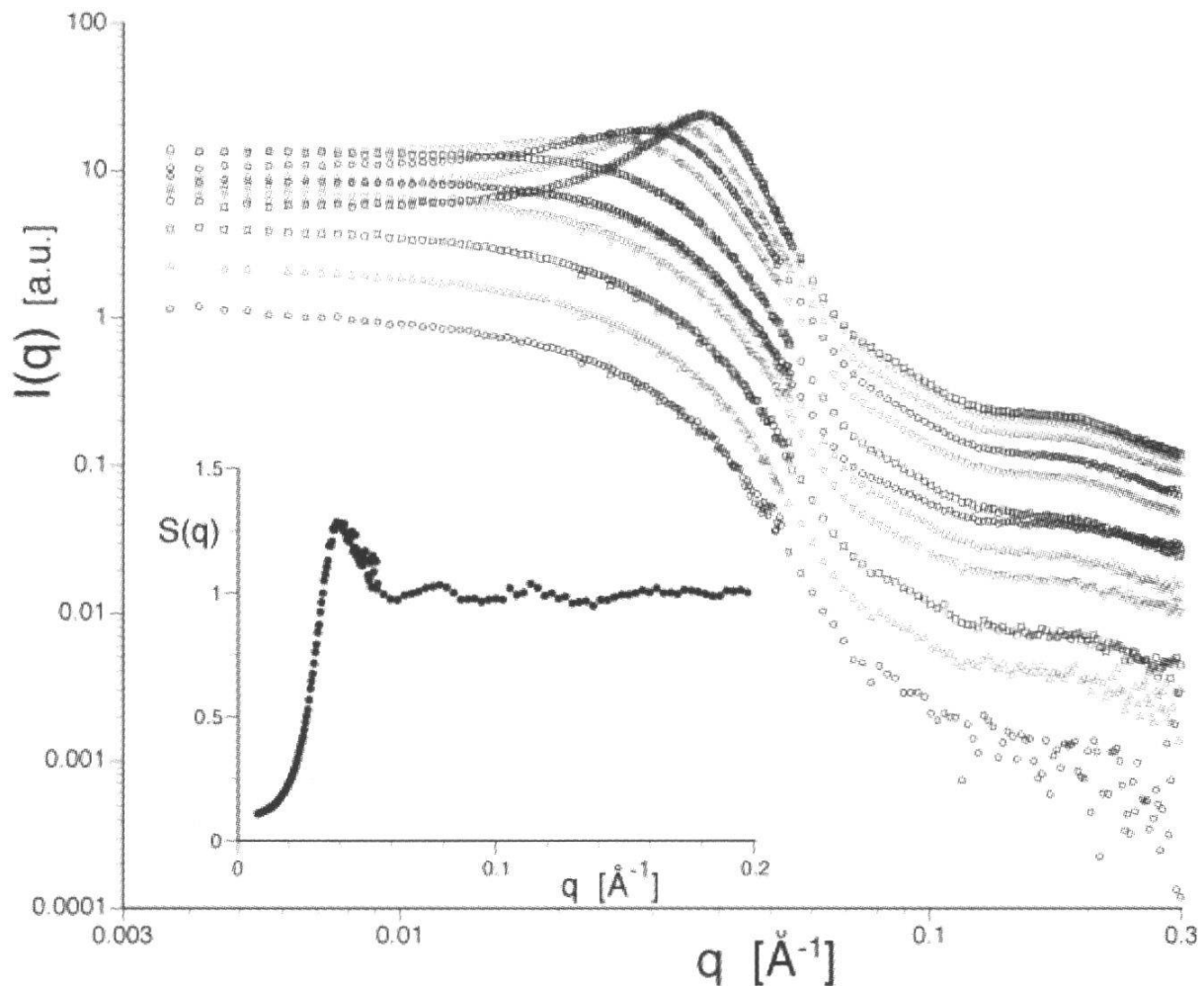
ment. Solche experimentellen Untersuchungen sind ausserordentlich wichtig im Hinblick auf neue und kontroverse Ergebnisse aus der Theorie stark wechselwirkender Suspensionen. Gleichzeitig erlauben sie es uns, mehr über die Wechselwirkungen zwischen kolloidalen Teilchen zu lernen. Dabei versuchen wir, die mit Hilfe einfacher Modellsysteme erarbeiteten Erkenntnisse auch auf komplexe Systeme, wie sie in der Natur oder in vielen Anwendungen auftreten, anzuwenden.



**Figur 5:** Streuintensität als Funktion des Streuvektors  $q$  (links) und der daraus resultierende statische Strukturfaktor  $S(q)$  (rechts) für kolloidale Suspensionen bei verschiedenen Volumensfraktionen  $\Phi$  (von oben nach unten: a)  $\Phi = 0.12$ , b)  $\Phi = 0.15$ , c)  $\Phi = 0.25$ , d)  $\Phi = 0.3$ ). Die Experimente wurden mit Kleinwinkelneutronenstreuung (SANS) gemacht, und die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen so eingestellt, dass diese denjenigen zwischen harten Kugeln entsprechen [7].

Ein Paradebeispiel dafür sind hochkonzentrierte Lösungen von Linsenproteinen, den sogenannten «Crystallins». Diese kommen in sehr hoher Konzentration in der Augenlinse vor und sind wesentlich für deren Funktion verantwortlich [8]. Im Falle der Starbildung (Cataract), der nach wie vor weltweit häufigsten Ursache für Blindheit, tritt eine verstärkte Streuung von Licht innerhalb der Augenlinse auf, und als Folge davon wird die Linse trübe und undurchsichtig. Diese verstärkte Trübung kann z.B. durch Aggregation der Linsenproteine oder auf Grund einer Phasentrennung [9] auftreten, und es ist deshalb ausserordentlich wichtig, mehr über die dominierenden Wechselwirkungen zwischen den Proteinen der Augenlinse zu lernen. Wir setzen darum

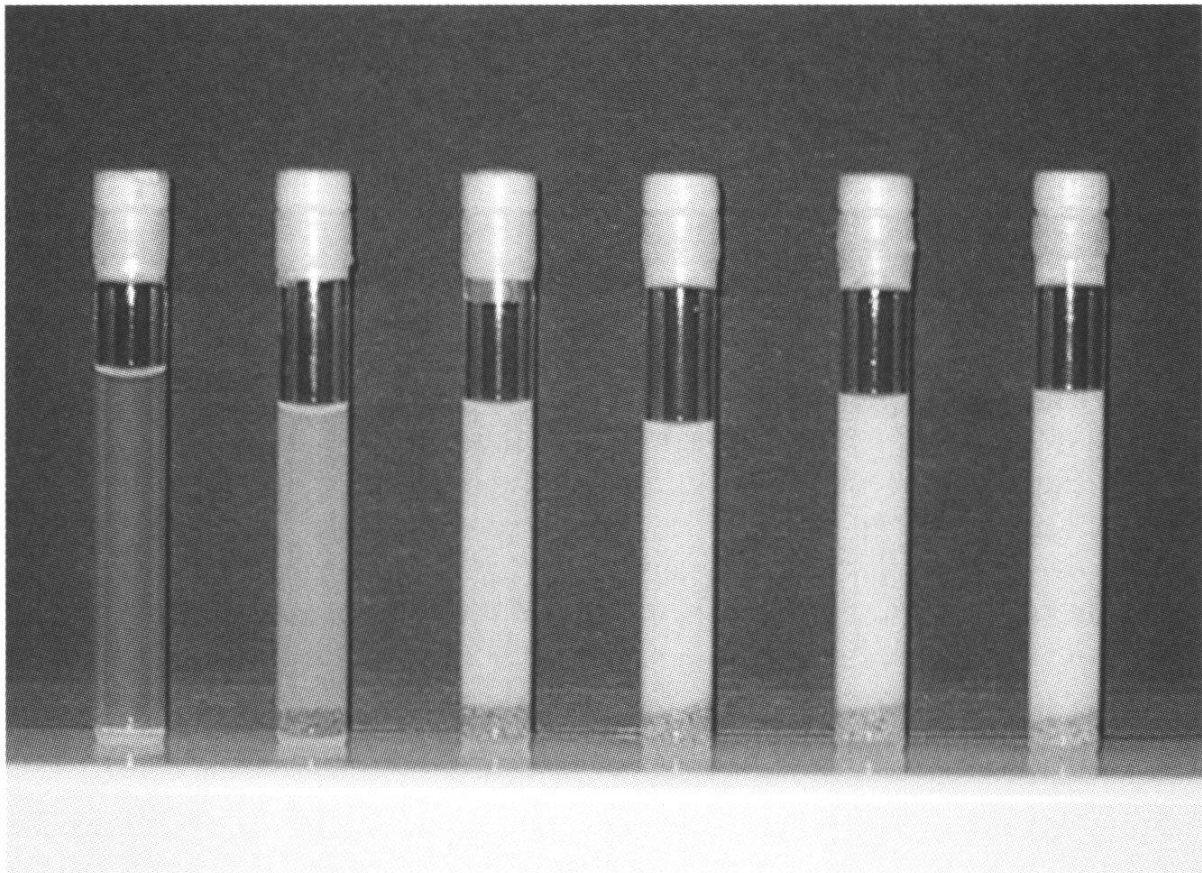
auch hier Streumethoden in Kombination mit klassischen Theorien der Kolloidphysik und Computersimulationen ein, um letztlich die molekularen Faktoren, die die Struktur und Dynamik der Linsenproteinmischungen innerhalb der Linse bestimmen, zu verstehen. Dabei zeigt es sich, dass die Proteine sich in vielen Belangen ganz wie unsere Modellkolloide verhalten. Ein Beispiel ist dazu in Figur 6 dargestellt, wo wir die Streuintensitäten aus einem SANS Experiment mit hochkonzentrierten Proteinlösungen zeigen, die denjenigen entsprechen, die wir mit harten Kugel-Kolloiden (Figur 5) beobachten konnten.



**Figur 6:** Streuintensität  $I(q)$  als Funktion des Streuvektors  $q$  für Lösungen des Linsenproteins  $\alpha$ -crystallin bei von unten nach oben zunehmender Proteinkonzentration ( $2 \text{ mg/mL} \leq c \leq 255 \text{ mg/mL}$ ). Im unteren Teildiagramm sehen wir den entsprechenden Strukturfaktor  $S(q)$  für  $c = 177 \text{ mg/mL}$ .

### 3. Lichtstreuung in trüben Suspensionen

Eine besondere Schwierigkeit, die in vielen Kolloidsystemen von praktischer Bedeutung auftritt, wird durch das sehr grosse Streuvermögen der Partikel für sichtbares Licht verursacht. Dies bewirkt, dass diese Suspensionen bereits bei sehr kleinen Teilchenkonzentrationen ausserordentlich trübe sind und ein milchiges Aussehen besitzen. Ein typisches Beispiel dafür ist tatsächlich «echte» Milch, wo die kolloidalen Komponenten (Caseinmizellen, mittlerer Radius  $a \approx 150$  nm und Fetttröpfchen, mittlerer Radius  $a \approx 300$  nm) für die starke Trübung verantwortlich sind [12]. Dies ist auch in Figur 7 illustriert, wo einige kolloidale Suspensionen von Latexteilchen mit einem Radius von 58.7 nm und einer Volumensfraktion zwischen  $10^{-4}$  und 0.015 abgebildet sind. Wir sehen sehr deutlich die grosse Trübung bei bereits relativ geringen Teilchenkonzentrationen von unter einem Volumenprozent. Damit wird durch die starke Mehrfachstreuung natürlich traditionelle Lichtstreuung als ideale Charakterisierungsmethode unmöglich.



**Figur 7:** Kolloidale Suspensionen von Latexteilchen (Radius  $a = 58.7$  nm, Volumensfraktion von links nach rechts  $\Phi = 10^{-4}$ ,  $\Phi = 1.3 \times 10^{-3}$ ,  $\Phi = 4.5 \times 10^{-3}$ ,  $\Phi = 7.75 \times 10^{-3}$ ,  $\Phi = 0.0105$ ,  $\Phi = 0.0155$ ). Deutlich sichtbar ist auch der Ionentauscher am Boden der Küvette, der verwendet wird, um eine minimale Ionenkonzentration und damit langreichweitige elektrostatische Wechselwirkungen zu erreichen [10].

Wir haben deshalb an der Implementierung neuer Methoden im Bereich der Lichtstreuung an trüben Suspensionen gearbeitet. Dabei verwenden wir entweder spezielle Kreuzkorrelationstechniken (die sog. 3D-Kreuzkorrelationstechnik), um mehrfach gestreute Photonen zu unterdrücken [10, 11], oder wir benützen die sogenannte «Diffusing Wave Spectroscopy» (DWS) [7, 13], in der gezielt mehrfach gestreutes Licht verwendet und dessen zeitliche Intensitätsfluktuationen entweder in Transmission oder in Rückstreuung analysiert werden. Die DWS bietet dabei besonders interessante Möglichkeiten, da sie es erlaubt, die Partikeldynamik über eine Bestimmung der Zeitabhängigkeit des mittleren Verschiebungsquadrates  $\langle \Delta r(t)^2 \rangle$  der Teilchen über bis zu 10 Größenordnungen in der Zeit zu bestimmen. Je nach verwendetem System bedeutet das, dass wir bei einer unteren Grenze von ca. 20 ns die Bewegung der Kolloide auf Längenskalen bis unterhalb eines Nanometers verfolgen können, d.h. wir erhalten dynamische Informationen die komplementär sind zu der statischen Strukturbestimmung mit Hilfe von SANS oder SAXS. Diese methodischen Entwicklungen haben im Jahr 2000 auch bereits zur Gründung einer Spin-off Firma (LS Instruments) geführt, die es sich zum Ziel gesetzt hat, moderne Lichtstreuapparaturen für die Untersuchung kolloidaler Partikel zu entwickeln, zu produzieren und zu verkaufen und daneben auch Beratungs-, Entwicklungs- und Servicedienstleistungen anzubieten.

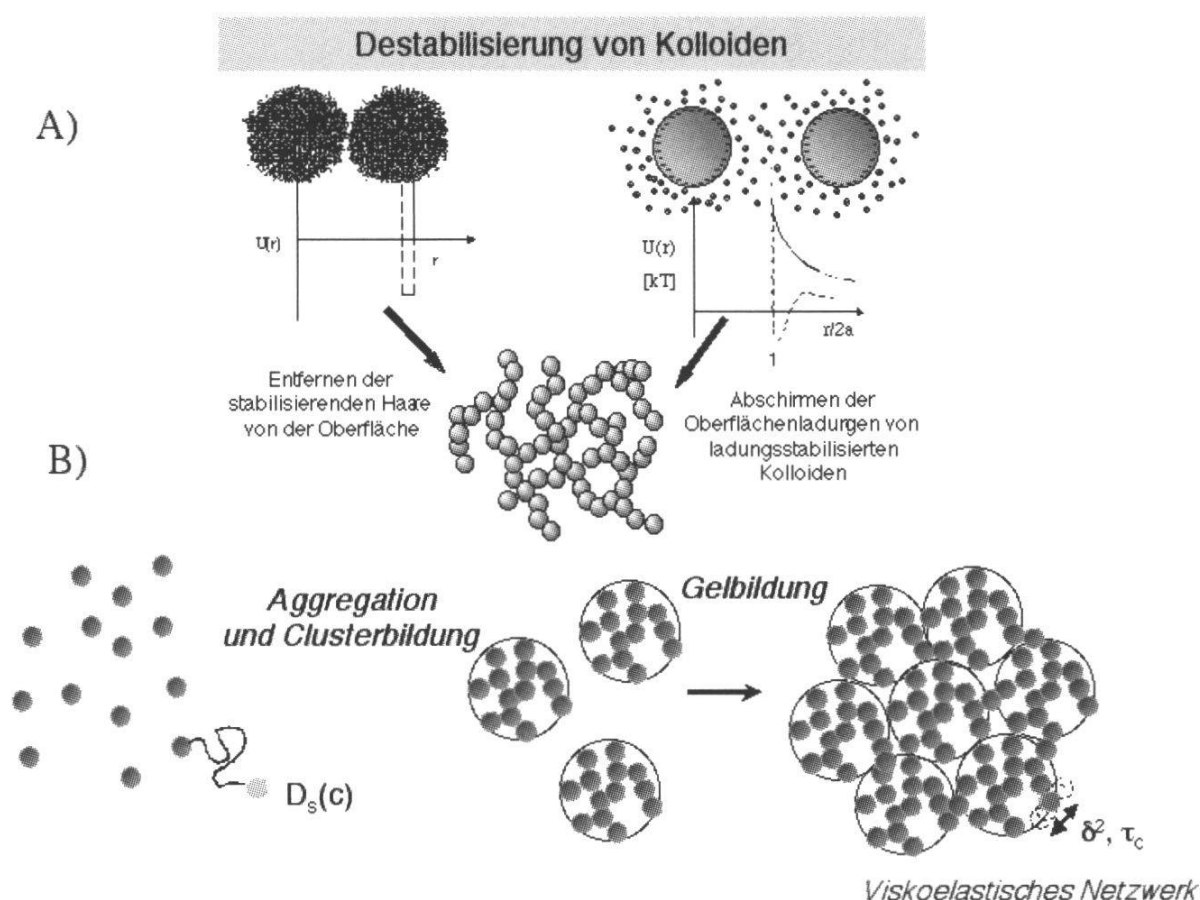
#### **4. Aggregation und Gelbildung**

Besonderes Interesse in der Physik der weichen Materie haben auch destabilisierte Kolloide hervorgerufen, wo z.B. durch Zugabe von Salz zu ladungsstabilisierten Partikeln die repulsiven Wechselwirkungen stark abgeschirmt und so Aggregation induziert werden kann [2].

Die daraus entstehenden Aggregate und ihre fraktale Struktur haben sowohl Theoretiker als auch Experimentatoren fasziniert. Dies einerseits auf Grund der universellen Eigenschaften, die diese Systeme unabhängig von ihrer chemischen Beschaffenheit oder der Partikelgrösse besitzen, andererseits aber auch wegen der enormen praktischen Bedeutung, die Aggregation und die daraus oft resultierende Gelbildung besitzen. Während die meisten früheren Untersuchungen sich auf stark verdünnte Systeme beschränkt haben, bedeuteten die für praktische Anwendung enorm wichtigen konzentrierten Suspensionen lange Zeit eine nahezu unlösbare Aufgabe für die Experimentatoren. Hier haben wir nun auf Grund der Möglichkeiten, die uns SANS, DWS und 3D-Lichtstreuung bieten, begonnen, Sol-Gel-Prozesse in konzentrierten Suspensionen zu untersuchen [13-15].

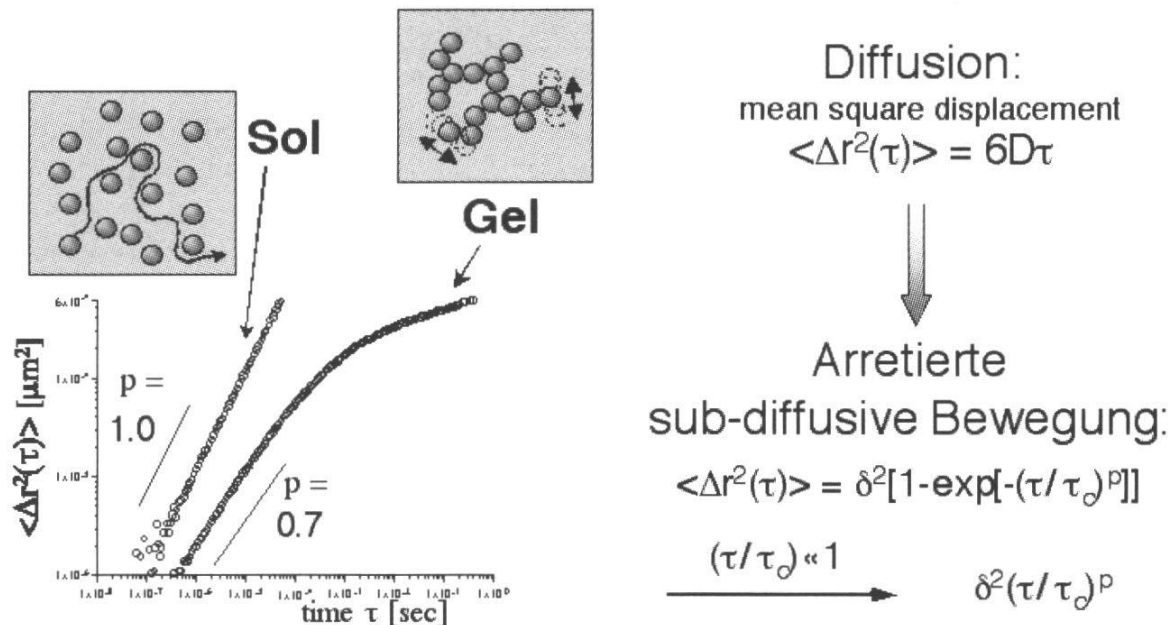
Ein typisches Beispiel hierfür ist die Herstellung von Yoghurt oder Käse, wo die sogenannten Casein-Mizellen (Protein-Aggregate mit einem mittleren Radius von ca. 150 nm) durch die Einwirkung von Enzymen destabilisiert

werden, aggregieren und nach einiger Zeit ein Gel bilden [15]. Dabei zeigt es sich, dass in solchen komplexen Lebensmittelsystemen auf mikroskopischer Ebene die gleichen Änderungen in der lokalen Dynamik und Struktur der kolloidalen Komponenten beobachtet werden können wie bei Modellkolloiden oder anorganischen Aluminiumoxidpartikeln, wie sie für die Herstellung von Hochleistungskeramiken über Sol-Gel Prozesse verwendet werden [15,14]. Es sind diese universellen Eigenschaften von Kolloidsuspensionen und Gelen, die uns, so hoffen wir, in Zukunft erlauben werden, die aus Modellexperimenten und Computersimulationen gewonnenen Erkenntnisse auch auf «reale» Systeme, wie sie für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen verwendet werden, zu übertragen und dort für die Verbesserung und Steuerung von Herstellungsprozessen einzusetzen.



**Figur 8:** A) Schematische Darstellung der Destabilisierung von sterisch oder elektrostatisch stabilisierten Kolloiden, der dadurch resultierenden Veränderung des Wechselwirkungspotentials und der Bildung eines fraktalen Aggregats. B) Während die stabilen Kolloide typische Brown'sche Bewegung machen, können die im Gel eingebauten Partikel nur noch eine räumlich eingeschränkte sogenannte subdiffusive Bewegung um eine maximale Auslenkung  $\delta$  ausführen

## DWS in kolloidalen Suspensionen und Gelen



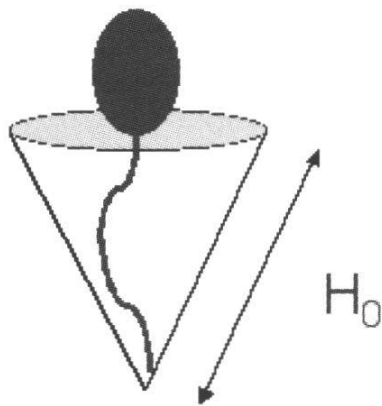
**Figur 9:** Beispiel für die mit «diffusing wave spectroscopy» gemessene Teilchendynamik von kolloidalen Partikeln in einer stabilen Suspension und im Teilchengel. In der Suspension zeigen die Kolloide typische Brown'sche Bewegung, während sie im Gel nur noch eingeschränkte sub-diffusive Bewegungen durchführen können.

### 5. Gleichgewichtskolloide: Mizellen, Mikroemulsionen und Vesikel

Tenside (engl. surfactants) sind oberflächenaktive amphiphile Moleküle, d.h. sie besitzen sowohl einen hydrophilen (wasserliebenden) als auch einen hydrophoben (wasserabstossenden, ölliebenden) Teil. In Gegenwart von Öl und/oder Wasser zeigen sie auf Grund eines empfindlichen Gleichgewichtes zwischen verschiedenen Kräften ein sehr komplexes Assoziationsverhalten. Dabei können sie eine ganze Reihe unterschiedlicher Mikrostrukturen einnehmen und makroskopisch homogene Phasen wie Mizellen, Mikroemulsionen oder Flüssigkristalle bilden [2]. Es sind diese Eigenschaften von Tensiden, die den Titel dieses Artikels provoziert haben.

Das Studium der Selbstorganisation von Tensidsystemen hat sich in den letzten Jahren unter dem Einfluss neuer Ideen und Methoden aus der Physik, der Chemie und den Materialwissenschaften grundlegend gewandelt. Gerade im Grenzbereich zwischen der Physik amphiphiler Systeme und der Biophysik hat sich für die theoretische Physik ein neues und ausserordentlich interessantes Forschungsgebiet geöffnet (Stichworte: Physik flexibler Filme und Membranen, Anwendung der Renormierungsgruppentheorie, Computersi-

mulationen). Eine wichtige Rolle in der theoretischen Behandlung des Selbstassoziationsverhaltens von Tensiden und einem Verständnis des Zusammenspiels zwischen molekularer Geometrie, Wechselwirkungen und Aggregatform spielt die sogenannte spontane Krümmung  $H_0$  [2].



**Variation:**

\* nichtionische Tenside:

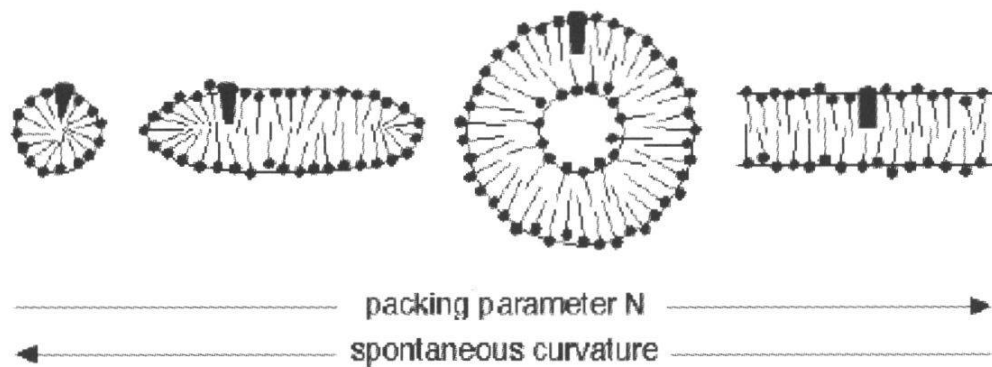
*Temperatur*

\* ionische Tenside :

*Ionenstärke*

\* gemischte Systeme:

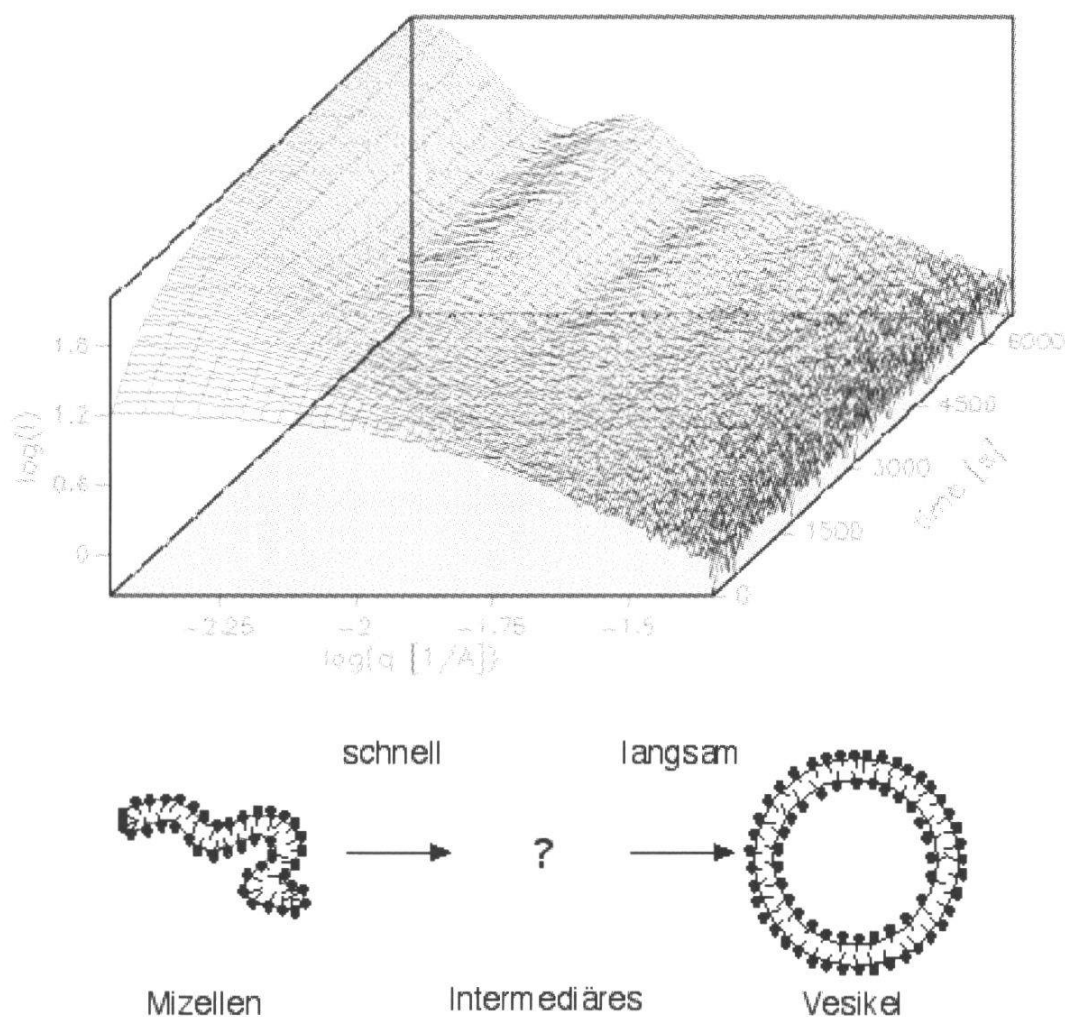
*Mischungsverhältnis*



**Figur 10:** Diese Figur zeigt eine schematische Darstellung der spontanen Krümmung, die bestimmt wird durch die eigentliche Molekülgeometrie (Grösse der Kopfgruppe und der Alkylkette) sowie den Wechselwirkungen zwischen benachbarten Tensidmolekülen (insbesondere elektrostatische Abstossung zwischen ionischen Kopfgruppen), die wichtigsten Parameter, durch die  $H_0$  variiert werden kann, sowie der Zusammenhang zwischen spontaner Krümmung und daraus resultierender Aggregatstruktur.

Eine Variation in  $H_0$ , wie sie in ionischen Tensiden zum Beispiel durch Zugabe von Salz erfolgt, erlaubt uns ein gezieltes Einstellen der Mizellarchitektur in wässrigen Lösungen. Dabei erreichen wir Variationen von der Bildung kleiner kugelförmiger Mizellen mit einem Radius von ca. 6 nm über gigantische, polymerähnliche und flexible Zylinder mit Längen bis zu einigen Mikrometern bis hin zu zellähnlichen Modellmembranen, den sogenannten

Vesikeln. Gerade die Umwandlung von polymerähnlichen Zylindermizellen zu Vesikeln bei einer Erniedrigung der spontanen Krümmung hat enormes Interesse unter Physikern und Biochemikern geweckt [16]. Dabei handelt es sich einerseits um ein interessantes theoretisches Nichtgleichgewichts-Problem, andererseits spielt diese aber auch eine wichtige Rolle in vielen Prozessen wie der Membranrekonstitution oder den Transportvorgängen im menschlichen Verdauungstrakt. Hier ist es uns gelungen, mit Hilfe von zeitaufgelöster Neutronenstreuung erstmals mehr über die strukturellen Umwandlungen in diesem Nichtgleichgewichtsprozess zu erfahren, und dies mit einer bisher nicht erreichten, nahezu atomaren Auflösung.



**Figur 11:** Ergebnis von zeitaufgelösten SANS Experimenten, in denen die  $q$ -Abhängigkeit der Streuintensität als Funktion der Zeit nach einem Verdünnungssprung einer wässrigen Mizelllösung von Gallensalz und Lezithin dargestellt ist. Durch die nach der Verdünnung eintretenden Änderungen des Mischungsverhältnisses innerhalb der Mizelle auf Grund der unterschiedlichen Monomerlöslichkeit von Gallensalz und Lezithin wird die spontane Krümmung verkleinert und ein Mizell-Vesikel Übergang induziert.

In einem nächsten Schritt werden wir nun versuchen, mit Hilfe einer Kombination von Stopped-Flow Technik und SANS zu noch viel kürzeren Zeiten zu gehen, um die Bildung der intermediären Strukturen zu studieren. Ein entsprechender Aufbau wird zur Zeit in Zusammenarbeit mit der Universität Edinburgh und dem Paul Scherrer Institut in die Wege geleitet.

## **6. Ausblick**

Die Physik der weichen kondensierten Materie bietet sowohl dem Theoretiker als auch dem Experimentator ein faszinierendes Betätigungsfeld [17-19]. Dabei können nicht nur grundlegende Probleme aus der klassischen Physik der kondensierten Materie neu angegangen werden, sondern sowohl neue Techniken entwickelt als auch die so gewonnenen Erkenntnisse auf vielfältige Weise in andere Domänen eingebracht werden. Damit können wichtige Beiträge auch in industriellen oder biologisch-medizinischen Bereichen gemacht und für unsere Studenten und Mitarbeiter neue Arbeitsmöglichkeiten geschaffen werden.

## **7. Verdankungen**

Dieser Artikel und die ihm zugrunde liegenden Arbeiten wären nicht möglich gewesen ohne die Beiträge einer ganzen Reihe von Mitarbeitern und Kollegen und die finanzielle Unterstützung verschiedener Institutionen und Firmen. Besonders herausheben möchte ich H. Bissig, L. Cannavacciuolo, F. Cardinaux, L. Cipelletti, S. Egelhaaf, V. Lobaskin, J. S. Pedersen, L. Rojas-Ochoa, S. Romer, F. Scheffold, C. Sommer, A. Stradner, G. Thurston, V. Trappe, C. Urban, R. Vavrin, den Schweizerischen Nationalfonds, COST, Novartis und Nestlé.

## **Zusammenfassung**

In der Domäne der «weichen kondensierten Materie» (engl. «soft condensed matter») werden primär drei komplementäre Gebiete untersucht: Kolloide, Polymere und sogenannte Assoziationskolloide (oder selbstorganisierende Systeme von Tensiden). Ziel ist dabei das Verständnis der Bildungsprozesse, der Struktur und der funktionellen Eigenschaften der sich bildenden supramolekularen Systeme, die eine wichtige Rolle im realen Leben spielen. Die weiche kondensierte Materie ist jedoch nicht nur ein attraktives Gebiet der modernen Grundlagenforschung, sondern von ausserordentlicher technologischer Bedeutung in vielen Bereichen wie z.B. der Lebensmitteltechnologie, der Herstellung von Hochleistungskeramiken oder der pharmazeutischen Industrie. In diesem Artikel wird aufgezeigt, wie mit Hilfe von Kolloiden

grundlegende Probleme der Physisik der kondensierten Materie untersucht und die dafür benötigten neuen experimentellen Techniken entwickelt werden können. Er zeigt aber auch, wie die dabei gewonnenen Kenntnisse auch für das Verständnis biologischer und medizinischer Prozesse verwendet und auf viele praktische Anwendungen wie Keramik- oder Yoghurtherstellung übertragen werden können.

## Referenzen:

- [1] M.E. Cates und M.R. Evans, Eds., «*Soft and Fragile Matters*», IOP Publishing, Bristol, 2000.
- [2] D. F. Evans and H. Wennerström, «*The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology and Technology Meet* » (VCH Publishers Inc., New York, 1994).
- [3] P. N. Pusey In *Liquids, Freezing and the Glass Transition*; edited by J. P. Hansen, D. Levesque and J. Zinn-Justin (North-Holland, Amsterdam, 1991); p 763.
- [4] W. van Megen and S. M. Underwood, Phys. Rev. Lett. **70**, 2766 (1993); Phys. Rev. E **49**, 4206 (1994)
- [5] «Neutron, X-Ray and Light Scattering» (P. Lindner und T. Zemb, Eds.) (Elsevier, 2<sup>nd</sup> Edition, in press.)
- [6] P. Schurtenberger, A. Stradner and S.U. Egelhaaf, in «Polymers, Colloids and Microemulsions: Neutron Scattering Experiments», Frontiers of Neutron Scattering, Albert Furrer, Ed., World Scientific Publishing, p. 107 – 130 (2000)
- [7] L.F. Rojas-Ochoa, S. Romer, F. Scheffold, P. Schurtenberger, Phys. Rev. E **65**, 051403 (2002)
- [8] G. B. Benedek, J. Pande, G. M. Thurston and J. I. Clark (1999), Progress in Retinal and Eye Research **18**(3):391–402.
- [9] Schurtenberger P, Chamberlin RA, Thurston GM, Thomson JA, Benedek GB, Phys. Rev. Letts. **63**, 2064–2067 (1989).
- [10] L. Rojas, C. Urban, P. Schurtenberger, T. Gisler, and H.H. Grünberg, Europhys. Lett. (2002, in press)
- [11] C. Urban and P. Schurtenberger, J. Colloid Interface Sci. **207**, 150 (1998)
- [12] C. Urban and P. Schurtenberger, Phys. Chem. Chem. Phys. **1**, 3911 (1999)
- [13] Luis F. Rojas, R. Vavrin, C. Urban, J. Kohlbrecher, A. Stradner, F. Scheffold and P. Schurtenberger, Faraday Discussions **123** (2002, in press)
- [14] S. Romer, F. Scheffold, and P. Schurtenberger, Phys. Rev. Lett. **85**, 4980 (2000)
- [15] P. Schurtenberger, A. Stradner, S. Romer, C. Urban and F. Scheffold, CHIMIA **55**, 155–159 (2001); A. Stradner, S. Romer, C. Urban and P. Schurtenberger, Prog. Colloid Polym. Sci. **118**, 135 (2001)
- [16] S.U. Egelhaaf and P. Schurtenberger, Phys. Rev. Lett. **82**, 2804 (1999)
- [17] K. Dawson, Curr. Opin. Colloid Interface Sci. **7**, 218 (2002)
- [18] D. Frenkel, Science **296**, 65 (2002)
- [19] W.C.K. Poon, Curr. Opin. Colloid Interface Sci. **3**, 593 (1998)