

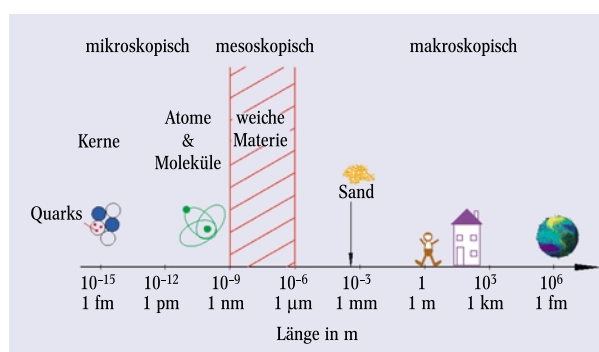
# Was ist hart an der Weichen Materie?

Ein Streifzug durch das interdisziplinäre Gebiet der Kolloide und Polymere

Hartmut Löwen

Zur reichhaltigen Welt der Weichen Materie gehören Dispersionskolloide, Polymere, Tenside, Membranen und biologische Makromoleküle. Allen ist gemein, dass sie in einem Zustand zwischen fest und flüssig „leben“ und auf der mesoskopischen Skala – zwischen Nano- und Mikrometern – Strukturen aufweisen. Deswegen reagiert Weiche Materie besonders empfindlich auf äußere mechanische Störungen. Hart an der Weichen Materie ist die Vorhersage ihrer makroskopischen Eigenschaften ausgehend von ihren mikroskopischen Bausteinen, da gleich zwei Brückenschläge zu meistern sind: zunächst von den mikroskopischen zu mesoskopischen und dann weiter zu den makroskopischen Längenskalen. Deswegen bezeichnet man Systeme der Weichen Materie auch als „komplexe Flüssigkeiten“. Pfiffige Konzepte aus der statistischen Physik demonstrieren, dass „komplex“ glücklicherweise nicht unbedingt „kompliziert“ bedeutet.

Die Welt ist nicht zuletzt deswegen so interessant, weil die Natur ganz verschiedene strukturelle Längenskalen offeriert, welche charakteristische Ausdehnungen der Systeme kennzeichnen. Solche Längenskalen, die sich um viele Größenordnungen unterscheiden, zeigt Abbildung 1 in einer logarithmischen Darstellung. Auf der einen Seite spielen sich Effekte im Atomkern auf einer Längenskala von einigen Fermi ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ) ab. In diesem Bereich hat sich das wissenschaftliche Wirken von Wolfgang Gentner bewegt. Der Sequenz des gleichnamigen Preises entsprechend, folgt dann der Wirkungsbereich von Alfred Kastler in der Welt der Atome und Moleküle, die von einer typischen Längenskala von einem Angström,  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ , gekennzeichnet ist. Auf der anderen Seite sind die räumlichen Ausdehnungen des Universums immens. Die Längenskalen werden klassisch aufgeteilt in „makroskopisch“ und „mikroskopisch“. Ersteres bezieht sich auf große Dimensionen – bis herunter zu wahrnehmbaren Bruchteilen von einem Millimeter – und schließt die so genannte granulare Materie wie Sand ein; als „mikroskopisch“ werden räumliche Distanzen bezeichnet, die typischerweise zwischen Atomen zu finden oder noch kleiner sind. Dazwischen liegen die „mesoskopischen Systeme“ im Bereich zwischen einem Nanometer ( $10^{-9} \text{ m}$ ) und einem Mikrometer ( $10^{-6} \text{ m}$ ). Liegt



**Abb. 1:** Die Phänomene der Weichen Materie spielen sich auf mesoskopischer Längenskala ab.

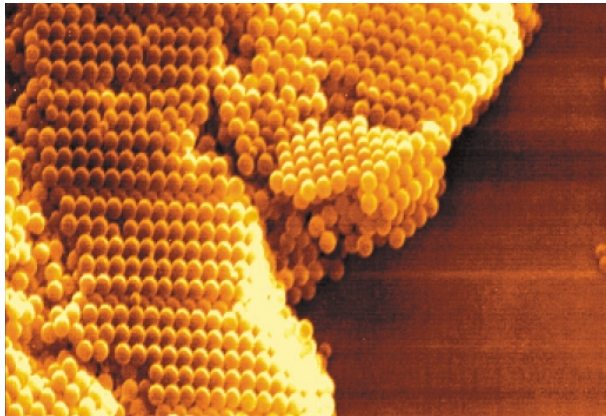
der Aggregatzustand solcher Systeme zwischen fest und flüssig, d. h. zeigt ein System partiell Eigenschaften, die sowohl für eine Flüssigkeit als auch für einen Festkörper sprechen, dann beginnt bereits die babylonische Sprachverwirrung: ein Chemiker benutzt dafür den allgemeinen Ausdruck „Kolloid“ (griechisch: Aussehen wie Leim). Historisch gesehen ist das ein Begriff, der bis ins vorletzte Jahrhundert zurückreicht, als Kolloide klar die Domäne der Chemiker waren. Lange haben Physiker dagegen supramolekulare Systeme eher abschätzig betrachtet und als zu kompliziert, zu schlecht charakterisiert, zu angewandt und/oder einfach als uninteressant abgetan. Seit zwei Jahrzehnten hat sich dieses Fachgebiet insgesamt und insbesondere in der Physik gemauert. Und um der Geschichte ihren eigenen Stempel aufzusetzen, erfanden Physiker gleich zwei verschiedene neue Begriffe für Kolloide: ein europäischer Physiker bezeichnet Kolloide als „Weiche Materie“ (engl. „soft matter“), ein amerikanischer Physiker präferiert den Begriff „Complex fluids“ (Komplexe Fluide oder komplexe Flüssigkeiten) [1]. Weil dies ein Artikel im (deutschen) Physik Journal ist, wird konsequenterweise ab sofort hauptsächlich von Weicher Materie die Rede sein.

„Weichheit“ lässt sich über die elastischen Moduln von makroskopischen Substanzen quantitativ erfassen: Ist der Schermodul bedeutend größer als der Kompressionsmodul, dann ist eine Substanz offenbar leicht durch mechanische Abscherung verletzbar, charakteristisch für Systeme, die im Grenzbereich zwischen fest und flüssig „leben“. Beispiele aus dem Alltagsleben sind Milch, Blut, Tinte, Wandfarbe und Mayonnaise. Für präzise Untersuchungen sind gut charakterisierte Proben nötig; diese finden sich im Bereich der kolloidalen Suspensionen oder Dispersionskolloide. Das sind

Prof. Dr. Hartmut Löwen, Institut für Theoretische Physik II, Universitätsstraße 1, 40225 Düsseldorf – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Gentner-Kastler-Preises 2005

formstabile mesoskopische Partikel, welche in einer mikroskopischen Trägerflüssigkeit eingebettet (oder „dispergiert“ bzw. „suspendiert“) sind.

Abbildung 2 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme einer wässrigen Suspension von winzigen Plastik­kugeln. Es wird sofort klar, dass sich die Kugeln gleichen, d. h. ihre Größenpolydispersität ist gering. Ferner erkennt man, dass sich die Kugeln auf einem regelmäßigen periodischen Gitter angeordnet haben. Dabei muss man sich in den Zwischenräumen noch das Lösungsmittel (im vorliegenden Fall ist das



**Abb. 2:** Elektronenmikroskopische Aufnahme von einem Aggregat aus mesoskopischen Polystyrolkugeln. Die mesoskopischen Teilchen haben sich auf einem periodischen Kristallgitter angeordnet. Der Partikeldurchmesser beträgt ein Bruchteil von einem Mikrometer. (mit freundlicher Genehmigung von T. Palberg)

Wasser) vorstellen. Die Kugeln bilden also einen Superkristall von Partikeln mit einer mesoskopischen Gitterkonstanten, die ihrerseits wiederum in einer Flüssigkeit eingebettet sind. Der Kompressionsmodul eines solchen Kristalls ist durch die Kompressibilität des Lösungsmittels dominiert; der Schermodul des Kolloidkristalls ist dagegen sehr viel kleiner, da er indirekt proportional zum Volumen der Kristallelementarzelle skaliert. Dieses Volumen ist bis zu zwölf Größenordnungen größer als das eines atomaren Kristalls. Damit ist dies eine eindrucksvolle Variante eines „weichen“ Systems, das leicht durch Scherung verletzbar ist.

Ein zweiter wichtiger Vertreter der Weichen Materie sind Schmelzen oder Lösungen von Polymeren. Das sind Makromoleküle, die aus einer molekularen Wiederholeinheit („Monomer“) aufgebaut sind. Hier sind sowohl lineare Ketten (z. B. Kohlenwasserstoffketten) als auch verzweigte Architekturen, wie Dendrimere oder Sternpolymere, denkbar. Letztere erhält man durch chemisches Anheften von  $f$  linearen Polymerketten an ein gemeinsames Zentrum. Ein Polymer wird aus entropischen Gründen im Mittel keine gestreckte Form annehmen, sondern sich im Allgemeinen verknäulen. Schließlich wird die Palette der Weichen Materie komplettiert durch Tensidmischungen und Biomaterie wie Membrane, Proteine etc.

Die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Weichen Materie sind interdisziplinär angelegt und haben sich im letzten Jahrzehnt rasant weiterentwickelt und stark diversifiziert. Die Gründe hierfür sind vielfältig: Zunächst haben die weichen Materialien viele technische Anwendungen, von denen exemplarisch Lacke,

Farben sowie Schmier- und Kunststoffe erwähnt seien. Zudem sind weiche Materialien auch in medizinischen und pharmazeutischen Applikationen omnipräsent, z. B. als kolloidale Arzneistoffträger. Außerdem spielen sie eine Schlüsselrolle für biologische Fragestellungen wie DNS-Erkennung, Transport durch Zellmembranen und Proteinkristallisation.

Last not least sorgte der Physik-Nobelpreis, der 1991 an Pierre-Gilles de Gennes für statistische Theorien der Weichen Materie vergeben wurde, dafür, dass das Gebiet auch in der Physik und in der Grundlagenforschung anerkannt und populär wurde. Denn die statistische Physik erlaubt quantitative Vorhersagen für das Verhalten von Weicher Materie, die dann direkt in Experimenten verifiziert werden und sich gezielt zur Suche nach neuen Materialeigenschaften einsetzen lassen. Hier findet zur Zeit ein sehr fruchtbarer Austausch zwischen Physikern, Chemikern, Biologen und Ingenieuren statt. Physiker beziehen ihre Existenzberechtigung daraus, dass sie aus komplexem Verhalten das Wesentliche extrahieren und universelle Mechanismen von molekularspezifischen Effekten trennen können.

### Das Konzept der effektiven Wechselwirkung

Man betrachte eine zweikomponentige Mischung aus  $N_1$  großen und  $N_2$  kleinen klassischen Teilchen im Volumen  $V$  bei vorgegebener Temperatur  $T$ .

Wenn  $\{\vec{R}_i\}, (i = 1, \dots, N_1)$  bzw.  $\{\vec{r}_j\}, (j = 1, \dots, N_2)$  die Orte der großen bzw. kleinen Teilchen bezeichnet (siehe Abbildung), dann sei die potentielle Gesamtenergie des Systems gegeben durch

$$U(\{\vec{R}_i\}, \{\vec{r}_j\}) = U_{11}(\{\vec{R}_i\}) + U_{12}(\{\vec{R}_i\}, \{\vec{r}_j\}) + U_{22}(\{\vec{r}_j\}). \quad (1)$$

Aufgabe der Gleichgewichtsstatistik ist es, einen Konfigurationsmittelwert zu berechnen. Mit  $\beta = 1/k_B T$  erhält man somit für die Helmholtzsche freie Energie  $F$

$$\exp(-\beta F) = \text{Sp}_1 \text{Sp}_2 \exp(-\beta U), \quad (2)$$

mit folgenden Abkürzungen für die klassische Spur

$$\text{Sp}_1 = 1/N_1! \int d^3 R_1 \dots \int d^3 R_{N_1} \text{ und}$$

$$\text{Sp}_2 = 1/N_2! \int d^3 r_1 \dots \int d^3 r_{N_2}.$$

Einsetzen von (1) in (2) ergibt

$$\exp(-\beta F) = \text{Sp}_1 \left[ \exp(-\beta U_{11}) \text{Sp}_2 \exp(-\beta(U_{12} + U_{22})) \right] =: \text{Sp}_1 \exp(-\beta V_{11}(\{\vec{R}_i\}))$$

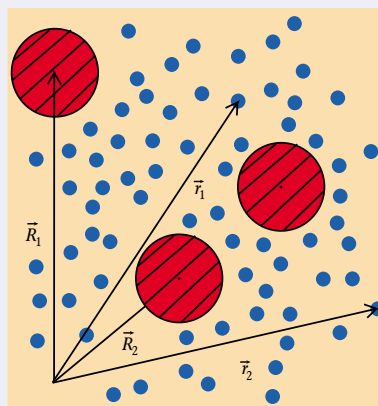
Deswegen gelingt eine *exakte* Abbildung von zweikomponentigen Systemen auf ein effektiv einkomponentiges System, welches durch die *effektive Wechselwirkung*

$$V_{11}(\{\vec{R}_i\}) = U_{11}(\{\vec{R}_i\}) - k_B T \ln[\text{Sp}_2 \exp(-\beta(U_{12} + U_{22}))]$$

beschrieben wird. Die Freiheitsgrade der kleinen Teilchen wurden „herausintegriert“. Die Näherung besteht typischerweise darin,  $V_{11}(\{\vec{R}_i\})$  als Summe von *Paar*-Wechselwirkungen anzunehmen:

$$V_{11}(\{\vec{R}_i\}) \cong \sum_{i < j} V_{\text{eff}}(\vec{R}_i, \vec{R}_j)$$

Freiheitsgrade, die sich zum Herausintegrieren bei einem System der Weichen Materie eignen, können vielfältig sein: Lösungsmittelmoleküle, Ionen, Monomere, auch ganze Polymerknäuel oder kleine Kolloidteilchen in binären Dispersionen. Somit ist das Konzept der effektiven Wechselwirkung sehr weitreichend.



## Hierarchien der Weichen Materie: ein supramolekularer Baukasten

Mit supramolekularen Bausteinen (wie Dispersionskolloid-Kügelchen und Polymerknäuel) der Weichen Materie kann man neue Kompositmaterialien bilden. Die Vorgehensweise entspricht dem traditionellen Periodensystem der Elemente, welches sich als „Baukastensystem“ nutzen lässt, um sukzessive Moleküle aufzubauen, nur passiert jetzt alles auf einer größeren Längenskala. Dabei können verschiedene Hierarchie-Ebenen erreicht werden. Mischt man die Bausteine, so organisieren sie sich selbst zu größeren Einheiten, womit man zu einer anderen Hierarchie-Ebene gelangt. In einem weiteren Schritt kann man diese Composite wieder mischen und bekommt somit die nächste Hierarchie-Ebene, und so fort.

Ein Beispiel für ein Mischsystem ist eine Mikroemulsion, welche durch das Zusammengeben von Öl- und Wassertröpfchen mit Tensidmolekülen erreicht wird, ein anderes Beispiel sind Mischungen aus Kolloidkugeln und Polymerketten, die spontan vergelen können. Als drittes Beispiel bilden Mischungen aus Polyelektrolytketten (das sind geladene Polymere) und ionischen Tensiden spontan lamellare Überstrukturen mit sehr geringen kritischen Oberflächenenergien aus. Die Composite haben somit im Allgemeinen Materialeigenschaften, die sich von denen der Einzelbaustein-Systeme sehr unterscheiden. Durch geschicktes Mischen gelingt es somit, neuartige Systeme mit neuen Eigenschaften zu komponieren. Um ein zufälliges Trial-and-Error-Verfahren zu vermeiden, ist eine Theorie, die systematisch voraussagt, wie das makroskopische Verhalten von allen Eingangsgrößen abhängt, sehr wünschenswert. Hier ist der theoretische Physiker gefordert.

## Konzepte zur theoretischen Beschreibung Weicher Materie

Hart an der Weichen Materie ist ein theoretischer Zugang „ab initio“ zu ihren makroskopischen Materialeigenschaften, weil gleich zwei Längenskalen zu überbrücken sind: Zunächst gilt es, die Lücke zwischen den mikroskopischen und mesoskopischen Skalen zu schließen und danach die Lücke zwischen den mesoskopischen und makroskopischen Skalen. In der Praxis stellen sich häufig noch sehr viel mehr intermediäre Längenskalen heraus, die für die Gesamtbehandlung des Problems wichtig sind. Im Vergleich dazu ist bei der atomaren Materie nur eine einzige Kluft direkt von mikroskopischer zur makroskopischen Beschreibung zu überwinden.

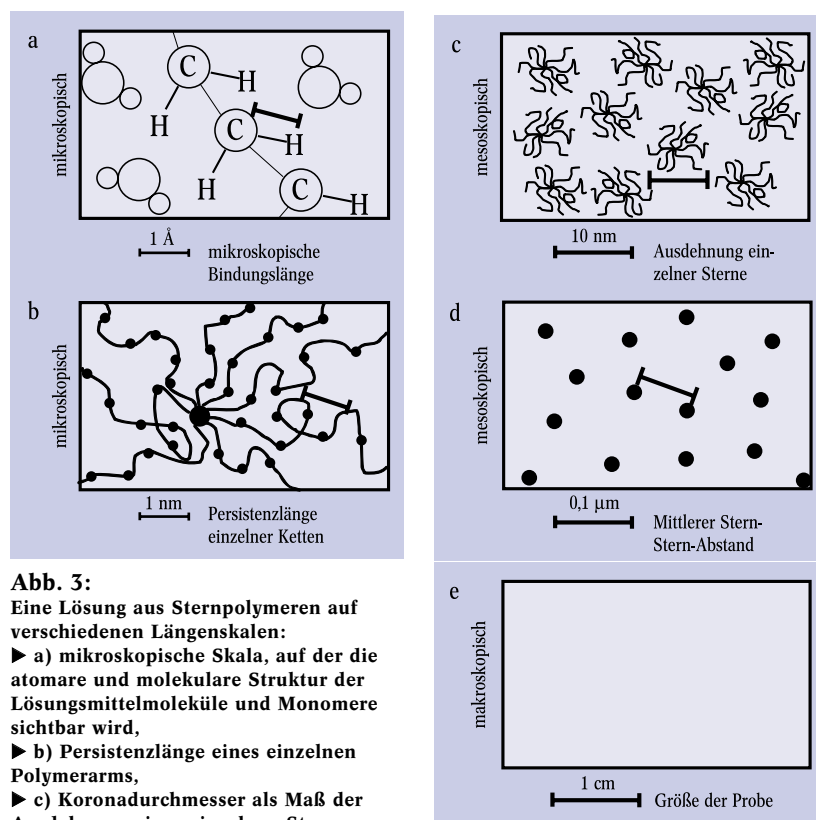
In der statistischen Physik wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene mächtige Werkzeuge entwickelt, um Längenskalen zu überbrücken. Dazu zählen das statistische Prinzip des Herausintegrierens von Freiheitsgraden (engl. „coarse graining“), welches zur effektiven Wechselwirkung zwischen den großen Partikeln führt [2], die Methode der Computersimulation von Systemen unterschiedlicher Komplexität sowie Skalierungstheoriemethoden für Polymere. Die zuerst genannte Methode des Herausintegrierens von Freiheitsgraden ist ein allgemein gültiges weitreichendes Konzept, welches eine Vielzahl von Anwendungen in Systemen von Weicher Materie gefunden hat (siehe Infokasten „Das Konzept der effektiven Wechselwirkung“). Beispielsweise wird dadurch ein komplexes System wie ein Polymerknäuel oder eine Kolloidkugel

als ein grob gerastertes Teilchen nur mit einem Translationsfreiheitsgrad beschrieben. Hierdurch gelingt eine Abbildung auf ein effektives klassisches Vielteilchensystem, welches noch durch die mikroskopischen Charakteristika geprägt ist. Hierüber gelingt es dann wiederum, mit Hilfe von klassischen Vielteilchentheorien zum makroskopischen Verhalten des Gesamtsystems zu gelangen.

## Beispiel: Sternpolymerlösungen

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die gleichzeitige Anwesenheit verschiedener Längenskalen in Systemen von Weicher Materie. Eine Lösung von Sternpolymeren in einem guten Lösungsmittel ist auf einer makroskopischen Skala strukturlos. Auf feiner mikroskopischer Skala erkennt man dagegen die atomare Struktur der Lösungsmittelmoleküle und der Monomere (typischerweise sind das Kohlenwasserstoffketten). Zoomt man auf größere Längenskalen, dann spielt die so genannte Persistenzlänge, auf der sich eine einzelne Polymerkette verdreht, eine Rolle. Auf noch größerer Skala erkennt man die Ausdehnung eines einzelnen Sterns, den so genannten Koronadurchmesser. Die nächste Längenskala ist der mittlere Zentren-Zentren-Abstand zwischen zwei benachbarten Sternen, bis man schließlich eine strukturlose makroskopische Sternpolymerlösung erreicht.

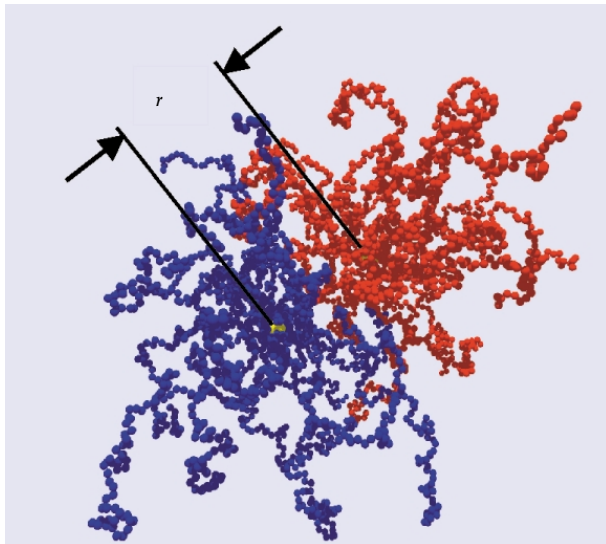
Im vorliegenden Beispiel lassen sich diese verschiedenen Skalen praktisch vollkommen überbrücken durch die Verwendung von verschiedenen theoretischen Techniken: mit Hilfe der Skalierungstheorie gelingt es, alle mikroskopischen Details loszuwerden. Durch das Herausintegrieren der Monomere erhält man die effektive Wechselwirkung zwischen zwei Ster-



**Abb. 3:** Eine Lösung aus Sternpolymeren auf verschiedenen Längenskalen:  
 ▶ a) mikroskopische Skala, auf der die atomare und molekulare Struktur der Lösungsmittelmoleküle und Monomere sichtbar wird,  
 ▶ b) Persistenzlänge eines einzelnen Polymerarms,  
 ▶ c) Koronadurchmesser als Maß für die Ausdehnung eines einzelnen Sterns,  
 ▶ d) typischer Zentrenabstand zwischen zwei benachbarten Sternpolymeren,  
 ▶ e) strukturlose makroskopische Lösung.



nen [2]. Dies kann auch mit Hilfe von Computersimulationen geschehen: Abbildung 4 zeigt einen typischen Simulationsschnappschuss von zwei Sternen mit festgehaltenem Zentrenabstand  $r$ . Die Simulationsergebnisse zeigen, dass man die Kraft zwischen zwei Sternen mit einem sehr weichen Paarpotential  $V_{\text{eff}}(r)$  beschreiben kann, welches für kleine Abstände  $r$  logarithmisch divergiert und als Vorfaktor mit einer Potenz in der



**Abb. 4:** Simulationsschnappschuss von zwei Sternpolymeren, die jeweils durch rote und blaue Monomerkugeln gekennzeichnet sind, im Zentrenabstand  $r$ . Die Arm-Anzahl beträgt hier  $f = 18$ .

Arm-Anzahl  $f^{3/2}$  skaliert. Für Abstände  $r$ , die größer als der Sterndurchmesser sind, klingt  $V_{\text{eff}}(r)$  exponentiell in  $r$  ab. Benutzt man  $V_{\text{eff}}(r)$  als Eingabegröße in einer klassischen Vielteilchentheorie, so bekommt man schließlich makroskopische thermodynamische Kenngrößen und kann das Volumenphasendiagramm von Sternpolymerlösungen vorhersagen.

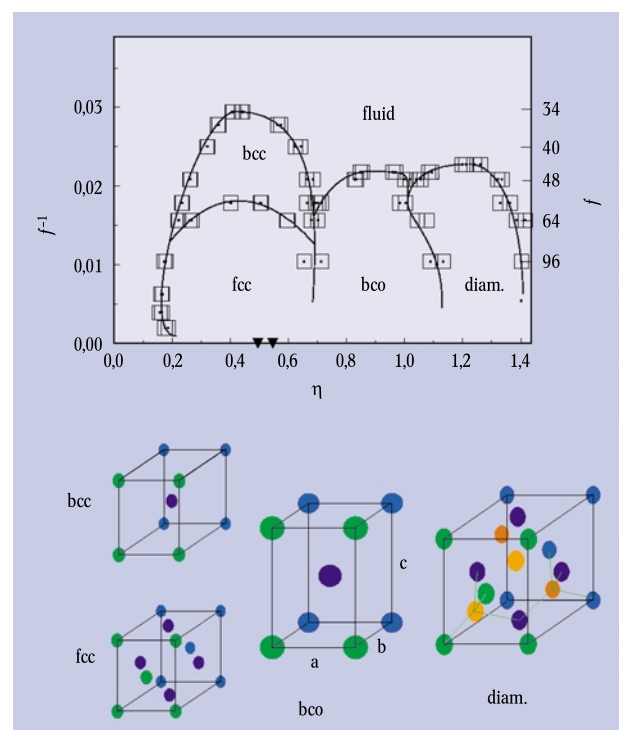
Abbildung 4 zeigt das volle Phasendiagramm als Funktion der Arm-Anzahl  $f$  und der reduzierten Sterndichte  $\eta$  [3]. Für mittlere Arm-Anzahlen  $f < 40$  gefriert zunächst die Sternpolymerlösung für wachsende Dichte  $\eta$  und schmilzt dann aber beim weiteren Erhöhen der Dichte wieder. Dieser reentrant-Effekt lässt sich direkt mit dem crossover vom logarithmischen zum exponentiellen Verhalten von  $V_{\text{eff}}(r)$  in Verbindung bringen. Eine Erhöhung der Dichte entspricht einer Erniedrigung des typischen Teilchenabstandes  $r \sim \eta^{-1/3}$ . Weil die Teilchen zunächst die exponentielle Abstoßung spüren, frieren sie ein. Erreichen sie bei weiterer Dichteerhöhung den logarithmischen weichen Teil von  $V_{\text{eff}}(r)$ , dann ist die Repulsion relativ gesehen wieder schwächer und das System schmilzt. Zu dem Phasendiagramm stellen sich außerdem verschiedene locker gepackte exotische Kristallstrukturen als thermodynamisch stabil heraus. Diese spielen für Materialien mit optischen Bandlücken (photonische Kristalle) eine wichtige Rolle.

Dem Sinn der verschiedenen Hierarchie-Ebenen in der Weichen Materie folgend, kann man nun Kompositsysteme aus ungeladenen Kolloid-Kügelchen und Sternpolymeren betrachten. Auch hierfür trägt das Konzept der effektiven Wechselwirkungen weit und hilft, alle Längenskalen von der Mikroskopik zur Makroskopik zu überbrücken [4]. Das Mischsystem zeigt

neue Phaseneigenschaften, insbesondere einen Entmischungübergang in ein kolloidreiches und kolloidarmes Fluidum [5, 6] und ein doppelphasiges dynamisches Vergelen [7].

### Kolloide als Modellsysteme

Wenn man akzeptiert, dass Kolloidkügelchen (oder Sternpolymere) mit effektiven Paarpotentialen beschrieben werden können, dann gelingt es damit auch, den Spieß umzudrehen: solche Systeme sind dann erstaunlich einfach. Aus „komplexen“ Flüssigkeiten sind mithilfe des Konzepts der effektiven Wechselwirkung simple Flüssigkeiten geworden. Deswegen lassen sich kollektive Vielteilcheneffekte gerade an kolloiden Suspensionen unmittelbar studieren. Zusätzlich ergibt sich der experimentelle Vorteil, dass man (z. B. mit Hilfe von konfokaler Mikroskopie) die Kolloidteilchen direkt im Ortsraum lokalisieren kann und sich die Dynamik auf experimentell zugänglichen Zeitskalen abspielt. Dies wird in eindrucklicher Weise am Kristallisationsübergang und am kinetischen Glasübergang im Volumen (bulk) demonstriert, wo Theorie, Simulation und Experiment nahezu gleichzeitig und in gegenseitiger Abstimmung entwickelt wurden und die kolloidalen Systeme eine Vorreiterrolle beim experimentellen Test von Theorien wie der Modenkopplungsapproximation gespielt haben. Ein tiefgehendes theoretisches Verständnis bedeutet auch eine Einsicht in den zugrunde liegenden allgemeinen Mechanismus dieser Übergänge, sodass den Kolloiden eine exponierte Rolle als Modellsysteme kondensierter Materie und der Wissenschaft allgemein zukommt.



**Abb. 5:** Phasendiagramm für Sternpolymerlösungen als Funktion der reduzierten Zentrenabdichte  $\eta$  und der Arm-Anzahl  $f$  bzw. der inversen Arm-Anzahl  $1/f$ . Die Koexistenzbereiche sind sehr klein und nicht aufgelöst. Die einzelnen zugrundeliegenden Kristallgitter sind ebenfalls gezeigt. Die Abkürzungen für die Kristallstrukturen bedeuten: fcc (face centred cubic): kubisch flächenzentriert, bcc (body centred cubic): kubisch innenzentriert, bco (body centred orthogonal): rechteckig innenzentriert, mit drei verschiedenen Rechtecklängen a, b, c, diam.: Diamantstruktur.

## Wohin geht die Reise?

Von vielen denkbaren Zukunftsperspektiven seien nur zwei Forschungsstoßrichtungen genannt:

► Mit verschiedenen äußeren Feldern kann man kolloidale Dispersionen kontrolliert ins Nichtgleichgewicht versetzen [8]. Es ist zu erwarten, dass solche Dispersionen auch für Nichtgleichgewichtsphänomene als Modellsysteme eine ähnliche Vorreiterrolle spielen wie im Gleichgewicht.

► Es ergibt sich die Frage, inwieweit das Konzept der effektiven Wechselwirkung noch bis in den Nanobereich trägt. Dies könnte klären, welche biologischen Phänomene molekularspezifisch sind und welche universell [9].

## Danksagung

Mein Dank gilt einer Vielzahl von Kollegen und Mitarbeitern für die intensive und fruchtbare Zusammenarbeit. Stellvertretend hierfür seien besonders Jean-Pierre Hansen und Christos N. Likos erwähnt.

## Literatur

- [1] *P. G. de Gennes*, Rev. Mod. Phys. **64**, 645 (1992)
- [2] *C. N. Likos*, Phys. Rep. **348**, 267 (2001)
- [3] *M. Watzlawek*, *C. N. Likos* und *H. Löwen*, Phys. Rev. Lett. **82**, 5289 (1999)
- [4] *A. Jusufi*, *J. Dzubiella*, *C. N. Likos*, *C. von Ferber* und *H. Löwen*, J. Phys.: Cond. Matter **13**, 6177 (2001)
- [5] *J. Dzubiella*, *A. Jusufi*, *C. N. Likos*, *C. von Ferber*, *H. Löwen*, *J. Stellbrink*, *J. Allgaier*, *D. Richter*, *A. B. Schofield*, *P. A. Smith*, *W. C. K. Poon* und *P. N. Pusey*, Phys. Rev. E **64**, 01040 (2001)

- [6] *J. Dzubiella*, *C. N. Likos* und *H. Löwen*, J. Chem. Phys. **116**, 9518 (2002)
- [7] *K. N. Pham*, *A. M. Puertas*, *J. Bergenholtz*, *S. U. Egelhaaf*, *A. Moussaid*, *P. N. Pusey*, *A. B. Schofield*, *M. E. Cates*, *M. Fuchs*, *W. C. K. Poon*, Science **296**, 104 (2002)
- [8] *H. Löwen*, J. Phys.: Cond. Matter **13**, R415 (2001)
- [9] *J. P. Hansen* und *Hartmut Löwen*, in: *P. Nielaba*, *M. Mareschal*, *G. Ciccotti* (Hrsg.). Bridging Time Scales: Molecular Simulations for the Next Decade, Springer Series, 167 (2002)

## Der Autor

**Hartmut Löwen** studierte Physik, Mathematik und Chemie an der Universität Dortmund, wo er bereits mit 24 mit Auszeichnung im Fach Physik promovierte. Zahlreiche Forschungsaufenthalte führten ihn vor allem nach Frankreich, aber auch in die USA, Kanada, Holland und England. 1993 habilitierte er sich an der LMU München. Anfang 1994 erhielt er den Gerhard-Hess-Forschungspreis der DFG und war Heisenberg-Stipendiat bis



zu seiner Berufung auf einen Lehrstuhl für Theoretische Physik an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Löwen wandte sich nach seinen anfänglichen Forschungsschwerpunkten Polaronensysteme, Schmelzprozesse an Festkörpern und Kristallwachstumsprozessen sehr bald der Physik der Weichen Materie zu. Die Begeisterung für dieses Gebiet vermag Löwen in seinen Vorlesungen auch auf die Studierenden zu übertragen