

# Hartmut Löwen

## Weiche Materie: vom hässlichen Entlein zum schönen Schwan

### Was ist „Weiche Materie“?

Die Natur offeriert ganz verschiedene Längenskalen, die die Ausdehnungen verschiedener Objekte kennzeichnen. Diese Längenskalen unterscheiden sich um viele Größenordnungen. Auf der einen Seite spielen sich Effekte im Atomkern auf einer Längenskala von einigen Fermi (das sind  $10^{-15}m$ ) ab; auf der anderen Seite sind die räumlichen Ausdehnungen des Universums immens. Im Gegensatz zu Dimensionen von einigen Millimetern bis zu einigen Kilometern, die uns aus dem Alltag sehr geläufig sind, ist es schwierig, eine gute Intuition für beide Extreme zu entwickeln. Die klassische Aufteilung der Längenskalen erfolgt in „makroskopisch“ und „mikroskopisch“. Das erste sind wahrnehmbare Dimensionen – bis herunter zu Bruchteilen eines Millimeters – und schließt die so genannte granulare Materie wie Sand ein. Als „mikroskopisch“ werden winzige räumliche Distanzen bezeichnet, die typischerweise zwischen Atomen zu finden sind – etwa im Bereich von einigen Angström (das sind  $10^{-10}m$ ). Dazwischen befinden sich „mesoskopische Systeme“, die im Bereich zwischen einem Nanometer (das sind  $10^{-9}m$ ) und einem Mikrometer (das sind  $10^{-6}m$ ) liegen. Beispiele dafür sind supramolekulare Aggregate und biologische Systeme. Solche Systeme bezeichnet man auch als *Weiche Materie* oder allgemeiner als *Kolloide*. Die verschiedenen Längenskalen sind in einer logarithmischen Darstellung in [Abbildung 1](#) illustriert.

Als Wolfgang Ostwald zu Beginn des 20. Jahrhunderts sein Kolloidlehrbuch *Die Welt der vernachlässigten Dimensionen* schrieb, hat er sicher nicht geahnt, wie lange der Titel mindestens in der Physik seine Gültigkeit behalten würde. Lange Zeit war die Forschung der Weichen Materie eine reine Domäne der Chemiker und Ingenieure. Die Physiker haben sich stattdessen vor allem auf kleine und kleinste Dimensionen in der Atom-, Kern-, und Teilchenphysik gestürzt oder sind zu makroskopischen Dimensionen in der Astrophysik vorgestoßen. Den Bereich der mesoskopischen Systeme mit ihren komplexen molekularen Einheiten hatte man eher abschätzig betrachtet und als zu kompliziert, zu angewandt und schlichtweg uninteressant abgetan.

Seit den 1980er Jahren kann man jedoch eine Renaissance der Kolloidwissenschaften beobachten, und die Physiker spielen dabei eine immer wichtigere Rolle. Dies äußert sich nicht nur in der Erschaffung des Begriffs Weiche Materie, sondern in einer außerordentlich lebendigen und vielfältigen Forschungslandschaft. Sie ist geprägt von einem engen Zusammenspiel von Theorie und Experiment, Grundlagenforschung und Anwendung und einem extrem interdisziplinären Ansatz, in dem Chemiker, Physiker, Ingenieure und Biologen zu gleichwertigen Partnern werden. *Aus dem hässlichen Entlein ist der schöne Schwan geworden*, was sich nicht zuletzt in der Verleihung des Physik-Nobelpreises im Jahre 1991 an Pierre-Gilles de Gennes manifestierte.

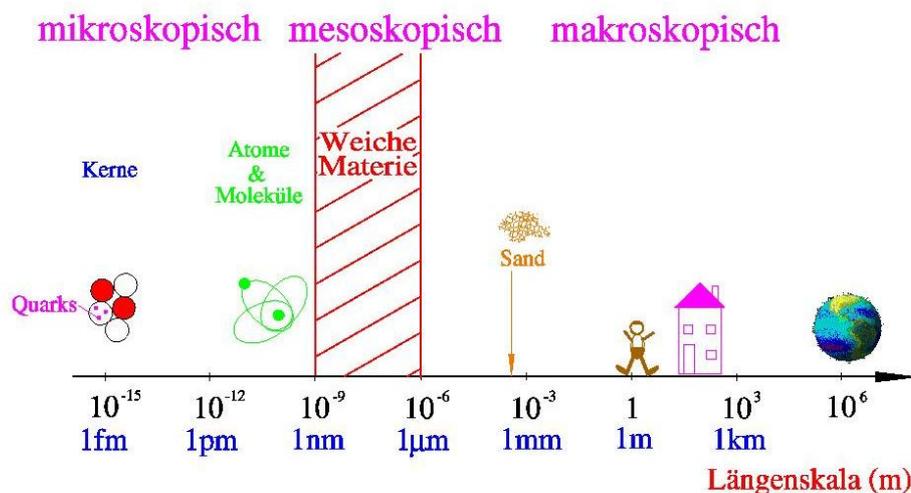


Abb. 1: Strukturelle Längenskalen in logarithmischer Auftragung für verschiedene Situationen im makroskopischen, mikroskopischen und dazwischen liegenden mesoskopischen Bereich.

Weiche kondensierte Materie (engl. *soft matter*) steht heute für einen sehr schnell expandierenden Wissenschaftsbereich.<sup>1</sup> Es gibt verschiedene Kenngrößen, welche „Weichheit“ charakterisieren; eine mögliche benutzt die elastischen Moduln von makroskopischen Substanzen: ist der Schermodul  $G$  bedeutend größer als der Kompressionsmodul  $E$ , dann ist eine Substanz offenbar leicht durch Abscherung verletzbar. Alle Fluide erfüllen diese Bedingung, aber auch feste mesoskopische Partikel, die in einer mikroskopischen Trägerflüssigkeit eingebettet (oder „suspendiert“) sind. Explizite Beispiele für Systeme der Weichen Materie sind kolloidale Suspensionen, Polymerketten, Membranen, Mikroemulsionen in ternären Öl-Wasser-Tensid-Mischungen usw., wie in Abbildung 2 skizziert. Darüber hinaus fallen auch biologische Makromoleküle darunter.

## Hierarchien der Weichen Materie: ein supramolekularer Baukasten

Mit supramolekularen Bausteinen der Weichen Materie kann man neue Kompositmaterialien bilden. Die Philosophie entspricht dem traditionellen Periodensystem der Elemente, das als „Baukastensystem“ benutzt werden kann, um sukzessive Moleküle aufzubauen – nur passiert jetzt alles auf einer größeren Längenskala. Dabei können, wie in Abbildung 3 dargestellt, verschiedene Hierarchieebenen erreicht werden. Als supramolekulare Grundbausteine kommen beispielsweise Kolloidkugeln, Polymerketten oder große Tensidmoleküle in Betracht, die somit die erste Hierarchieebene der Weichen Materie bilden. Mischt man die Bausteine, so selbstorganisieren sie zu größeren Einheiten, womit man

<sup>1</sup> Vgl. Schurtenberger (2003: 3).

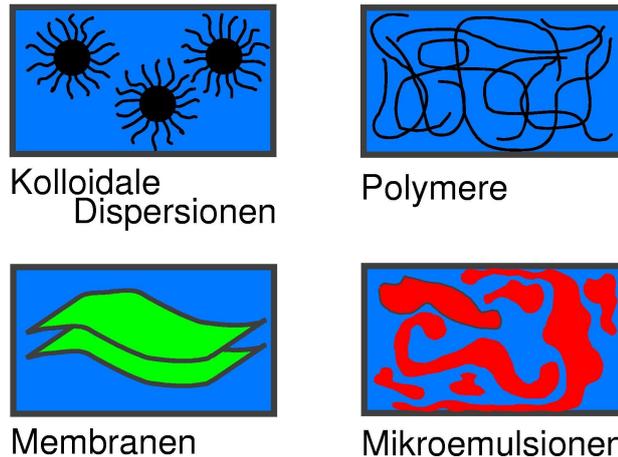


Abb. 2: Verschiedene Realisierungen von Weicher Materie: kolloidale Suspensionen, Polymere, Membranen und Mikroemulsionen.

zur zweiten Ebene der Hierarchie gelangt. In einem weiteren Schritt kann man diese Komposite wieder mischen und bekommt somit die dritte Ebene, und so fort.

Beispiele sind (1) eine Mikroemulsion, die durch die Mischung von Öl- und Wassertropfchen mit Tensidmolekülen erreicht wird, (2) Mischungen aus Kolloidkugeln und Polymerketten, die spontan vergelen können, und (3) Mischungen aus Polyelektrolytketten (das sind geladene Polymere) und ionischen Tensiden, die spontan lamellare Überstrukturen mit sehr geringen kritischen Oberflächenenergien ausbilden. Die Komposite haben somit im Allgemeinen Materialeigenschaften, die von denen der Einzelbaustein-Systeme sehr verschieden sind. Durch geschicktes Mischen gelingt es somit, neuartige Systeme zu komponieren.

## Konzepte zur theoretischen Beschreibung Weicher Materie

Die große Herausforderung an den Theoretischen Physiker besteht darin vorherzusagen, in welche Richtung sich die Materialeigenschaften von Kompositsystemen bei vorgegebenen Einzelbausteinen verändern. Verfügte man über eine solche detaillierte Kenntnis, dann könnte man systematisch nach Materialien mit neuartigen makroskopischen Eigenschaften suchen und damit „intelligente Materialien“ konstruieren.

Ein theoretischer Zugang zu den Eigenschaften Weicher Materie ist aber ungeheuer kompliziert, weil gleich zwei Längenskalen zu überbrücken sind: Zunächst muss die Lücke zwischen den mikroskopischen und mesoskopischen Skalen geschlossen werden und danach die 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 der mikroskopischen zur makroskopischen Beschreibung zu überwinden. Die theoretische Forschung hat in den letzten Jahrzehnten verschiedene mächtige Werkzeuge entwickelt, um Längenskalen zu überbrücken. Dazu zählen das statistische Prinzip des Herausintegrierens von Freiheitsgraden (engl. *coarse graining*),<sup>2</sup> die Methode der Computersimulation von Systemen unterschiedlicher Komplexität sowie

<sup>2</sup> Vgl. Löwen (2001).

## Hierarchie der Weichen Materie

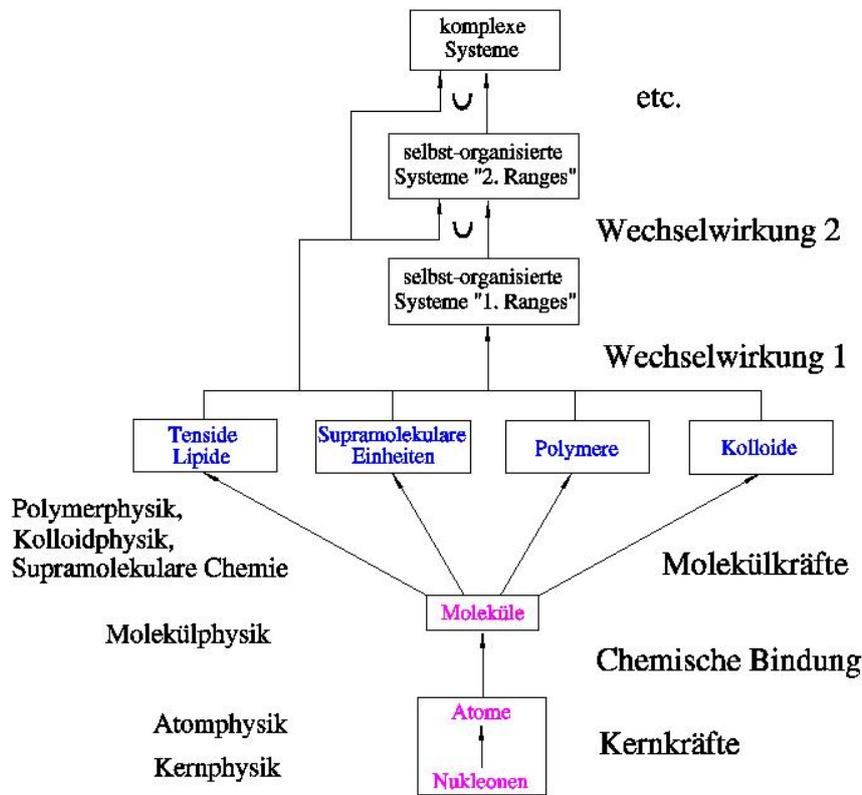


Abb. 3: Die Hierarchie Weicher Materie: aus supramolekularen Bausteinen werden neue Aggregate gebildet, die neuartige Materialeigenschaften besitzen.

Skalierungstheoriemethoden für Polymere. Das zuerst genannte Konzept des Herausintegrierens von Freiheitsgraden ist ein allgemein gültiges weitreichendes Konzept, das eine Vielzahl von Anwendungen in Systemen von Weicher Materie gefunden hat. Beispielsweise wird dadurch ein komplexes System wie ein Polymerknäuel oder eine Kolloidkugel als ein grob gerastertes Teilchen nur mit einem Translationsfreiheitsgrad beschrieben. Das führt zur effektiven Wechselwirkung<sup>3</sup> zwischen mesoskopischen Partikeln, wodurch eine Abbildung auf ein effektives klassisches Vielteilchensystem gelingt, das noch durch die mikroskopischen Charakteristika geprägt ist. Hierüber gelingt es dann wiederum, mit Hilfe klassischer Vielteilchentheorien zum makroskopischen Verhalten des Gesamtsystems zu gelangen.

### Beispiel: Sternpolymerlösungen

Ein Beispiel für das gleichzeitige Vorhandensein verschiedener Längenskalen in Systemen von Weicher Materie ist in Abbildung 4 gezeigt. Eine Lösung von Sternpolymeren in einem guten Lösungsmittel ist auf einer makroskopischen Skala strukturlos. Vor sehr feiner mikroskopischer Skala erkennt man dagegen die atomare Struktur der Lösungs-

<sup>3</sup> Vgl. Hansen und Löwen (2002).

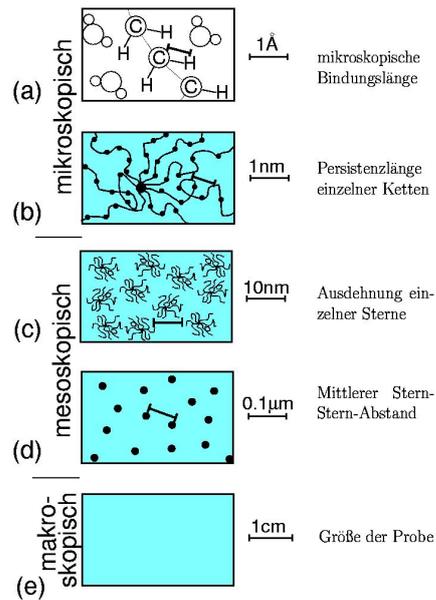


Abb. 4: Eine Lösung aus Sternpolymeren auf verschiedenen Längenskalen: a) mikroskopische Skala, auf der die atomare und molekulare Struktur der Lösungsmittelmoleküle und Monomere sichtbar wird, b) Persistenzlänge eines einzelnen Polymerarms, c) Koronadurchmesser als Maß der Ausdehnung eines einzelnen Sterns, d) typischer Zentrenabstand zwischen zwei benachbarten Sternpolymeren, e) strukturlose makroskopische Lösung.

mittelmoleküle 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 kann die Überbrückung dieser verschiedenen Skalen durch die Verwendung verschiedener theoretischer Techniken praktisch vollkommen erreicht werden: Mit Hilfe der Skalierungstheorie gelingt es, alle mikroskopischen Details loszuwerden. Durch Herausintegrieren von effektiven Monomeren erhält man die effektive Wechselwirkung zwischen zwei Sternen.<sup>4</sup> Auch in Computersimulationen kann man bei vorgegebenem Zentren-Zentren Abstand  $r$  zwischen zwei Sternpolymeren die mittlere Kraft  $F(r)$  messen. Abbildung 5 zeigt einen Simulationsschnappschuss.

Der entscheidende Parameter für die Größe der Kraft ist die Anzahl der Arme  $f$  eines einzelnen Sterns, die sogenannte Funktionalität. Die Simulationen zeigen, dass man die Kraft zwischen zwei Sternen mit einem sehr weichen Potential  $V(r)$  beschreiben kann, das für kleine Abstände  $r$  logarithmisch divergiert und als Vorfaktor mit der Armanzahl  $f^{3/2}$  skaliert. Mit einer klassischen Vielteilchentheorie bekommt man schließlich makroskopische thermodynamische Kenngrößen und kann das Volumenphasendiagramm von Stern-

<sup>4</sup> Vgl. Likos (2001).

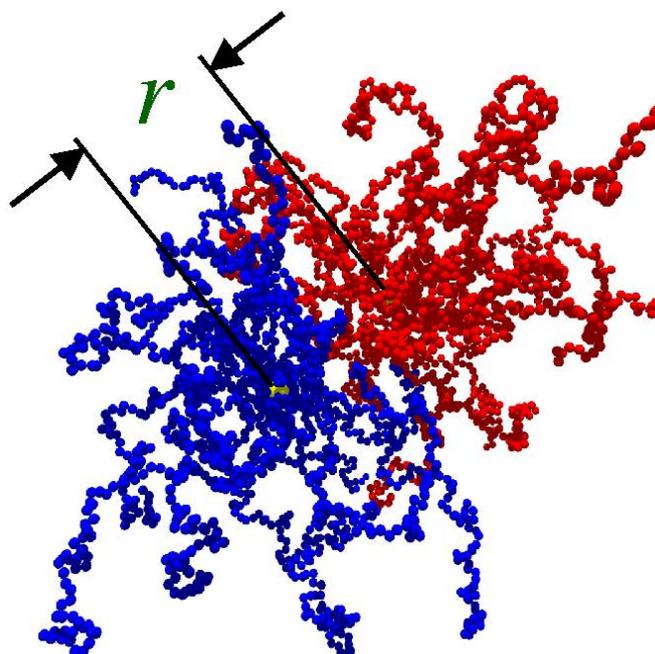


Abb. 5: Simulationsschnappschuss von zwei Sternpolymeren im Zentrenabstand  $r$ . Die Armzahl beträgt hier  $f = 18$ .

polymerlösungen vorhersagen. Abbildung 6 zeigt das volle Phasendiagramm als Funktion der Armanzahl  $f$  und der reduzierten Sterndichte  $\eta$ .<sup>5</sup> Neben dem *reentrant*-Schmelzeffekt als Funktion der Dichte  $\eta$  bei mittleren Armzahlen stellen sich locker gepackte exotische Kristallstrukturen als thermodynamisch stabil heraus. Diese spielen für optische Bandlückenmaterialien (photonische Kristalle) eine wichtige Rolle.

## Zusammenfassung

Der Themenbereich Weiche Materie ist aus dem vernachlässigten Tummelplatz einiger Chemiker und Ingenieure ein blühendes und faszinierendes interdisziplinäres Forschungsgebiet geworden. Aus schmutzigen, schlecht charakterisierbaren Drecksystemen haben sich maßgeschneiderte, hervorragend charakterisierte Proben entwickelt, die als Modellsysteme der statistischen Physik taugen. Aus dem hässlichen Entlein der Kolloidchemie ist der schöne Schwanz der Kolloidphysik geworden.

<sup>5</sup> Vgl. Watzlawek *et al.* (1999).

**Bibliographie**

- HANSEN, Jean-Pierre und Hartmut LÖWEN. „Effective interactions for large-scale simulations of complex fluids“, in: P. NIELABA, M. MARESCHAL und G. CICCOTTI (Hrsg.). *Bridging Time Scales: Molecular Simulations for the Next Decade*. Berlin u. a. 2002, 167-198.
- LIKOS, Christos N. „Effective interaction in soft condensed matter physics“, *Physics Reports* 348 (2001), 267-439.
- LÖWEN, Hartmut. „Colloidal soft matter under external control“, *Journal of Physics: Condensed Matter* 13 (2001), R415-R432.
- SCHURTENBERGER, Peter. „Die Geschichte vom häßlichen Entlein“, *Physik in unserer Zeit* 34 (2003), 3.
- WATZLAWEK, Martin, Christos N. LIKOS und Hartmut LÖWEN. „Phasediagram of star polymer solutions“, *Physical Review Letters* 82 (1999), 5289-5292.