

Hartmut Löwen

**Transregio-Sonderforschungsbereich TR6
„Physik kolloidaler Dispersionen in äußeren Feldern“**

Kolloidale Suspensionen als physikalische Modellsysteme

In der Wissenschaftlichen Einrichtung (WE) Physik der Heinrich-Heine-Universität stellt die Erforschung der Weichen Materie einen wichtigen Schwerpunkt dar. Weiche Materie umfasst definitionsgemäß alle Substanzen, die eine strukturelle Längenskala zwischen einem Nanometer und einem Mikrometer aufweisen und die makroskopisch weich sind. Aus dem Alltag bekannte Beispiele für solche Weichen Materialien sind Zahncreme, Pudding, Wandfarben und Blut. Die beiden letzten Beispiele werden auch als kolloidale Suspensionen bezeichnet. Dies sind formstabile mesoskopische Partikel, die in einem Fluidum dispergiert sind. Dazu zählen wässrige Suspensionen von Polystyrol- oder Latexkügelchen genauso wie stäbchenförmige Partikel oder Staubteilchen in Plasmen. Innerhalb der Weichen Materie zeichnen sich kolloidale Suspensionen deswegen besonders aus, weil sie zugleich gut präparierbar, sauber charakterisierbar sowie hervorragend kontrollierbar sind. Die Wechselwirkung zwischen den Kolloidpartikeln kann von außen eingestellt, d. h. maßgeschneidert werden. Zudem nehmen die Kolloide eine Sonderstellung als Prototyp Weicher Materie ein, weil sie in gewisser Weise zu den einfachsten komplexen Fluiden zählen: Die Längenskalenseparation zwischen dem molekularen Lösungsmittel und dem mesoskopischen kolloidalen Teilchen ist vollständig und eindeutig; sind die Teilchen kugelförmig und auf der mesoskopischen Skala ohne weitere Struktur, dann ist die höchstdenkbare Partikelsymmetrie realisiert. Dies impliziert direkt eine sehr gute und anpassungsfreie theoretische Modellierbarkeit der einzelnen Partikel. Die spannenden Fragen betreffen kollektive Vielteilcheneffekte, bei denen das Zusammenspiel vieler Teilchen essentiell ist. Ein schlagender Vorteil von Kolloiden besteht darin, dass diese Fragen simultan mit den drei unterschiedlichen Methodiken *Theorie*, *Computersimulation* und *Experiment* untersuchbar sind, die dann im gegenseitigen befruchtenden Vergleich komplementär eingesetzt werden können. 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 spielten. Ein tief gehendes theoretisches Verständnis bedeutet auch eine Einsicht in den zugrunde liegenden allgemeinen Mechanismus dieser Übergänge, so dass den Kolloiden eine exponierte Rolle als *Modellsystemen* kondensierter Materie und der Wissenschaft allgemein zukommt.

Abbildung 1 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme einer Dispersion aus Kolloidpartikeln. Es wird sofort klar, dass sich die Kugeln gleichen, d. h., ihre Größenpolydispersität ist gering. Ferner erkennt man, dass sich die Kügelchen auf einem regelmäßigen periodischen Gitter angeordnet haben. Dabei muss man sich in den Zwischenräumen noch

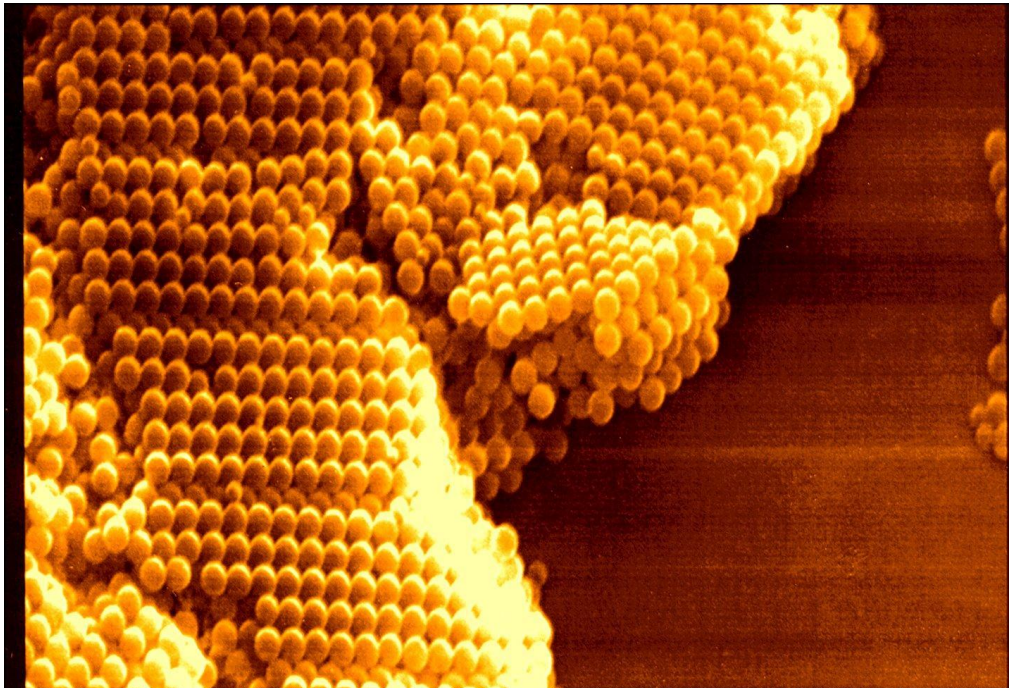


Abb. 1: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Aggregats aus mesoskopischen Polystyrolkugeln. Die mesoskopischen Teilchen haben sich auf einem periodischen Kristallgitter angeordnet. Der Partikeldurchmesser beträgt einen Bruchteil eines Mikrometers.

das Lösungsmittel (im vorliegenden Fall ist das Wasser) vorstellen. Die Kugeln bilden also einen Superkristall von Partikeln, die ihrerseits wiederum in einer Flüssigkeit eingebettet sind. Der Kompressionsmodul eines solchen Kristalls ist durch den 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 kleiner als das eines atomaren Kristalls. Damit ist dies eine eindrucksvolle Variante eines „weichen“ Systems. Das Studium des Gefrierübergangs im Gleichgewicht wurde nahezu gleichzeitig mit mikroskopischen Theorien, Computersimulationsstudien und Experimenten im Ortsraum durchgeführt. Das Gefrieren verändert sich signifikant unter einschränkender Geometrie (z. B. zwischen zwei parallelen Platten), und wieder hat in den letzten fünf Jahren der Vergleich zwischen Theorie und Experiment an Kolloidsystemen ein fundamentales Verständnis dieses allgemeinen Phänomens geleistet.

Kolloide Dispersionen unter Kontrolle

Während die Gleichgewichtseigenschaften kolloidaler Weicher Materie im Volumen mittlerweile eingehend erforscht und weitgehend verstanden sind, sind wichtige Fragen von Kolloiden in einschränkenden Geometrien und im Nichtgleichgewicht noch offen. Um diese Fragen gebündelt untersuchen zu können, wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft der Transregio-Sonderforschungsbereich (SFB) TR6 mit der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf als Sprecherhochschule ab dem 1. Juli 2002 eingerichtet. Weiterhin sind die Standorte Jülich, Mainz, Konstanz und Utrecht (Niederlande) beteiligt.¹ Im

¹ Siehe <http://www.sfb-tr6.de> (17. März 2003).

Rahmen dieses Sonderforschungsbereichs „Physik von kolloidalen Dispersionen in äußeren Feldern“ soll generell das Verhalten von kolloidaler Weicher Materie *unter äußeren Einwirkungen* im Fokus des Interesses stehen. Diese äußeren Einwirkungen werden durch *extern angelegte Kontrollfelder* (Scherfelder, elektrische und magnetische Felder, Lichtfelder, eingrenzende Geometrien) erreicht. Die Motivation hierfür ist vielschichtig: Zunächst reagiert Weiche Materie *per definitionem* sehr empfindlich auf äußere Manipulationen. Die mit großer Experimentierkunst realisierten stabilen *bulk*-Proben sind eher die Ausnahme als die Regel. Diese „Empfindsamkeit“ Weicher Materie hat man sich mit Hilfe ausgeklügelter Empirie in vielen technischen Prozessen bereits nutzbar gemacht. Es fehlt aber noch ein systematisches wissenschaftliches Verständnis, das von den Grundlagen der „mikroskopische“ Teilchenwechselwirkungen ausgeht und – auf die statistische Physik gegründet – auch quantitative Vorhersagen erlaubt. Darüber hinaus können starke äußere Einwirkungen zu interessanten, qualitativ neuen Effekten führen (z. B. die spontane Bildung von Phasenlagen unterschiedlicher Mikrostruktur unter Scherung, so genannte Scherungsbänder).

Im Gegensatz zu molekularen Systemen bieten Kolloide die faszinierende Möglichkeit, diese äußeren Einwirkungen *maßgeschneidert* und *kontrolliert* vorzunehmen und den Systemresponse auf *experimentell zugänglichen Längen- und Zeitskalen* direkt zu messen. Die Teilchenrelaxationszeit der Kolloide liegt typischerweise im Millisekundenbereich und ist daher viele Größenordnungen langsamer als die von Molekülen. Außerdem hat die mesoskopische Längenskala der Kolloide zur Folge, dass Veränderungen von strukturellen Korrelationen zwischen Partikeln gleichzeitig im Orts- und Impulsraum messbar sind (z. B. durch konfokale Mikroskopie und durch Lichtstreuung). Damit ist eine *real-space* und *real-time* Messung einer äußeren Einwirkung in greifbare Nähe gerückt. Dies sind ideale Situationen für die komplementären theoretischen Beschreibungen und Computersimulationen in inhomogenen Situationen und im Nichtgleichgewicht. Ebenso wie in den bislang studierten *bulk*-Situationen erscheint ein direkter Vergleich möglich und verspricht sowohl neue fundamentale Einsichten wie auch qualitativ neue Effekte. Damit können die Kolloidsysteme als Modellsysteme für andere, kompliziertere Weiche Materialien oder für molekulare kondensierte Materie eine Vorreiterrolle spielen.

Hieraus ergeben sich Perspektiven, die das Fachgebiet überschreiten: Versteht man beispielsweise das Prinzip des Iontentransports im Modellkanal, dann lässt dies auch Rückschlüsse auf den Mechanismus in biologisch relevanten komplizierteren Situationen zu. Wenn man es versteht, durch externe Felder Kolloide zu kontrollieren, zu manipulieren und zu steuern, dann birgt das ein hohes Anwendungspotential. So sind durchaus verschiedene technische Applikationen (wie die Anfertigung von hochreinen photonischen Kristallen durch extern kontrolliertes Kristallwachstum; durch elektrische Felder gesteuerte Stoßdämpfer, die auf den viskoelastischen Eigenschaften elektrorheologischer Fluide beruhen; schnelle optische Schalter; Optimierung von Bohrflüssigkeiten, die bei der Erdölgewinnung eine wichtige Rolle spielen, usw.) avisiert, die in Absprache mit verschiedenen Industrielabors entwickelt werden.

Was soll im Transregio-SFB TR6 genau erforscht werden?

Kolloide reagieren sehr empfindlich auf mechanische *Scherfelder*. In Scherzellen sind solche mechanischen Einwirkungen auf Kolloide kontrolliert untersuchbar. Dabei ist sowohl

lineare wie zeitlich oszillierende Scherung realisierbar. Beides sind intrinsische Nichtgleichgewichtssituationen. Im Transregio-SFB liegt ein besonderer Fokus auf der durch Scherung induzierten Strukturveränderung der Kolloide, auf ihrer modifizierten Dynamik und Viskosität sowie auf scherinduzierten Phasenübergängen. Durch Kombination von Lichtstreuung und konfokaler Mikroskopie kann man praktisch sämtliche Kolloidkorrelationen extrahieren. Auf der anderen Seite soll die Scherung mittels einfacher Modelle in Computerexperimenten simuliert werden. Schließlich bieten moderne Modenkopplungstheorien einen geeigneten Rahmen, um Schereinwirkungen kohärent theoretisch zu beschreiben. Besonderes Augenmerk muss hierbei auf die durch das Lösungsmittel hervorgerufenen hydrodynamischen Wechselwirkungen gerichtet werden.

Geladene Kolloide sind durch *elektrische Gleich- und Wechselfelder* beeinfluss- und steuerbar; Effekte reichen von der elektrophoretischen Mobilität über Steuerung von Staubteilchen in Plasmen bis zu Anwendungen von elektrorheologischen Fluiden. Das elektrische Feld greift dabei sowohl an die geladenen Kolloidteilchen (Polyionen) wie auch an das zusätzliche Mikroionenplasma an, das seinerseits über die Coulombwechselwirkung an die geladenen Polyionen gekoppelt ist. Gleichzeitig spielen hydrodynamische Wechselwirkungen und Mikroionendämpfungseffekte eine wichtige Rolle.

Optische *Lichtfelder* koppeln an die Dielektrizitätskonstante der Kolloidteilchen an. Mit superponierten Laserstrahlen gelingt es somit, ein maßgeschneidertes externes Potential für die Kolloidteilchen zu generieren. Das Anwendungspotential dieser Idee reicht von der Konstruktion einer optischen Pinzette für ein einzelnes Kolloidteilchen über periodisch-modulierte Felder bis zur Konstruktion von „optischen Kanälen“, in denen sich die Kolloidteilchen zwangsweise bewegen. Auch diese Felder können statisch oder zeitabhängig sein, insbesondere können Ein- und Ausschalteffekte und die Relaxation des Kolloidsystems zurück ins Gleichgewicht direkt detektiert und verfolgt werden.

Obwohl sie den gleichen physikalischen Ursprung haben, seien *Magnetfelder* hier besonders erwähnt, weil sie an die magnetische Suszeptibilität der Kolloidteilchen anknüpfen. Sie regieren die effektive Wechselwirkung von paramagnetischen Kolloidpartikeln an einer Wasser-Luft-Grenzfläche und induzieren einen Einfrierübergang, der durch weitere magnetische Störfelder noch modifiziert werden kann. Der Reiz dieser Systeme besteht darin, dass sie exzellente Realisierungen strikt zweidimensionaler Fluide sind und damit qualitativ ein ganz anderes elastisches und thermodynamisches Verhalten als im üblichen Fall von drei Raumdimensionen an zeigen.

Schließlich sollen noch topographische Felder, d. h. *einschränkende Geometrien*, betrachtet werden. Eine typische Geometrie-einschränkung erfolgt durch eine oder zwei planparallele Glasplatten; mit Ätzmethoden lassen sich aber auch Substrate herstellen, die eine totale Geometriereduktion zur Folge haben und auf ein endliches Kolloidsystem führen. Die strukturellen und dynamischen Korrelationen solcher eingeschränkter Kolloidsysteme sind auch im Gleichgewicht noch nicht komplett verstanden. Ein entsprechend gemustertes Substrat kann gezielt zum Züchten von hochreinen Kolloidkristallen benutzt werden, die wiederum das Ausgangsmaterial zur Herstellung photonischer *Bandgap*-Materialien bilden. Außerdem spielen sich vielfältige Benetzungs- und Nukleationsphänomene an Wänden ab, die in Kolloidsystemen im Ortsraum direkt visualisiert werden können. Noch komplizierter, aber umso reichhaltiger sind bewegte Hindernisse, die das Transportverhal-

ten kolloidaler Weicher Materie stark modifizieren; ein Effekt, der z. B. bei Bohrfluiden ausgenutzt wird, aber noch nicht systematisch verstanden ist.

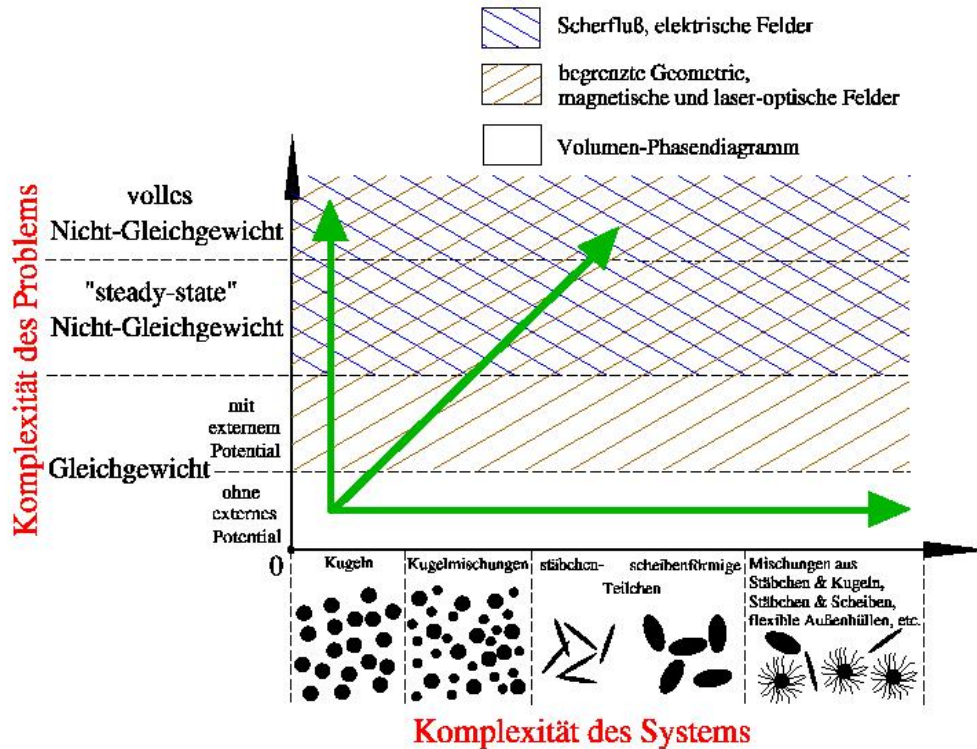


Abb. 2: Klassifikation von Komplexität als Komplexität des Systems (x -Achse) und Komplexität des Problems (y -Achse) und mögliche Forschungsrichtungen.

Alle zu untersuchenden Fragen können in einem Schema (*roadmap*) nach verschiedenen Komplexitätsgraden klassifiziert werden (siehe Abbildung 2).² Auf der x -Achse ist die Komplexität des Systems gezeigt. Wachsende Komplexität liegt vor in der Sequenz: Kugeln \Rightarrow Mischungen von Kugeln \Rightarrow Stäbchen \Rightarrow Teilchen mit inneren Freiheitsgraden (wie z. B. flexible Schalen). Auf der y -Achse ist dagegen die Komplexität des Problems skizziert. Von Volumeneigenschaften im Gleichgewicht erhöht sich die Komplexität unter Einwirkung eines externen Potentials im Gleichgewicht bis hin zum *steady state*-Nichtgleichgewicht oder zum vollen zeitabhängigen Nichtgleichgewicht. Die oben beschriebenen verschiedenartigen externen Felder führen zu verschiedenen Komplexitäten des Problems. Drei mögliche Forschungsstoßrichtungen sind ebenfalls in Abbildung 2 eingezeichnet. Erhöht werden kann entweder die Komplexität des Systems, die Komplexität des Problems, oder beides gleichzeitig. Um das gesamte Gebiet mit wissenschaftlicher Kenntnis zu besetzen, ist optimistisch gesehen eine Explorationszeit von einigen Jahrzehnten zu erwarten.

² Vgl. Löwen (2001).

Die Struktur des Transregio-SFB TR6

An den vier deutschen Standorten Düsseldorf, Jülich, Konstanz und Mainz liegt wertvolle Expertise im Bereich der Kolloidphysik vor. Diese Rheinschiene wird jetzt durch den SFB gebündelt, wie in Abbildung 3 skizziert.

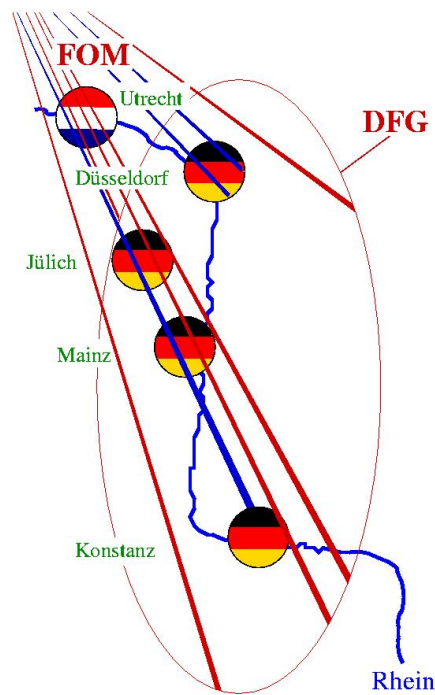


Abb. 3: Struktur und Standorte des deutsch-niederländischen SFB TR6.

Es finden an jedem Ort SFB-Seminare statt; interne Workshops und ein Austausch von Wissenschaftlern und Gästen tragen zum fruchtbaren wissenschaftlichen Austausch bei. Gleichzeitig ist Utrecht ein weiterer ausländischer Standort, der eine langjährige Tradition in der Kolloidwissenschaft besitzt. Forschungspolitisch ist das ein Novum, weil bislang Sonderforschungsbereiche auf deutschen Boden beschränkt waren. Durch eine gemeinsame Anstrengung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) einerseits und des niederländischen Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) wurde eine gemeinsame Begehung abgestimmt, in dem die deutschen Standorte durch die DFG und die Projekte aus Utrecht durch das FOM finanziert werden. Durch die Einrichtung des Transregio-Sonderforschungsbereichs wurde der Schwerpunkt Weiche Materie der WE Physik in Düsseldorf weiter gestärkt. Sowohl eine C4-Stelle für Experimentelle Physik Weicher Materie als auch eine C3-Stelle für Theoretische Physik Weicher Materie sind zur Zeit in der Besetzung. Die zukünftige Stelleninhaber sollen aktiv in den SFB TR6 miteingebunden werden, damit der Standort Düsseldorf ein den anderen Standorten gleichrangiges Gewicht erhält.

Bibliographie

LÖWEN, Hartmut. „Colloidal soft matter under external control“, *Journal of Physics: Condensed Matter* 13 (2001), R415-R432.