

- [36] B. Hille, *Ionic Channels of Excitable Membranes*, Sinauer Associates Inc., Sunderland, MA, USA, 1984.
- [37] M. Mishina, T. Tobimatsu, K. Imoto, K. Tanaka, Y. Fujita, K. Fukada, M. Kurasaki, H. Takahashi, Y. Morimoto, T. Hirose, S. Inayama, T. Takahashi, M. Kuno, S. Numa, *Nature (London)* **1985**, *313*, 364.
- [38] B. Sakmann, C. Methfessel, M. Mishina, T. Takahashi, T. Kawai, M. Kurasaki, K. Fukuda, S. Numa, *Nature (London)* **1985**, *318*, 539.
- [39] K. Imoto, C. Methfessel, B. Sakmann, M. Mishina, Y. Mori, T. Konno, K. Fukuda, M. Kurasaki, H. Bujo, Y. Fujita, S. Numa, *Nature (London)* **1986**, *324*, 670.
- [40] K. Imoto, C. Busch, B. Sakmann, M. Mishina, T. Konno, J. Nakai, H. Bujo, Y. Mori, K. Fukuda, S. Numa, *Nature (London)* **1988**, *335*, 645.
- [41] T. Konno, C. Busch, E. von Kitzing, K. Imoto, F. Wang, J. Nakai, M. Mishina, S. Numa, B. Sakmann, *Proc. R. Soc. London B* **1991**, *244*, 69.
- [42] A. Villarroel, S. Herlitze, M. Koenen, B. Sakmann, *Proc. R. Soc. London B* **1991**, *243*, 69.
- [43] A. Villarroel, B. Sakmann, *Biophys. J.* **1992**, *62*, 196.
- [44] P. W. Atkins, M. J. Clugston, *Principles of Physical Chemistry*, Pitman Publishing, London, 1983.
- [45] J. C. Eccles, in *Les Prix Nobel en 1963*, The Nobel Foundation, Stockholm, 1963, S. 26–283; *Angew. Chem.* **1964**, *76*, 674–681.
- [46] B. Sakmann, O. P. Hamill, J. Bormann, *J. Neural Transm. Suppl.* **1983**, *18*, 83.
- [47] H. Betz, *Biochemistry* **1990**, *29*, 3591.
- [48] J. Bormann, O. P. Hamill, B. Sakmann, *J. Physiol.* **1987**, *385*, 243.
- [49] O. P. Hamill, J. Bormann, B. Sakmann, *Nature (London)* **1983**, *305*, 805.
- [50] P. Ascher, L. Nowak, *J. Physiol.* **1988**, *399*, 227.
- [51] S. G. Cull-Candy, M. M. Usovitz, *Nature (London)* **1987**, *325*, 525.
- [52] C. E. Jahr, C. F. Stevens, *Nature (London)* **1987**, *325*, 522.
- [53] T. A. Verdoorn, A. Draguhn, S. Ymer, P. H. Seeburg, B. Sakmann, *Neuron* **1990**, *4*, 919.
- [54] F. A. Edwards, A. Konnerth, B. Sakmann, T. Takahashi, *Pflügers Arch.* **1989**, *414*, 600.
- [55] B. Sakmann, F. Edwards, A. Konnerth, T. Takahashi, *Q. J. Exp. Physiol.* **1989**, *74*, 1107.
- [56] F. A. Edwards, A. Konnerth, B. Sakmann, mit Anhang von C. Busch, *J. Physiol.* **1990**, *430*, 213.
- [57] C. Busch, B. Sakmann in *The Brain. Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* **1990**, *55*, 69–80.
- [58] P. Jonas, B. Sakmann, *J. Physiol.* **1992**, im Druck.
- [59] P. Stern, F. A. Edwards, B. Sakmann, *J. Physiol.* **1992**, *449*, 247; P. Jonas, B. Sakmann, *ibid.* **1992**, *446*, 515 P.
- [60] C. Franke, H. Hatt, J. Dudel, *Neurosci. Lett.* **1987**, *77*, 199.
- [61] D. Colquhoun, P. Jonas, B. Sakmann, *J. Physiol.* (1992) im Druck.
- [62] L. O. Trussell, G. D. Fischbach, *Neuron* **1989**, *3*, 209.
- [63] M. Hollmann, A. O'Shear-Greenfield, W. Rogers, S. Heinemann, *Nature (London)* **1989**, *342*, 643.
- [64] K. Keinänen, W. Wisden, B. Sommer, P. Werner, A. Herb, T. A. Verdoorn, B. Sakmann, P. H. Seeburg, *Science (Washington, D.C.)* **1990**, *249*, 556.
- [65] B. Sommer, K. Keinänen, T. A. Verdoorn, W. Wisden, N. Burnashev, A. Herb, M. Köhler, T. Takagi, B. Sakmann, P. H. Seeburg, *Science (Washington, D.C.)* **1990**, *249*, 1580.
- [66] M. Hollmann, M. Hartley, S. Heinemann, *Science (Washington, D.C.)* **1991**, *252*, 851.
- [67] T. A. Verdoorn, N. Burnashev, H. Monyer, P. H. Seeburg, B. Sakmann, *Science (Washington, D.C.)* **1991**, *252*, 1715.
- [68] R. I. Hume, R. Dingledine, S. Heinemann, *Science (Washington, D.C.)* **1991**, *253*, 1028.
- [69] N. Burnashev, H. Monyer, P. H. Seeburg, B. Sakmann, *Neuron* **1992**, *8*, 189.
- [70] A. Khodorova, N. Burnashev, *J. Physiol.* **1991**, *446*, 516 P.
- [71] B. Sommer, M. Köhler, R. Sprengel, P. H. Seeburg, *Cell* **1991**, *67*, 11.

## Weiche Materie (Nobel-Vortrag)\*\*

### Von Pierre-Gilles de Gennes\*

Was verstehen wir unter weicher Materie? Die Amerikaner ziehen den Begriff „komplexe Flüssigkeiten“ vor, und dieser bezeichnet in der Tat zwei der wichtigsten Eigenschaften weicher Materie: Komplexität und Flexibilität.

1) **Komplexität:** In einem gewissen, vereinfachten Sinn kann man sagen, daß die Entwicklung der modernen Biologie von Studien einfacher Modellsysteme (Bakterien) ihren Ausgang nahm und heute beim Studium komplexer multizellulärer Organismen (Pflanzen, wirbelloser Tiere, Wirbeltiere...) angelangt ist. In ähnlicher Weise baut auf der explosionsartigen Entwicklung der Atomphysik in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts das Studium der weichen Materie auf, d. h. der Polymere, Tenside, Flüssigkristalle und Kolloide.

2) **Flexibilität:** Ich möchte dies gern anhand eines uralten „Polymerisationsexperimentes“ von Indianern des Amazonas-Beckens erklären. Sie sammelten den Saft des Gummibaumes und ließen ihn an ihren Füßen kurz „trocknen“ – und schon hatten sie Schuhe. Aus mikroskopischer Sicht enthält die Ausgangssubstanz eine Reihe unabhängiger, flexibler Polymerketten. Der Luftsauerstoff baut einige wenige

Brücken zwischen die Ketten ein, und das Ergebnis ist eine spektakuläre Veränderung: der Wechsel von einer flüssigen zu einer vernetzten Struktur, die auf Zug belastbar ist. Sie ist uns als **Gummi** (auf Französisch: Caoutchouc, eine direkte Übertragung des indianischen Wortes) bestens bekannt. Was an diesem Experiment so verblüfft, ist die Tatsache, daß ein sehr geringfügiger chemischer Eingriff eine so drastische Veränderung der mechanischen Eigenschaften zur Folge hat: Dies ist typisch für weiche Materie.

Andere Polymere wiederum neigen dazu, steife Strukturen aufzubauen. Ein wichtiges Beispiel sind die **Enzyme**. Sie bestehen aus einer langen Kette von Aminosäuren, die sich zu einer mehr oder weniger kompakten Kugel zusammenfaltet. Einige dieser Aminosäuren spielen eine besondere Rolle, sie bilden das aktive Zentrum, das einer spezifischen Erkennung oder Katalyse dient. Jacques Monod stellte schon vor langer Zeit eine interessante Frage. Er sagte: An jedem Punkt der Kette haben wir eine Auswahl von ca. zwanzig Aminosäuren, und wir möchten eine Rezeptorbindungsstelle aufbauen, in der die „aktiven Elemente“ in einer bestimmten räumlichen Form angeordnet sind. Wir können diese aktiven Elemente nicht einfach hintereinander anordnen, denn Orientierung und Position wären dann nicht korrekt. Deshalb brauchen wir zwischen zwei aktiven Elementen einen „Abstandshalter“ (Spacer), d. h. eine Kette von Aminosäuren mit genügend Variationsmöglichkeiten, um eine relativ gute Positionierung der aktiven Elemente an ihren Enden zu ermöglichen. Monods Frage war: Wie lang muß ein Spacer mindestens sein? Es stellte sich heraus, daß diese Länge

\* Prof. P.-G. de Gennes  
Collège de France  
11, Place Marcelin-Berthelot, F-75231 Paris Cedex 05 (Frankreich) oder  
Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI)  
10, Rue Vauquelin, F-75231 Paris Cedex 05 (Frankreich)

\*\* Copyright © The Nobel Foundation 1992. – Wir danken der Nobel-Stiftung Stockholm, für die Genehmigung zum Druck einer deutschen Fassung des Vortrags.

ziemlich exakt definiert ist<sup>[1]</sup>. Die magische Zahl ist 13 oder 14. Mit weniger als 13 Einheiten wird man normalerweise die gewünschte Konformation nicht erreichen; mit mehr als 14 wird es viele brauchbare Sequenzen geben. Die Erklärung ist primitiv; sie zieht zwar Volumeneffekte in Betracht, nicht aber eine weitere Voraussetzung für ein stabiles Enzym – daß nämlich das Innere vorzugsweise aus hydrophoben Teilen bestehen sollte, während die Oberfläche hydrophil sein muß. Aber ich vermute, daß diese Zusatzbedingung die magische Zahl um nicht mehr als eins verändern kann. Wenn wir die Länge der Spacer in einem einfachen kugelförmigen Protein, z.B. Myosin, betrachten, so sehen wir, daß sie in der Tat nicht weit von der magischen Zahl entfernt ist.

Lassen Sie uns nun zu den **flexiblen Polymeren** in Lösungen zurückkehren und einige ihrer eigenartigen mechanischen Eigenschaften betrachten. Ein schönes Beispiel ist das Vier-Rollen-Experiment von Andrew Keller und Mitarbeitern<sup>[2]</sup>. In diesem Experiment wird eine verdünnte Lösung von Knäuelmolekülen einer rein longitudinalen Scherung ausgesetzt. Wenn die Ausgangstrajektorie gut gewählt wird (in der Symmetrieebene des Ausgangskanals), wirken die Scherkräfte auf die Moleküle über einen langen Zeitraum. Übersteigt nun die Scherrate  $\dot{\gamma}$  einen bestimmten Schwellenwert  $\dot{\gamma}_c$ , so findet ein abrupter Übergang statt, und das Medium wird doppelbrechend. Dieses Phänomen habe ich Knäuel-Streck-Übergang (coil-stretch transition) genannt<sup>[3]</sup>. Wenn die Scherung beginnt, das Knäuel zu öffnen, kann sie noch besser angreifen, sie öffnet das Knäuel noch weiter, und dies führt schließlich zu einem abrupten Übergang. Wir sehen hier einen weiteren faszinierenden Aspekt weicher Materie – die verblüffende Kopplung zwischen mechanischen Eigenschaften und der Konformation. Keller zeigte, daß die Ketten ziemlich bald brechen (bei Scherraten  $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$ ), und zwar nahe der Molekülmitte – ein wahrhaft spektakuläres Resultat.

Eine weitere interessante Eigenschaft von verdünnten Lösungen von Knäuelmolekülen ist deren Fähigkeit, Reibungsverluste in turbulenten Strömungen zu verringern, allgemein bekannt als Toms-Effekt. In Wirklichkeit wurde er bereits vor Toms von Karol Mysels entdeckt<sup>[4]</sup>. Gemeinsam mit M. Tabor haben wir versucht, ein Skalierungsmodell für Knäuel in turbulenten Strömungen auszuarbeiten<sup>[5]</sup>, aber unsere Freunde aus der Mechanik meinen, daß es nicht realistisch ist – die Zukunft wird uns zeigen, was die richtige Antwort ist.

Ich habe viel über Polymere gesprochen. Lassen Sie mich nun hinüberwechseln zu **Tensiden**. Tensidmoleküle bestehen

aus zwei Teilen: einem polaren Kopf, der Wasser mag, und einem aliphatischen Schwanz, der Wasser verabscheut. Benjamin Franklin führte ein großartiges Experiment durch: In einen Teich in Clapham Common schüttete er etwas Ölsäure, ein natürliches Tensid, welches die Neigung hat, auf der Wasseroberfläche einen dichten Film zu bilden. Er maß die Ölsäuremenge, die erforderlich war, um den ganzen Teich zu bedecken. Da er die Oberfläche kannte, kannte er auch die Filmdicke – ungefähr drei Nanometer in unserem heutigen Maßsystem. Meines Wissens war dies das erste Mal, daß die Größe von Molekülen gemessen wurde. Heutzutage, wo wir durch außerordentlich komplexe „Untersuchungsinstrumente“ – unser Spielzeug sind Kernreaktoren und Synchrotronstrahlungsquellen – verwöhnt sind, erzähle ich meinen Studenten besonders gern von diesen einfachen Experiments à la Franklin.

Tenside ermöglichen es uns, eine Wasseroberfläche zu schützen oder die wundervollen **Seifenblasen** zu erzeugen, die unsere Kinder erfreuen. Das meiste zum Verständnis dieser Seifenblasen verdanken wir einem bemerkenswerten Team: Mysels, Shinoda und Frankel, die das Standardwerk zu diesem Thema geschrieben haben<sup>[6]</sup>. Leider ist ihr Buch kaum mehr zu bekommen – ich hoffe sehr, daß es nachgedruckt wird.

Bereits vor langer Zeit interessierten sich Françoise Brochard, Jean-François Lennon und ich<sup>[7]</sup> für bestimmte **Doppelschicht-Strukturen**, die aus zwei Tensid-Monoschichten aufgebaut sind, die beide ihre polaren Zentren dem Wasser zuwenden. Ein verwandtes, wenn auch komplexeres System dieser Art sind die roten Blutkörperchen. Lange war bekannt, daß diese Körperchen flimmern, wenn sie im Phasenkontrastmikroskop beobachtet werden. Manchmal glaubte man, daß dieses Flimmern die Instabilität eines lebenden Systems unter Nicht-Gleichgewichtsbedingungen wider-spiegelt. Tatsächlich ist die Sache viel einfacher: Eine wichtige Eigenschaft unlöslicher Doppelschichten (Bilayer) ist die, daß sie ihre Oberfläche bei einer vorgegebenen Zahl von Tensidmolekülen optimieren. Auf diese Weise ist die Energie hinsichtlich der Oberfläche gleichbleibend, und die Oberflächenspannung verschwindet. Dies bedeutet, daß die Geschwindigkeit der Formveränderung dieser Zellstrukturen oder „Bläschen“ (Vesikel) gewaltig ist; und das Flimmern ist ein Beispiel für die Brownsche Bewegung eines sehr flexiblen Objekts. Jean-François maß die Raum-Zeit-Abhängigkeit des Flimmerns, und Françoise zeigte dann, daß man diese Daten aus einem Modell ableiten konnte, das keine Oberflächenspannungen hatte, sondern nur Krümmungsenergien



Pierre-Gilles de Gennes wurde 1932 in Paris geboren. Von 1955 bis 1959 war er Forschungsingenieur am Atomenergiezentrum (Saclay), wo er unter der Anleitung von A. Abragam und J. Friedel 1957 über Neutronenbeugung und Magnetismus promovierte. Nach einem Postdoc-Aufenthalt 1959 bei C. Kittel in Berkeley wurde er 1961 Assistenprofessor in Orsay. Dort arbeitete er zunächst über Supraleiter und ab 1968 über Flüssigkristalle. 1971 wurde er Professor am Collège de France und befaßte sich vor allem mit der Polymerphysik. Seit 1980 beschäftigt er sich in erster Linie mit Oberflächenproblemen wie Benetzungs- und Adhäsionsvorgängen. Zu seinen vielen Ehrungen gehören der Ampère-Preis der französischen Akademie der Wissenschaften, der Harvey- und der Wolf-Preis (beide Israel) sowie der Nobel-Preis für Physik. Er ist unter anderem Mitglied der französischen Akademie der Wissenschaften und der National Academy of Sciences der USA.

und viskose Kräfte aufwies – ein weiteres gutes Beispiel für weiche Materie.

Dies war in der Tat der Ausgangspunkt für viele Studien über Doppelschichten (Pionier war W. Helfrich) und in analoger Weise über beliebige Oberflächen (random surfaces), die besonders mit D. Nelson untersucht wurden. Einer der größten Erfolge auf diesem Gebiet war die Entdeckung der „Schwammpause“ von **Mikroemulsionen**<sup>[8, 9]</sup>. Aber ganz allgemein ist es amüsant, von diesen Leuten zu lernen, daß es gewisse Überschneidungen zwischen hochgestochenen String-Theorien und der einfachen Beschreibung von Seife gibt!

Lassen Sie mich nun zu einer anderen Ecke unseres Gartens hinüberwechseln: zu den **Flüssigkristallen**. Hier muß ich zunächst zwei bedeutenden Pionieren Tribut zollen: 1) Georges Friedel, der als erster begriff, was ein Flüssigkristall genau ist und welche Haupttypen es gibt, sowie 2) Charles Frank, der (nach einigen Vorarbeiten von Oseen) die Theorie der nematischen Flüssigkristalle aufstellte und auch einige ihrer topologischen Defekte beschrieb. Ich will hier nur über die smektischen Flüssigkristalle sprechen. Nachdem Friedel gewisse konische Defekte in smektischen Phasen entdeckt hatte, konnte er beweisen, daß ihre Struktur aus flüssigen, äquidistanten und deformierbaren Schichten aufgebaut war<sup>[10]</sup>. Durch Beobachtungen im 100 µm-Bereich konnte er auf die genaue Struktur im 10 Å-Bereich schließen, eine verblüffende Leistung.

Die smektischen Phasen bringen mich natürlich auf eine andere wichtige Eigenschaft komplexer Flüssigkeiten, nämlich, daß es heutzutage manchmal möglich ist, *neue Formen weicher Materie zu entwickeln*. Die oben erwähnte Schwammpause war ein Beispiel dafür. Aufregend war auch die Erfindung ferroelektrischer smektischer Phasen durch R. B. Meyer (in Orsay, ca. 1975). Er dachte über eine bestimmte Anordnung chiraler Moleküle nach, die automatisch eine bestimmte Phase (die „C-Phase“) bilden sollte mit einem definierten elektrischen Dipol. Innerhalb einiger Monate hatten unsere Chemiker am Ort die richtige Verbindung synthetisiert, und der erste ferroelektrische Flüssigkristall war geboren<sup>[11]</sup>! Diese Materialien sind schon jetzt sehr wichtig für die Herstellung von Displays geworden – sie lassen sich tausendmal schneller als die nematischen Flüssigkristalle in unseren Armbanduhren schalten.

Von geringerer praktischer Bedeutung, aber sehr amüsant, sind die von M. Veyssié und P. Fabre entwickelten „ferro-smektischen“ Materialien. Der Ausgangspunkt ist ein Ferrofluid auf Wasserbasis, das ist eine Suspension sehr kleiner magnetischer Teilchen. (Ferrofluids sind vor langer Zeit von R. Rosensweig erfunden worden und haben aufregende Eigenschaften.) **Ferrosmektische Materialien** sind nach Art eines Club-Sandwiches aufgebaut: Doppelschicht|Ferrofluid|Doppelschicht|... Wird ein solches System einem Magnetfeld  $\vec{H}$  ausgesetzt, fühlt es sich wohler, wenn die Feldlinien parallel zu den Schichten laufen. Es ist interessant, diese Schichten unter einem Polarisationsmikroskop zu betrachten, wenn die Feldlinien senkrecht zu den Schichten verlaufen. Bei geringer Feldstärke ist nichts zu sehen, aber oberhalb einer bestimmten, sehr niedrigen Schwelle  $H_c$  erscheinen blumenähnliche Figuren<sup>[12]</sup>. Wir verstehen dies als einen zweistufigen Prozeß: a) unmittelbar über der Schwelle gibt es eine chemische wellenförmige Instabilität, b) später erscheinen fokussierende Keile mit einer Ausgangsgröße, die von der ursprünglichen Welle vorgegeben wird, und zusätzlich

kleinere Keile (die nötig sind, um die Zwischenräume genau auszufüllen). Dieser „Club-Sandwich“ reagiert schon auf extrem schwache Magnetfelder (ca. 30 Gauß).

Lassen Sie mich noch ein weiteres exotisches Material erwähnen: **Januskörper**, die zuerst von C. Casagrande und M. Veyssié geschaffen wurden. So wie der Gott Janus zwei Gesichter hat, haben die Januskörper zwei Seiten: eine apolare und eine polare. Daher ähneln sie in manchen Eigenschaften den Tensiden. Es gibt aber auch einen interessanten Unterschied, wenn wir die Filme betrachten, die sie bilden – zum Beispiel an der Wasser-Luft-Grenzfläche. Ein dichter Film eines konventionellen Tensids ist völlig undurchlässig. Dagegen hat ein dichter Film von Januskörpern Minilücken zwischen den Körnern, wodurch ein chemischer Austausch zwischen beiden Seiten möglich ist: „die Haut kann atmen“. Dies könnte eine gewisse praktische Bedeutung haben.

Die zuerst zur Herstellung von Januskörpern angewendete Technik basierte auf sphärischen Teilchen, die halb in Plastik eingebettet und auf der zugänglichen Seite mit Silikon beschichtet wurden<sup>[13]</sup>. Damit lassen sich aber nur kleinste Mengen erzeugen. Eine Forschergruppe der Th. Goldschmidt AG in Essen fand einen viel klügeren Weg: Hohle Glaspartikel, die im Handel erhältlich sind, werden außen wasserabweisend gemacht und anschließend zerkleinert. Die entstandenen Minischörper sind auf der einen Seite wasseranziehend und auf der anderen wasserabweisend. Sie sind zwar ungleichmäßig, können aber tonnenweise(!) produziert werden.

Ich möchte noch kurz auf den Forschungsstil bei der Untersuchung weicher Materie eingehen. Einer der wichtigsten Punkte ist die Möglichkeit, sehr einfache Experimente wie das von Benjamin Franklin durchführen zu können. Zwei Beispiele: Das erste bezieht sich auf das **Benetzen** von Fasern. Üblicherweise bildet sich auf einer Faser eine Reihe von Tropfen, nachdem sie in eine Flüssigkeit getaucht wurde, so daß man lange glaubte, daß die meisten bekannten Fasern nicht benetzbar seien. F. Brochard analysierte theoretisch das Gleichgewicht auf gekrümmten Oberflächen und vertrat die Ansicht, daß in vielen Fällen ein benetzender Film zwischen den Tropfen vorhanden sind müsse. J. M. di Meglio und D. Quéré bewiesen die Existenz und die Dicke des Films auf sehr elegante Weise<sup>[14]</sup>: Sie stellten zwei benachbarte Tropfen her, der eine klein, der andere groß, und zeigten, daß der kleine sich langsam in den großen entleerte (entsprechend den Kapillarkräften). Durch Messung der Geschwindigkeit dieses Vorgangs konnten sie auf die Dicke des Films zwischen den beiden Tropfen auf der Faser schließen, denn die Fließrate hängt nach Poiseuille stark von der Dicke ab.

Ein weiteres elegantes Experiment in Sachen Benetzung betrifft die Grenzlinie eines Tropfens auf einem festen Untergrund. Wenn man diese Linie durch eine äußere Maßnahme stört, kehrt sie in ihre ursprüngliche Gleichgewichtsposition zurück, wobei die Relaxationsgeschwindigkeit von der Wellenlänge der Störung, die wir erforschen wollten, abhängig ist. Aber wie konnten wir diese Berührungsline stören? Ich dachte an sehr komplizierte Tricks, z.B. die Anwendung von Metaldämpfen oder andere noch aufwendigere Verfahren. Aber Thierry Ondarcuhu dachte sich eine äußerst einfache Methode aus. Zuerst stellte er die ungestörte Berührungsline L her, indem er einen großen Tropfen auf eine feste Phase aufbrachte. Dann tauchte er eine Faser in dieselbe Flüssigkeit und erhielt dadurch eine sehr gleichmäßige Kette von Tropfen (entsprechend der Instabilität nach Rayleigh). An-

schließend legte er die Faser auf den Festkörper parallel zu L und erzeugte auf ihm eine Reihe von Tropfen. Schließlich verschob er die Linie L (indem er die Fläche kippte) so lange, bis L die Tropfen berührte; die Tropfen verschmolzen miteinander, und er hatte eine einzige, gewellte Linie, an der er die Relaxationsgeschwindigkeit messen konnte<sup>[15]</sup>.

Ich habe hier mehr Wert auf Experimente als auf Theorien gelegt. Natürlich brauchen wir auch etwas Theorie, wenn wir uns mit weicher Materie beschäftigen. Und in der Tat zeigen sich amüsante theoretische Analogien zwischen weicher Materie und anderen Bereichen. Ein wesentliches Beispiel verdanken wir S. F. Edwards<sup>[16]</sup>: Er zeigte eine großartige Übereinstimmung zwischen den Konformationen einer flexiblen Kette und den Trajektorien eines nichtrelativistischen Teilchens; das statistische Gewicht der Kette entspricht der Ausbreitung des Teilchens. In Anwesenheit von äußeren Potentialen werden beide Systeme durch genau die gleiche Schrödinger-Gleichung beschrieben! Diese Beobachtung war der Schlüssel zu allen späteren Entwicklungen in der Polymerstatistik.

Eine weitere Analogie verbindet smektische A-Phasen und Supraleiter: Sie wurde gleichzeitig von dem verstorbenen W. McMillan (einem großen Wissenschaftler, den wir alle sehr vermissen) und uns entdeckt. Später wurde sie von T. Lubensky et al.<sup>[17]</sup> kunstreich ausgewertet. Und hier sehen wir wieder eine neue Form von Materie im Entstehen! Wir wußten, daß Supraleiter des Typs II das Magnetfeld in Form von quantisierten Wirbeln einlassen. Die Analogie zur smekti-schen A-Phase besteht nun darin, daß wir chirale Moleküle einlagern, die die Rolle des Feldes übernehmen. In manchen günstigen Fällen kann, wie 1988 von Lubensky et al. vorhergesagt, eine smekti-sche Phase mit helixartigen Verschiebungen generiert werden, die sogenannte A\*-Phase. Dies wurde dann ein Jahr später von Pindak und seinen Mitarbeitern experimentell nachgewiesen<sup>[18]</sup> – eine tolle Leistung.

Lassen Sie mich nun diese sentimentale Reise ins Reich der weichen Materie beenden mit einer kurzen Erwähnung meiner Weggefährten: Einigen begegnete ich auf meinem Weg, wie Jean Jacques – einem großen Erfinder auf dem Gebiet der Flüssigkristalle – oder Karol Mysels – dem unangefochtenen Meister der Tensidforschung. Andere begleiteten mich auf dem ganzen Weg: Henri Benoit und Sam Edwards, die mir die Wissenschaft der Polymere beibrachten; Jacques des Cloizeaux und Gérard Jannink, die ein grundlegendes Buch zur Theorie dieses Themas verfaßt haben. Schließlich ein harter Kern von Mitstreitern auf allen Strecken auf Land und auf See: Phil Pincus, Shlomo Alexander, Etienne Guyon, Madeleine Veyssié und last but not least Françoise Brochard, ohne die nichts so wäre, wie es heute ist.

Die letzten Zeilen stammen nicht von mir: Sie beziehen sich auf ein Experiment über weiche Materie (nach Eugène Boudin, einem französischen Genremaler des 19. Jahrhunderts), das in der Abbildung oben rechts gezeigt wird. Kein Schluß könnte passender sein.

Eingegangen am 31. Januar 1992 [A 873]  
Übersetzt von Prof. Dr. Heinz Rehage, Essen



*La Souffleuse de Savon.*

*Amusons-nous. Sur la terre et sur l'onde  
Malheureux, qui se fait un nom!  
Richesse, Honneurs, faux éclat de ce monde,  
Tout n'est que boules de savon.<sup>[\*]</sup>*

- [1] Ein Nachdruck findet sich in *Introduction to Polymer Dynamics* (Lezioni Lincei), Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1990, Kap. 2.
- [2] J. A. Odell, A. Keller in *Polymer-flow Interactions* (Hrsg.: I. Rabin), Am. Inst. Phys., New York, 1985; A. Keller, J. Odell, *Colloid Polym. Sci.* **1985**, 263, 181.
- [3] P. G. de Gennes, *J. Chem. Phys.* **1974**, 60, 5030.
- [4] Ein historischer Überblick: K. Mysels, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.* **1971**, 67, 45.
- [5] M. Tabor, P. G. de Gennes, *Europhys. Lett.* **1986**, 2, 519, P. G. de Gennes *Physica* **1986**, 140 A, 9.
- [6] K. Mysels, K. Shinoda, S. Frankel, *Soap Films*, Pergamon, London, 1959.
- [7] F. Brochard, J. F. Lennon, *J. Phys. (Paris)* **1976**, 36, 1035.
- [8] G. Porte, J. Marignan, P. Bassereau, R. May, *J. Phys. (Paris)* **1988**, 49, 511.
- [9] D. Roux, M. E. Cates in *Proc. 4th Nishinomya-Yukawa Symp.*, Springer, Heidelberg, **1992**, im Druck.
- [10] G. Friedel, *Ann. Phys.* **1922**, 18, 273.
- [11] R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki, P. Keller, *J. Phys. Lett.* **1975**, 69.
- [12] P. Fabre, C. Casagrande, M. Veyssié, V. Cabuil, R. Massart („Ferro-smectics: A New Magnetic and Mesomorphic Phase“), *Phys. Rev. Lett.* **1990**, 64, 539.
- [13] C. Casagrande, M. Veyssié, *C. R. Acad. Sci. (Paris)* **1988**, 306 II, 1423; C. Casagrande, P. Fabre, M. Veyssié, E. Raphaël, *Europhys. Lett.* **1989**, 9, 251.
- [14] J. M. di Meglio, *C. R. Acad. Sci. (Paris)* **1986**, 303 II, 437.
- [15] T. Ondarcuhu, M. Veyssié, *Nature*, **1991** 352, 418.
- [16] S. F. Edwards, *Proc. Phys. Soc. (London)* **1965**, 85, 613.
- [17] S. R. Renn, T. Lubensky, *Phys. Rev. A* **1988**, 38, 2132.
- [18] J. W. Goodby, M. A. Waugh, S. M. Stein, E. Chin, R. Pindak, J. S. Date, *J. Am. Chem. Soc.* **1989**, 111, 8119.

[\*] Das Portrait der Dame beim Seifenblasen ist unterschrieben: „Amusiert Euch! Unglückselig, wer sich einen Namen macht an Land oder auf See. Reichtum und Ehren, falscher Beifall der Welt sind nichts als Seifenblasen.“