

## NOBELPREISE 2016

## PHYSIK

## Noble Wirbel

In der Schule lernen wir, dass Materie in drei Aggregatzuständen oder Phasen auftritt: fest, flüssig und gasförmig. Bisweilen werden noch Plasmen hinzugefügt, die bei sehr hohen Temperaturen auftreten. Diese Darstellung ist stark vereinfacht. Es fehlen etwa Flüssigkristalle, magnetische Materiezustände wie Ferromagneten sowie verschiedene nichtklassische Aggregatzustände bei tiefen Temperaturen. Faszinierende Beispiele für letztere sind Suprafluide, die ohne Reibung fließen, und Supraleiter, die dem elektrischen Strom keinen Widerstand entgegensetzen. Eine allgemeine Theorie dieser Zustände und ihrer Umwandlungen geht auf den russischen Physiker Lev Landau (Nobelpreis 1962) zurück. Die Landau'sche Theorie, die die Rolle von Symmetrien in den Mittelpunkt stellt, hat lange fast unangefochten dominiert. Erst in jüngster Zeit hat sich auf breiter Front durchgesetzt, dass sie unvollständig ist und viele Phasen(umwandlungen) nicht über ihre Symmetrie, sondern ihre Topologie definiert werden. Die theoretischen Grundsteine für diese fundamentale Einsicht haben die Arbeiten der diesjährigen Physik-Nobelpreisträger David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane und J. Michael Kosterlitz gelegt.

Die Landau'sche Theorie und die Rolle der Symmetrie lassen sich am magnetischen Phasenübergang zwischen Ferromagneten und Paramagneten illustrieren (Abb. 1). Ein magnetisches Material besteht aus vielen mikroskopischen Elementarmagneten. Diese zeigen in der ferromagnetischen Phase kollektiv

in eine Vorzugsrichtung. Wird der Ferromagnet erwärmt, so verstärken sich wie bei der Brown'schen Bewegung die Fluktuationen in der Ausrichtung der einzelnen Elementarmagneten. Bei einer kritischen Temperatur gibt es einen Phasenübergang in einen paramagnetischen Zustand, in dem die Elementarmagneten ihre Ordnung verlieren und das Material nicht mehr magnetisiert ist.

Ein zentraler Unterschied zwischen beiden Phasen liegt in ihrer Symmetrie. Die volle Rotationssymmetrie des Systems hat nur der paramagnetische Zustand. Er hat keine Vorzugsrichtung und bleibt bei einer beliebigen Drehung des Systems unverändert. Im ferromagnetischen Zustand hingegen ändert eine Drehung das System, da die Magnetisierung nun in eine andere Richtung zeigt. Die Vorzugsrichtung des Ferromagneten wird nicht durch irgendwelche Eigenschaften des Systems vorgegeben, sondern bildet sich spontan. Man sagt, dass der ferromagnetische Zustand die Symmetrie des Materials verletzt. Landau hat dieses Konzept der spontanen Symmetriebrechung in den Mittelpunkt seiner Theorie der Materiephasen und der Phasenübergänge gestellt. Er und seine Kollegen konnten damit unter anderem höchst erfolgreich die suprafluide und die supraleitende Phase beschreiben. Später wurde das Konzept in die Theorie der Elementarteilchen übertragen, wo es eine fundamentale Rolle in der Vereinheitlichung der Grundkräfte sowie dem Verständnis von Masse spielt.

Kosterlitz und Thouless haben

im Jahr 1973 einen Phasenübergang beschrieben, der nicht in Landaus Schema passt und der jetzt nach ihnen benannt ist. Hierzu haben sie einen zweidimensionalen Magneten betrachtet. Dies klingt zunächst exotisch, kann aber in geeigneten Schichtsystemen realisiert werden. Die Elementarmagneten (kurz: Spins) können in eine beliebige Richtung in der Ebene zeigen (Abb. 2), und für benachbarte Spins ist es wie für Stabmagneten energetisch vorteilhaft, sich parallel zueinander auszurichten. Während dies in dreidimensionalen Magneten dazu führt, dass sich die Spins unterhalb der kritischen Temperatur spontan ausrichten und einen Ferromagneten bilden, sind die thermischen Fluktuationen in zwei Dimensionen unabhängig von der Temperatur so stark, dass sie die Ausbildung einer ferromagnetischen Phase verbieten. Kosterlitz und Thouless haben nun gezeigt, dass es in zwei Dimensionen trotzdem zwei Phasen und einen Phasenübergang gibt. Im Gegensatz zu Landaus Theorie liegt der Unterschied zwischen beiden Phasen allerdings nicht in ihrer Symmetrie, sondern in subtileren Eigenschaften.

Die beiden Phasen unterscheiden sich darin, wie Wirbelanregungen (Vortizes) in der Spinkonfiguration auftreten. Solche

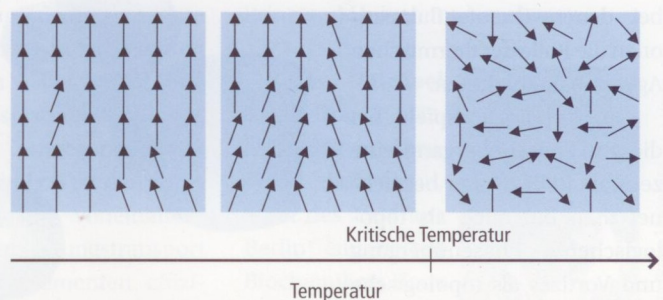
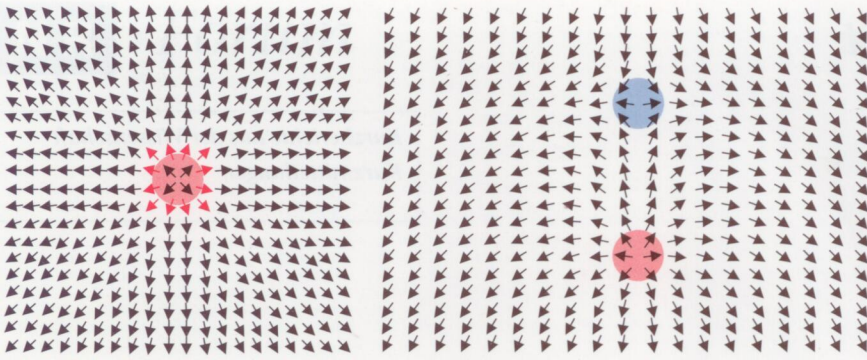


Abb. 1. Typische Konfigurationen der Elementarmagneten (Spins) in einem magnetischen Material. Im ferromagnetischen Zustand haben die Spins eine Vorzugsrichtung. Diese geht in der paramagnetischen Phase durch thermische Fluktuationen verloren.



**Abb. 2.** Vortex-Anregungen in zweidimensionalen Magneten. Links: Einzelner Vortex. Rechts: Vortex-Paar, bestehend aus zwei Vortizes mit entgegengesetztem Drehsinn. Die Trennung solcher Vortex-Paare charakterisiert einen Kosterlitz-Thouless-Berezinskii-Phasenübergang. Nach [The Nobel Prize in Physics, Advanced Informations/Königlich-Schwedische Akademie der Wissenschaften]

Vortizes sind in Abbildung 2 dargestellt: Umfährt man das Zentrum eines Vortex, so drehen sich die Spins um ihre eigene Achse. Den Drehsinn und die Anzahl der Drehungen kann man als eine Art Ladung betrachten, die tatsächlich viele Analogien zur elektrischen Ladung aufweist. Bei tiefen Temperaturen sind nun Wirbel mit entgegengesetztem Drehsinn in Paaren gebunden, die als Ganzes keine Vortexladung tragen. Oberhalb der kritischen Temperatur des Kosterlitz-Thouless-Berezinskii-Übergangs trennen sich diese Paare, und Vortizes können als freie „Ladungen“ existieren. (Berezinskii ist ein verstorbener russischer Physiker, der parallel zu Kosterlitz und Thouless ähnliche Ideen entwickelt hat.) Dieser neuartige Phasenübergang ist nicht auf Magneten beschränkt, sondern tritt auch in anderen Systemen wie zweidimensionalen Supraleitern oder Kristallen auf. Entsprechende zweidimensionale Systeme wurden vielfach experimentell untersucht und die Vorhersagen der Theorie dabei bestätigt. Ein weiterer Anwendungsbereich der Theorie sind sogenannte Quantenphasenübergänge in eindimensionalen Systemen, bei denen Quantenfluktuationen die Rolle der thermischen Agitation übernehmen.

Die Topologie spielt bei diesem Phasenübergang eine zentrale Rolle. Daher bezeichnet man ihn auch als topologischen Phasenübergang und Vortizes als topologische Anregungen. Die mathematische Disziplin der Topologie beschreibt die Eigenschaften eines Objekts, die erhalten

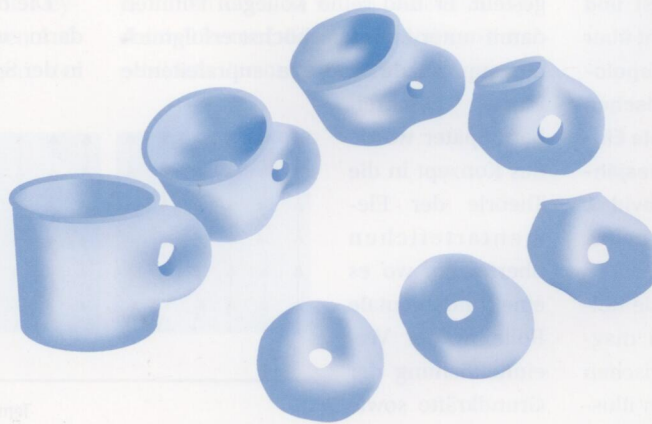
bleiben, wenn man es verzerrt, verdreht oder deformiert, aber nicht auseinanderreißt. So sind eine Kaffeetasse und ein Bagel vom Standpunkt der Topologie identisch. Kaffeetassen haben wegen des Henkels ebenso wie Bagels ein Loch. Beide können somit durch Verzerren und Deformieren kontinuierlich ineinander überführt werden (Abb. 3). Eine Kugel hat hingegen kein Loch, kann nicht kontinuierlich in ein Bagel überführt werden und ist daher ein topologisch verschiedenes Objekt. Die Vortexladung verhält sich ganz analog zur Anzahl der Löcher in diesem Beispiel. Sie kann auch nicht durch kontinuierliche Deformation der Spinkonfiguration geändert werden und ist demnach eine topologische Größe.

Den nächsten Angriff auf das Landau'sche Gedankengebäude hat im Jahr 1980 die unerwartete Entdeckung des Quanten-Hall-Effekts durch Klaus von Klitzing (Nobelpreis 1985) ausgelöst. Von Klitzing hat den elektrischen Wider-

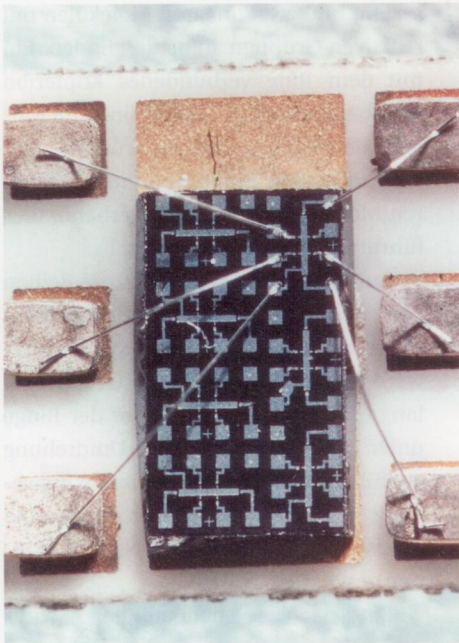
stand von dünnen Elektronenschichten an der Grenzfläche von zwei Halbleitern bei tiefen Temperaturen und in hohen Magnetfeldern gemessen. Es stellt sich heraus, dass der sogenannte Hall-Widerstand über weite Parameterbereiche nur bestimmte Werte annimmt, die mit phantastischer Präzision ausschließlich durch fundamentale Konstanten der Physik bestimmt werden, die Elektronenladung  $e$  und das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$ . Viele Aspekte dieses erstaunlichen Effekts sind zügig verstanden worden, wobei Robert B. Laughlin (Nobelpreis 1998) auf theoretischer Seite eine wesentliche Rolle gespielt hat.

David Thouless gebührt der Verdienst, die zentrale Rolle der Topologie zum Verständnis des Quanten-Hall-Effekts herausgearbeitet zu haben. Er ging dabei von der Frage aus, wie man die Präzision des Hall-Widerstands verstehen kann, obwohl die experimentellen Systeme in hohem Maße ungeordnet sind und ihre Eigenschaften teilweise gar nicht bekannt sind (Abb. 4). Diese Frage wurde ihm unter anderem von seinem experimentellen Kollegen Hans Dehmelt (Nobelpreis 1989) aufgedrängt. Dehmelt hatte viele Jahre investiert, damit er an einem einzelnen Elektron in fast perfekt kontrollierter Umgebung experimentieren konnte. Seine wichtigste Messung konnte nun ebenso wie der Klitzing'sche Quanten-Hall-Effekt als Messung der sogenannten Feinstrukturkonstante interpretiert werden. Dehmelt war einigermaßen entgeistert, dass eine scheinbar so unkontrollierte Messung wie der Quanten-Hall-Effekt mit seinen Präzisionsmessungen konkurrieren konnte.

David Thouless (mit M. Kohmoto, M.P. Nightingale und M. den Nijs) hat 1982 gezeigt, dass die Präzision darauf zurückgeführt werden kann, dass der Hall-Widerstand eine topologische Größe ist. Wir haben bereits gesehen, dass Bagel und Kaffeetassen vom Standpunkt der Topologie identisch sind und sich von einer Kugel unterscheiden. Die Anzahl der Löcher, die Kugeln von Kaffeetassen und Bageln unterscheidet, ist ein Beispiel für eine topologische Größe, die nur feste Werte



**Abb. 3.** Vom Standpunkt der Topologie sind Kaffeetassen und Bagel identisch, da sie kontinuierlich ineinander verformt werden können. Die Anzahl der Löcher ist eine topologische Invariante. [Graphiken Ruth Hammelehe.]



**Abb. 4.** Eine der ersten Proben, an denen Klaus von Klitzing den Quanten-Hall-Effekt entdeckt hat. Der Hall-Widerstand wird durch fundamentale Konstanten der Physik bestimmt und ist laut Physikalisch-Technischer Bundesanstalt mit einer Genauigkeit von mindestens eins in zehn Milliarden unveränderlich und reproduzierbar. David Thouless hat den Hall-Widerstand als topologische Invariante interpretiert. [Photo Dr. Braun/PTB]

annehmen kann und unter beliebigen Verzerrungen und Deformationen des Objekts, unverändert bleibt. Der Hall-Widerstand lässt sich in analoger Weise als eine solche topologische Größe verstehen, die innerhalb gewisser Grenzen unabhängig von der genauen Beschaffenheit des Systems ist.

Diese Ideen haben in den letzten Jahren eine stürmische Entwicklung ausgelöst. Es wurden immer mehr topologische Phasen gefunden, die nicht durch ihre Symmetrien charakterisiert werden und sich nicht im Rahmen des Landau'schen Schemas verstehen lassen. Diese Entwicklung wurde insbesondere durch die Entdeckung der topologischen Isolatoren vorangetrieben. Dies sind Materialien, die im Inneren keinen Strom leiten, aber an den Oberflächen frei bewegliche Ladungsträger haben. Ein Meilenstein auf dem Weg zu den topologischen Isolatoren war ein von Duncan Haldane im Jahr 1988 vorgeschlagenes Modell, das den Quanten-Hall-Effekt sogar ohne angelegtes Magnetfeld zeigt. Fügt man zwei dieser Modelle in geeigneter Weise zusammen, so erhält man einen topologischen Isolator. Die ersten experimentellen Hinweise auf diese neuartigen topologischen Isolatoren wurden 2007 kurz nach der theoretischen Vorhersage durch Charles L. Kane und Eugene J. Mele im Labor von Laurens Molenkamp in Würzburg gefunden.

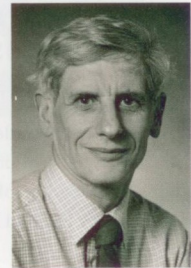
Duncan Haldane hatte bereits zuvor im Jahr 1982 einen wichtigen Beitrag zur Theorie der topologischen Phasen geleistet.

Bei einer Untersuchung magnetischer Ketten stellte er gänzlich unerwartet fest, dass die erlaubten Energiezustände stark von der Art der magnetischen Atome abhängen. Der Spin der Atome kann nur bestimmte feste Werte annehmen und die Atome fallen ganz allgemein in zwei Klassen: Atome mit halbzahligem und ganzzahligem Spin. Besteht die Kette aus Atomen mit halbzahligem Spin, so gibt es Zustände bei beliebig kleinen Energien. Ketten mit ganzzahligem Spin haben eine Energielücke und können somit Energie nur oberhalb einer Mindestenergie absorbieren. Es stellt sich heraus, dass Ketten mit ganzzahligem Spin auch eine topologische Phase ausbilden, die viele Parallelen mit den besprochenen topologischen Phasen der elektronischen Systeme aufweist.

Zunächst einmal zeichnet dieser Nobelpreis Einsichten der theoretischen Physik aus, die weitreichend und fundamental sind. Hinzu kommt, dass die stürmische Entwicklung der letzten Jahre vielleicht sogar zu Anwendungen führen könnte. So kann man vielleicht mit Hilfe von topologischen Isolatoren Ladungsträger, die sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, ähnlich zu den Fahrbahnen einer Autobahn voneinander trennen und damit den Ladungstransport in elektronischen Bauelementen effizienter gestalten. Weiterhin sind diese Materialien durch eine enge Kopplung der Ladung an den Spin gekennzeichnet, was vielleicht zu Bauelementen führen könn-

te, die die Elektronik mit dem Magnetismus kombinieren (Spintronik). Eine weitere Klasse von Systemen, die aktuell im Zentrum der Forschung stehen, sind topologische Supraleiter, die die Basis für einen topologischen Quantencomputer bilden könnten. Wir können gespannt sein, wohin uns diese Reise noch führt.

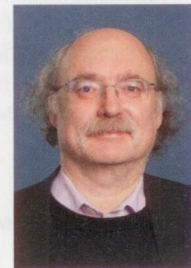
**David James Thouless** (\*21. Sept. 1934, in Bearsden, Schottland), Studium der Physik an der University of Cambridge, UK, Promotion 1958



[Photo 1995 Mary Levin/University of Washington]

an der Cornell University (Ithaka, NY) unter Hans Bethe. Danach folgten Aufenthalte am Lawrence Berkeley National Laboratory in den USA und Forschungs- und Lehrtätigkeiten in England und in den USA (Birmingham University, Cambridge University, Queen's University, Yale University). Von 1980 ab an der University of Washington, Seattle, wo er 2003 emeritiert wurde.

**Frederick Duncan Michael Haldane** (\* 14. Sep. 1951 in London) studierte an der University of Cambridge, UK, wo er 1978 auch promoviert



[Photo Denise Applewhite/Princeton University]

wurde. 1977 bis 1981 war er am Institut Laue-Langevin in Grenoble, Frankreich. Weitere Stationen in den USA (University of Southern California, Los Angeles und Bell Laboratories in Murray Hill, New Jersey). Ab 1987 Professor an der University of California, San Diego, ab 1990 an der Princeton University, New Jersey.

**John Michael Kosterlitz** (\* 22. Juni 1942 in Aberdeen, Schottland,



[Photo Brown University]

Sohn des 1934 aus Berlin emigrierten Biochemikers Hans Walter Kosterlitz, des Entdeckers der Endorphine) besuchte das Gonville and Caius College der University of Cam-

bridge. Seine Promotion vollendete er 1969 an der University of Oxford. Danach als Postdoc unter anderem in Birmingham, wo er mit David Thouless zusammenarbeitete. Seit 1982 ist er Professor für Physik an der Brown University, Providence (RI/USA), zurzeit Gastprofessor an der Aalto Universität in Helsinki, Finnland, und seit 2016 Distinguished Professor for Computational Sciences am Korea Institute for Advanced Study (KIAS).

#### Originalarbeiten

J. M. Kosterlitz, D. J. Thouless: Long range order and metastability in two dimensional solids and superfluids. (Application of dislocation theory). *Journal of Physics C: Solid State Physics*, **5**, L124 (1972).

J. M. Kosterlitz, D. J. Thouless: Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, **6**, 1181 (1973).

D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, M. D. Nijs: Quantized hall conductance in a two-dimensional periodic potential. *Physical Review Letters*, **49**, 405 (1982).

F. D. M. Haldane: Continuum dynamics of the 1-D Heisenberg antiferromagnet: Identification with the O(3) nonlinear sigma model. *Physics Letters A* **93**, 464 (1983).

F. D. M. Haldane: Nonlinear Field Theory of Large-Spin Heisenberg Antiferromagnets: Semiclassically Quantized Solitons of the One-Dimensional Easy-Axis Néel State. *Physical Review Letters* **50**, 1153 (1983).

Prof. Dr. Felix von Oppen, Berlin

#### NOBELPREISE CHEMIE

## Molekulare Maschinen

Von der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften wurde der Nobelpreis für Chemie 2016 Jean-Pierre Sauvage, James Fraser Stoddart und Bernard L. Feringa zugesprochen. Diese drei Forscher waren Pioniere beim Design und bei der Synthese molekularer Nanomaschinen. Der Franzose Sauvage erhält die Hälfte des Preisgeldes von 832 000 €, der Brite Stoddart und der Niederländer Feringa je einen Viertel.

Die synthetische organische Chemie (auch Chemie des Kohlenstoffs genannt) befasst sich vorwiegend mit dem Schließen und Öffnen kovalenter Verbindungen zwischen Kohlenstoffatomen oder zwischen Kohlenstoffatomen und sogenannten Heteroatomen wie Wasserstoff, Sauerstoff, Halogenen und Metallatomen. Dabei

bilden die daran beteiligten Atome mindestens ein gemeinsames Elektronenpaar oder ein Oktett. Kovalente Bindungen sind besonders stabil, wenn ihre äußeren Elektronen die nächstgelegene Edelgaskonfiguration erreichen. Es gibt aber auch rein mechanische, ungerichtete Verbindungen ohne Beteiligung der Elektronenschalen. Die betroffenen Moleküle sind nämlich miteinander verkettet bzw. verknotet und verhalten sich wie die Glieder einer Kette. Man hat sie zuerst aus großen Ringverbindungen mit mindestens 20 bis 30 Kohlenstoffatomen synthetisiert. Dazu wurde von einem geschlossenen Ring sowie einem langen Molekül mit reaktiven Gruppen an beiden Enden ausgegangen, die als Lösungen zusammengegeben wurden.

Rein zufallsbedingt fädelten sich einige lineare Moleküle gelegentlich durch die Öffnung des zyklischen Moleküls. Löste man nun die Ringschlussreaktion aus, so erhielt man (mit meist schlechter Ausbeute) eine Kette mit zwei, drei und mehr Gliedern, sog. Catenane (nach dem lateinischen Wort *catena* für Kette). Annehmbare Ausbeuten erhält man bei dieser Vorgehensweise lediglich bei hoher Verdünnung mit großen Überschüssen der geschlossenen Ringverbindung. Eine solche Kette ist so stark wie die schwächste kovalente Bindung im ganzen Catenan.

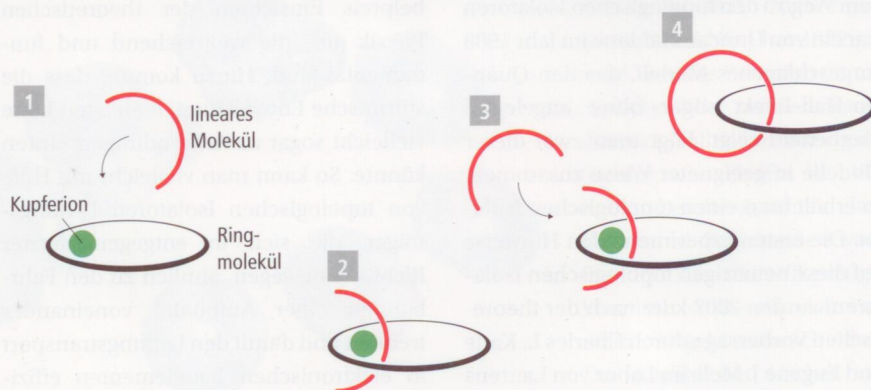
Die zufallsbedingte, statistische Catenansynthese war schon in den 1950er Jahren bekannt, doch man betrachtete sie als Spielerei; nützliche Anwendungen waren nicht absehbar. Erst Anfang der 1980er Jahre beschloss Jean-Claude Sauvage an der Universität Straßburg das Problem der Catenansynthese unter neuen Gesichtspunkten wieder aufzunehmen. Er arbeitete mit einem geschlossenen Ring-

system und zwei linearen Molekülen mit reaktiven Gruppen an beiden Enden. Ein mit dem Ring verbundenes Kupferion führte dazu, dass eines der linearen Moleküle sich dort anlagerte, krümmte und sich an beiden Enden mit einem weiteren Molekül derselben Art verband; dies führte zum Ringschluss (Abb. 1).

Auf diese Weise konnten ganze Reihen von verschränkten Ringen und Knoten mit recht guter Ausbeute synthetisiert werden. Sauvage und seine Gruppe gelang es dann 1994, dass einer der Ringe unter Energiezufuhr eine Umdrehung vollführte. Mit der kontrollierten Bewegung des Ringmoleküls war erstmals so etwas wie eine molekularer Nanomaschinen geschaffen worden.

Ein nächster bedeutender Schritt gelang James Fraser Stoddart, der mit Rotaxanen arbeitete. Rotaxane sind Systeme aus mindestens zwei Molekülen, von denen eines ein Makrozyklus ist, der auf einem langen linearen Molekül gesteckt ist, das an beiden Enden mit räumlich weit ausgedehnten Gruppen verbunden sind; sie dienen als eine Art Prellbock und verhindern, dass der Makrozyklus von der Achse rutscht. In der Nähe der „Prellböcke“ befindet sich je ein elektronenreicher Bereich, der den Ring anzieht (Abb. 2a). Erwärmt man das System, so gleitet der Ring mit großer Geschwindigkeit hin und her. Eine vertikale Version gleicht einem Aufzug, dessen Hub allerdings nur 0,7 nm beträgt (Abb. 2b). Mit Stoddarts Rotaxanen wurde u.a. ein künstlicher Muskel gebaut, der eine hauchdünne Goldfolie verbiegen konnte.

Stoddarts Linearmotor wurde ergänzt mit Feringas Rotationsmotor. Er besteht aus einem ringförmigen System von meh-



**Abb. 1.** Catenansynthese nach Jean-Claude Sauvage. 1: Anziehung der ersten Bauteile eines Catenans durch ein Kupferion. 2: Anlagerung der Moleküle. 3: Anziehung und Verbindung eines zweiten linearen Moleküls. 4: Ringschluss und mechanische Verbindung beider Moleküle, Entfernen des Kupferions.