WEICHE MATERIE

Frustriert in Bewegung

In elastischen Materialien erzeugen weiche Moden, die aus Verspannung und Frustration entstehen, Drehmomente und Bewegung.

Falko Ziebert und Igor M. Kulić

Mechanische Verspannungen gibt es in vielen Systemen kondensierter Materie, bedingt durch Materialeigenschaften oder die Geometrie. Wenn dann durch den Bruch einer kontinuierlichen Symmetrie so genannte weiche Moden auftreten, können sich die Systeme aufgrund der Verspannung selbstständig bewegen oder als Motoren und Schalter agieren. In biologischen Systemen ist das Konzept bereits umgesetzt, beispielsweise beim flagellaren Haken von Bakterien.

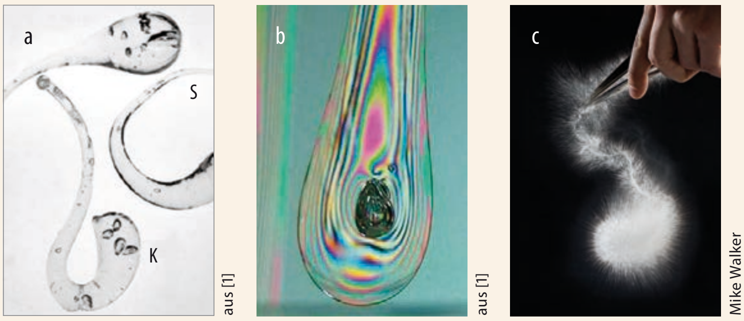


Abb. 1 Eine Bologneser Glasträne entsteht beim schnellen Abschrecken eines heißen Glaströpfchens (a). Die internen Verspannungen lassen sich durch Spannungsdoppelbrechung visualisieren (b). An der Oberfläche des Kopfes (K) ist das Material komprimiert und steht im Inneren unter Zugbelastung. Hier ist der Tropfen sehr stabil, während an seinem Schwanzende (S) schon geringer Druck ein explosionsartiges Zerspringen bewirkt (c).

Im Englischen sind „Bologneser Glastränen“ auch heute noch als Prince Rupert‘s Drops bekannt: Ruprecht von der Pfalz hatte die Glastropfen am Hof des englischen Königs Karls II. im 17. Jahrhundert vorgeführt (**Abb. 1**). Der laute Knall, mit dem sich der Tropfen nach einem schnellen Fingergriff in Staub auflöste, hat wohl auch den anwesenden Robert Hooke fasziniert: Er versuchte, das Verhalten der Glastränen zu erklären, die beim schnellen Abschrecken heißer Glaströpfchen in Öl oder Wasser entstehen. Ohne die Erkenntnisse der Elastizitätstheorie – die Hooke später inklusive des bekannten Hookeschen Gesetzes entwickeln sollte – oder das Wissen um die Struktur von Gläsern und die thermischen Effekte beim Abschrecken erkannte der Zeitgenosse und Konkurrent Sir Isaac Newtons, dass es sich bei dem Tropfen um ein intern zutiefst verspanntes Material handeln musste. Auch wenn die „Explosion“ des Tropfens bis heute nicht im Detail verstanden ist [1], wissen wir inzwischen um die fundamentale Bedeutung mechanischer Frustration und die damit einhergehenden Verspannungen in vielen Materialien und Systemen.

Physikalisch gesehen stellen Verspannungen interne Kräfte dar. Sie treten auf, sobald Materialeigenschaften mit Geometrie oder Topologie inkompatibel sind. Typischerweise entstehen sie während des Aufbaus eines Objekts (**Infokasten** Verspannte Materialien und Frustration). Etwas abstrakter kann man sich auch vorstellen, dass ein Körper mit nicht-euklidischer innerer Geometrie in den flachen Euklidischen Raum gezwängt wird [2]: Der Körper muss sich bestmöglich mit der flachen Metrik des umgebenden Raumes arrangieren. Die damit verbundene Frustration führt zu vielen interessanten Phänomenen. In einigen Fällen hält das Material der Frustration nicht stand und löst sich bei geringer Perturbation in Staub auf, wie die Bologneser Glastränen. Verspannungen können aber auch sehr nützlich sein. Klassische Beispiele sind der Spannbeton, bei dem eine Vorspannung des Stahlgerüsts die Bildung von Rissen und Deformationen des Betons stark reduziert, und das für Displays verwendete Gorilla-Glas, an dessen Oberfläche ein Ionenaustausch in der Schmelzphase eine Spannung erzeugt, die ebenfalls der Rissbildung entgegenwirkt. Auch in biologischen Systemen entstehen durch Wachstumsprozesse Strukturen, die intern verspannt sind. Diese Verspannungen sind für viele Lebensprozesse wichtig [3].

Dies wirft die Fragen auf, ob es möglich ist, mechanische Verspannungen und Frustration zu „zähmen“, um sie zu nutzen und vielleicht sogar „zum Laufen“ zu bringen, oder ob sie sich per Design in ein Material „einbetten“ lassen, um erwünschte Eigenschaften zu erzielen. Diese Fragen können inzwischen eindeutig bejaht werden, sodass sich heute Aktuatoren oder Motoren aus sehr einfachen Materialien entwickeln lassen.

KOMPAKT

- Durch Kräfte oder Topologie kann es in einem Material zu internen Verspannungen kommen.
- Ist gleichzeitig eine kontinuierliche Symmetrie gebrochen, liegt eine so genannte weiche Mode vor.
- In frustrierten Materialien können äußere Kräfte diese Moden antreiben, sodass eine Bewegung entsteht.
- Je nach Geometrie lassen sich damit einfache Motoren oder Schalter realisieren.

Priv.-Doz. Dr. Falko Ziebert, Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, Philosophenweg 19, 69120 Heidelberg und **Dr. Igor M. Kulić**, Institut Charles Sadron, 23 rue du Loess, BP 84047, 67034 Strasbourg Cedex 2, Frankreich

Im Folgenden diskutieren wir anhand zweier Beispiele das allgemeine Konzept, um so genannte weiche Moden durch elastische Verspannungen zu generieren. Werden diese Moden durch einen Energiefluss oder äußere Kräfte angetrieben, kann das Objekt beispielsweise zyklische Bewegungen als Basis eines Motors vollführen [4] oder auch als Schalter fungieren [5].

Verspannungen und ihre Auswirkungen

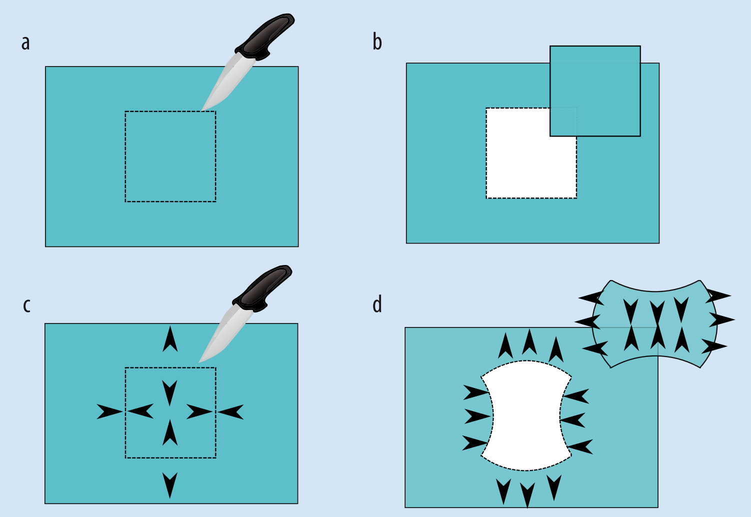
Die Elastizitätstheorie beschreibt die Formveränderung eines Körpers beziehungsweise seiner Volumenelemente, wenn äußere Kräfte wirken. Dabei gilt im elastischen Regime die Annahme der Reversibilität. Wenn die Kraft aufhört zu wirken, kehrt der Körper wieder in seine ursprüngliche Form zurück. Ein Fließen des Materials oder Plastizität bleiben dabei ausgeschlossen. Das Hooke'sche Gesetz für eine Feder, also die Proportionalität von Kraft und Auslenkung, lässt sich auf kontinuierliche Felder verallgemeinern. Dann entspricht der Kraft eine mechanische Spannung $\sigma = F/A$ mit der Fläche A des Volumenelements. Anstelle der Auslenkung tritt ein Verschiebungsfeld, dessen räumliche Ableitung die Deformation ε ist. Nur diese symmetrisierte räumliche Variation der Auslenkung darf eine Rolle spielen, da Translationen oder starre Rotationen des Körpers keine Deformationen darstellen. Für kontinuierliche Felder ist der Ausdruck $\sigma = C\varepsilon$ mit einem Tensor elastischer („Feder"-)Konstanten C analog dem Hookeschen Gesetz. Analog zu der Energie, welche die Feder speichern kann, ist die Energiedichte des Materials gegeben durch das Produkt $\sigma\varepsilon/2$ und hängt damit quadratisch von der Deformation ab.

Wichtig ist nun, dass alle diese Größen nicht notwendigerweise räumlich konstant sein müssen. Insbesondere treten Verspannungen auf, wenn die Materialeigenschaften sich innerhalb des Systems verändern oder die Geometrie beziehungsweise Topologie bezüglich eines Referenzzustands variiert. Das vielleicht bekannteste Beispiel ist ein Bimetallstreifen. Zwei flache, dünne Platten aus verschiedenen Metallen sind dabei als Referenzzustand aneinander befestigt. Ändert sich nun die Temperatur als äußerer Parameter, führen die unterschiedlichen Materialeigenschaften, in diesem Fall die verschiedenen thermischen Ausdehungskoeffizienten, zu einem Verbiegen des Streifens. Bei den Bologneser Glastränen sorgt das schnelle Abschrecken für geometriebedingte Verspannungen.

In biologischen Systemen haben Verspannungen oft noch interessantere Folgen. Beispielsweise führen in einem Gewebe die Zellteilung und das Zellwachstum zu einer kontinuierlichen Spannungsbildung. Die Verspannung ist dynamisch und sehr wichtig für die Morphogenese, also das Ausbilden der Organe beziehungsweise der Strukturen des ganzen Organismus. Auch der tensorielle Aspekt von Spannungen kommt oft ins Spiel wie bei unserer Haut. Diese ist vor allem entlang einiger Hauptrichtungen verspannt, den so genannten Langer-Linien. Bei chirurgischen Eingriffen achten Mediziner darauf, parallel zu diesen Linien zu schneiden, um die anschließende Wundschließung zu erleichtern.

VERSPANNTE MATERIALIEN UND FRUSTRATION

Innere Verspannungen werden sichtbar, wenn man das Material zerlegt und ein Stück herausschneidet. Weist das Material keine **Verspannung** auf (a), lassen sich die Teile wieder nahezu nahtlos zum Ganzen zusammenfügen (b). Ist das System dagegen beispielsweise in x-Richtung komprimiert und in y-Richtung unter Zug (c), ohne dass diese Verspannung sichtbar wäre, ist es in dem Sinne frustriert, dass sich gewisse Bereiche ausdehnen und andere zusammenziehen möchten, ohne es zu können. Nach dem Herausnehmen relaxiert die Spannung aufgrund der fehlenden Gegenkräfte, und die Teile sind nicht länger geometrisch kompatibel (d). Ohne Stauchen und Strecken passen sie nicht zusammen. Rückwärts betrachtet lässt sich **Frustration** erzeugen, indem man die inkompatiblen Geometrien zusammenzwingt.



Verspannungen lernen laufen

Statische Verspannungen können also nützlich sein – aber kann man Verspannungen auch in Bewegung setzen? Das ist in der Tat kinderleicht, wie ein einfaches „Küchenexperiment" zeigt. Dazu legt man eine ungekochte Spaghetti auf eine Herdplatte oder in eine große flache Pfanne, die zuvor auf eine Temperatur von etwa 100 °C aufgeheizt wurde. Die Nudel beginnt, sich seitwärts hin und her zu bewegen (**Abb. 2a**). Ein genauerer Blick zeigt, dass die Spaghetti dabei ganz leicht gekrümmt ist und dass es sich um eine Art Rollbewegung handelt. Die Krümmung ist leicht zu verstehen. Durch die Hitze entsteht ein Temperaturgradient von der heißen Herdplatte oder Pfanne zur kälteren Umgebung. Dies bewirkt eine thermische Ausdehnung der Spaghetti, wobei sich die Seite der Spaghetti, die der heißen Platte zugewandt ist, stärker thermisch ausdehnt als die kühlere Seite. Eine solche differentielle elastische Deformation verursacht auf natürliche Weise eine Krümmung. Ein ebenfalls einfaches und gleichermaßen interessantes Experiment macht die Rotationsbewegung verständlich. Zuerst verbindet man ein

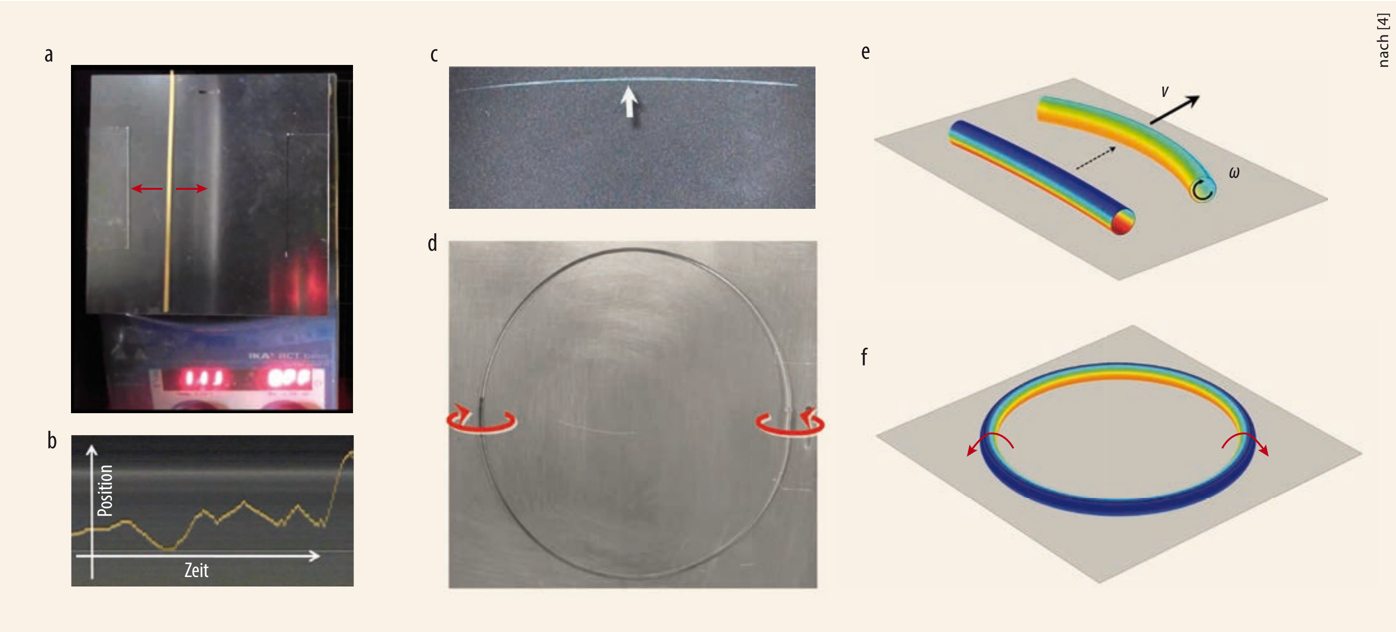


Abb. 2 Wenn eine Spaghetti auf einer heißen Platte rollt (a), verändert sich ihre Position senkrecht zur Längsachse als Funktion der Zeit (b). Mit Nylonfäden lassen sich getriebene weiche elastische Moden demonstrieren, sowohl beim offenen Faden (c) als auch beim Ring (d). Der offene Faden muss sich erst krümmen (e), um die weiche Mode zu erzeugen, die in der Ringgeometrie direkt vorliegt (f).

Stück Angelschnur aus Nylon zu einem Ring, indem man die beiden Enden mit einer kleinen Metallöse fixiert (**Abb. 2d**). Geometrisch betrachtet entspricht das resultierende Objekt einem Torus mit sehr großem Radius im Vergleich zum Schnurquerschnittsradius. Auf einer heißen Platte beginnt sich der Torus zu drehen, und zwar so, dass von oben betrachtet die Schnurquerschnitte nach außen rotieren. Diese neuartige Bewegung entspricht in keiner Weise einer starren Rotation, sondern stellt eine kontinuierliche Deformation dar, die um die Schnurachse wandert.

Symmetriebruch und weiche Moden

Hinter der Drehbewegung des Torus steckt ein besonderer Mechanismus: Eine kontinuierliche Symmetrie des Fadens wurde gebrochen. Das erzeugt eine so genannte weiche Mode, die der Temperaturgradient antreiben kann. Solche weichen Moden – oft auch Goldstone-Moden genannt – treten in vielen physikalischen Systemen auf, die eine Ordnung aufweisen. Beispiele sind Ferromagneten, in denen sich eine Vorzugsrichtung der Spinorientierung ausbildet, oder nematische Flüssigkristalle aus anisotropen Molekülen. Hier bricht jeweils die Vorzugsrichtung die kontinuierliche Rotationssymmetrie, die in der ungeordneten Phase vorliegt. Am wichtigsten ist dabei, dass jede der möglichen Vorzugsrichtungen gleichwertig ist. Eine von ihnen wird durch das Wechselspiel von Anfangsbedingungen und – typischerweise thermischen – Fluktuationen spontan ausgewählt. Daher kostet es keine Energie, diese Vorzugsrichtung in homogener Weise zu drehen: Eine solche Drehung entspricht gerade einer weichen Mode im System [6]. Der Begriff „weich" hat in diesem Zusammenhang nichts mit Steifigkeit im Sinne der Elastizitätstheorie zu tun, sondern meint, dass diese Mode leicht beweglich ist. Gerade für elastische Systeme wurde dieser Mechanismus allerdings offenbar lange übersehen.

Im Fall der Nylonschnur hat zunächst das Formen zu einem Ring die axiale Rotationssymmetrie gebrochen. Entlang des inneren Umfangs wurde das Material mechanisch gestaucht, während es entlang des äußeren Umfangs mechanisch gestreckt wurde (**Abb. 3a**). In einem idealen System ohne Reibungs- und Dissipationsverluste braucht es dann keine elastische Energie, um die Orientierung dieses topologisch induzierten Deformationsgradienten innerhalb des Querschnitts zu drehen. Damit stellt diese Bewegung eine weiche Mode dar.

Dynamische Frustration als Antrieb

Der Torus besitzt durch den Ringschluss also eine leicht bewegliche Verspannung. Um diese anzutreiben, braucht es einen äußeren Einfluss wie den Temperaturgradienten der erhitzten Platte. Weil Nylon als semikristallines polymeres Material im relevanten Temperaturbereich in eine kompaktere Kristallstruktur überwechselt, weist es einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizient auf. Nylon zieht sich bei höheren Temperaturen effektiv zusammen: Auf der Seite des Torus, die auf der Platte liegt, kontrahiert das Material (**Abb. 3b**). Das System ist nun bestrebt, die thermisch kontrahierten Teile des Torus nahe der Platte mit den durch die Topologie des Ringschlusses gestauchten Bereichen im Innenkreis zur Deckung zu bringen, um seine elastische Energie zu minimieren. Dadurch stellt sich eine dynamische Frustration ein: Das Material wird kontinuierlich von unten thermisch

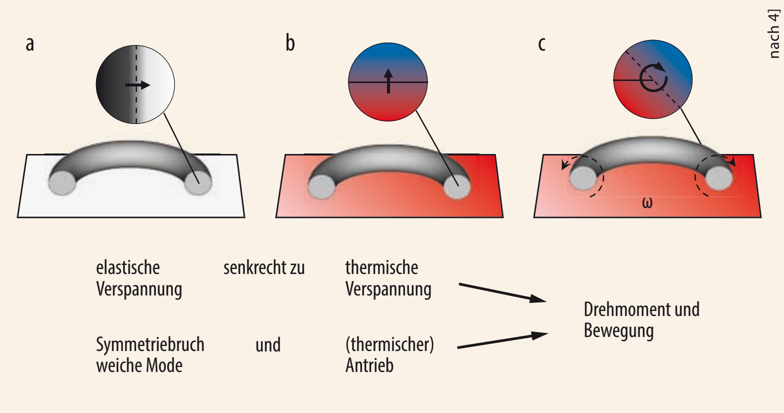


Abb. 3 Der Ringschluss bricht die Rotationssymmetrie des Fadens (a): Innen ist das Material gestaucht (dunkel), außen gedehnt (hell). Der thermische Gradient bewirkt für Nylon eine Kontraktion an der heißen Platte (b, rot) verglichen zur kälteren Umgebungstemperatur (blau). Das System möchte beide kontrahierten Bereiche zur Deckung bringen und seine elastische Energie minimieren. Weil die Geometrie das verhindert, kommt es zur Frustration. Daraus entsteht ein Drehmoment, das bei ausreichender Stärke zur Rotation mit der Frequenz ω führt.

gestaucht, während es topologisch immer innen gestaucht bleiben muss. Weil die beiden Bereiche nie zur Deckung kommen, bildet sich ein konstantes Drehmoment aus (**Abb. 3c**). Bei hinreichend starkem thermischen Antrieb lassen sich die dissipativen Effekte wie Reibung und viskoelastische Verluste im Material überwinden (**Infokasten** Drehmoment und Frequenz): Das Objekt dreht sich wie beschrieben!

Besteht der Torus aus einem Material, das sich thermisch ausdehnt – beispielsweise Polydimethylsiloxan, mit dem Kanäle für die Mikrofluidik gebaut werden – kehrt sich die Drehrichtung gerade um [4]. Ein Ring aus einem thermoresponsiven polymeren Material, der bereits in Torusform gegossen wurde, dreht sich dagegen gar nicht: Ein solches System gewinnt nichts mehr, wenn sich der thermisch deformierte Teil von der beheizten Platte wegbewegt. Der Symmetriebruch ist zwingend notwendig, damit sich der Torus bewegt.

DREHMOMENT UND FREQUENZ

Das erzeugte **Drehmoment** m einer weichen Mode lässt sich aus der Elastizitätstheorie des dünnen Stabes im Temperaturfeld zu $m \sim YR^3\kappa\varepsilon_z$ berechnen. Hierbei stehen Y für das Youngsche Modul, R für den Querschnittradius, κ für die ebene Krümmung der Faser und $\varepsilon_z = \alpha\Delta T_z$ für die thermische Deformation senkrecht zur Heizplatte. Diese Deformation ist durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten α und die Temperaturdifferenz senkrecht zur Platte ΔT_z gegeben. Den Zusammenhang für das Drehmoment kann man auch als das Produkt verstehen, das sich aus der geometrisch aufgezwungenen Deformation $\varepsilon \sim R\kappa$ mit der thermisch erzeugten mechanischen Spannung $\sigma \sim Y\varepsilon_z$ ergibt, integriert über den Querschnitt $\sim R^2$.

Die Krümmung κ ist beim Torus geometrisch vorgegeben, während sie sich bei der geraden Faser dynamisch zu $\kappa = \varepsilon_x/R$ einstellt: Die thermische Advektion bewirkt in der Faser eine Temperaturdifferenz ΔT_x in der Plattenebene und eine Deformation $\varepsilon_x = \alpha\Delta T_x$.

Die Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung einer möglichen Querschnittsdrehung bestimmt die **Dynamik**. Für die gerade Faser schreibt sich die Kreisfrequenz als $\omega \sim D/R^2$ mit dem thermischen Diffusionskoeffizienten D. Dünnere Fasern drehen sich also schneller. Typische Drehfrequenzen sind 10 Hz. Offene Fasern dissipieren dabei über Rollreibung, der Torus hat größere, interne viskose Verluste und dreht sich langsamer.

Für die Spaghetti – vernetzte und verschlaufte Stärkeketten – oder einen offenen Nylonfaden (**Abb. 2c**) ist für die rollende Bewegung entscheidend, dass es zunächst spontan zu einer thermisch induzierten Krümmung in der Plattenebene kommt, um den beim Torus durch die Topologie bereits aufgeprägten Symmetriebruch zu erzeugen. Es handelt sich dabei um eine dynamische Instabilität. Insbesondere ist die Richtung ihrer Krümmung – und damit auch die Bewegungsrichtung – nicht festgelegt, sondern spontan gewählt. Deshalb ändert sich die Krümmung relativ leicht, beispielsweise durch Defekte im Aufbau der Spaghetti oder auf der Plattenoberfläche, und die Spaghetti rollt hin und her.

Demnach führt der Bruch der kontinuierlichen Symmetrie zu einer weichen Deformationsmode. Die Frustration durch die Phasenverschiebung der thermischen gegenüber der topologischen Deformation induziert deren Bewegung. In gewisser Weise befindet sich eingebettet im Material ein drehbares Rad, das aus der beweglichen Deformation besteht und sich von außen antreiben lässt.

Filamente als Motoren

Der Torus stellt einen minimalen Motor dar, der nur aus einem Rotor ohne Stator besteht, weil die beheizte Platte für den Mechanismus nicht zwingend nötig ist. Vielmehr ist es der Ringschluss, der die Frustration zwischen topologisch und thermisch induzierter Krümmung und mithin das Drehmoment erzeugt. Auch ein Torus, der in einer Flüssigkeit frei schwimmt, würde sich drehen, sobald ein Temperaturfeld senkrecht zur Ringebene existiert.

Dennoch ist der Torus für Anwendungen eher ungeeignet. Dazu wäre es nötig, den Effekt zu skalieren. Das durch den Mechanismus erzeugte Drehmoment ist recht groß und erlaubt einer Faser, zusätzlich zur Bewegung Arbeit zu verrichten, beispielsweise gegen das eigene Gewicht eine schiefe Ebene hochzurollen (**Abb. 4a**). Insbesondere skaliert das Drehmoment mit der Länge der Faser. Wickelt man die Faser entlang eines gekrümmten Pfades auf, beispielsweise durch einen einfachen Halter zu einer Spirale, drehen sich alle Faserquerschnitte gleichzeitig und kollektiv (**Abb. 4b**). Dieser sehr einfache Aufbau erlaubt es, Lasten zu heben (**Abb. 4c**), und zeigt, dass das Drehmoment linear mit der Gesamtlänge der Faser skaliert, während die Energiedichte sogar quadratisch mit der Länge wächst [4]. Es lässt sich also auch Energie speichern. Dazu bleibt ein Ende der Faser fixiert, während sie thermisch verdrillt wird. Anschließend fixiert man auch das zweite Ende, um zu einem späteren Zeitpunkt die gespeicherte Torsionsenergie wieder nutzbar zu machen. Der Wirkungsgrad ist in der Größenordnung von Promille, allerdings auch noch nicht für die Anwendung optimiert.

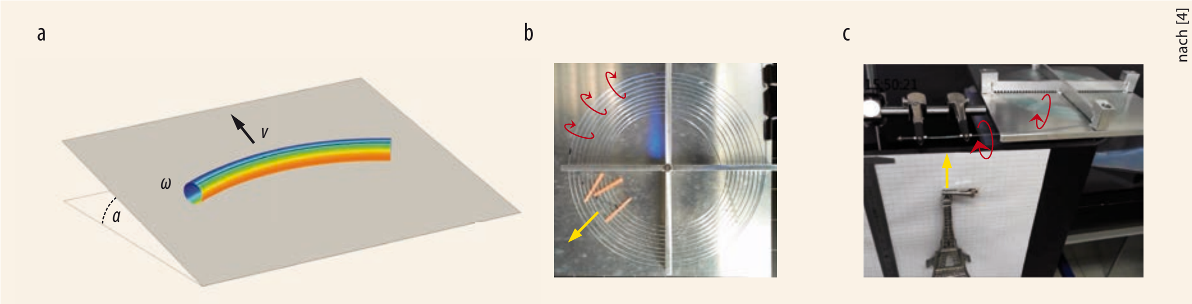


Abb. 4 Das Drehmoment einer getriebenen weichen elastischen Mode ist groß genug, damit eine Faser bergauf rollen kann (a). Daraus lassen sich die Drehmoment-Geschwindigkeits-Kurve und das Haltemoment bestimmen. Zwingt man eine Faser in eine Spirale, drehen sich beim Kontakt mit der Heizplatte alle Querschnitte kollektiv (b). So können längliche Probeteilchen wie auf einem Förderband nach außen transportiert werden. Das Gesamtdrehmoment wächst linear mit der Faserlänge und erlaubt es, makroskopische Objekte wie ein Modell des Eiffelturms zu heben (c).

Der Natur voraus?

Der einfache Mechanismus wirft die Frage auf, ob weiche elastische Moden nicht auch in der Natur vorkommen, also im Zuge der Evolution gefunden und genutzt wurden. Ein Kandidat hierzu ist der so genannte flagellare Haken. Dieser verbindet in Bakterien die fadenförmigen Geißeln mit dem zugehörigen, in der Membran eingelagerten Motorproteinkomplex, der die Geißel antreibt und in Rotation versetzt. Obwohl lange vermutet wurde [7], dass dieser nanoskopische Haken wie eine molekulare Kreuzgelenkkette funktioniert, überraschte es, dass die Krümmung des Elements bei der Drehung invariant bleibt. Dieses ungewöhnliche Verhalten lässt sich durch die Grundbausteine des Hakens erklären: Die Flagellin-Proteine stellen schaltbare, bistabile Elemente dar [8]. Durch ihre Bistabilität bevorzugt der flagellare Haken eine bestimmte gekrümmte Form, aber die Krümmungsrichtung kann frei variieren.

Die Natur nutzt hier offenbar ein nichtlineares, schaltbares, elastisches Medium, das durch seine Bauweise eine weiche Mode aufweist. Dieses Prinzip findet sich auch in den Mikrotubuli des menschlichen Körpers. Diese lebenswichtigen Biofilamente bilden einen Hauptbestandteil des Zellskeletts und sind an zentralen zellbiologischen Funktionen beteiligt [9]. Ihre Struktur entspricht einem Hohlzylinder, dessen Querschnittsberandung typischerweise aus 11 bis 14 Proteinen besteht. Längs der Achse des Tubulus ordnen sich die Proteine zu Protofilamenten an. Experimente mit Protofilamenten in isolierter Form zeigten, dass auch sie bistabil sind: Sie kommen in einem geraden Zustand vor, weisen aber bevorzugt eine leichte Krümmung auf [10]. Daraus ergeben sich Konsequenzen für das Design eines Hohlzylinders aus schaltbaren Elementen.

Weiche Mode im schaltbaren Hohlzylinder

Offenbar bestimmen zwei energetische Beiträge das mechanische Verhalten: die elastische Energie der Deformation des Hohlzylinders und der Energiebeitrag

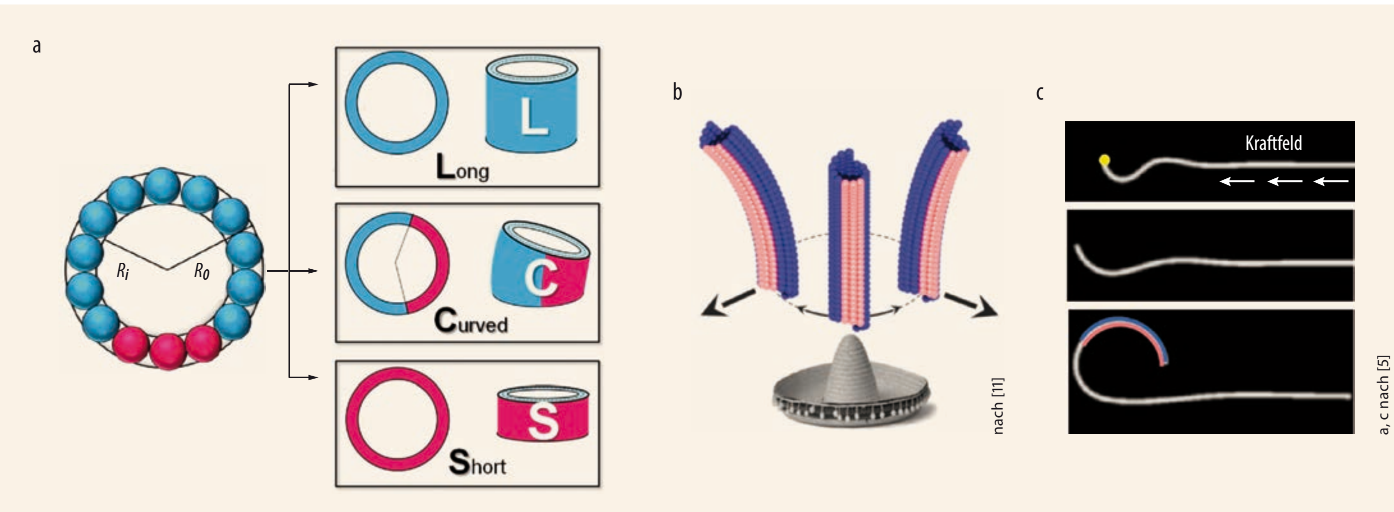


Abb. 5 Ein schaltbarer Hohlzylinder entsteht, wenn seine Bausteine zwei Zustände annehmen können – gerade (a, blau) und gekrümmt (rot). Dann konkurrieren drei Zustände des Querschnitts – lang (L), gekrümmt (C) und kurz (S) – energetisch miteinander. Ist jede Ausrichtung der Krümmung energetisch gleichwertig, entspricht die weiche Mode der Bewegung in einem „Sombrero"-Potential (b). Beim Anregen der weichen Mode entsteht eine so genannte Wobbel-Mode. Bei einem schaltbaren Hohlzylinder, der in einem Kraftfeld transient fixiert ist (c, oben), führt die Knickinstabilität zu einem Umschalten der Bausteine, zu einer makroskopischen Krümmung und letzlich zum Aufrollen des Zylinders (unten).

der verschiedenen Konformationen der Bausteine. Unter der Annahme, der gekrümmte Zustand der Bausteine sei bevorzugt, gewinnt das System für jeden gekrümmten Baustein eine gewisse Freie Energie ΔG. Offensichtlich sind aber nicht beliebig viele gekrümmte Bausteine mit der Hohlzylindergeometrie kompatibel. Die Krümmung impliziert lokale Verspannungen, die für die elastische Energie ungünstig sind und Frustration erzeugen. Abhängig von ΔG, von den Abmessungen des Zylinders und der Bausteine sowie von äußeren Kräften kann es für das System insgesamt günstig sein [5], nur eine gewisse Zahl der Bausteine nebeneinander in den gekrümmten Zustand zu versetzen (**Abb. 5a,b**). Die resultierende differentielle Deformation im Querschnitt krümmt den ganzen Tubulus, sofern eine gewisse Kooperativität längs des Protofilaments vorliegt. Die Position des Blocks gekrümmter Bausteine ist dabei beliebig: Das mesoskopische Design der schaltbaren Elemente hat dem System eine weiche elastische Mode aufgeprägt.

Diese weiche Mode hat für die Mikrotubuli interessante Konsequenzen. Wenn thermische Fluktuationen die Mode anregen, kommt es zu einer erratischen Dynamik der Krümmung und damit zu einer Wobbel-Mode (**Abb. 5c**) [11]. Diese Dynamik ist den klassischen thermischen Biegefluktuationen des Filaments überlagert und führt zu einer effektiven Steifigkeit. Der Mechanismus erklärt zudem elegant das Ausbilden von mikrometerskaligen Ringen. Dazu sind die Mikrotubuli eigentlich viel zu steif. Aber Beobachtungen verschiedener Systeme, beispielsweise während der Synapsenbildung in Axonen, belegen die Ringe. Unter äußerer Krafteinwirkung erfolgt ein Umschalten in den gekrümmten Zustand und mithin ein Aufrollen des ganzen Tubulus (**Abb. 5d**).

Ausblick

Ausgehend von den in der Materialwissenschaft bekannten Effekten der inneren Verspannung und mechanischen Frustration lassen sich weiche Moden in elastischen Systemen gezielt suchen und nutzbar machen. Die quasi eindimensionale Zylindergeometrie bietet sich besonders an, da die kontinuierliche Rotationssymmetrie entlang der Achse einfach zu brechen ist. Das allgemeine Prinzip ist aber keinesfalls auf diese Geometrie beschränkt. In zwei Dimensionen, also der Geometrie einer dünnen Platte, wären beispielsweise periodische Oberflächenfaltungen oder Varianten des Möbius-Bandes denkbar, in denen ebenfalls die Rotationssymmetrie gebrochen ist. Auch der Antrieb der weichen Mode lässt sich durch andere als thermische Effekte realisieren. Jeder Nichtgleichgewichtsmechanismus, also jeder Gradient oder Fluss, ist möglich, sofern er nur hinreichend stark an die elastische Deformation koppelt. Beispielsweise käme das Quellen von Gelen in Feuchtigkeits- oder Ionengradienten infrage oder auch optisch responsive Materialien.

Das Konzept, eine Schaltbarkeit der Eigenkrümmung durch das Bauprinzip zu kodieren, ist dagegen etwas aufwändiger technisch zu realisieren, aber vielversprechend. Insbesondere wäre ein schaltbarer Zylinder quasi unzerbrechlich. Während ein normaler Stab unter zu starker Last knickt und letztlich bricht, wird sich ein schaltbarer Zylinder einfach in eine spontan gewählte Richtung wegkrümmen – und das in umso größeren Bereichen, je größer die äußere Kraft ist. Energetisch ist das völlig zufriedenstellend, da seine Krümmung gerade der entstehenden spontanen Krümmung entspricht.

Die Beispiele des flagellaren Hakens und der Mikrotubuli zeigen, dass wir der Natur und Evolution mit der Idee aktiv getriebener weicher Moden bestenfalls einen Tick voraus sind. Die Moden kommen wohl in der Natur vor, aber werden sie auch schon irgendwo angetrieben? Die Antwort wissen wir noch nicht. Aber eine höchst unangenehme Vermutung ist, dass filamentöse Viren wie Ebola den Mechanismus nutzen könnten, um sich entlang heißer, nasser oder leitender Oberflächen zu bewegen, anstatt nur auf passive Kontaktinfektion zu setzen. Hoffentlich sind diese Viren noch zu unausgereift, um von dieser Möglichkeit zu wissen!

Literatur

[1] *H. Aben*, et al., Appl. Phys. Lett. **109**, 231903 (2016); *M. M. Chaudhri*, J. Appl. Phys. **110**, 013523 (2011)
[2] *Y. Klein*, et al., Science **315**, 1116 (2007)
[3] *B. Ladoux* und *R.-M. Mège*, Nat. Rev. Mol. Cell. Biol. **18**, 743 (2017)
[4] *A. Baumann* et al., Nat. Mater. **17**, 523 (2018)
[5] *F. Ziebert* et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 148101 (2015)
[6] *D. Forster*, Hydrodynamic Fluctuations, Broken Symmetry, and Correlation Functions, Advanced Book Classics, Addison-Wesley (1990)
[7] *H. C. Berg* und *R. A. Anderson*, Nature **245**, 380 (1973)
[8] *F. A. Samatey* et al., Nature **431**, 1062 (2004)
[9] *J. Howard*, Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton, Sinauer, Sunderland (2001)
[10] *C. Elie-Caille* et al., Curr. Biol. **17**, 1765 (2007)
[11] *H. Mohrbach* et al., Phys. Rev. Lett., **105**, 268102 (2010)

DIE AUTOREN

Falko Ziebert (FV Biologische Physik, Dynamik, Statistische Physik) ist nach Studium an der Universität des Saarlandes und Promotion in Bayreuth sowie Aufenthalten am Argonne National Lab (USA), ESPCI in Paris sowie in Straßburg und Freiburg, wo er 2014 habilitiert wurde, nun am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg tätig. Seine Interessen sind nichtlineare und Nichtgleichgewichtseffekte in der weichen und biologischen Materie.

Igor M. Kulić hat in Stuttgart Mathematik studiert und am MPI Mainz in der Physik promoviert. Seine Interessen gelten der Biophysik, der weichen und aktiven Materie. Nach Stationen an der University of Pennsylvania und Harvard ist er seit 2009 Wissenschaftler des CNRS am Institut Charles Sadron in Straßburg, wo er sich der Umsetzung seiner physikalischen Erfindungen widmet.

