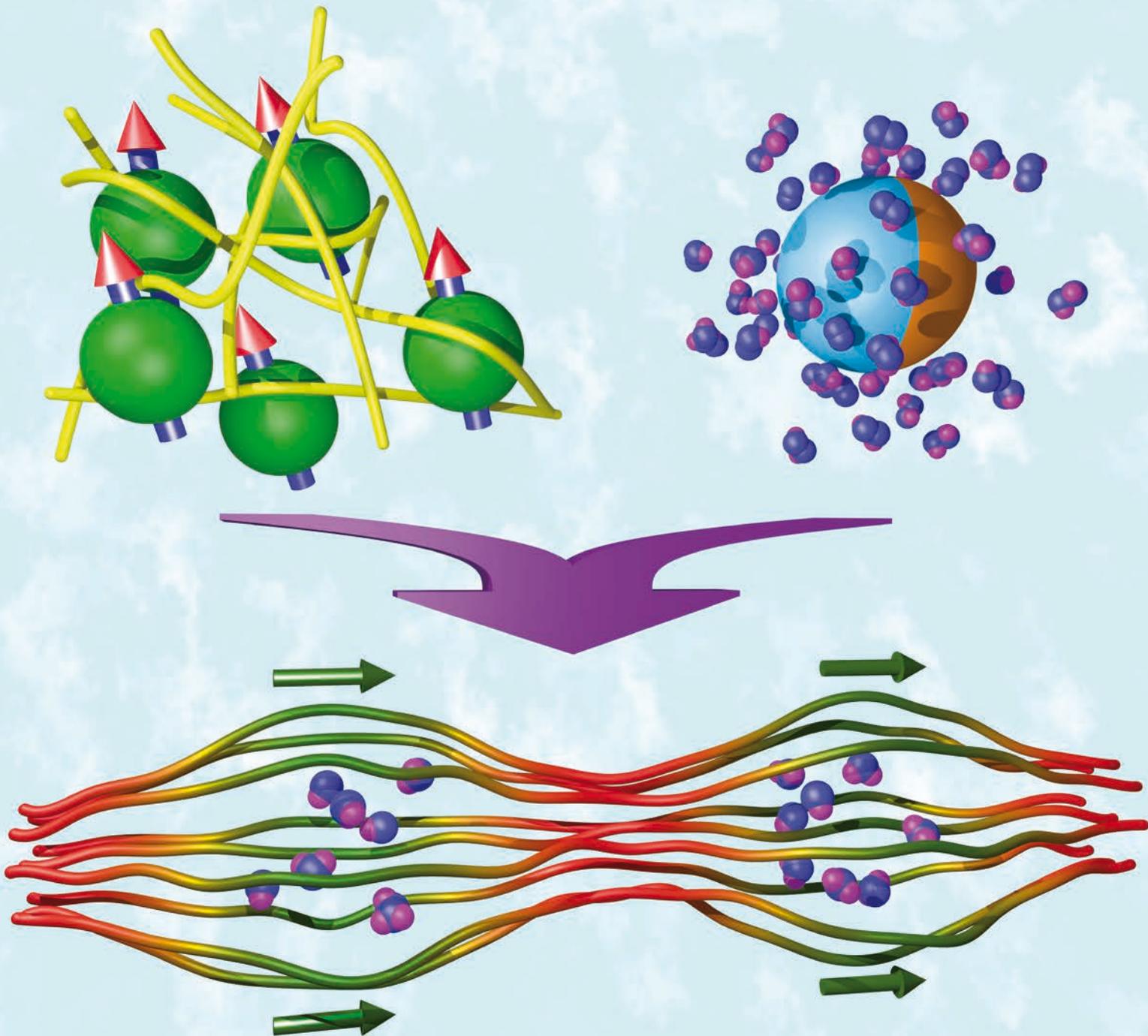


Die Natur zum Vorbild

Polymere Materialien lassen sich so funktionalisieren, dass sie intelligent agieren und autonom Tätigkeiten ausführen können.

Andreas M. Menzel



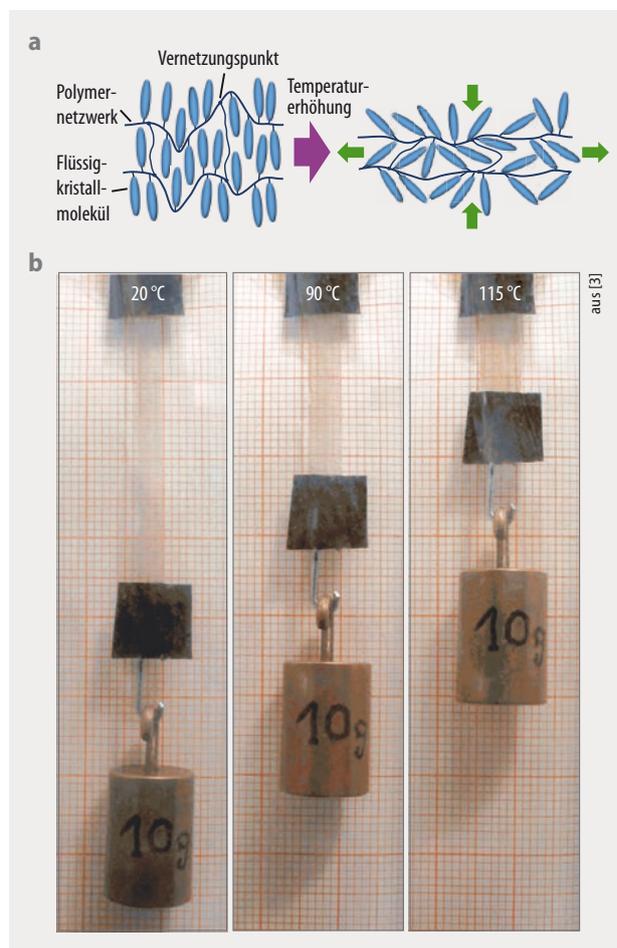
Die Erkenntnisse zu intelligenten polymeren Funktionsmaterialien, die auf externe Reize reagieren, und zu aktiven Systemen lassen sich zunehmend kombinieren, um autonom operierende Materialien zu realisieren.

Aufgrund ihrer vielfältigen Funktionalisierbarkeit sowie durch Einbindung verschiedener Materialkomponenten lassen sich die Eigenschaften polymerer Materialien auf unterschiedlichste Weise variieren und anpassen. Dadurch können zum Beispiel thermisch oder magnetisch aktivierbare Aktoren entstehen, die mechanisch durch Deformationen auf externe Reize und veränderte Umgebungsbedingungen reagieren. Ein wesentliches Ziel besteht darin, autonom agierende polymere Systeme zu entwickeln, die nach einmaliger Aktivierung selbstständig eine gewünschte Tätigkeit ausführen.

Wann können Moleküle, Materialbausteine und Materialien als „intelligent“ gelten? Zunächst sollte ein solches Material „fähig“ sein, eine komplexe Aufgabe zu erfüllen. Beispielsweise wird an Mikrokapseln aus weichen Gelen geforscht, die unter passenden Umgebungsbedingungen gezielt Medikamente freisetzen. Zusätzlich sollte ein intelligentes Material „schlau“ genug sein, weitgehend selbstständig auf einen äußeren Reiz zu reagieren. Das heißt, die gewünschte Reaktion, etwa eine mechanische Deformation, folgt eigenständig als Antwort auf den äußeren Reiz. Etwas subjektiver ist von einem intelligenten Material eine „gewitzte“ oder „geniale“ Lösung eines gestellten Problems zu erwarten. Durch Optimierung seiner Komponenten und inneren Struktur wird dem Material „gelehrt“, die ihm übertragenen Aufgaben zur maximalen Zufriedenheit zu erfüllen.

Polymere Materialien sind ideale Kandidaten, um derartige Ziele zu erreichen. Einzelne Polymermoleküle bestehen aus einer enormen Zahl identischer Wiederholeinheiten, den Monomeren, die durch chemische Bindungen zu einem Makromolekül verknüpft sind. Solche Moleküle lassen sich synthetisch herstellen, kommen aber auch in der Natur vor. Aufgrund ihrer Größe ist es möglich, bereits auf einem einzigen Molekül unterschiedliche Funktionalitäten und Informationen zu speichern. Ein sehr prominentes Beispiel ist die menschliche DNA. Entlang dieses linearen Biopolymermoleküls ist über die räumliche Abfolge und Wiederholung von vier verschiedenen Monomeren die Erbinformation kompakt gespeichert. In gestrecktem Zustand ist das Molekül knapp zwei Meter lang. Wir haben es also im wahrsten Sinne des Wortes mit einem Makromolekül zu tun. Obwohl schätzungsweise wenige Kubikmeter DNA genügen, um das gesamte, globale menschliche Wissen zu kodieren, würden wir das Molekül für sich allein im obigen Sinne nicht als „intelligent“ bezeichnen. Die DNA kann zwar die Information tragen, wie auf externe Stimuli zu reagieren ist, benötigt im Organismus aber noch den biologischen Zellapparat, um entsprechende Aufgaben abzuwickeln.

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf intelligente, weiche, elastische, polymere Festkörper. Hierzu werden zum Beispiel einzelne Makromoleküle in einer Polymer-schmelze oder -lösung durch chemische Vernetzungsreaktionen miteinander zu noch größeren Molekülen verknüpft. Ein elastischer Festkörper entsteht, wenn diese Moleküle durch das gesamte System perkolieren, also von einem Ende bis zum anderen reichen. Im Prinzip kann solch ein makroskopischer Festkörper aus einem einzigen riesigen Makromolekül bestehen. Derartige Materialien im nichtkristallinen und im nicht glasartigen Zustand besitzen unter anderem das Potenzial für mechanische Anwendungen mit ausgeprägten Deformationen. Diese Elastomere sind häufig deutlich weicher als entsprechende kristalline Festkörper, lassen sich also mit relativ geringem Kraftaufwand stark deformieren [1]. Gleichzeitig sind die Deformationen oft nahezu vollständig reversibel, trotz gewaltiger Streckungen von teilweise einem Vielfachen der ursprünglichen Abmessung – wie bei einem Gummiband. Enthält das Polymernetzwerk zudem ein niedermolekulares Lösungsmittel, handelt es sich eigentlich um ein Gel. Jedoch werden die beiden Begriffe „Elastomer“ und „Gel“ im Rahmen der unten beschriebenen Materialien häufig nicht streng unterschieden.



◀ **Abb. 1** In flüssigkristallinen Elastomeren sind Flüssigkristallmoleküle (blau, a) als Seitengruppen an den Polymermolekülen fixiert, wie hier gezeigt, oder direkt als Teil der Polymerhauptketten chemischer Bestandteil eines Polymernetzwerks (dunkle Linien). Durch Temperaturerhöhung (violetter Pfeil) reduziert sich reversibel die ausgeprägte mittlere Orientierungsordnung der Flüssigkristallmoleküle. Dadurch zieht sich das hier skizzierte Elastomer in einer Richtung zusammen und dehnt sich seitlich aus (grüne Pfeile). Auf diese Weise können solche Materialien als thermische Aktoren dienen und Gewichte anheben (b) – ohne zusätzliche Steuerung von außen.

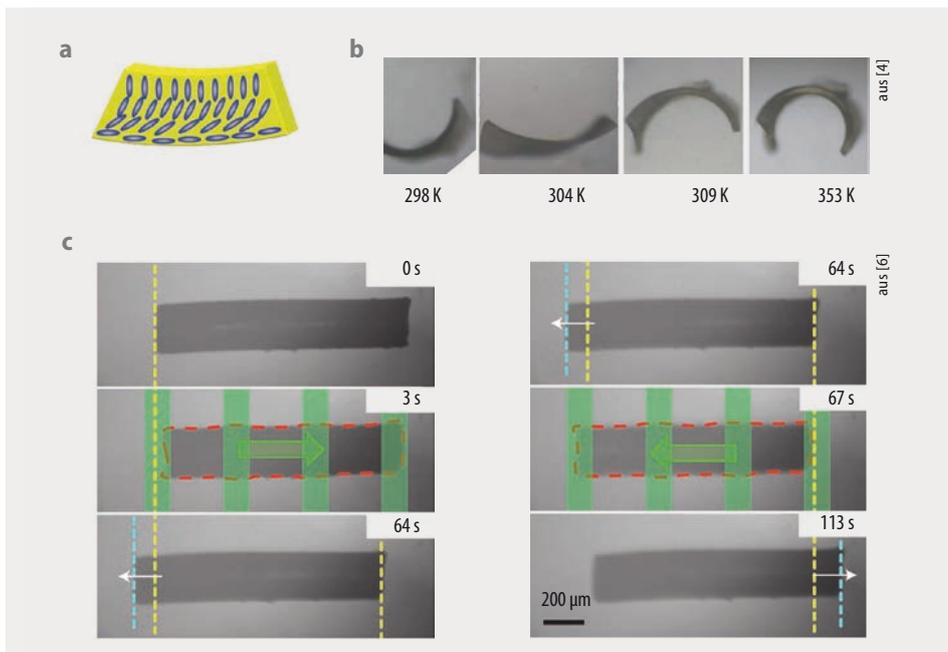


Abb. 2 In einen flüssigkristallinen Gelfilm lässt sich eine nematische Orientierungsachse einprägen (a), die zu einer Oberfläche parallel und zur anderen senkrecht ausgerichtet ist. Infolgedessen verbiegt sich der Gelfilm bei Temperaturänderungen (b). Sind spezielle Farbstoffmoleküle in flüssigkristalline Polymermaterialien integriert, lässt sich die Orientierungsordnung außerdem durch optische Reize reduzieren (c). Laufende Beleuchtungsfelder (grün) lösen dadurch propagierende Verdickungen eines flüssigkristallinen Elastomerylinders aus. Als Konsequenz bewegt sich der Zylinder in einer umgebenden viskosen Flüssigkeit je nach Laufrichtung der Lichtfelder nach links oder rechts (gelb, blau).

Die makromolekulare Struktur eröffnet zahlreiche Möglichkeiten, polymere Gele und Elastomere zu funktionalisieren. Zum einen kann dies direkt auf molekularer Ebene geschehen durch chemische Anbindung zusätzlicher funktioneller Moleküleinheiten. Zum anderen lassen sich ganze Partikel durch das Polymernetzwerk umschließen und darin einbetten. Dadurch erhält man funktionalisierte elastische Kompositmaterialien. Über beide Wege können intelligente Materialien entstehen, die sehr unterschiedlich auf äußere Reize reagieren [2], zum Beispiel durch Änderungen der optischen Eigenschaften, der Wärme- oder der elektrischen Leitfähigkeit. Im Folgenden soll es vor allem um Änderungen der mechanischen Eigenschaften und Deformationen gehen, mit denen die Materialien eigenständig auf externe Stimuli wie Temperaturänderungen oder magnetische Felder reagieren.

Flüssigkristalline Elastomere und Gele

Wir beginnen mit der Funktionalisierung von Elastomeren auf der molekularen Ebene, hier am Beispiel flüssigkristalliner Elastomere [3]. Um diese herzustellen, werden gewöhnliche Flüssigkristallmoleküle etwa als Seitengruppen chemisch an die Polymermoleküle angebunden (**Abb. 1a**). Einfache Flüssigkristallmoleküle sind deutlich länger als breit und besitzen einen eher starren Mittelteil. Reine Substanzen daraus zeigen „Mesophasen“. Das heißt, die Substanz geht beim Aufheizen aus der kristallinen Phase nicht direkt in die isotrope flüssige Phase über, sondern zum Beispiel in eine nematische flüssige Zwischenphase. Auf diese wollen wir uns hier konzentrieren. Es zeigt sich in dieser Phase eine charakteristische nematische Anisotropie. Die Moleküle sind dann zwar nicht mehr langreichweitig in ihren Positionen geordnet, jedoch besteht noch eine molekulare Orientierungsordnung.

Stellt man chemisch durch Anknüpfung von Flüssigkristallmolekülen an Polymermoleküle und Vernetzung der

Polymermoleküle flüssigkristalline Elastomere in der nematischen Phase her, ist zunächst keine einheitliche Orientierungsachse zu beobachten. Stattdessen entsteht eine Polydomänenstruktur mit räumlich variierenden nematischen Ordnungsachsen. Um Monodomänen-Elastomere mit einheitlicher Orientierungsordnung zu erzeugen, gilt es, die flüssigkristallinen Einheiten während der Vernetzung über das gesamte Material hinweg einheitlich auszurichten, etwa mittels externer magnetischer bzw. elektrischer Felder oder durch mechanische Dehnung. Für letzteres wird die Probe zunächst schwach vorvernetzt und anschließend entlang einer Achse gedehnt. Dadurch richten sich die Flüssigkristallmoleküle zunächst im Mittel aus, bevor die Probe im gestreckten Zustand fertig vernetzt wird. Je nach Herstellungsmethode sind nematischer und isotroper Zustand oft nicht mehr klar durch einen Phasenübergang voneinander getrennt. Dennoch lässt sich häufig der flüssigkristalline Ordnungsgrad in den entstandenen Materialien durch Temperaturänderungen deutlich beeinflussen.

Die molekulare Ordnung eines solchen Materials koppelt an seine makroskopische Form, was sich beim Aufheizen aus dem geordneten nematischen Zustand zeigt. Dabei reorientiert sich im Mittel ein großer Teil der flüssigkristallinen Einheiten, die durch die Anbindung an das Polymernetzwerk relativ zueinander in Position bleiben. Der mittlere Platzbedarf der flüssigkristallinen Einheiten reduziert sich also entlang der ursprünglichen Orientierungsachse und erhöht sich senkrecht dazu. Diese molekulare Umstrukturierung überträgt sich auf das Gesamtmaterial. Letzteres zieht sich hierbei entlang der ursprünglichen Orientierungsachse zusammen und dehnt sich seitlich aus (**Abb. 1a**). Dieser thermomechanische Effekt ist reversibel, wenn das Material wieder abgekühlt wird.

Aufgrund ihrer sichtbaren Reaktion auf Temperaturänderungen sind sensorische Anwendungen flüssigkristalliner Elastomere denkbar. Hervorzuheben sind vor allem aktorische Eigenschaften wie thermisch induzierte Defor-

mationen [3]. Ein Gewicht hängt an einem dünnen Film eines flüssigkristallinen Elastomers (**Abb. 1b**). Heizt sich die Umgebung auf, so reduziert sich die nematische Orientierungsordnung. Dadurch zieht sich der Film reversibel auf etwa ein Drittel der ursprünglichen Länge zusammen und hebt das Gewicht an. Das intelligente Material dient also als selbstständig agierender, thermosensitiver Aktor. Es wandelt die externen Temperaturänderungen in mechanische Arbeit um, ohne dass es einer weiteren Ablaufkontrolle und Steuerung von außen bedarf.

In einem nächsten Schritt lassen sich bei der Herstellung räumliche Änderungen der nematischen Orientierungsachse in das Material einprägen, beispielsweise in einen Elastomerfilm (**Abb. 2a**) [4]. Bei Temperaturänderung krümmt sich eine solche Probe (**Abb. 2b**). Werden vorgegebene räumliche Muster der nematischen Ordnung in den Film eingeprägt, sind komplexe, thermisch induzierte Deformationen möglich. So kann sich ein zunächst flacher Elastomerfilm in dreidimensionale Strukturen wie ein regelmäßiges Stachelgitter oder ein Schächtelchen auffalten [5].

Die Änderungen der molekularen flüssigkristallinen Struktur lassen sich nicht nur thermisch induzieren. So wurden Farbstoffmoleküle in das Polymernetzwerk integriert, die bei Lichteinstrahlung ihre Konfiguration ändern, etwa von einem gestreckten in einen gekrümmten Zustand [6]. Dies stört ebenfalls die nematische Orientierungsordnung, und das Elastomer reagiert durch makroskopische Deformationen auf externe Lichtimpulse. Auf diese Weise gelang es, einen schwimmenden Zylinder eines flüssigkristallinen Elastomers anzutreiben (**Abb. 2c**). Hierzu wurden Beleuchtungsfelder längs des Zylinders geführt. Die induzierten, längs des Zylinders laufenden Verdickungen trieben das Elastomerstück in der viskosen Flüssigkeit voran.

Magnetische Gele und Elastomere

Als nächstes betrachten wir Kompositmaterialien, in denen zur Funktionalisierung magnetische oder magnetisierbare Partikel in ein Polymernetzwerk eingebettet sind [7]. Die

verwendeten Partikel sind häufig einige Nano- bis Mikrometer groß, teilweise noch deutlich größer. Ein Weg, solche Materialien herzustellen, besteht darin, die Partikel zunächst in einer noch flüssigen, reaktiven Lösung zu dispergieren. Im Anschluss daran werden chemische Reaktionen in der Lösung induziert, die zum Aufbau eines permanenten Polymernetzwerks führen, das die Partikel umschließt (**Abb. 3**). Dadurch wandelt sich die flüssige Umgebung der Partikel in einen elastischen Festkörper um. Meist besteht das Ziel darin, die Partikel durch das Polymernetzwerk zu fixieren, sodass sie nicht mehr durch dieses hindurchdiffundieren können. Als Bezeichnungen für solche Materialien haben sich, je nach Zusammensetzung und implizierter Verwendung, verschiedene Begriffe etabliert. Die Ausdrücke „Gel“ und „Elastomer“ werden dabei oft weniger bezüglich der eingangs erwähnten Definition getrennt. Stattdessen unterscheidet man häufig Materialien mit kleineren und größeren Partikeldurchmessern im Nano- beziehungsweise Mikrometerbereich durch die Begriffe „Ferrogele“ und „magnetorheologische Elastomere“.

In magnetischen Gelen und Elastomeren können äußere Magnetfeldgradienten auf die magnetischen und magnetisierbaren Partikel Kräfte ausüben. Ist die Polymermatrix hinreichend weich, elastisch und an einem Ende fixiert, initiieren äußere Magnetfeldgradienten reversible mechanische Deformationen des Gesamtmaterials. Solche magnetisch steuerbaren, weichen Aktoren können etwa in Mikrofluidikanwendungen zum Einsatz kommen.

Daneben deformieren sich solche Materialien bereits aufgrund homogener äußerer Magnetfelder deutlich. Eine solche „Magnetostriktion“ entsteht durch die induzierten oder geänderten magnetischen Kräfte zwischen den enthaltenen Partikeln. Ziehen sich etwa zwei benachbarte Partikel an, so drücken sie das elastische Material zwischen ihnen zusammen. Stoßen sie sich ab, dehnen sie das elastische Material zwischen ihnen. Die Gesamtdeformation des Materials ist das Ergebnis all dieser Wechselwirkungen, die sich durch äußere Magnetfelder steuern lassen. Daraus resultiert eine starke Abhängigkeit von der räumlichen Partikel-

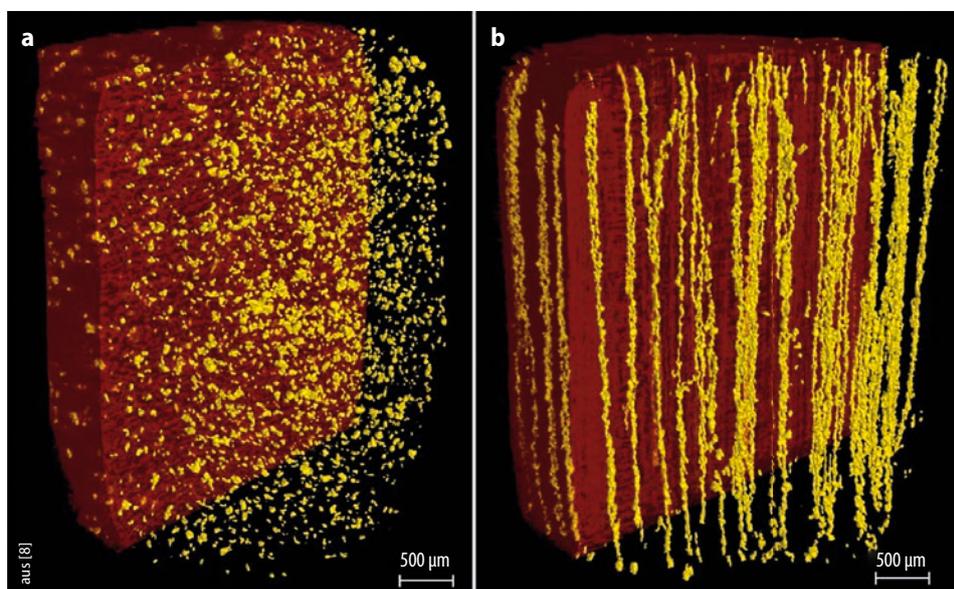


Abb. 3 Röntgentomographische Aufnahmen zweier zylindrischer Proben magnetischer Elastomere. Die in dem weichen, elastischen Polymerkörper fixierten Carbonyleisenpartikel (gelb) werden dabei sichtbar und zeigen eine Probe isotroper (a) bzw. anisotroper Partikelverteilung (b). Die permanenten kettenförmigen Strukturen entstanden, weil das Material in Gegenwart eines homogenen Magnetfelds der Stärke 270 mT hergestellt wurde.

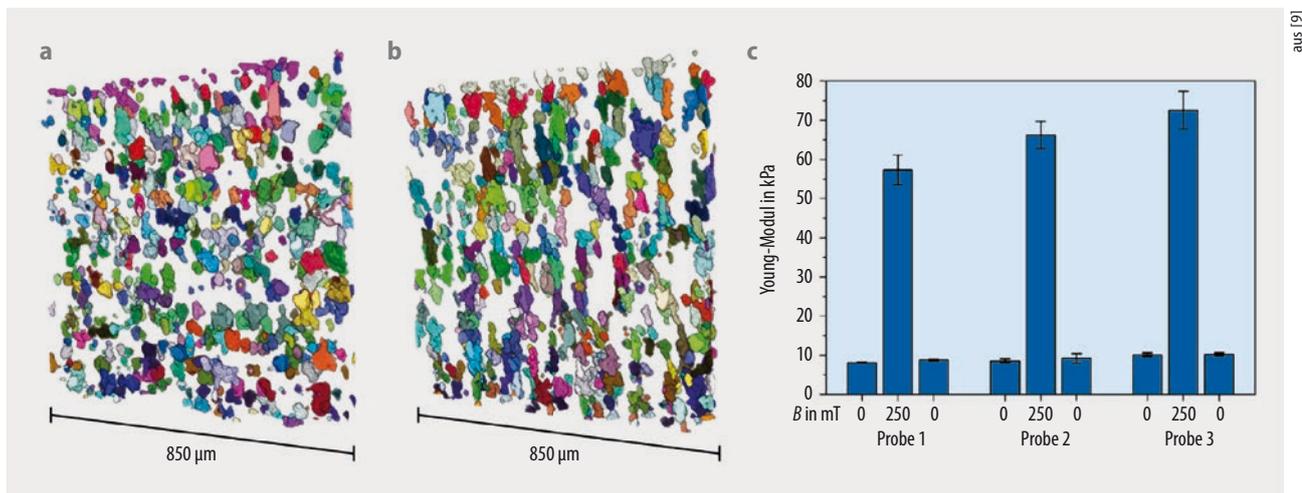


Abb. 4 Magnetische Elastomere mit knapp 10 Prozent Partikelvolumenanteil und zunächst isotroper Partikelverteilung reagieren auf ein homogenes externes Magnetfeld der Stärke 250 mT, das hier vertikal orientiert ist. Aus der anfangs isotropen Partikelanordnung (farbig, a) bilden sich kettenförmige, vertikal orientierte Partikelaggregate

(farbig, b). Dadurch wird die jeweilige Probe bei Stauchung entlang der Magnetfeldrichtung um einen Faktor 6 bis 7 härter, was sich im Young-Modul zeigt (c). Für drei verschiedene Proben ist jeweils der Young-Modul ohne, dann mit und dann wieder ohne externes Magnetfeld aufgetragen. Der Effekt ist offensichtlich reversibel.

anordnung, was Gegenstand zahlreicher theoretischer Studien war. Sowohl Kontraktionen als auch Streckungen des Gesamtmaterials entlang eines äußeren Magnetfeldes werden je nach Partikelkonfiguration vorhergesagt [2].

Experimentell ist es bislang schwierig, makroskopische Materialien mit regelmäßigen Gitteranordnungen oder anderweitig gezielt platzierten Partikeln bei gleichzeitig moderaten Volumenanteilen herzustellen. Vor allem lassen sich Proben erzeugen, die kettenförmige Aggregate enthalten (Abb. 3b). Diese bilden sich aus, wenn man bei der Herstellung starke homogene Magnetfelder anlegt, welche die einzelnen Partikel magnetisieren beziehungsweise ihre magnetischen Momente entlang des Magnetfeldes ausrichten. Ist das umgebende Medium noch flüssig, können sich die Partikel hindurchbewegen und sich wie kleine Magnete zu kettenförmigen Strukturen zusammenfinden. Durch die anschließende chemische Vernetzungsreaktion wandelt sich das umgebende Medium in einen elastischen Festkörper um, in dem die Strukturen permanent fixiert werden. Eine zentrale Aufgabe wird künftig darin bestehen, weitere experimentelle und synthetische Methoden zu ent-

wickeln, um theoretisch vorgegebene Partikelstrukturen in die Materialien einzuprägen. Analog zu flüssigkristallinen Elastomeren [5] sollten sich auf diese Weise komplexe Deformationen magnetisch induzieren lassen.

Äußere Magnetfelder können auch die mechanischen Eigenschaften magnetischer Gele und Elastomere signifikant und reversibel beeinflussen. Besonders ausgeprägt ist der Effekt, wenn die äußeren Magnetfelder starke magnetische Wechselwirkungen zwischen den Partikeln und dadurch eine innere Umstrukturierung im Material induzieren. So bildeten sich aus zunächst isotropen Partikelanordnungen bei starker magnetischer Anziehung zwischen den Teilchen und gegen die elastische Rückstellkraft des polymeren Netzwerks kettenförmige Partikelaggregate aus (Abb. 4a, b). In solchen Situationen trat eine signifikante mechanische Verhärtung um nahezu eine Größenordnung auf. Der Effekt ist reversibel (Abb. 4c). Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, weiche Dämpfungssysteme zu entwickeln, die von außen reversibel einstellbar sind. Äußere Magnetfelder lassen sich durch elektrische Ströme erzeugen und schalten. Entsprechende dynamische Eigenschaften sind Gegenstand

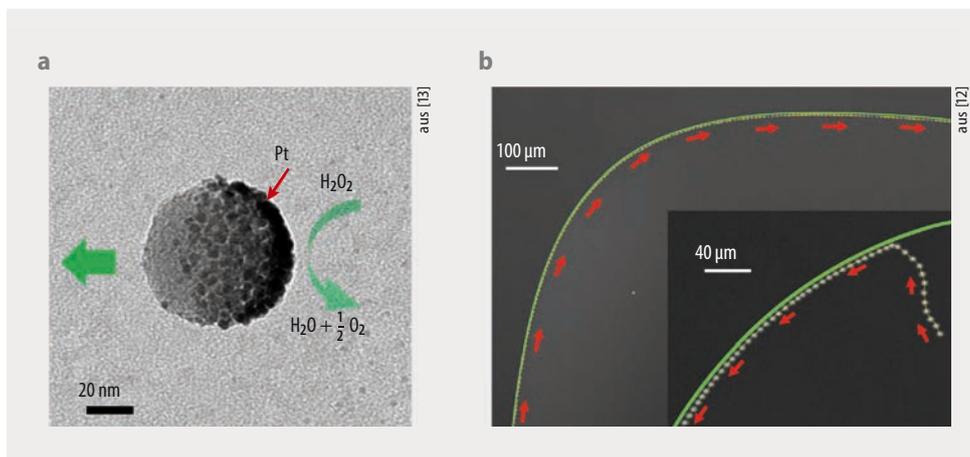


Abb. 5 Die transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme zeigt ein Partikel, das auf einer Hälfte mit Platin beschichtet ist (a). Diese Seite katalysiert in der umgebenden Flüssigkeit die chemische Umwandlung von Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff, wodurch ein Eigenantrieb entsteht. Ein selbstgetriebenes Janusteilchen (b) von ca. 3 μm Durchmesser findet autonom seinen Weg entlang der Kante einer Glasküvette (grün, b). Das Inset zeigt den Einfang durch die Küvettenkante. Die einzelnen hellen Punkte entsprechen dem Teilchen in identischen Zeitabständen.

aktueller Forschung, wobei sich typische gemessene mechanische Antwortzeiten resultierender Deformationen im Bereich einiger Hundertstelsekunden bewegen.

Aktive Systeme

Einen noch höheren Grad an Selbstständigkeit erreichen Systeme, die nach einer Initialisierung weitgehend autonom operieren, ohne dass zusätzliche externe Reize nötig sind. Solche aktiven Systeme werden derzeit intensiv vor allem anhand selbstgetriebener Partikel untersucht [2, 10, 11]. Beispiele sind synthetisch hergestellte, kolloidale Janusteilchen, die sich eigenständig durch eine Flüssigkeit bewegen. Je nach Herstellung sind sie nano- bis mikrometerklein, wobei thermische Fluktuationen kleinere Teilchen meist mehr beeinflussen und reorientieren. Charakteristisch für Janusteilchen ist, dass ihre Oberflächenhälften unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, etwa eine Platinbeschichtung auf einer Seite (Abb. 5a). In einer entsprechenden Lösung katalysiert die Platinoberfläche die Umwandlung von Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff. Entstehende nichtsymmetrische Konzentrationsgradienten um das Janusteilchen herum führen zu seiner Fortbewegung. Angetrieben durch chemische Reaktionen können sich solche Partikel selbstständig entlang vorgegebener Pfade bewegen (Abb. 5b) [12] und zusätzliche Ladungen wie Chemikalien

oder andere Partikel transportieren [13]. Im Prinzip setzt sich die Bewegung so lange fort, wie genügend „Treibstoff“, hier Wasserstoffperoxid, in der Umgebung vorhanden ist und kein Hindernis im Weg steht. Die Partikel können auch auf chemische Gradienten reagieren. Auf diese Weise bilden diese synthetischen Teilchen Aspekte des Verhaltens biologischer Mikroschwimmer ab, zum Beispiel des Bakteriums *Escherichia coli*.

Die Fähigkeit zu aktiven autonomen Operationen zeichnet biologische Systeme natürlicherweise aus. Die aktuelle Forschung zielt darauf ab, diese Fähigkeit auf intelligente synthetische Materialien zu übertragen. Einen Schritt in diese Richtung stellten polymere Gele dar, die sich getrieben durch eine oszillierende chemische Reaktion periodisch deformieren [14]. Während einer solchen chemischen Reaktion wechseln sich verschiedene chemische Zustände periodisch ab, und zwar in räumlich voneinander entfernten Bereichen nicht notwendigerweise gleichzeitig. So kommt es gegebenenfalls zu einer propagierenden Verschiebung der Grenzen zwischen den sich abwechselnden Bereichen unterschiedlicher chemischer Zustände, das heißt, es treten sogenannte chemische Wellen auf.

Die Idee bestand nun darin, diese chemischen Oszillationen mit dem Quellverhalten eines entsprechend sensitiven polymeren Gels zu koppeln. Das heißt, in einem der chemischen Zustände quillt das Gel, nimmt also größere Mengen eines Lösungsmittels auf und wird dadurch dicker. Ändert sich der chemische Zustand, wird das Lösungsmittel wieder abgegeben, und das Gel schrumpft zusammen. Gekoppelt an eine sich räumlich ausbreitende chemische Welle lässt sich auf diese Weise zum Beispiel eine Form von peristaltischer Bewegung einer zylindrischen Materialprobe realisieren (Abb. 6a). Quer zur Laufrichtung der chemischen Welle gerichtete Materialgradienten können zudem periodisch oszillierende Biegungen verursachen (Abb. 6b). Auf unsymmetrisch strukturierten Oberflächen übersetzt sich letzteres in eine Fortbewegung. Wesentlich an diesen Beispielen ist, dass nach dem Start der chemischen Reaktion kein weiteres Eingreifen von außen notwendig ist. Das Material führt die mechanische Operation selbstständig und fortwährend durch, solange genug Ausgangsstoffe für die chemische Reaktion zur Verfügung stehen.

Allgemein müssen autonom operierende Materialien nicht nur in der Lage sein, mehrere Aufgabenschritte prinzipiell auszuführen, sondern auch deren richtige Reihenfolge einzuhalten. So sind Wege gefordert, die geordnete zeitliche Abfolge der einzelnen Schritte ohne Steuerung von außen zu realisieren. Im Beispiel oben koordinierte die chemische Reaktion eine periodische Abfolge von Ausdehnung und Kontraktion durch länger anhaltende, oszillatorische Vorgänge.

Daneben wird an der Entwicklung chemischer Steuerungen für einmalige Ausführungen gearbeitet [17]. Eine Möglichkeit besteht darin, den pH-Wert eines Systems durch eine zugesetzte Aktivatorsubstanz zwischenzeitlich durch einen chemischen Prozess umstellen zu lassen, um die Ausführung der gewünschten Operation des Systems zu initiieren. Gleichzeitig befindet sich im System eine Deaktivatorsubstanz, die jedoch deutlich langsamer chemisch

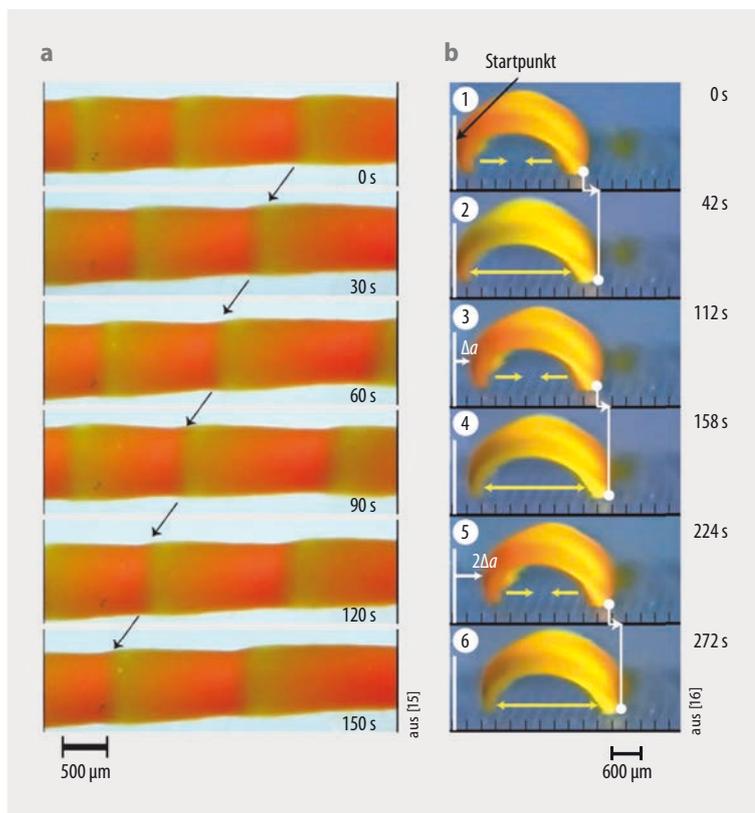


Abb. 6 Eine oszillierende chemische Reaktion steuert die autonome periodische Deformation eines elastischen Gelsystems. Das Gel erscheint grünlich in einem periodisch wiederkehrenden chemischen Zustand, der erhöhte Quellung und Verdickung auslöst. Ein entsprechender Gelzylinder deformiert sich peristaltisch (a). Auf einem Substrat mit unsymmetrisch strukturierter Oberfläche führt eine periodisch variierende Biegedeformation eines gekrümmten Gelstreifens zu einer Vorwärtsbewegung (b).

reagiert oder erst durch den umgestellten pH-Wert aktiviert wird. Der verzögert einsetzende Deaktivator bewirkt nach einer Weile die Rückstellung des pH-Werts und damit das Ende der Systemaktivität. Insbesondere organische Moleküle und Enzyme, die von Beginn an dem System zugesetzt sind, werden als Aktivatoren und Deaktivatoren diskutiert. Auf diese Weise konnte zum Beispiel ein Gel durch eine autonom gesteuerte Änderung des Quellungsgrades vorübergehend ein Gewicht anheben. Die zugehörigen Zeitskalen bewegen sich momentan im Bereich von Minuten bis Tagen. Zudem gilt es, Wege zu finden, die während der zeitlichen Steuerung entstandenen Reaktionsprodukte am Ende wieder durch entsprechende Ausgangsstoffe zu ersetzen. In anderen Worten, für eine erneute Verwendung muss das System wieder in den Ausgangszustand zurückkehren.

Ausblick

Vorbild solcher Bemühungen sind biologische Systeme. Bereits eine einzelne Zelle stellt ein je nach Fall und Situation weitgehend autonom operierendes, äußerst komplexes intelligentes System dar. Externe Stimuli aktivieren entsprechende Reaktionen. Wie die Zelle anschließend vorgeht, gibt großteils die gespeicherte Information auf der DNA vor. So können Rezeptoren der Zellmembran äußere Reize detektieren und eine autonome Antwort der Zelle auslösen, zum Beispiel die Aufnahme eines externen Objekts.

Multifunktionale Materialien der Zukunft führen nicht nur selbstständig vorgegebene Prozesse durch. Zusätzlich sollen bei Bedarf, zum Beispiel durch Wechseln der Reaktionsvorschrift und des damit verbundenen Informationsträgers, unterschiedliche Reaktionen desselben Materials auf denselben Stimulus möglich sein. Die Implementierung solcher Funktionalitäten in weichen polymeren Materialien, ohne auf konventionelle Steuereinheiten wie harte Mikrochips oder externe Antriebseinheiten zurückzugreifen, ist eine wichtige Aufgabe der Forschung.

Literatur

- [1] G. Strobl, *The Physics of Polymers*, Springer, Berlin, Heidelberg (2007)
- [2] A. M. Menzel, *Phys. Rep.* **554**, 1 (2015)
- [3] C. Ohm, M. Brehmer und R. Zentel, *Adv. Mater.* **22**, 3366 (2010)
- [4] H. Doi und K. Urayama, *Soft Matter* **13**, 4341 (2017)
- [5] T. H. Ware et al., *Science* **347**, 982 (2015)
- [6] S. Palagi et al., *Nat. Mater.* **15**, 647 (2016)
- [7] G. Filipcsei et al., *Adv. Polym. Sci.* **206**, 137 (2007)
- [8] T. Gundermann et al., *Smart Mater. Struct.* **26**, 045012 (2017)
- [9] M. Schümann und S. Odenbach, *J. Magn. Magn. Mater.* **441**, 88 (2017)
- [10] S. J. Ebbens, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **21**, 14 (2016)
- [11] C. Bechinger et al., *Rev. Mod. Phys.* **88**, 045006 (2016)
- [12] S. Das et al., *Nat. Commun.* **6**, 8999 (2015)
- [13] X. Ma, K. Hahn und S. Sanchez, *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 4976 (2015)
- [14] Y. S. Kim et al., *Mater. Horiz.* **4**, 38 (2017)
- [15] S. Maeda et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **47**, 6690 (2008)
- [16] S. Maeda et al., *Adv. Mater.* **19**, 3480 (2007)
- [17] R. Merindol und A. Walther, *Chem. Soc. Rev.* **46**, 5588 (2017)

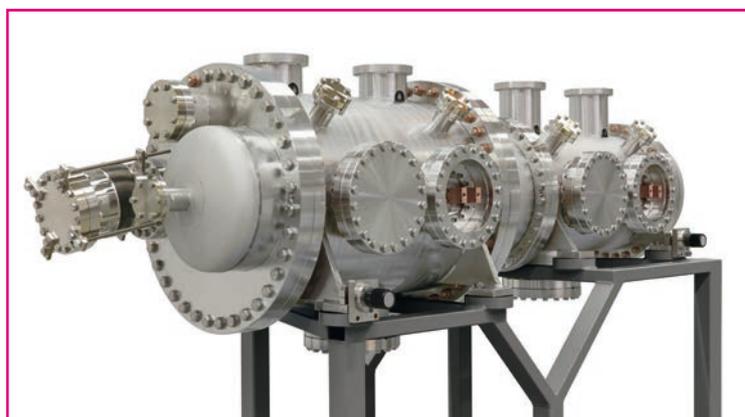
Der Autor



Andreas Menzel (FV Chemische Physik und Polymerphysik) studierte und promovierte an der U Bayreuth. Nach Aufenthalt in Japan, in den USA und in Mainz habilitierte er sich 2014 in Theoretischer Physik an der U Düsseldorf. Inhaltlich faszinieren ihn die Auswirkungen steuerbarer mesoskopischer Struktureigenschaften auf das makroskopische Materialverhalten in komplexen Fluiden und elastischen Systemen oder die Entstehung von Ordnung und kollektiver Bewegung in Nichtgleichgewichtssystemen. Kürzlich wurde er in das Heisenberg-Programm der DFG aufgenommen.

Priv.-Doz. Dr. Andreas Menzel, Institut für Theoretische Physik II: Weiche Materie, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Universitätsstr.1, 40225 Düsseldorf

Vakuumtechnik



Extraktionsseptum-Booster (Vakuumkammer, CF und COF ganzmetallgedichtet, mit Einbauten und Durchführungen) für den Einsatz am Elektronenspeicherring BESSY II.

**Innovativ und intelligent.
Präzise und produktiv.
Zuverlässig und zukunftsweisend.**

PiNK, der Weltmarktführer für vakuumtechnische Sonderanlagen, produziert seit über 30 Jahren Anlagen und Systeme nach Kundenanforderung. Zum umfassenden Produktspektrum zählen u.a. hochkomplexe UHV-Systeme und Sonderanlagen für Linearbeschleuniger, Ionenstrahl-Therapieanlagen, Dichtheitsprüfanlagen sowie Hochvakuum-Lötöfen.

Führende internationale Technologieunternehmen, u.a. aus der Halbleiter- und Elektronikindustrie, der Medizintechnik, der Luft- und Raumfahrt sowie der Wissenschaft und Forschung vertrauen auf die innovativen Produkte des Familienunternehmens aus Wertheim.