

relevante Degradation möglich. Die Bioreaktoren waren nach einer Formationsphase für rund 45 Stunden mit gleichbleibender Wandlungsrate (um die 60 mg Alkohol per Liter und Stunde) in Betrieb.

Die Autoren diskutieren auch die Wirtschaftlichkeit und Skalierung auf industrielle Größe: Als kostengünstige CO<sub>2</sub>-Quelle setzen sie auf gereinigtes Abgas, beispielsweise von Brauereien, Zementfabriken oder Biomasseverstromungsanlagen. In deren Nachbarschaft sind Anlagen in passender Größe denkbar, typisch wären rund 10 000 Tonnen Jahresproduktion. Zum Vergleich: Die gesamte Butanol-Erzeugung Deutschlands beträgt das rund 60-Fache. Vom Labormaßstab ausgehend erfordert eine solche Anlage beim ersten Prozessschritt eine Skalierung von etwa  $2,7 \times 10^5$ . Das wäre möglich durch 270 Stacks und eine Vergrößerung der Elektrodenoberfläche von zehn Quadratzentimetern auf ein Quadratmeter. Für die Weiterverarbeitung des Synthesegases gilt es, von einigen Litern im Labor auf industriell bereits übliche Bioreaktor-Volumina von 700 m<sup>3</sup> zu skalieren und dabei die Konzentration um einen Faktor

30 zu erhöhen, was für machbar gehalten wird. Dabei ist von Vorteil, dass die Anlage keinen sterilen Betrieb erfordert.

Für die anvisierte dezentrale Produktion schlagen die Autoren die Nutzung von (Überschuss-) Strom aus regionaler Photovoltaik vor, für den sie 2,5 ct/kWh ansetzen. Mit rund 20 Prozent Umwandlungseffizienz von Licht zu Strom und einer Energieeffizienz von bis zu 47 Prozent für die CO<sub>2</sub>- bzw. 70 Prozent für die H<sub>2</sub>-Erzeugung erreichen sie einen Gesamtwirkungsgrad (von Photonenenergie zu chemischer Produktenergie) von rund acht Prozent. Das ist für diese Art von Konzepten eine der höchsten bisher erzielten Gesamteffizienzen! Die Kosten sollten gemäß der Abschätzung mit der gegenwärtigen Herstellung vergleichbar sein (etwa 1,20 € pro kg Butanol). Über die Investitions- und Betriebskosten sowie die Frage, ob der Betrieb bei fluktuierendem Stromangebot möglich ist, ohne dass Stromspeicherung in die Rechnung eingehen muss, gibt es keine Angaben.

In einer ersten Bewertung [4] des Prozesses wird auf die außer-

gewöhnlich hohe erreichte Stromdichte und stabile Betriebsdauer des Elektrolyseurs, auf die Energieeffizienz des Gesamtverfahrens und insbesondere auf seine Modularität hingewiesen, die für die Skalierung und weitere Optimierungen Vorteile bieten könnte gegenüber Entwicklungen, die teils ohne Fermenter rein elektrochemisch vorgehen oder eine Fermentation in die elektrochemische Zelle zu integrieren suchen. Auf der Grundlage des Laborerfolges wollen Siemens und Evonik bis 2021 mit Förderung des BMBF in Marl eine Pilotanlage als Zwischenschritt hin zu kommerziellen Anlagen bauen [5].

Hardo Bruhns

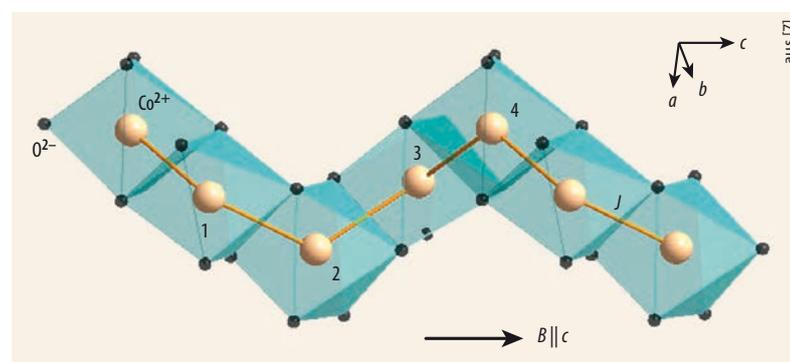
- [1] O. S. Bushuyev et al., *Joule* 2018, [www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(17\)30076-4](http://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(17)30076-4)
- [2] Th. Haas et al., *Nat. Catal.* 1, 32 (2018). Die Arbeiten werden im Kontext der vom BMBF geförderten Kopernikusprojekte P2X und Rheticus durchgeführt.
- [3] H. Sahm et al. (Hrsg.), *Industrielle Mikrobiologie*, Springer, Berlin, Heidelberg (2013)
- [4] E. B. Creel und B. D. McCloskey, *Nat. Catal.* 1, 6 (2018)
- [5] [www.fona.de/de/kickoff-rheticus-projekt-22925.html](http://www.fona.de/de/kickoff-rheticus-projekt-22925.html)

## String-Zustände aus Magnonen

In Strontiumkobaltvanadat ist es zum ersten Mal gelungen, die schon von Hans Bethe für eindimensionale Quantenmagnete vorhergesagten String-Zustände experimentell nachzuweisen.

Wir kennen alle das Konzept der Punktteilchen, also nulldimensionaler Objekte ohne Ausdehnung. Sie stellen eine Idealisierung dar, die in sehr vielen Bereichen der Physik erfolgreich verwendet wird. In der makroskopischen Physik handelt es sich dabei um eine Näherung. Mikroskopisch gibt es jedoch tatsächlich Elementarteilchen, wie Elektronen oder Quarks, denen man keine Ausdehnung zuordnen kann. Sie sind in der Tat Punktteilchen gemäß heutiger Messmöglichkeiten.

Viele Varianten von String-Theorien behandeln elementare Objekte nicht als punktförmig, sondern als eindimensional. Man



Strontiumkobaltvanadat besitzt eine Kettenstruktur mit vierfacher Schraubensymmetrie entlang der *c*-Achse des Kristalls.

Eine starke Ising-Anisotropie der magnetischen Wechselwirkung richtet die Spins bevorzugt entlang dieser Achse aus.

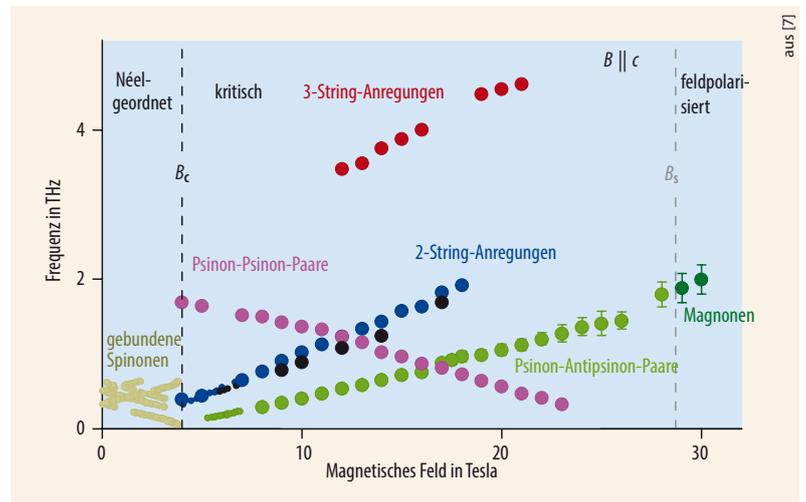
muss sie sich als Saiten oder unendlich dünne Fäden, eben Strings, vorstellen. Daneben werden auch höherdimensionale Objekte disku-

tiert, so genannte Branes (von Englisch: membrane). Solche Ansätze sollen eine große vereinheitlichte Theorie von Gravitation und Stan-

dardmodell ermöglichen. Bisher gibt es aber keine experimentellen Möglichkeiten, diese Ansätze in der Hochenergiephysik oder der Kosmologie zu verifizieren oder zu falsifizieren.

So wie das Higgs-Teilchen der Hochenergiephysik in der Festkörperphysik seine Entsprechung in der Amplitudenmode des Ordnungsparameters von Supraleitern findet [1], gibt es auch Stringzustände in Festkörpern. Die erste Vorhersage dazu stammt aus den 1930er-Jahren von Hans Bethe und bezieht sich auf Anregungen in Atomketten mit lokalen magnetischen Momenten bzw. Spins [2]. Den Grundzustand dieser Ketten charakterisiert im Wesentlichen eine antiparallele Ausrichtung benachbarter Spins.

Schon ohne äußeres Magnetfeld sind die Anregungen in solchen antiferromagnetischen Spinketten ungewöhnlich. Bei einem Spinflip, auch als Magnon bezeichnet, entsteht nicht eine einzelne Anregung mit einer um 1 geänderten Spinquantenzahl, sondern eine Domänenwand vor dem Spinflip und eine dahinter [3]. Das entspricht zwei so genannten fraktionalen Anregungen mit der Spinquantenzahl  $\frac{1}{2}$ , die sich getrennt bewegen können [4]. Sie werden Spinonen genannt. Ihr experimenteller Fingerabdruck sind vorherrschende Kontinua in spektroskopischen Untersuchungen [5]. In einem äußeren magnetischen Feld heißen die den Spinonen



**Abb. 1** Die Eigenfrequenzen der experimentell beobachteten magnetischen Anregungen (Kreise) weisen verschiedene Abhängigkeiten vom Magnetfeld auf. Unterhalb von 4 Tesla sind die Spinonen in einer Néel-geordneten Phase ge-

bunden. Im kritischen Regime bis etwa 29 Tesla tauchen verschiedene Anregungen auf, darunter auch 3-String-Zustände. Bei noch größeren Feldstärken gibt es nur noch Magnonen in einer feldpolarisierten ferromagnetischen Phase.

entsprechenden fraktionalen Anregungen Psinonen und Anti-Psinonen, je nach Ausrichtung der Spins relativ zum Magnetfeld.

Die String-Zustände tauchen für Magnetfelder auf, die groß genug sind, um Energielücken zu schließen, aber auch klein genug, um die Spins nicht vollständig auszurichten. Diese gebundenen Zustände von Magnonen sind Kompositteilchen. Man spricht von  $n$ -Strings, wenn  $n$  Magnonen am Bindungskomplex beteiligt sind. Beispielsweise entspricht ein 2-String einem gebundenen Zustand von zwei Magnonen. Solche Zustände tauchen in vielen isotropen Spin-

modellen auf, in denen alle Spinrichtungen gleichberechtigt sind, und bestimmen dort wesentliche Teile der Dynamik [3, 6]. Besonders bemerkenswert ist also das Auftauchen von  $n$ -Strings mit  $n > 2$ .

Einem internationalen Team ist es nun gelungen, die Betheschen String-Zustände zum ersten Mal eindeutig experimentell nachzuweisen [7]. Dazu synthetisierten die Forscher mit neusten Methoden Kristalle von Strontiumkobaltvanadat ( $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$ ) und zeigten, dass in dieser Verbindung antiferromagnetische Kopplungen mit Ising-Anisotropie vorliegen [8]. Mit hochauflöser Terahertz-Spektroskopie wiesen sie magnetische Anregungen nach und bestimmten die Magnetfeldabhängigkeit der Anregungsenergien. Jenseits eines Quantenphasenübergangs bei einer kritischen Magnetfeldstärke von 4 T änderten sich die Anregungen völlig. Durch den quantitativen Vergleich mit den theoretischen Bethe-Ansatz-Lösungen ließen sich die Anregungen identifizieren. Neben fraktionalen Psinonen und Anti-Psinonen tauchten die Signaturen von 2-String- und 3-String-Zuständen auf: Sie stachen vor allem aufgrund ihrer Magnetfeldabhängigkeiten hervor (Abb. 1).

Wichtig ist dabei, dass die Wechselwirkung benachbarter

## KURZGEFASST

### ■ Faltenfrei durch Infrarotstrahlung

Ein neues intelligentes Material verliert seine Faltenstruktur, wenn es Infrarotstrahlung absorbiert. Chinesische Forscher haben dazu ein Elastomer mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen versetzt, sodass es Infrarotstrahlung in Wärme umwandeln kann. Eine Beschichtung durch ein steiferes Polymer mit unterschiedlichem thermischen Ausdehnungskoeffizienten führt zu einer Oberfläche mit Mikrometer-breiten Falten. Diese verschwinden bei der Bestrahlung und treten nach dem Abkühlen wieder auf. Eine Anwendung ist ein Transmissionsbeugungsgitter, das sich mit Infrarotstrahlung schalten lässt. *F. Li et al., Sci. Adv.* **4**, eaar5762 (2018)

### ■ Dunkle Materie im Standardmodell

Eine Instabilität im Higgs-Feld könnte primordiale Schwarze Löcher erzeugen, die heute als Dunkle Materie erscheinen. Laut Theoretikern des ICREA, Barcelona, und der Universität Genf entstehen während der inflationären Phase des frühen Universums unzählige mikroskopische Schwarze Löcher mit Massen von nur  $10^{15}$  kg. Ihre Dichte passt zur kosmologischen Vorhersage für Dunkle Materie. Damit wäre das Higgs-Feld für die Masse der Elementarteilchen und der Dunklen Materie verantwortlich – und Physik jenseits des Standardmodells dazu nicht nötig. *J. R. Espinosa et al., Phys. Rev. Lett.* **120**, 121301 (2018)

Spins in Strontiumkobaltvanadat relativ stark anisotrop vom Ising-Typ ist. Die Spins richten sich also bevorzugt entlang einer Achse aus, in diesem Fall entlang der  $c$ -Achse des Kristalls. Liegt nur diese Ising-Wechselwirkung vor, unterliegen die Spinflips einer stringartigen Vielteilchenwechselwirkung, die das Vorzeichen der Flips von Gitterplatz zu Gitterplatz bestimmt [9]. Daher liegt es nahe, die experimentellen Befunde so zu interpretieren, dass die Ising-artige Anisotropie das Erscheinen experimenteller Signale der 3-Strings begünstigt. So öffnet sich vermutlich ein Weg zu noch längeren Strings aus noch mehr Magnonen.

Die experimentellen Signaturen der exotischen String-Zustände aus Magnonen sind einerseits von

fundamentaler Bedeutung, weil sie die Existenz solcher eindimensionaler Anregungen beweisen. Andererseits stimulieren sie sicher die weitere Erforschung solcher Phänomene, die sich auch für andere elementare Anregungen ergeben. Beispielsweise bilden sich String-Zustände von dreifach entarteten Triplonen in stark frustrierten Spinleitern [10]. Deren experimenteller Nachweis steht noch aus.

Die jetzt publizierten bahnbrechenden Ergebnisse erlauben es beispielsweise auch, über Anwendungen in der Quanteninformationsverarbeitung nachzudenken. Vielleicht ergeben sich sogar darüber hinaus neue Denkanstöße für String-Zustände in ganz anderen Bereichen der Physik.

Benedikt Fauseweh und Götz S. Uhrig

- [1] D. Manske und M. Dressel, *Physik Journal*, Januar 2016, S. 37
- [2] H. Bethe, *Z. Phys.* **71**, 205 (1931); M. Ganahl et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 077206 (2012)
- [3] G. S. Uhrig und M. Grüninger, *Physik Journal*, Januar 2003, S. 41
- [4] L. D. Faddeev und L. A. Takhtajan, *Phys. Lett.* **85A**, 375 (1981)
- [5] D. A. Tennant et al., *Phys. Rev. Lett.* **70**, 4003 (1993); M. Mourigal et al., *Nat. Phys.* **9**, 435 (2013)
- [6] M. Kohno, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 037203 (2009); M. Powalski et al., *SciPost Phys.* **4**, 1 (2018)
- [7] Z. Wang et al., *Nature* **554**, 219 (2018)
- [8] A. K. Bera et al., *Phys. Rev. B* **89**, 094402 (2014)
- [9] B. Fauseweh und G. S. Uhrig, *Phys. Rev. B* **87**, 184406 (2013)
- [10] A. Honecker et al., *Phys. Rev. B* **94**, 094402 (2016)

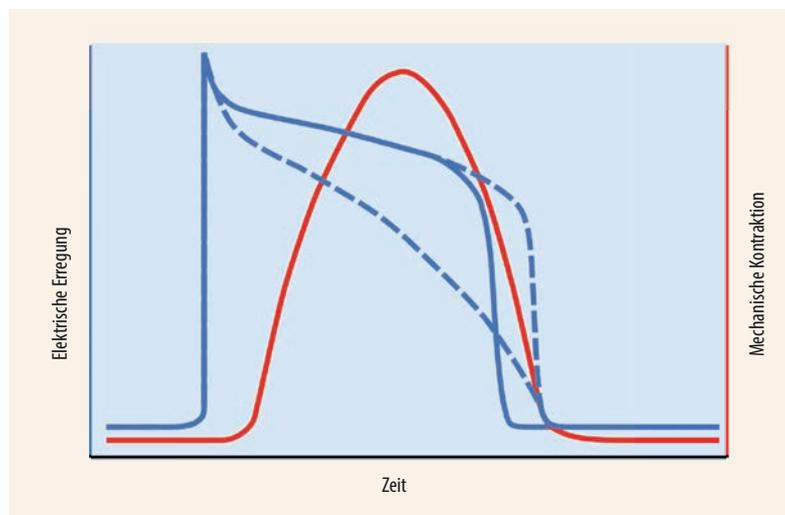
Dr. Benedikt Fauseweh, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Heisenbergstr. 1, 70569 Stuttgart und Prof. Dr. Götz S. Uhrig, Lehrstuhl für Theoretische Physik I, Technische Universität Dortmund, Otto-Hahn-Str. 4, 44221 Dortmund

## ■ Stille Wasser sind tief

Eine neue Methode macht die mechanischen Wellen unter der Herzoberfläche sichtbar.

Jeder Schlag im gesunden Herz beginnt mit einer elektrischen Aktivierung (Erregung), die sich wellenartig im Muskelgewebe ausbreitet. Dieser Erregungswelle folgt die mechanische Kontraktion der Herzkammern. Die lebenswichtige Pumpfunktion des Herzens beruht also auf einem elektrisch koordinierten mechanischen Prozess. Unterschiede in Struktur und Funktion im Herzmuskelgewebe – so genannte Heterogenitäten – können dazu führen, dass sich die wohlkoordinierte elektrische Erregung außerhalb der natürlichen Wege ausbreitet. Dies führt zu ungeordneten Kontraktionen und ist die häufigste Ursache des plötzlichen Herztods.

Als Therapie dient unter anderem die Ablation – ein Verfahren, bei dem während einer Katheteruntersuchung Herzmuskelgewebe auf den ungewünschten Ausbreitungswegen durch lokales Erhitzen oder Kühlen gezielt geschädigt wird. Das verringert lokal die elektrische Leitfähigkeit des Gewebes, sodass keine irregulär zirkulierenden Wellen entstehen und weiterge-



Elektrische Erregung (blau) und mechanische Kontraktion (rot) des Herzens stehen in zeitlicher Beziehung zueinander: Die Kontraktion folgt der Erregung mit relativ konstanter zeitlicher Verzögerung

und erlaubt Rückschlüsse auf deren Beginn. Änderungen in Form und Dauer der elektrischen Erregung (blau, gestrichelt) lassen sich aus der mechanischen Aktivität nicht ableiten.

leitet werden. Dazu ist es nötig, die Bereiche des Herzmuskels genau zu identifizieren, in denen die ungewollte elektrische Aktivität besteht.

In der klinischen Praxis lassen sich durch das Einführen eines Katheters in das Herz die bestehenden elektrischen Erregungsmuster in unmittelbarer Gewebnähe abbil-

den. Diese erlauben Rückschlüsse auf lokal variierende elektrische Gewebeeigenschaften. Die räumliche Auflösung ist dabei auf  $10^{-3}$  m begrenzt. Da eine einzelne Herzmuskelzelle mit etwa  $10^{-4}$  m Länge und  $10^{-5}$  m Breite wesentlich kleiner ist, geht viel Information verloren. Eine höhere Auflösung ist notwen-