

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)

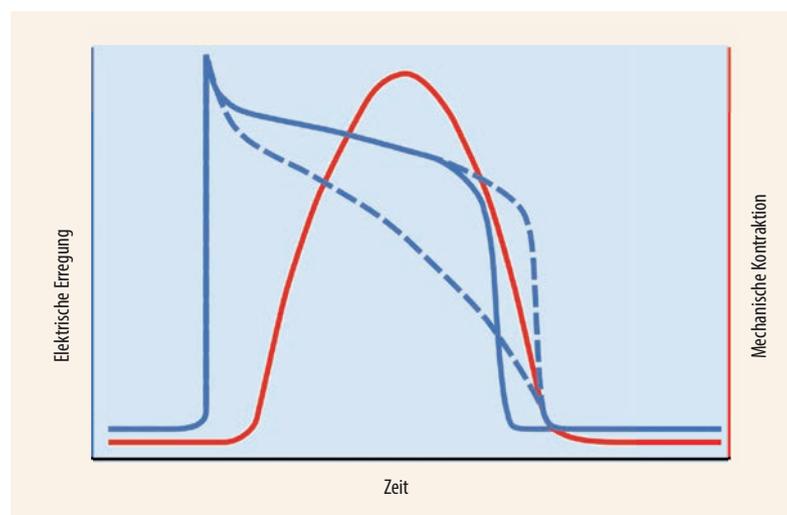
Dr. Benedikt Fauseweh, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Heisenbergstr. 1, 70569 Stuttgart und Prof. Dr. Götz S. Uhrig, Lehrstuhl für Theoretische Physik I, Technische Universität Dortmund, Otto-Hahn-Str. 4, 44221 Dortmund

## ■ 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 Gewebenähe 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-

Simon Jacobi, Prof. Dr. Peter Kohl und Dr. Callum Michael Zgierski-Johnston, Institut für Experimentelle Kardiovaskuläre Medizin, Universität Herzzentrum Freiburg – Bad Krozingen, Medizinische Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

dig, um auch Ausbreitungswege zu detektieren, die nur wenige Herzmuskelzellen breit sind.

In der präklinischen Forschung kommen optische Verfahren mit Fluoreszenzfarbstoffen zum Einsatz, um die elektrische Erregung zu messen. Damit lassen sich Signale von den oberflächlichen Zellschichten eines Gewebes mit einer Auflösung von  $10^{-6}$  m erfassen. Um dies zu erreichen, werden häufig Substanzen eingesetzt, die verhindern, dass der Erregung eine mechanische Kontraktion folgt (Entkoppler). Dadurch werden Bewegungsartefakte vermieden, die ansonsten Analyse und Interpretation der Daten erschweren.

Der große Nachteil dieser Techniken ist die ausschließlich betrachtete Oberflächenprojektion der elektrischen Aktivität. Die elektrischen Wellen tief im Herzmuskelgewebe lassen sich nicht direkt und dreidimensional beurteilen. In Analogie zum Meer: Eine Betrachtung der Wellen an der Oberfläche erlaubt keine Rückschlüsse auf Meeresströmungen. Es fehlt wichtige Information, da die Dreidimensionalität des Systems nicht beachtet wird.

Am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen beschäftigt sich die Gruppe von Stefan Luther damit, die Dynamik der elektrischen Herzerregung besser zu verstehen. Dabei gelang es, die optischen Fluoreszenzmessungen der Herzelektrik an der Oberfläche mit dreidimensionalen Ultraschallmessungen der Gewebedeformation während des Herzzyklus zu verbinden [1]. Diese neue Technik zeigt, dass irreguläre elektrische und mechanische Wellen jeweils um ein Organisationszentrum kreisen. Im Raum formen die Zentren dreidimensionale Filamente. Diese sind für die elektrischen und mechanischen Wellen nicht identisch, besitzen aber eine enge räumlich-zeitliche Korrelation. Somit erlaubt die Beobachtung der mechanischen Wellen im Inneren des Herzmuskels Rückschlüsse auf die elektrische Erregung. Die Entstehungsorte der zirkulierenden elektrischen Wellen

können mit der neuen Methode aufgespürt und gegebenenfalls therapiert werden.

Außerdem erlaubt der neue Ansatz erstmals, die durch die Herzkontraktion induzierten Bewegungsartefakte in die Interpretation der optischen Fluoreszenzmessungen einzubeziehen. Diese Verbesserung erreichten die Wissenschaftler durch die Entwicklung komplexer, computergestützter Algorithmen zur Analyse der großen Datenmengen. Die erwähnten Entkoppler werden damit unnötig, und die experimentellen Modelle liefern unter Einbezug der mechanischen Komponente ein genaueres Abbild der Realität.

Das neue Verfahren hat noch Einschränkungen. Zwar erlaubt die Darstellung der mechanischen Wellen, die wahrscheinlichen räumlichen Ausbreitungswege der ursächlichen elektrischen Aktivierung zu identifizieren. Dauer, Form und Rückbildung der elektrischen Aktivität lassen sich daraus aber nicht ableiten (Abb.). Diese Eigenschaften sind jedoch entscheidend bei der natürlichen Erregungsausbreitung, der Entstehung von Herzrhythmusstörungen und deren Prävention und Therapie. Nichtsdestotrotz hat die Methode das Potenzial, die Diagnose und Behandlung von Störungen der elektrischen Erregungsausbreitung im Herzen zu revolutionieren, vor allem aufgrund der nicht-invasiven Natur von Ultraschallmessungen und der somit naheliegenden konkreten Anwendung in der Klinik.

Auch in der Grundlagenforschung zur Funktion des Herzens ergeben sich interessante Möglichkeiten. Neben der elektromechanischen Kopplung als „Feed-forward“-Mechanismus haben mechanische Parameter als „Feed-back“ Einfluss darauf, wie sich elektrische Erregungen im Herzen bilden und ausbreiten [2]. Mechanische und elektrische Rotationszentren beeinflussen einander also wechselseitig. Elektrische Wellen haben dabei eine räumlich recht begrenzte Auswirkung: Sie bewegen sich mit 1 m/s langsam und löschen sich beim Aufeinan-

dertreffen gegenseitig aus. Mechanische Wellen breiten sich dagegen mit Schallgeschwindigkeit im Gewebe aus ( $10^3$  m/s). Sie eliminieren sich nicht, sondern modulieren einander. Somit führt die elektrische Aktivität zu lokaler mechanischer Kontraktion, während die resultierende mechanische Welle aufgrund der schnellen Ausbreitung weiträumig Effekte hervorrufen kann, die ihrerseits die Herzelektrik verändern. Hierfür gab es bislang kaum geeignete Untersuchungsverfahren.

Der duale Ansatz mit optischem und mechanischem dreidimensionalen Mapping erlaubt die gezielte mechanistische Analyse von Interaktionen zwischen Struktur, Elektrik und Mechanik des Herzens. Dies ist von höchster klinischer Bedeutung, da Unterschiede in mechanischen Parametern die Diagnose und Verlaufsbeurteilung von Herz-Rhythmus-Erkrankungen verbessern könnten [3]. Die Methode ermöglicht somit ein besseres Verständnis der elektromechanischen Vorgänge im Herzen und bietet potenziell neue Optionen bei der Beurteilung von Krankheitsentwicklung und Therapieeffekten in der Klinik. Der Blick unter die Oberfläche des Herzens offenbart eine komplexe Realität mit zahlreichen noch zu erforschenden Mechanismen.<sup>#)</sup>

Simon Jacobi, Peter Kohl und Callum Michael Zgierski-Johnston

- [1] J. Christoph et al., *Nature* (2018), doi:10.1038/nature26001
- [2] R. Peyronnet, J. M. Nerbonne und P. Kohl, *Circ. Res.* **118**, 311 (2016)
- [3] J. Brado et al., *Heart Rhythm* **14**, 1388 (2017)

<sup>#)</sup> unterstützt durch den ERC Advanced Grant CardioNECT