

Elastisch dank einflussreicher Elektronen

In einem kritischen, stark korrelierten System sind Kraft und Auslenkung nirgends proportional.

1) Eigentlich müsste es *ceiinosstuv* heißen, aber Hooke unterscheidet hier offenbar, wie oft üblich im Lateinischen, nicht zwischen *u* und *v*.

2) Bei der Probe handelte es sich um das organische Ladungstransfer-salz κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl

Die Auslenkung x einer mechanischen Feder ist für eine kleine Zugkraft F proportional zur Kraft: $F = -kx$, wobei k die Federkonstante ist. Hooke publizierte dieses nach ihm benannte Gesetz 1676 in Form eines Anagramms: *ceiinosstuu* [1].¹⁾ Erst zwei Jahre später löste er auf: *ut tensio, sic vis*. Dies bedeutet soviel wie: Wie die Auslenkung, so die Kraft [2]. Damit wollte er wohl die Priorität dieser Einsicht sichern, ohne den eigentlichen Inhalt preiszugeben.

Das Hookesche Gesetz beschreibt kein fundamentales Prinzip der Physik, sondern lediglich den führenden Term einer Taylor-Entwicklung der Funktion $F(x)$. Abweichungen von der linearen Form sind allgegenwärtig und besonders für Federn aus weichen, plastischen oder gummiartigen Stoffen wichtig. Ist die angelegte Kraft jedoch ausreichend klein, so gilt auch in diesen Fällen das Hookesche Gesetz (Abb. 1).

Nun ist es einem Team aus Deutschland, Japan und den USA gelungen, ein Beispiel zu finden, in dem das Hookesche Gesetz zumindest in der Umgebung eines Punktes im Phasendiagramm niemals gilt [3]. Die Federspannung F realisierten die Wissenschaftler durch sorgfältiges Anlegen eines äußeren Drucks mit Helium als Druckmedium; die Auslenkung $x \sim \Delta L/L$ resultierte aus der relativen Längenänderung der Probe aus organischen Ladungstransfer-salzen

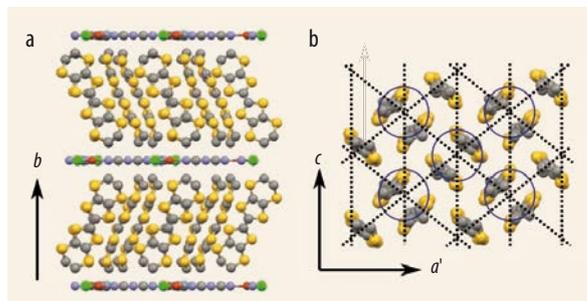


Abb. 2 Struktur des Ladungstransfer-salzes entlang der *b*-Achse (a). Die Wasserstoffatome fehlen hierbei. (b) zeigt die BEDT-TTF-Ebene, die Kreise stehen für ein Dimer aus zwei BEDT-TTF-Molekülen. Die Dimere sind auf einem Dreiecksgitter angeordnet mit den Sprungparametern t und t' (gestrichelte Linien).

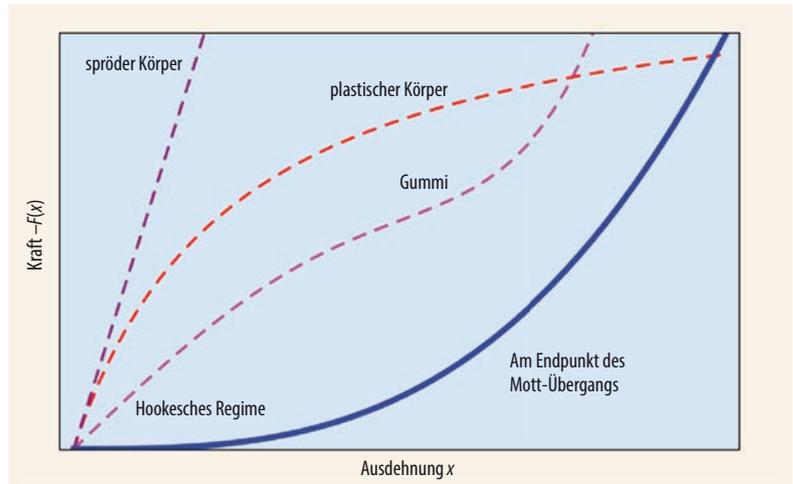


Abb. 1 Im Hookeschen Regime besteht für die gezeigten Körper zumindest für kleine Ausdehnungen ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Aus-

dehnung. Am kritischen Endpunkt des Mott-Übergangs ist das bei dem untersuchten Ladungstransfer-salz nicht der Fall.

(Abb. 2).²⁾ In diesen Materialien geben schichtartig gestapelte Moleküle Elektronen an Zwischenschichten ab, woraufhin sich ein quasi-zweidimensionales System von Löchern bildet [4]. Wegen der geringen Abschirmung wirkt zwischen den Löchern eine sehr starke Coulomb-Wechselwirkung. Ladungstransfer-salze besitzen elektronische Eigenschaften wie Supraleitung, Antiferromagnetismus und eine Spinfluktuationsphase, bei der Quantenfluktuationen die langreichweitige Ordnung von lokalen magnetischen Momenten unterbinden.

Es gibt zahlreiche Hinweise, dass diese exotischen elektronischen Eigenschaften eng mit dem Auftreten eines Metall-Isolator-Übergangs verbunden sind, wie ihn Nevill Francis Mott ursprünglich diskutiert hat [5]. Verändert man den äußeren Druck, so findet ein Übergang von einem isolierenden in einen metallischen Zustand statt. Starke Wechselwirkungen der Elektronen untereinander führen bei kleinen angelegten Drücken zu einer Lokalisierung. Unter Druck überlappen die Wellenfunktionen benachbarter organischer Moleküle immer mehr, was zu einer Delokalisierung führt. Die aktuelle Arbeit zielte darauf ab, den Einfluss der (De-)Lokalisierung auf die mecha-

nischen Eigenschaften des Festkörpers aufzuklären [3].

Der Mott-Übergang ist bei tiefen Temperaturen ein Phasenübergang erster Ordnung, ähnlich zum Übergang zwischen Flüssigkeit und Dampf. In beiden Fällen existiert bei höheren Temperaturen und Drücken ein kritischer Endpunkt (Abb. 3). Zwischen Dampf und Flüssigkeit bzw. Metall und Isolator lässt sich dann nicht mehr genau unterscheiden. Die Analogie zum Übergang vom Dampf zur Flüssigkeit endet hier allerdings.

Während des letzten Jahrzehnts gab es eine intensive Diskussion, wie der kritische Endpunkt eines Mott-Übergangs korrekt zu beschreiben sei. So legten Messungen des elektrischen Widerstands im gleichen System zunächst nahe, dass es sich um einen Übergang mit neuem, unverständlichem Skalverhalten handelt [6]. Bei der Untersuchung des elektrischen Widerstands muss man allerdings sorgfältig vorgehen. Dieser wird schnell durch Aspekte wie die Streuung an Domänengrenzen dominiert, die für thermodynamische Überlegungen nicht entscheidend sind [7].

Die detaillierte Untersuchung der thermodynamischen Ausdehnung bzw. der Längenänderung $\Delta L/L$ in [3] hat nun Klarheit geschaffen,

was die Universalitätsklasse dieses wichtigen Phasenübergangs angeht: Es handelt sich um einen Ising-Übergang, bei dem die Molekularfeldtheorie exakt ist. Diese beruht darauf, dass die elektronischen Freiheitsgrade an das kristalline Gitter koppeln und am Metall-Isolator-Übergang einen Volumensprung induzieren. Wegen des endlichen Schermoduls des Festkörpers führt diese Kopplung zu langreichweitigen elastischen Wechselwirkungen und Molekularfeldverhalten [8]. Da nun am kritischen Endpunkt das Volumenmodul verschwindet, folgt als exaktes Resultat, dass eine elastische Kraft mit der dritten Potenz der Auslenkung zusammenhängt: $F(x) \sim x^3$. Dieses Verhalten wurde nun auch beobachtet [3]. Es gibt also in einem kritischen, stark korrelierten System keinen Bereich, in dem Kraft und Auslenkung proportional sind. Dies ist ein sehr schönes Beispiel dafür, dass wir starke elektronische Wechselwirkungen in Festkörpern nicht losgelöst von ihren mechanischen Eigenschaften

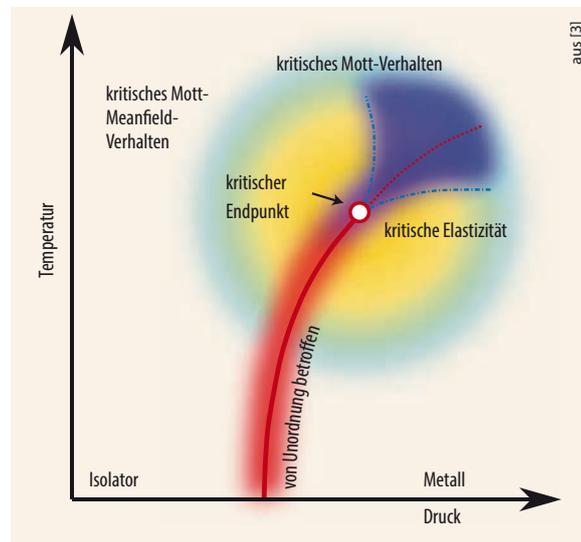


Abb. 3 Das Phasendiagramm des organischen Ladungstransfersalzes zeigt den Metall-Isolator-Übergang. Der Phasenübergang erster Ordnung ist rot markiert. Kritische Elastizität und nicht Hookesches Verhalten sind im gelben und violetten Bereich des Phasendiagramms zu beobachten.

betrachten können. Die Autoren von [3] hätten ihre Beobachtung also auch folgendermaßen publizieren können: ceiiinnnoosssttuv – ut tensio, sic non vis.

Jörg Schmalian

- [1] R. Hooke, A description of helioscopes and some other instruments, London (1676)
 [2] R. Hooke, Lectures De Potentia Restitutiva or of Spring, Explaining the Power

- of Springing Bodies, London (1678)
 [3] E. Gati et al., Sci. Adv. 2, e1601646 (2016)
 [4] M. Lang und J. Müller, in: K.-H. Bennemann und J. B. Ketterson (Hrsg.), The Physics of Superconductors Band II, Springer, Berlin, Heidelberg (2003)
 [5] N. F. Mott, Metal-Insulator Transition, Wiley-VCH, Weinheim (1990)
 [6] F. Kagawa, K. Miyagawa und K. Kanoda, Nature 436, 534 (2005)
 [7] S. Papanikolaou et al., Phys. Rev. Lett. 100, 026408 (2008)
 [8] T. Chou und D. R. Nelson, Phys. Rev. E 53, 2560 (1996)

Prof. Dr. Jörg Schmalian, Institut für Theorie der Kondensierten Materie und Institut für Festkörperphysik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe