

doch die Möglichkeit, einem Verständnis der immer noch letztlich ungeklärten Supraleitungsmechanismen in den Kupraten und den anderen oben genannten exotischen Supraleitern näher zu kommen.

Während die Bedeutung von Elektronenkorrelation und antiferromagnetischen Spinfuktuationen für die Löcher-Supraleitung in Kupraten nahezu allgemein anerkannt ist, herrscht für die neue Verbindung noch Unklarheit über den Charakter der supraleitenden Ladungsträger, den Wechselwirkungsmechanismus und die Rolle des Kristallwassers – verbunden mit der Frage nach möglicherweise in Zukunft noch höheren erreichbaren Sprungtemperaturen.

HELGE ROSNER, STEFAN-LUDWIG DRECHSLER, GÜNTER FUCHS UND KARL-HARTMUT MÜLLER

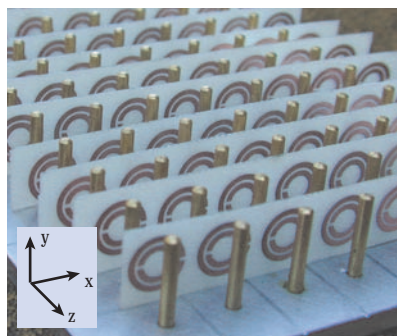
- [1] T. Takada et al., Nature **422**, 53 (2003)
- [2] H.-H. Wen et al. Chin. Phys. Lett. **20**, 725 (2003)
- [3] C. Delmas et al., Solid State Ionics **3/4**, 165 (1981)
- [4] T. Tanaka et al., Jpn. J. Appl Phys. **33**, L581 (1994)
- [5] D. J. Singh, Phys. Rev B **61**, 13397 (2000)
- [6] S. Yamanaka et al., Nature **392**, 580 (1998)
- [7] Y. Levi et al., Europhys. Lett. **51**, 564 (2000)

## Materialien für Linkshänder

So genannte „Left-Handed“ Metamaterialien (LHM), die im Gegensatz zu natürlich vorkommenden Werkstoffen gleichzeitig eine negative Permeabilität  $\mu$  und Permittivität  $\epsilon$  aufweisen, haben große Aufmerksamkeit in Physik und Ingenieurwissenschaften ausgelöst. Bereits 1968 hat Veselago in einer theoretischen Arbeit die Möglichkeit solcher negativen Materialparameter postuliert und einige überraschende Konsequenzen abgeleitet [1]: So bilden bei Wellenausbreitungsphänomenen die elektrischen und magnetischen Feldvektoren und  $\vec{E}$  mit dem Wellenvektor  $\vec{H}$  ein „Linke-Hand-System“ (daher auch „LHM“), und der Brechungsindex  $n$  (mit  $\vec{k}$  zunächst vorzeichenneutral zu definieren) im Snellschen Brechungsgesetz wechselt sein Vorzeichen. Dagegen lässt sich die zunächst unphysikalisch erscheinende negative Energiedichte auf

die fehlende Berücksichtigung der Dispersion in der vereinfachten Gleichung  $(\epsilon/2)|\vec{E}|^2 + (\mu/2)|\vec{H}|^2$  zurückführen.

Eine praktische Realisierung eines LHM wurde erst durch so genannte Metamaterialien ermöglicht. Darunter versteht man synthetische Medien, deren elektromagnetische Eigenschaften sich durch eine spezielle Feinstrukturierung gezielt einstellen lassen. Den Durchbruch erzielte der britische Physiker Pendry, der 1999 mit dem „Split Ring Resonator“ (SRR) eine Mikrostruktur mit negativer Permeabilität vorschlug [2]. Seine Idee griffen Shelby, Smith und Schultz (Universität San Diego) auf, die kurz darauf



**Abb. 1:** Auf die Arbeiten [2] und [3] zurückgehendes Metamaterial aus einer periodischen Anordnung von Split-Ring-Resonatoren (zur Synthese einer negativen Permeabilität  $\mu_z$ ), kombiniert mit metallischen Drähten (zur Synthese einer negativen Permittivität  $\epsilon_y$ ) bei Wellenausbreitung in  $x$ -Richtung. Der äußere Durchmesser der Ringresonatoren beträgt 6,6 mm, die Zellengröße des Arrays 8 mm. Der LHM-Effekt tritt bei einer Frequenz von ca. 3,6 GHz auf, dies entspricht einer Freiraumwellenlänge von 83 mm. (Foto: D. Smith, UCSD)

erstmalig ein LHM realisierten [3]. Seitdem beschäftigen sich eine Vielzahl von Arbeitsgruppen weltweit mit der Synthese und Analyse von LHM, nicht zuletzt ausgelöst durch ein millionenschweres Förderprogramm der US-amerikanischen DARPA-Behörde.<sup>1)</sup>

Zugleich wurden aber auch Zweifel laut, ob es sich bei linksgerichteten Wellen nicht lediglich um eine Fehlinterpretation von Messergebnissen handelt [4]. Neuere Arbeiten belegen aber experimentell und durch unterstützende Feldsimulationen, dass die von Veselago vorhergesagten Effekte nicht nur real sind, sondern auch in keiner Weise im Widerspruch zu physikalischen Gesetzmäßigkeiten stehen [5–7].

Metamaterialien sind periodische Materialien, deren „Einheitszelle“

wesentlich kleiner ist als die verwendeten Wellenlängen. Als Beispiel zeigt Abb. 1 ein Metamaterial aus einem in konventioneller planarer Technik aufgebauten Array von SRR, gekoppelt mit dünnen metallischen Drähten. Da die elektromagnetischen Wellen die Details der Feinstruktur „nicht sehen“ können ist eine makroskopische Betrachtung mit gemittelten Feldgrößen zulässig.

Bereits bei Einführung des SRR hat Pendry ein geeignetes Mittelungsverfahren zur Bestimmung der makroskopischen Materialparameter vorgeschlagen, das von der integralen Formulierung der Maxwell-Gleichungen ausgeht. Die elektrischen und magnetischen Feldstärken werden dabei entlang von Strecken gemittelt – etwa einer äußeren Kante eines Array-Elements –, die elektrischen und magnetischen Flussgrößen entlang von Flächen – auch hier zweckmäßigerweise entlang der Berandung eines Elements [2]. Durch den komponentenweise zu bildenden Quotienten zwischen diesen gemittelten Größen erhält man dann anisotrope Materialtensoren, die jeweils in einer Vorzugsrichtung (hier für die Feldgrößen  $E_y$  und  $H_z$ ) das gewünschte LHM-Verhalten zeigen. Die gemittelten Materialeigenschaften beschreiben dann ein äquivalentes homogenes Ersatzmaterial mit identischen makroskopischen Eigenschaften wie dem Reflexionsfaktor ebener Wellen oder dem erwähnten Brechungsgesetz.

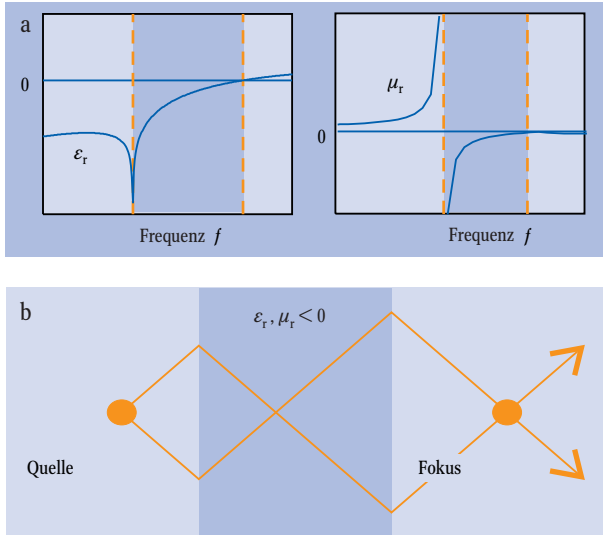
Im Gegensatz zur in der Elektrodynamik üblichen Mittelung molekularer Polarisierungseffekte lässt sich bei Metamaterialien auch das mikroskopische Modell – der Aufbau des LHM-Arrays aus SRR und Drähten – durch etablierte Techniken, z. B. kommerzielle Feldberechnungssoftware, leicht analysieren. Somit erlauben Simulationen eine komplementäre Analyse der LHM sowohl auf mikroskopischer als auch auf makroskopischer Ebene [5, 6].

Der Effekt negativer Materialparameter selbst lässt sich schließlich getrennt für die Permeabilität und die Permittivität auf bekannte physikalische Phänomene zurückführen. Dass eine periodische Anordnung von metallischen Drähten als Ersatzmodell für ein Plasma mit negativer Permittivität gesehen werden kann, ist bereits seit Längerem bekannt [8]. Die negative Per-

Dr. Helge Rosner, Max-Planck-Institut für Chemie und Physik fester Stoffe, Nöthnitzer Str. 40, 01187 Dresden; Dr. Stefan-Ludwig Drechsler, Dr. Günter Fuchs und Dr. Karl-Hartmut Müller, Leibniz-Institut für Festkörperforschung Dresden, Helmholtzstr. 20, 01069 Dresden

1) [www.darpa.mil/dso/thrust/matdev/metamat.htm](http://www.darpa.mil/dso/thrust/matdev/metamat.htm)

meabilität wird in einem schmalen Frequenzband durch die starke Resonanzüberhöhung in den beiden unterbrochenen Spulen im SRR erzeugt. Die Schwierigkeit bei der Synthese eines LHM besteht nun darin, diese beiden sich durch ihre Nahfelder gegenseitig beeinflussenden Effekte so zu kombinieren, dass für gewisse Frequenzen gleichzeitig  $\varepsilon$  und  $\mu$  negativ werden (Abb. 2a).



**Abb. 2:**  
 ►a) Typische Frequenzverläufe für die gemittelte Permittivität  $\varepsilon(f)$  in einem „Plasmamedium“ aus metallischen Drähten und die gemittelte Permeabilität  $\mu(f)$  in einem SRR-Medium (aus Feldsimulation), mit jeweils negativem Bereich.  
 ►b) Der negative Brechungsindex bei LHM geht mit einem negativen Brechungsindex einher, der im Prinzip eine „perfekte Linse“ mit neuartigen Abbildungseigenschaften ermöglicht.

Versteht man die Wirkungsweise von LHM also richtig als eine Möglichkeit, durch geschickte Modellbildung auf einer im Vergleich zur Wellenlänge kleinen Größenskala neue makroskopische Effekte zu erzielen, so ergeben sich eine ganze Reihe möglicher Anwendungen. Denkbar sind z. B. Mikrowellenbauelemente wie Filter, Phasenschieber und Resonatoren mit besonderen Eigenschaften, insbesondere mit sehr kleinen Abmessungen, oder dünne Materialschichten mit starken Filtereigenschaften etwa für die Radartechnik. Dagegen wird die Funktionsweise der bereits in [1] skizzierten perfekten Linse für Mikrowellen- oder optische Anwendungen (Abb. 2b) durch die stark dispersiven Eigenschaften realer LHM-Konzepte eingeschränkt. Auch wurden nach der Bestätigung des LHM-Effekts schnell Nachteile der gezeigten SRR-Struktur deutlich: Die starken Feldüberhöhungen im Resonator führen – neben einigen durchaus erwünschten Effekten

Dr.-Ing. Rolf Schuhmann und Prof. Dr.-Ing. Thomas Weiland, Fachgebiet Theorie Elektromagnetischer Felder, Technische Universität Darmstadt

[2] – einerseits zu großen dielektrischen Verlusten im Trägermaterial und andererseits zu einer starken Begrenzung der nutzbaren Bandbreite. Doch inzwischen gibt es bereits alternative Vorschläge für LHM, die z. B. eine vergrößerte nutzbare Bandbreite aufweisen.

ROLF SCHUHMAN UND  
 THOMAS WEILAND

[1] V. G. Veselago, Soviet Physics Uspekhi **10**, 509 (1968)  
 [2] J. B. Pendry et al., IEEE Trans. MTT **47**, 2075 (1999)  
 [3] R. A. Shelby, D. R. Smith und S. Schultz, Science **292**, 77 (2001)  
 [4] A. L. Pokrovsky und A. L. Efros, Phys. Rev. Lett. **89**, 093901 (2002)  
 [5] T. Weiland et al., J. Appl. Phys. **90**, 5419 (2001)  
 [6] C. G. Parazzoli et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 107401 (2003)  
 [7] A. A. Houck und J. B. Brock, I. L. Chuang, Phys. Rev. Lett. **90**, 137401 (2003)  
 [8] W. Rotman, IEEE Trans. APS **10**(1), 82 (1962)

## Sonnenneutrinos: zurück zur Astrophysik!

*Nachdem der teilchenphysikalische Aspekt in den letzten Jahren dominierte, konzentriert sich die Sonnenneutrino-Forschung nun wieder auf ihren ursprünglichen Gegenstand, die Sonnenphysik. Eine Analyse aller Sonnenneutrino-Daten erlaubt den Schluss, dass der Anteil des CNO-Zyklus an der Energieerzeugung in der Sonne kleiner als 7,3 % ist.*

Im vergangenen Jahr wurden die beiden letzten noch fehlenden Mosaiksteine zur Lösung des so genannten Sonnenneutrino-Problems gefunden. Im April erbrachte der SNO-Detektor im kanadischen Sudbury den Nachweis, dass die im Sonneninneren produzierten Elektron-Neutrinos ( $\nu_e$ ) am terrestrischen Detektor als eine Mischung aus Elektron-, Myon- und Tauon-Neutrinos ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) ankommen [1]. Damit ist endgültig klar, dass die gemessenen Sonnenneutrino-Defizite aller sechs bisher durchgeführten Experimente durch Neutrino-Oszillationen verursacht werden und nicht etwa durch unserer unzureichendes Verständnis der Neutrinoproduktion im Sonneninneren. Im Dezember schließlich zeigten die ersten Resultate des KamLAND-Detektors in der japanischen Kamioka-Mine, dass Anti-

Neutrinos, die in japanischen und koreanischen Kernreaktoren einige hundert Kilometer vom Detektor entfernt produziert werden, ebenfalls oszillieren [2]. Dadurch wurden die zuvor noch möglichen Oszillations-Szenarien für Sonnenneutrinos auf einen kleinen Parameter-Bereich (die so genannte Large-Mixing-Angle- oder LMA-Lösung) eingeschränkt [2].

Als jedoch Raymond Davis Jr. vor über vierzig Jahren seine Pionierarbeiten zum Nachweis von Sonnenneutrinos mit Hilfe eines radiochemischen Chlor-Detektors begann, für die er im letzten Jahr mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurde [3], war seine Motivation ausschließlich astrophysikalischer Natur. Davis wollte die Theorie der Energieerzeugung in der Sonne experimentell überprüfen, die Hans Bethe schon 1939 in seiner grundlegenden Arbeit zur Wasserstoff-Fusion in der Sonne aufgestellt hatte. Danach sind im Prinzip zwei verschiedenen Reaktionszyklen möglich.

Der Proton-Proton-Zyklus (pp-Zyklus) beginnt mit der Verschmelzung von zwei Protonen zu einem Deuterium-Kern, während der Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus (CNO-Zyklus) durch die Anlagerung eines Protons an einen schon in der Sonnenmaterie vorhandenen  $^{12}\text{C}$ -Kern ausgelöst wird. Einige der Reaktionen in den beiden Zyklen sind  $\beta$ -Zerfälle, die dabei erzeugten Elektron-Neutrinos ( $\nu_e$ ) machen den solaren Neutrino-Fluss aus. In der Summe ist das Ergebnis in beiden Reaktions-Zyklen das gleiche: Vier Protonen werden in ein  $\alpha$ -Teilchen, zwei Positronen und zwei Elektron-Neutrinos umgewandelt.

In seiner Original-Arbeit kam Bethe noch zu dem Schluss, dass der CNO-Zyklus die Energieerzeugung in der Sonne dominiert. Heute geht man jedoch davon aus, dass dies nur bei Hauptreihensternen der Fall ist, die wesentlich massereicher als die Sonne sind. Der Grund hierfür liegt in der höheren Coulomb-Barriere für die Reaktionen des CNO-Zyklus; diese benötigen deshalb höhere Temperaturen im Sternzentrum. In der Sonne sollte dagegen nach dem Standard-Sonnen-Modell (SSM) nur etwa 1,5 % der Leuchtkraft durch den CNO-Zyklus erzeugt werden [4]. Die Abbildung zeigt das Energiespektrum der Sonnenneutrinos, wie es sich aus dem SSM ergibt. Die