

Hochtemperatursupraleitung – quo vadis?

Michael R. Koblichka und Uwe Hartmann
Experimentalphysik

Vielfältige Anwendungen

Die Anwendungen der Supraleitung sind mittlerweile sehr vielfältig, da mit der Entwicklung der Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) neue, wesentliche Möglichkeiten hinzugekommen sind. Die „klassischen“ Einsatzbereiche für Supraleiter sind Kabel und Spulen – hierzu werden draht- oder bandförmige Supraleiter benötigt – und zum anderen die Sensorik und Elektronik, die hauptsächlich mit dünnen, supraleitenden Filmen arbeiten. Beispiele für die Herstellung von HTSL-Bandleitern im Silbermantel haben wir in Magazin Forschung 2/2001 besprochen [1]. Ein großer Teil der Arbeiten an HTSL der letzten 20 Jahre ist deswegen in die Weiterentwicklung der eigentlichen Herstellungstechniken geflossen; als Beispiele sind hier die Laser-Ablationstechnik zur Herstellung von Dünnschichten

Die wohl spektakulärsten Phänomene, die mit dem Begriff Supraleitung verbunden sind, bestehen im kompletten Verschwinden des elektrischen Widerstands des supraleitenden Materials und in einer repulsiven Kraft, die das Material auf Permanentmagnete ausübt. In den fast hundert Jahren seit der Entdeckung haben diese besonderen Eigenschaften der Supraleiter, die kein anderes Material aufweist, zu einer Reihe von wichtigen Anwendungen und noch mehr Vorschlägen für mögliche Anwendungen geführt. Allerdings gibt es dabei nicht unbeträchtliche Einschränkungen, die damit zusammenhängen, dass geeignete Materialien erst dann supraleitend werden, wenn sie sich bei hinreichend niedrigen Temperaturen befinden, die mehr oder weniger aufwändige Kühlprozesse voraussetzen. 1986 wurden dann die ersten Hochtemperatursupraleiter gefunden, die keine so niedrigen Temperaturen mehr erfordern, aber dennoch eine Kühlung weit unter die Raumtemperatur. Nunmehr, über 20 Jahren nach ihrer Entdeckung, ist die anfängliche Anwendungseuphorie einer gewissen Ernüchterung gewichen, da die Hochtemperatursupraleitung immer noch nicht vollständig verstanden ist. Ihr Verständnis stellt vielmehr eines der größten und dringlichsten Probleme der heutigen Festkörperphysik dar. Dieser Aufsatz gibt einen Überblick über unser heutiges Wissen über die Hochtemperatursupraleitung, über ihre heutige und für die Zukunft denkbare Anwendung und über „exotische“ Materialsysteme, die ebenfalls Supraleitung zeigen. Abschließend wird die Frage diskutiert, ob Supraleiter, die keinerlei Kühlung benötigen und vielleicht sogar bei erhöhten Temperaturen das Phänomen aufweisen, denkbar sind.

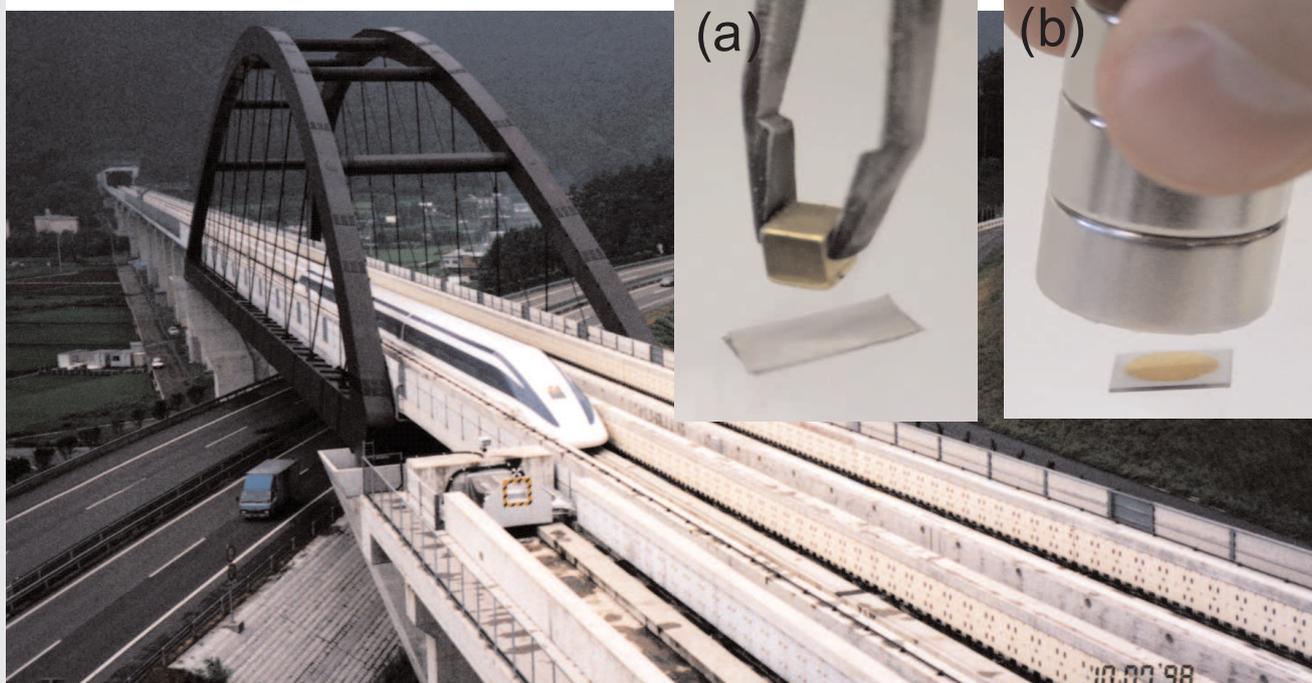


Abb. 1: Ein Schwebenzug auf der Testlinie im japanischen Yamanashi. Dieser Zug verfügt über supraleitende Spulen und LHe-Kühlung an Bord des Zuges. Neuere Testmodelle verwenden bereits HTSL-Magnete. Die beiden Einsätze (a) und (b) zeigen supraleitende Proben, die stabil unter einem Magneten schweben; in (a) ist das ein Stück eines YBCO coated conductors, in (b) ein mit einem Goldfilm beschichteter HTSL-Dünnschicht (200 nm dick), der selbst sein schweres Substrat noch tragen kann.

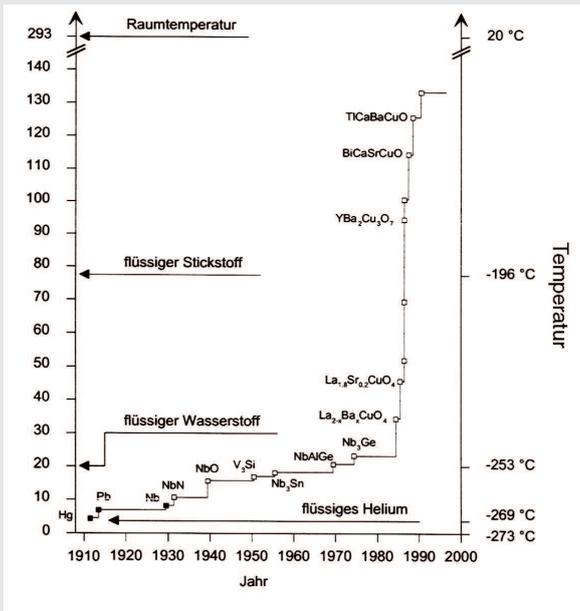


Abb. 2: Graphische Darstellung der Geschichte der Supraleitung und der HTSL. Die Temperaturen der verschiedenen Kühlmittel sind ebenfalls markiert.

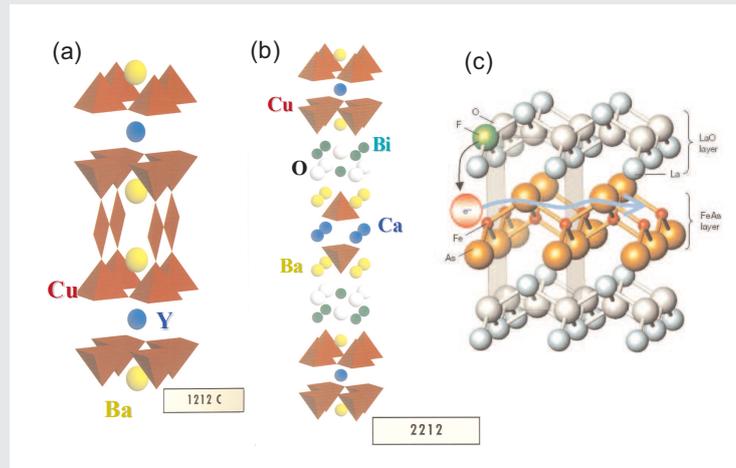


Abb. 3: Die Kristallstrukturen von HTSL. (a) ist das am häufigsten verwendete YBCO, (b) der Schichtsupraleiter Bi-2212 mit zwei Cu-O-Ebenen und (c) das erste Oxyprnicide LaOFeAs.

und die Entwicklung der sogenannten „coated conductors“ zu nennen. Die Laser-Abblationstechnik wirkt heute auch befruchtend auf andere Gebiete der Physik. So können heute Multischichten aus Multiferroika gezielt „design“ werden. Die HTSL haben es darüber hinaus durch die vereinfachte Kühltechnik (flüssiger Stickstoff, LN₂ oder Cryocooler) ermöglicht, dass an Anwendungen der magnetischen Levitation gearbeitet werden kann. Hierzu sind nun nicht mehr nur Spulen verfügbar, sondern auch sogenannte Bulkproben. Diese Bulkproben entstehen nach einer

gezielten Temperaturbehandlung in kontrollierter Atmosphäre und mit Hilfe eines Saatkristalls (dem sogenannten OCMG-Verfahren) aus einem gepressten Rohling. Solche Bulkproben können heute Durchmesser von bis zu 20 cm haben und mit einer Imprägnierung versehen werden [2]. In den Proben kann, wenn sie auf Stickstofftemperatur abgekühlt werden und ein starkes Magnetfeld angelegt wird, das Feld quasi eingefroren werden. Die derzeitigen Rekorde für solche supraleitenden Permanentmagnete liegen bei ca. 10 – 12 T bei 77 K, und bei etwa 20 T

bei 40 K. Magnete dieser Stärke können nur mittels der HTSL realisiert werden. Mit solchen Supraleiter-Proben lassen sich z.B. supraleitende Magnetlager bauen, oder man kann diese Magnete in einer Magnetschwebbahn verwenden (Abb. 1).

Entdeckung und Entwicklung der Materialfamilien

Die Geschichte der HTSL (Abb. 2) beginnt mit der Mischung La-Ba-Cu-O, die von Bednorz und Müller 1986 bei IBM Rüschlikon (Zürich) hergestellt worden ist [3]. Diese erste HTSL-Mischung hatte eine Sprungtemperatur T_c von 35 K, zeigte aber bereits deutlich den Weg auf, den man beschreiten musste, um zu noch höheren Sprungtemperaturen zu gelangen. Ein innerer Druck durch chemische Substitution brachte die Sprungtemperatur T_c im System La_xSr_{1-x}CuO₄ auf etwa 45 K und dann wurde das System YBa₂Cu₃O_x (Abb. 3a, abgekürzt YBCO oder Y-123) mit einem T_c von 91 K entdeckt, was zum ersten Mal ein T_c oberhalb der Stickstofftemperatur von 77 K ermöglichte. Weitere Entwicklungen sind die Familie Bi-Sr-Ca-Cu-O (Abb. 3b) mit drei Mitgliedern (Bi-2201, Bi-2212 und Bi-2223), und die Tl- und Hg-basierten Hochtemperatur-Supraleiter-Systeme. Leider haben alle diese Supraleiter zwar ein höheres T_c , allerdings durch ihre immer komplexere Kristallstrukturen auch eine höhere Anisotropie und sind deshalb für die Anwendungen nicht wirklich interessant. Die „Arbeitspferde“ für HTSL-Anwendungen sind deshalb



Uwe HARTMANN, geb. in Köln, studierte Physik an der Universität Münster. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter war er am dortigen Institut für Angewandte Physik tätig und promovierte mit einer Arbeit über grundlegende physikalische Phänomene in ferromagnetischen Materialien. Als Hochschulassistent am Institut für Angewandte Physik der Universität Gießen begann er 1987, sich mit Aspekten der Nanostrukturphysik und insbesondere mit den neuen Verfahren der Rastersondenmikroskopie zu befassen.

1989 nahm Prof. Hartmann eine Fiebigler-Stelle am Institut für Schicht- und Ionentechnik des Forschungszentrums Jülich an. Die Habilitation erfolgte 1992 an der Universität Gießen. Zwischenzeitlich verbrachte er verschiedene Forschungsaufenthalte in der Schweiz und in den Vereinigten Staaten.

Seit 1993 ist er als Leiter einer Arbeitsgruppe in der Fachrichtung Experimentalphysik der Universität des Saarlandes tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte sind die Rastersonden- und Nanostrukturphysik als Grundlage zur Entwicklung ultrakleiner funktionaler Bauelemente. In den vergangenen Jahren erhielt Prof. Hartmann mehrere Rufe an bundesdeutsche Universitäten und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen. Er ist ständiger Berater verschiedener industrieller Unternehmen im Bereich der Informationstechnologie und Sensorik. 1998 wurde er für seine messtechnischen Entwicklungen im Bereich Nanotechnologie mit dem renommierten Philip-Morris-Forschungspreis ausgezeichnet.

immer noch das YBCO (dünne Filme, Bulk-Proben und die sog. „coated conductors“) und das Bi-2223 für die silberummantelten Bandleiter. Im Falle des YBCO gibt es noch weitere Variationen, bei denen das Y-Atom durch andere, leichte Seltenerd-Atome ausgetauscht werden kann. Zum Beispiel hat das $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ eine noch höhere Sprungtemperatur, aber auch ein anderes Wachstumsverhalten und bietet höhere kritische Stromdichten im Bereich der Stickstofftemperatur, so dass diese Systeme für die coated conductors und für Bulkproben die beste Wahl sind. Das derzeitige HTSL-Material mit den höchsten Stromdichten ist eine ternäre Mischung $(\text{Nd, Eu, Gd})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ [4]. Dieses Material zeigt im Nanometerbereich das Vorhandensein von selbstorganisierten Nanostreifenstrukturen, die zu der hohen Stromtragfähigkeit in hohen Feldern und bei hohen Temperaturen beitragen. Diese Nanostreifenstrukturen und ihre Bedeutung für das Flusspinning (und damit für hohe kritische Stromdichten) werden in den Abbildungen. 4 – 6 vorgestellt, und sind auch in der Literatur ausführlich beschrieben [5,6].

Zusätzlich zu den typischen HTSL-Systemen, die durch das Vorhandensein von Cu-O-Ebenen gekennzeichnet sind, gibt es seit 2008 eine neue HTSL-Familie die Fe-O-Ebenen aufweist: die Oxypnicide vom Typ $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ (Abb. 3c) [7]. Noch liegt die Sprungtemperatur im Bereich von 37 K – so wie bei den ersten HTSL. Es gibt aber Hinweise darauf, dass auch hier T_c in der Größe von ~100 K erwartet werden kann.

Interessante Eigenschaften

(Fast) alle bis jetzt bekannten Hochtemperatur-Supraleiter sind oxidische Keramiken. Damit ist der größte Unterschied zu den herkömmlichen Supraleitern, die ja alle Metalle oder Metall-Legierungen sind, bereits genannt. Keramiken benötigen eine relativ hohe Herstellungstemperatur; der Sauerstoffgehalt spielt eine wichtige Rolle bei der Herstellung, und typische metallurgische Verarbeitungsprozesse, wie Ziehen oder Rollen, sind nicht gut geeignet. Trotzdem werden auch heute noch Bandleiter aus Bi-2223 mit dieser Technik hergestellt. Ein weiterer wichtiger Unterschied betrifft die physikalischen Eigenschaften: Die beiden Parameter λ (London'sche Eindringtiefe) und ξ (Kohärenzlänge) haben völlig andere Dimensionen als bei den herkömmlichen Supraleitern, obwohl auch da Ausnahmen existieren. λ ist wesentlich größer, aber ξ ist deutlich kleiner. Dies

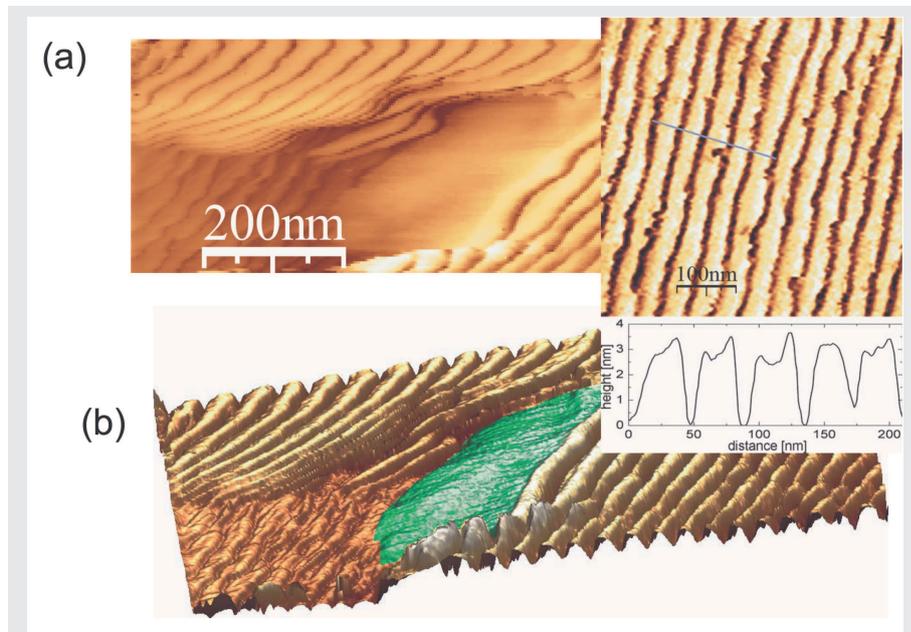


Abb. 4: Nano-Streifenstrukturen in Leicht-Seltenerd-HTSL. Der Einsatz zeigt eine solche ungestörte Struktur zusammen mit einem Höhenprofil; die große Abbildung zeigt oben eine AFM-Messung und darunter eine dreidimensional Darstellung der Nanostreifen an einem eingebetteten, nicht-supraleitendem Y_2BaCuO_5 -Partikel.

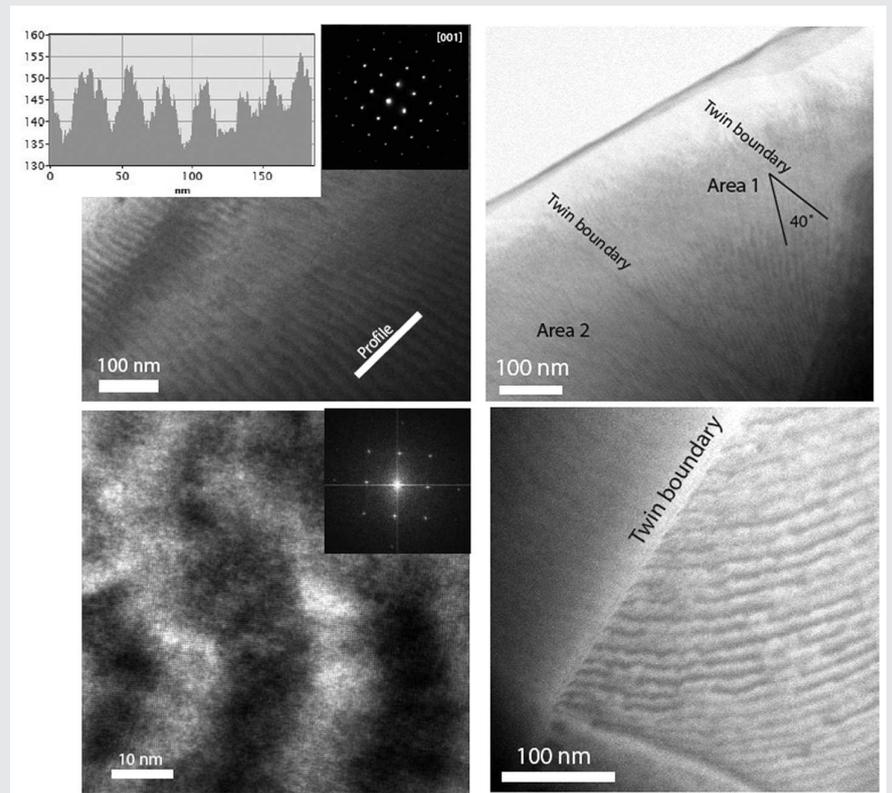


Abb. 5: Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchung der Nanostreifen, die in Antwerpen durchgeführt wurde. Man sieht die Nanostreifen und ihr Verhalten bezüglich von Zwillingsgrenzen (twin boundaries).

hat zur Folge, dass Defekte im Kristallgitter wie z.B. Versetzungen, die durch den Herstellungsprozess (Drahtziehen) erzeugt werden, einen anderen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften der HTSL haben. Im Falle von Bandleitern/Kabeln aus Nb_3Sn sind solche Versetzungen geradezu ideal, um hohe Haft-

kräfte zu erhalten. Im Falle der HTSL haben die Versetzungen leider einen negativen Einfluss auf die Stromtragfähigkeit und sind deshalb tunlichst zu vermeiden. Als Konsequenz daraus wird heute zunächst ein Precursor-Material (noch nicht die endgültige Materialzusammensetzung) hergestellt, dann wer-

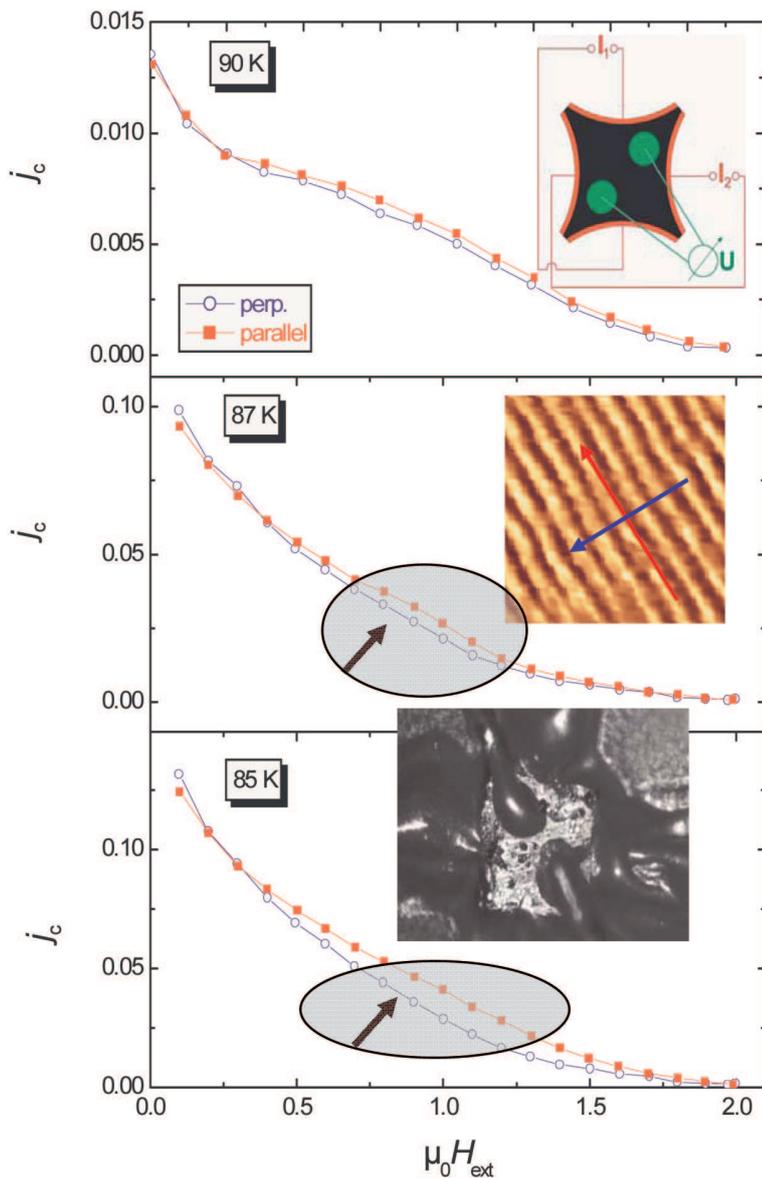


Abb. 6: Messungen der kritischen Stromdichte bei drei verschiedenen Temperaturen (90 K, 87 K, 85 K) parallel und senkrecht zu den Nanostreifenstrukturen. Die Einsätze zeigen das elektrische Schaltbild, Details der Streifenstruktur (AFM) und die tatsächliche Probe. Die Probe wurde zunächst mit dem Kraftmikroskop (AFM) vermessen, dann die Kontakte mittels Elektronenstrahlolithographie definiert und schlussendlich bei tiefer Temperatur gemessen.



Michael R. KOBLSCHKA, geb. 1963, studierte Physik an der Universität Stuttgart. Er promovierte 1992 am Max-Planck Institut für Metallforschung, Stuttgart, mit einer Arbeit zur magneto-optischen Abbildung von Flusstrukturen an Hochtemperatur-Supraleitern. Nach Forschungsaufenthalten an der Freien Universität Amsterdam (Niederlande), der Universität Genf (Schweiz), der Universität in Oslo (Norwegen) und am Superconductivity Research Laboratory, Tokyo (Japan) wechselte er 1999 in die Industrie zu Nordic Superconductor Technologies (NST) in Dänemark. Seit 2001 ist er am Fachbereich Experimentalphysik der Universität des Saarlandes.

Sein Arbeitsgebiet sind die magnetischen Eigenschaften von Supraleitern und ferromagnetischen Materialien. Als experimentelle Verfahren in Saarbrücken sind Raster-Sondentechniken (STM, AFM, MFM und Hochfrequenz-MFM) zu nennen. Die derzeitigen Arbeiten konzentrieren sich auf Fragestellungen zur Natur der Haftzentren in Hochtemperatur-Supraleitern, Nanomagnetismus und zur Entwicklung der Hochfrequenz-Magneto-Kraftmikroskopie an z.B. Festplatten-Schreibköpfen.

den die metallurgischen Verformungen vorgenommen und erst zum Schluss das fertige Produkt wärmebehandelt und so der Supraleiter geformt. Die Textur, die ebenfalls für eine hohe Stromtragfähigkeit wichtig ist, wird dabei vom Precursor-Material übernommen und mittels der Wärmebehandlung entstandene Defekte ausgeht.

Da diese Herstellungstechnik für Bandleiter aus keramischen Hochtemperatur-Supraleitern alles andere als ideal ist, wurde in den letzten Jahren die Herstellung der „coated conductors“ [8] immer mehr perfektioniert, so dass auch mit diesem Verfahren jetzt größere Längen möglich sind. Hierbei wird eine Schicht aus YBCO mittels Laserablation oder eines CVD-Verfahrens unter Zuhilfenahme von Zwischenschichten auf ein (billiges) metallisches Substrat aufgebracht. Der Vorteil ist, dass man die positiven Eigenschaften von YBCO auch für Bandleiter nutzbar machen, und gleichzeitig auch auf das teure Silber verzichten kann. Allerdings ist hier immer noch der größte Forschungsbedarf vorhanden, um zu einem wirklich kostengünstigen Herstellungsverfahren zu gelangen. Die geringe Größe der Kohärenzlänge ξ führt dazu, dass wichtige magnetische Eigenschaften der HTSL sich im Maßstab von 5 – 10 nm abspielen. Aus diesem Grunde ist es wichtig, die HTSL auf dieser Größenskala zu charakterisieren, was nur mit Methoden aus dem Bereich der Nanotechnologie möglich ist und daher auch erst in den letzten Jahren angewendet werden konnte. Hier liegt eine der wesentlichen Forschungsaktivitäten unseres Lehrstuhls.

Exotische Supraleitervarianten

Der Begriff „exotisch“ ist natürlich wissenschaftlich wenig spezifisch und hängt sehr vom Standpunkt ab. Er soll hier nur dazu dienen, bestimmte Materialklassen, in denen überraschenderweise Supraleitung nachgewiesen wurde, von den besprochenen, relativ einfachen metallischen Systemen und von den Kupraten zu unterscheiden. Auch bei den metallischen Systemen gibt es durchaus exotischere Varianten, wie die Schwere-Fermionen-Systeme.

Vor nicht einmal hundert Jahren, im Jahre 1911, wurde die Supraleitung im Metall Quecksilber entdeckt. In den folgenden Jahrzehnten wurden dann weitere supraleitende

Metalle, Legierungen und intermetallische Verbindungen gefunden. Die maximalen Sprungtemperaturen lagen aber jeweils unterhalb von 25 K. Einen wesentlichen Anstoß zur Identifikation von ganz anderen Materialsystemen gab im Jahre 1964 eine Arbeit von W.A. Little, in der ein neuartiger Kopplungsmechanismus zwischen Elektronen postuliert wurde [9]. Während in den bis dahin bekannten metallischen Systemen der Paarungsmechanismus von jeweils zwei Elektronen zu „Cooper-Paaren“ in einer Wechselwirkung der Elektronen mit Phononen besteht, nahm Little einen Paarungsmechanismus ohne Beteiligung von Phononen an, der in organischen Polymeren möglich sein sollte. Etwa fünfzehn Jahre nach diesem Vorschlag wurde zum ersten Mal Supraleitung in einem organischen Metall beobachtet [10]. Mittlerweile sind Dutzende organischer Supraleiter synthetisiert worden, die quasi-eindimensionale oder quasi-zweidimensionale elektronische Strukturen aufweisen. Teilweise zeigen sie Supraleitung nur unter erhöhtem Druck. Typische organische Metalle und Supraleiter sind Ladungstransfer Salze, basierend auf z. B. den organischen Donatoren TMTSF (Tetramethyltetraselenafulvalen) und BEDT-TTF (auch ET, Bisethyldithiolo-Tetrathiofulvalen). Die typische Molekülstruktur dieser Donatoren ist in Abb. 7a dargestellt. Hochwertige Einkristalle organischer Metalle werden üblicherweise aus der Lösung gewonnen. Die höchste bislang erreichte Sprungtemperatur beträgt 11,5 K.

1986 wurden dann die Kuprate gefunden mit einem bislang maximalen T_C -Wert von 138 K. Wenige Jahre später, 1991, fand man erstaunlicherweise Supraleitung in mit Alkalium dotierten Fullerenkristallen [11]. Kondensierte Fullerene (Abb. 7b) sind neben den lange bekannten Modifikationen Graphit und Diamant eine neue Modifikation des festen Kohlenstoffs. Von besonderem Interesse ist C_{60} . Das Molekül hat eine außergewöhnlich hohe Symmetrie und kann durch 120 Operationen auf sich selbst abgebildet werden. Jedes Atom hat genau dieselbe Umgebung. Das Molekül wurde 1985 entdeckt. Danach wurden Methoden entwickelt um größere Mengen zu produzieren, wodurch entsprechende Experimente erst möglich wurden. Die Sprungtemperatur der alkalidotierten Fullerenkristalle vom Typ Cs_3C_{60} kann 40 K betragen. Sie wird damit nur von den Kupraten übertroffen. Vor relativ kurzer Zeit wurde Supraleitung auch in Systemen aus höher indizierten Fullerenen und sogar Kohlenstoff-Nanoröhrchen nachgewiesen [12].

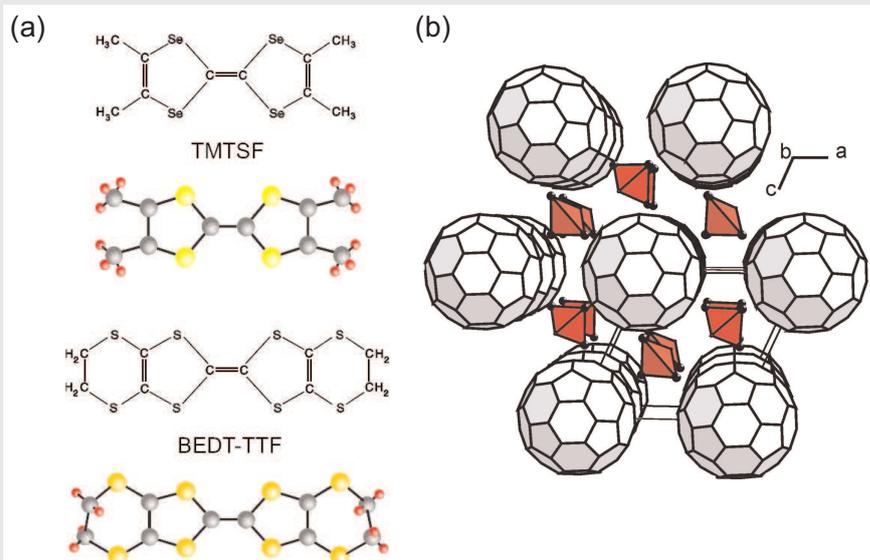


Abb. 7: (a) Molekülstruktur zweier typischer organischer Elektronen-Donatoren. (b) Struktur alkalidotierter Fullerenkristalle des Moleküls C_{60} .

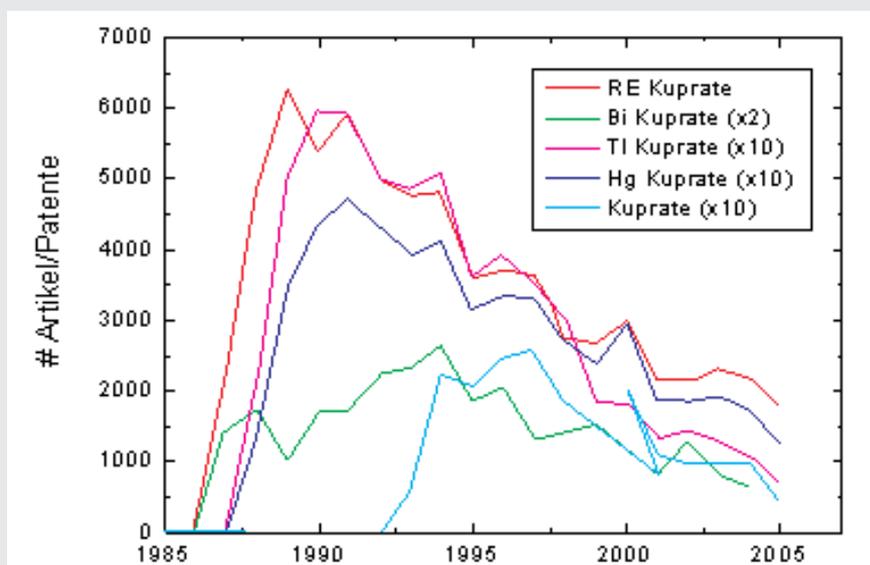


Abb. 8: Anzahl der Publikationen und Patente als Funktion der Zeit. Aus [14].

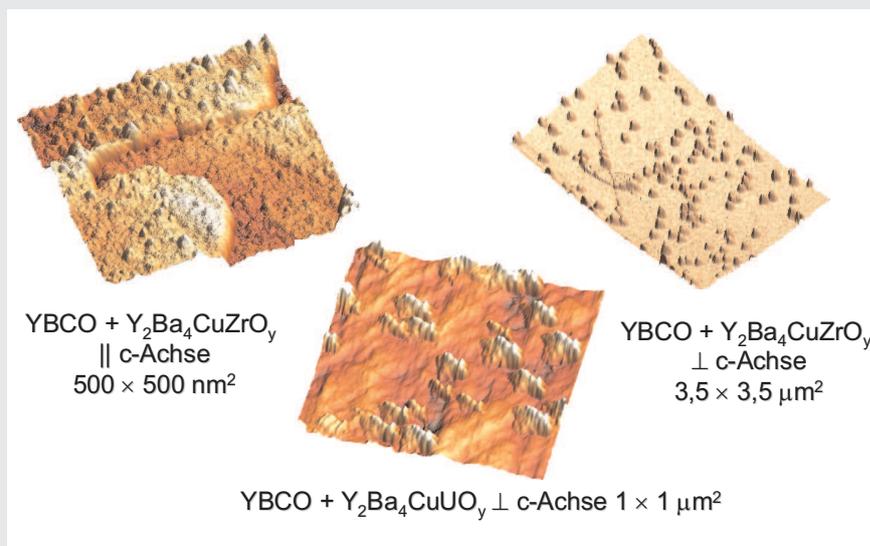


Abb. 9: Nanopartikel eingebettet in der supraleitenden YBCO-Matrix. Diese Aufnahmen wurden mit Hilfe eines Raster-Kraftmikroskops gemacht.

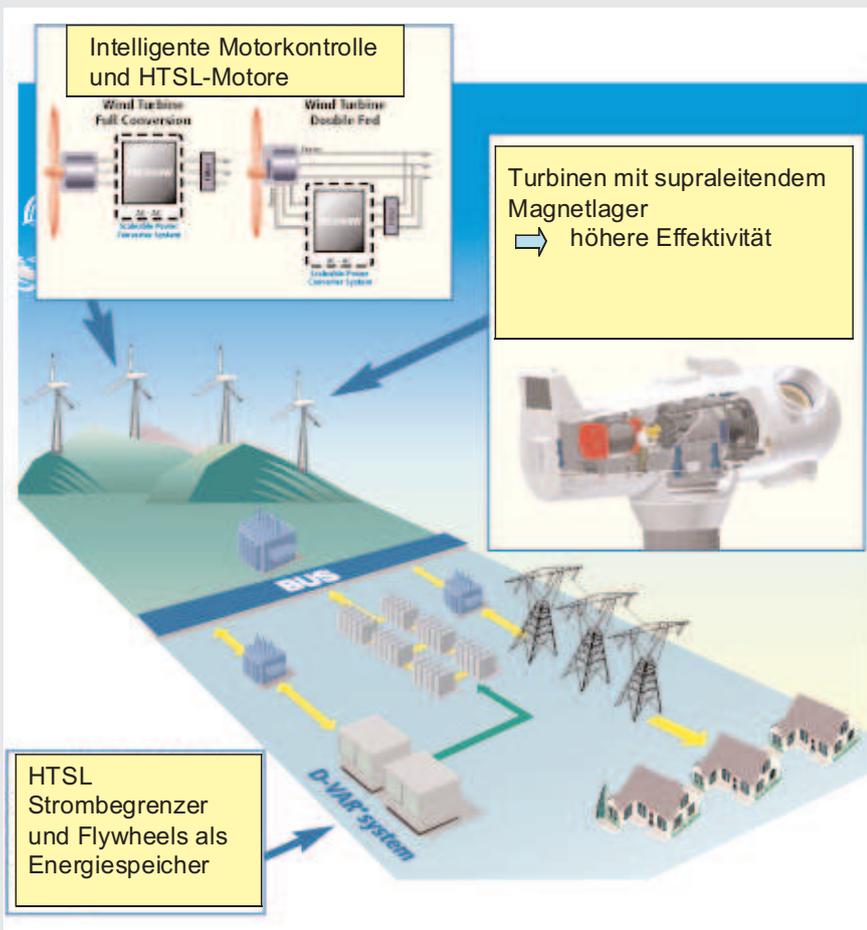


Abb. 10: Ein moderner Windpark mit supraleitenden Bauelementen: Magnetlager, Strombegrenzer und Schwungrad-Speicher.

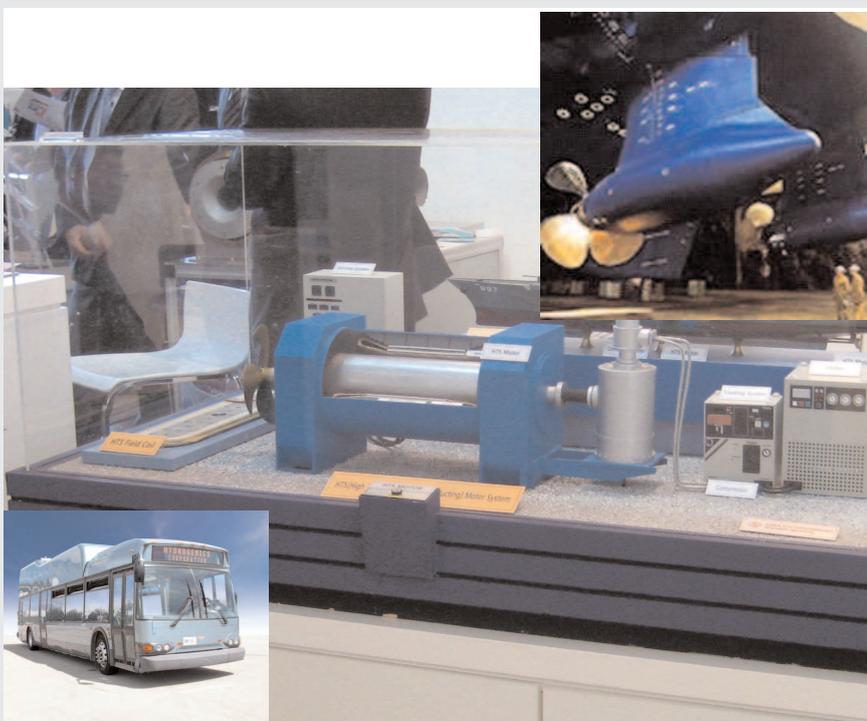


Abb. 11: Anwendungen von HTSL-Motoren als Schiffsmotor aufgrund des geringen Platzbedarfes und Gewichtes. Der obere Einsatz zeigt den Einbau eines solchen Motors in einer drehbaren „Gondel“ unter dem Schiff. Der untere Einsatz zeigt einen Hybridbus in Kanada, der über einen supraleitenden Motor verfügt.

Borokarbide, bei denen die Supraleitung 1993 entdeckt wurde und Ruthenate, bei denen man 1994 auf die Koexistenz supraleitender und bestimmter magnetischer Eigenschaften stieß, sind ebenfalls zu den „exotischen“ Supraleitern zu zählen. Dies gilt genauso für das Magnesiumborid MgB_2 . Im Jahre 2001 wurde hier Supraleitung mit einer erstaunlich hohen Sprungtemperatur von 39 K nachgewiesen [13]. Das Interessante an diesem Material ist, dass die Ausgangssubstanzen kostengünstig verfügbar sind und damit gute Voraussetzungen für eine technische Anwendung gegeben wären.

Offene Fragen und Forschungsschwerpunkte

Abbildung 8 zeigt die Zitierungen im HTSL-Bereich als Funktion der Zeit [14]. Deutlich ist der enorme Anstieg in den Jahren 1987/1988 zu erkennen. Um das Jahr 2003 hat sich die Anzahl der Veröffentlichungen wieder auf einem „normalen“ Niveau eingependelt, das auch heute noch gültig ist. Interessant ist auch, dass das Interesse an anderen Kuprat-Supraleitern stärker abgenommen hat als das an YBCO. Dies ist auf die Entwicklung der neuen Herstellungstechniken (coated conductors) zurückzuführen.

23 Jahre nach der Entdeckung der HTSL hat die Zahl der Publikationen im HTSL-Bereich zwar deutlich abgenommen, allerdings befassen sich die meisten derzeitigen Publikationen auch mit deutlich fortgeschrittenen Themen, wie dem Flussspinning mittels eingelagerter Nanopartikel [15,16] (Abb. 9), der gezielten Erzeugung von Defekten in dünnen Filmen durch vorstrukturierte Substrate, etc. Hieraus kann man erkennen, dass die HTSL heute bereits einen hohen technischen Anwendungsstand erreicht haben, auch wenn es noch immer nötig ist, die Materialeigenschaften besser, d.h. auf Nanometerskala zu verstehen. Hier tragen auch Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Nanotechnologie (Selbstorganisation, Raster-Sonden-Techniken) viel zur Weiterentwicklung der Materialien bei. Nicht zu vergessen ist aber auch eine bemerkenswerte Weiterentwicklung der Kühltechniken [17], die durch die HTSL angestoßen wurde: So ist es heute möglich, selbst Temperaturen im Millikelvinbereich ohne Einfüllen von Kühlmitteln zu erreichen. Dadurch ist eine weitgehende Unabhängigkeit von flüssigem Helium selbst in Forschungslaboratorien erreicht worden, was wesentlich zu einer weiteren Verbreitung von HTSL-Anwendungen führen wird.

Supraleitung entsteht, weil die Elektronen trotz ihrer Coulomb-Abstoßung eine effektive anziehende Wechselwirkung besitzen. Bei den konventionellen metallischen Systemen wird diese Wechselwirkung durch eine Kopplung über Phononen hervorgerufen. Leitungselektronen schließen sich zu Elektronenpaaren mit verschwindendem Gesamtimpuls und Gesamtspin zusammen. Daraus resultierende Phänomene werden durch die Theorie von Bardeen, Cooper, und Schrieffer (BCS) beschrieben [18]. Diese Theorie macht keine Aussage über die Ursachen der attraktiven Wechselwirkungen zwischen den Elektronen, sondern nimmt vielmehr a priori eine schwache Kopplung an. Vorausgesetzt wird allerdings ein s-Wellenzustand, entsprechend einem Orbitaldrehmoment des Cooper-Paares von 0. „Unkonventionelle“ Supraleitung liegt nun vor, wenn die attraktive Wechselwirkung zwischen Elektronen nicht durch Elektron-Phonon-Wechselwirkung zustande kommt und/oder die Paarwellenfunktion nicht die hohe Symmetrie eines s-Wellenzustands, sondern eine niedrigere Symmetrie hat. Dies ist beispielsweise der Fall für p- und d-Wellenzustände. Viele Experimente haben gezeigt, dass Schwere-Fermionen-Systeme, Kuprate, organische Supraleiter und auch die anderen exotischen Varianten unkonventionelle Supraleitung zeigen oder zumindest strittig ist, ob es sich um konventionelle Supraleitung handelt. So zeigen beispielsweise die Hochtemperatursupraleiter eine d-Wellensymmetrie und die Cooper-Paarbildung könnte auf eine Wechselwirkung von Elektronenspins zurückzuführen sein. Hier hat sowohl die theoretische als auch experimentelle Forschung zur Klärung grundlegender Fragen noch erhebliche Arbeiten zu leisten. Setzte man zwischen Entdeckung und zufriedenstellender Beschreibung der Hochtemperatursupraleitung einen Zeitraum an, der demjenigen zwischen Entdeckung und Beschreibung der konventionellen Supraleitung entspräche, so wäre mit einer Lösung des Rätsels im Jahre 2032 zu rechnen.

Quo vadis?

Die energietechnischen Anwendungen der HTSL beschränken sich nicht nur auf Kabel und damit den verlustlosen Energietransport [19]. Mittels der HTSL-Technik kann man z.B. einen modernen Windpark aufbauen, bei dem alle Schutz- und Speicherfunktionen von HTSL bestritten werden (Abb. 10). Die Schaltzeiten der Strombegrenzer auf HTSL-Basis sind unübertroffen kurz, und die Energiespeicherung kann mit sogenannten „Flywheels“ (Schwungrädern), die mit reibungsfreien

Magnetlagern arbeiten, bewerkstelligt werden. Eine erst in den letzten Jahren aufgekommene Anwendung sind Schiffsmotoren. Hierzu werden wieder die langen Bandleiter benötigt. Der Vorteil der Elektromotoren mit HTSL besteht in einer wesentlich geringeren Größe und einem geringeren Gewicht. Dies allein ist z.B. für U-Boote wichtig genug. Allerdings geht die Entwicklung einen Schritt weiter: Die durch die HTSL möglich gewordenen viel kleineren Elektromotoren können in einer beweglichen Motorgondel unter dem Schiff aufgehängt werden, was zu einer enormen Verbesserung der Manövrierbarkeit des Schiffes führt (Abb. 11). Aus diesem Grund können Passagierschiffe, aber auch Containerschiffe und Tanker mit supraleitenden Motoren ausgerüstet werden. Eine weitere Anwendung betrifft Transformatoren, die typischerweise sehr schwer sind, und z.B. bei einer Elektrolokomotive den grössten Teil des Gewichts ausmachen. Hier bietet sich die Supraleiter-Technik geradezu an, auch wenn die zusätzliche Kühlung einen zusätzlichen Aufwand verlangt.

Supraleiter, die bei Raumtemperatur oder bei nur geringer Kühlung arbeiteten, würden zweifellos unsere gesamte Energiewirtschaft und auch den Elektromaschinenbau revolutionieren. Ein verlustfreier weltweiter Austausch elektrischer Energie durch ein globales Leitungsnetz wäre möglich. Verlustarme elektromechanische Konstruktionen würden erheblich zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung beitragen. Aber auch wichtige Impulse für neuartige medizinische Diagnoseverfahren, wie die Magnetokardiographie und Magnetoenzephalographie mittels supraleitender Quanteninterferenzdetektoren wären zu erwarten [20].

Außerordentlich große Umwälzungen könnten im Bereich von Technologien zur Informationsverarbeitung eintreten. So werden seit vielen Jahren Konzepte entwickelt, mittels supraleitender Bauelemente unvorstellbare Geschwindigkeitssteigerungen in der digitalen Informationsverarbeitung im Vergleich zu heute auf der Basis von Halbleiterbauelementen erreichbaren Werten zu realisieren. Unter Verwendung von Rapid-single-flux-quantum-Bauelementen sind Taktfrequenzen bis annähernd in den Terahertz-Bereich hinein denkbar [21]. Die Energiedissipation, die bei heutigen Prozessoren zu einer sehr starken Erwärmung führt, wäre verschwindend gering.

Wohin entwickelt sich die Supraleitung nun also? In der Forschung wird uns die unkon-

ventionelle Supraleitung noch viele Jahre auf sehr hohem experimentellem und theoretischem Niveau beschäftigen. Es handelt sich um komplexeste Phänomene der Festkörperphysik, deren Klärung bisher trotz Bemühungen von Hunderten von Arbeitsgruppen weltweit in zwei Jahrzehnten nicht herbeigeführt werden konnte. Auch die Herstellung von Materialien und Bauelementen aus HTSL ist eine große technische Herausforderung, die weiteres Engagement erfordert, da geringe Modifikationen der Materialzusammensetzung und der Herstellungsmethoden im Allgemeinen sehr große Einflüsse auf das spätere Verhalten der Supraleiter haben. Anwendungen werden auch in den kommenden Jahren realisiert werden, wenn die Kühlung auf -170° bis -200° C akzeptabel ist. Dies ist z. B. der Fall für bestimmte Applikationen im Bereich der Energieversorgung, elektromagnetischer Maschinen, medizinischer Diagnoseverfahren oder Weltraumanwendungen. Dass sich die Kühlung „lohnen“ kann, sieht man anhand der weitverbreiteten Kernspintomographen in Kliniken, bei denen die supraleitende Spule sogar auf -269° C gekühlt werden muss.

Bereits 1964 wurde die konkrete Hypothese aufgestellt, dass es Supraleitung bei Raumtemperatur oder darüber geben müsste [9]. Experimentell hat man bislang kein entsprechendes Material identifizieren oder sogar synthetisieren können. Andererseits gibt es aber auch keine physikalische Theorie, die aus nachvollziehbaren Gründen die Supraleitung bei Raumtemperatur oder sogar höheren Temperaturen ausschließen würde. Es kann daher gefolgert werden, dass die Erforschung der Supraleitung ein spannendes Feld mit vermutlich noch vielen Überraschungen in den kommenden Jahren bleiben wird.

Literatur

- [1] M. R. Koblischka und U. Hartmann, *magazin forschung* 2/2001 p.11
- [2] M. Tomita, and M. Murakami, *Nature* **421**, 517 (2003)
- [3] J.G.Bednorz und K. A. Müller, *Z. Phys. B* **64**, 189 (1986)
- [4] M. Muralidhar, M. R. Koblischka, T. Saitoh, and M. Murakami, *Supercond. Sci. Technol.* **11**, 1349 (1998)
- [5] M. R. Koblischka, M. Winter, A. Koblischka-Veneva, M. Muralidhar, F. Mücklich, and U. Hartmann, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 82502 (2007)

- [6] M. R. Koblishka, M. Winter, A. Hu, M. Murakami, and U. Hartmann, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 2259 (2006).
- [7] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hisono, *J. Am. Ceram. Soc.* **130**, 3296 (2008)
- [6] M. P. Paranthaman und T. Izumi, *MRS Bulletin*, August 2004, p.533
- [9] W. A. Little, *Phys. Rev.* **134**, A1416 (1964)
- [10] D. Jérôme, A. Mazaud, M. Ribault and K. Bechgaard, *J. Physique Lett.* **41**, L95 (1980)
- [11] A.F. Hebard, M.J. Rosseinsky, R.C. Haddon, D.W. Murphy, S.H. Glarum, T.T.M. Palstra, A.P. Ramirez and A.R. Kortan, *Nature* **350**, 600 (1991)
- [12] Z.K. Tang, Lingyun Zhang, N. Wang, X.X. Zhang, G.H. When, G.D. Li, J.N. Wang, C.T. Chan and Ping Chen, *Science* **292**, 2462 (2001)
- [13] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu, *Nature* **410**, 63 (2001)
- [14] A. Barth and W. Marx, *J. Supercond. Nov. Magn.* **21**, 113 (2008)
- [15] J. L. Macmanus-Driscoll, S. R. Foltyn, Q. X. Jia, H. Wang, A. Serquis, L. Civale, B. Maiorov, M. E. Hawley, M. P. Maley, and D. E. Peterson, *Nature Materials* **3**, 439 (2004)
- [16] N. Hari Babu, E. S. Reddy, D. A. Cardwell, A. M. Campbell, C. D. Tarrant, and K. R. Schneider, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4806 (2003)
- [17] K. Watanabe, Y. Yamada, J. Sakuraba, F. Hata, C.K. Chong, T. Hasebe, and M. Ishihara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 1488 (1993)
- [18] J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer, *Phys. Rev.* **106**, 162 (1957)
- [19] A. Malozemoff, J. Mannhart and D. Scalapino, *Physics Today*, April 2005, p. 41
- [20] S.J. Swithenby, *Physics in Technology* **18**, 17 (1987)

Der saarländische TÜV

innovativ, unabhängig, erfolgreich



Mit der Universität des Saarlandes verbunden als

- Lehrender:** Vorlesung „Sicherheit technischer Systeme“ für Studierende der Ingenieurwissenschaften seit 1995
- Stifter:** Projektförderung für den Lehrstuhl für Fertigungstechnik CAM durch die TÜV Saarland Stiftung
- Anwender:** Entwicklungspartner und Kunde des Fraunhofer Instituts Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP seit 1996

Unternehmensgruppe TÜV Saarland
Am TÜV 1, 66280 Sulzbach/Saar