

# Supraleitung - Strom ohne Widerstand

*Diese mehrteilige Artikelserie wird mit einem Beitrag zu Anwendungsspekten der Supraleitungstechnologie abgeschlossen. Die z. Z. wichtigsten Einsatzmöglichkeiten supraleitender Materialien werden skizziert und zusammengestellt. Exemplarisch werden einige Anwendungen der Supraleitung ausführlicher behandelt.*

Prof. Dr. Siegfried Fellmann

## Teil 7: Anwendungen

Die Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten der Supraleitung sind äußerst vielfältig. Dazu muß herausgestellt werden, daß es sich zur Zeit nur um den Einsatz von den sogenannten klassischen Supraleitern mit so niedrigen Sprungtemperaturen handelt, daß die Kühlung mit flüssigem Helium erforderlich ist. Im wesentlichen lassen sich drei Anwendungsbereiche für die Supraleitung unterscheiden.

Zum einen steht die Erzeugung extrem großer Magnetfelder für Forschung und industrielle Anwendung im Vordergrund. So werden heute supraleitende Magnete mit unterschiedlichen Größen und diversen Geometrien hergestellt. In größerem Maßstab werden solche Magnete bereits heute in der Hochenergiephysik bei Teilchenbeschleunigern, in der Festkörperphysik, bei Experimenten zur kontrollierten Fusion (Energiegewinnung aus der Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern - ein Prozeß, der auf der Sonne abläuft) und für Energiespeicher eingesetzt. Ein besonders spektakuläres Beispiel in diesem Zusammenhang ist die magnetische Lagerung von Zügen, für die der Einsatz der Supraleitungstechnik zumindest in der Planung ist.

Ein weiterer Bereich ist die Verwendung von Supraleitern bei weniger stark ausgeprägten Magnetfeldern. Dazu gehört z. B. der Stromtransport durch supraleitende Kabel. Da beim Transport der elektrischen Energie durch Kabel die Verlustleistung  $R \cdot I^2$  beträgt, ist verständlich, wenn man Kabel mit möglichst niedrigem Widerstand  $R$  verwendet. Dies wäre bei Supraleitern der Fall.

Schließlich ist noch der große Bereich der meßtechnischen Anwendungen der Supraleitung zu nennen. Hier sind vor allem die Möglichkeiten bei der Ausnutzung der Josephson-Effekte von Bedeutung. Dazu gehören insbesondere extrem genaue Messungen von Magnetfeldern und Spannungen. Der Einsatz von Josephson-Kontakten als schnelle Schalt- und Speicherelemente in Großrechnern ist ebenfalls in ernsthafter Diskussion.

Die angesprochenen Möglichkeiten des Einsatzes der Supraleitung in Technik und Forschung sollen lediglich einen Eindruck über die Vielfalt dieser Technologie vermit-

eln. Daher können die Ausführungen zur Anwendung der Supraleitung keinesfalls vollständig sein. Um die Vorteile der Supraleitungstechnik gegenüber der herkömmlichen Technik wenigstens punktuell zu unterstreichen, werden nachfolgend aus den angesprochenen Gebieten einige Beispiele exemplarisch etwas ausführlicher dargestellt.

Zweifellos ist die Anwendung der Supraleitung beim Bau von großen Magneten oder aber von Magneten mit extrem großen Feldern ein besonders naheliegender Aspekt. So gibt es beim Entwurf konventioneller Elektromagnete zur Erzeugung großer magnetischer Felder 3 Hauptprobleme. Zum einen ist dies der große Energiebedarf. Wollte man mit einem konventionellen Magneten magnetische Feldstärken von  $8 \cdot 10^6$  A/m erreichen, was wiederum einer magnetischen Kraftflußdichte von  $B \approx 10$  T entspricht, müßte man eine Eingangsleistung von etwa 1 MW bereitstellen. Zum zweiten müßte man etwa den gleichen Anteil an Energie in Form von Wärme durch Kühlung abführen. In Leitern mit einem Widerstand  $R \neq 0$  erzeugt ein Strom  $I$  die Joulesche Wärme  $R \cdot I^2$ . Würde diese Wärme nicht durch Kühlung abgeführt, würde sie den Magneten schmelzen. Für die Abführung der genannten Wärmemenge muß ca.  $1 \text{ m}^3$  Kühlwasser pro Minute durch den Magneten gepumpt und nachfolgend durch einen Kühlturm geleitet werden. Schließlich müssen die bei großen magnetischen Feldstärken in der Spule auftretenden Druckkräfte, die sich aus der Wechselwirkung von Strom und Magnetfeld ergeben, von geeigneten Stützkonstruktionen aufgefangen werden. So greift an den Windungen einer Zylinder- spule mit einem inneren Spulendurchmesser von 50 cm bei einer Feldstärke von 5 T ein nach außen gerichteter radialer Zug von etwa  $3000 \text{ N/cm}^2$  an. Einem vergleichbaren Druck ist man ausgesetzt, wenn man sich in ca. 3000 m Meerestiefe aufhält.

Die beiden erstgenannten Probleme lassen sich sofort lösen, wenn man die konventionelle Magnetspule durch eine supraleitende Spule ersetzt. Der das Magnetfeld erzeugende Strom fließt in dieser Spule ohne elektrischen Widerstand, so daß nach dem Aufbau des Magnetfeldes zu seiner weiteren Aufrechterhaltung im Prinzip keine elektrische Leistung mehr erforderlich ist. Daher entfällt auch eine aufwendige Kühleinrichtung. Als Gegenleistung muß die gesamte Spule auf Temperaturen von eini-

gen Kelvin abgekühlt und bei dieser Temperatur gehalten werden. Die Leistung zur Aufrechterhaltung der tiefen Temperatur ist vernachlässigbar im Vergleich zum o. g. Leistungsbedarf bei konventionellen Magneten. Als Materialien für die Drähte der supraleitenden Spulen kommen nur harte Supraleiter in Betracht, da nur diese - wie bereits früher ausführlich dargestellt - durch Kraftflußfesselung zum Nullwiderstand im Mischzustand führen, und zwar auch bei großen Magnetfeldern bzw. Strömen.

Bei Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit von supraleitenden Magneten müssen auch die sogenannten Kryomagnete berücksichtigt werden. Kryomagnete besitzen Spulen aus extrem reinem Material - z. B. Aluminium - das zwar normalleitend bleibt, aber bei Abkühlung auf extrem tiefe Temperaturen einen sehr kleinen Widerstand annimmt. Zumindest für Langzeiteinsätze kann gesagt werden, daß supraleitende Magnetspulen verglichen mit Kryomagneten die wirtschaftlich günstigere Version sind.

Magnetische Kraftflußdichten von etwas mehr als 20 T stellen zur Zeit die obere Grenze dar, die mit Supraleitern erreicht werden kann. Noch höhere Kraftflußdichten von 25 bis 30 T können durch sogenannte Hybridmagnete erzielt werden. Dazu wird mit Hilfe einer supraleitenden Magnetspule in deren Inneren eine Kraftflußdichte von ca. 15 T erzeugt. Innerhalb dieser Spule wird nun ein zweiter supraleitender Magnet mit einem freien Innendurchmesser von einigen Zentimetern angeordnet. Dabei muß ein Material gewählt werden, das bei diesen hohen Feldern eine möglichst große kritische Stromdichte besitzt und somit für die zusätzliche Erzeugung von einigen Tesla herangezogen werden kann. Bei Hybridmagneten wird auch die Kombination aus äußerem supraleitenden Magneten und einem Einsatz aus einem nicht supraleitenden Widerstandsmagneten verwendet.

Die größten magnetischen Kraftflußdichten werden an einigen wenigen Laboratorien der Welt mit konventionellen Hochfeldanlagen (Bittermagnete) erzeugt, wobei allerdings ein enormer Aufwand an elektrischer Energie betrieben werden muß (10 MW und mehr). Im Augenblick gibt es vier Laboratorien auf der Welt, in denen Felder von 30 T zur Verfügung stehen. In den USA arbeitet man zur Zeit an der Entwicklung eines neuen Hybridmagneten, der 35 T erzeugen soll. Ähnliche Pläne bestehen auch in Japan.

Der derzeitige Entwicklungsstand in der Supraleitungstechnologie soll nun an dem Großbeschleunigerprojekt HERA erläutert werden. HERA ist ein Kunstwort und steht als Abkürzung für Hadron-Elektron-Ring-Anlage. HERA wird von DESY (Deutsches-Elektronen-Synchrotron) in Hamburg seit 1984 errichtet und soll bis 1989 fertig-



gestellt sein. Ab 1990 wird HERA eine der größten Beschleunigeranlagen dieser Art auf der Welt sein. Man kann diese Anlage als Super-Elektronen-Mikroskop zur Erforschung der kleinsten Bausteine der Materie bezeichnen. Obwohl diese Einrichtung der Grundlagenforschung dient, erfordert ihr Bau gleichwohl den Einsatz modernster Technologien. Ohne den Einsatz der Supraleitungstechnologie in großem Umfang könnte das Projekt HERA nicht realisiert werden.

HERA besteht aus zwei übereinanderliegenden Speicherringen, wobei je einer für Protonen und Elektronen vorgesehen ist. Eine wesentliche Komponente dieser Ringe ist ein extrem luftleer gepumptes Rohr mit einem Umfang von 6,3 km, in dem die Elektronen bzw. Protonen mehrere Stunden umlaufen können, und zwar mit fast 50.000 Umläufen pro Sekunde. Da die Teilchen bei ihren über Stunden währenden Umläufen in der Kreisbahn quasi gespeichert sind, nennt man solche Beschleunigungsanlagen Speicherringe. Die beiden Teilchenarten laufen dabei in entgegengesetzter Richtung um und können bei Bedarf aufeinander geschossen werden. Aus den Elektron-Proton-Stößen und deren Vermessung erhoffen sich die Physiker neue Erkenntnisse über die kleinsten Strukturen im Aufbau der Materie. Bei diesen Experimenten können Strukturen aufgelöst werden, die eine Ausdehnung von nur  $10^{-19}$  m besitzen. Das entspricht einem Zehntausendstel des Durchmessers eines Protons, welches ein Baustein von Atomkernen ist.

Die Energie der Elektronen beträgt 30 GeV (30 Milliarden Elektronenvolt) und die der Protonen 820 GeV. 1 eV ist dabei die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es die Spannung von 1 V durchfällt. Damit die Elektronen und Protonen bei ihrem Umlauf die Kreisbahn nicht verlassen, müssen sie durch extrem starke Magnetfelder geführt werden. Ähnlich wie ein an einer Schnur befestigter Körper beim Herumschleudern im Kreis wegzufiegen versucht, werden auch die kreisenden Elektronen und Protonen durch die Fliehkraft aus ihrer Kreisbewegung herausgetrieben, wenn nicht eine entsprechende Gegenkraft zur Verfügung steht. So wie die Schnur den kreisenden Körper auf der Kreisbahn hält, sorgen bei HERA starke Elektromagnete mit den von ihnen erzeugten Magnetfeldern dafür, daß die Elektronen und Protonen bei ihrem Kreisumlauf im Beschleunigerring die gewünschte Kreisbahn beibehalten. Die Anforderungen an diese Magnete können mit konventionellen Verfahren nicht verwirklicht werden. Bei der Verwendung von Elektromagneten mit Eisenkernen erreicht man magnetische Kraftflußdichten von etwas weniger als 2 T. Um jedoch im Projekt HERA die Protonen mit einer Energie von 820 GeV bei ihren Umläufen im Speicher-

ring auf eine Kreisbahn zu zwingen, werden Kraftflußdichten benötigt, die fast dreimal so groß sind. Solche Feldstärken kann man zwar mit herkömmlichen Magnetspulen erreichen, müßte dann aber Spulendurchmesser von ca. 10 m in Kauf nehmen. Noch gravierender ist dabei die Tatsache, daß der Stromverbrauch eines solchen Magneten vergleichbar wäre mit demjenigen der gesamten Stadt Hamburg. Für HERA sind aber 500 solcher Magnete erforderlich, die längs der Umlaufbahn angeordnet sind, um die Protonen auf die gekrümmte Bahn zu zwingen. Dazu kommen noch ca. 200 weitere Magnete, die zur Fokussierung des Protonenstrahls erforderlich sind. Mit herkömmlicher Technik würde daher der Energieverbrauch Dimensionen annehmen, die aus Kostengründen nicht realisierbar sind. Bei Verwendung supraleitender Spulen lassen sich ausreichend große magnetische Felder erzeugen, da die zur Magnetfelderzeugung notwendigen Ströme widerstandsfrei durch die supraleitenden Magnetspulen fließen, wenn die Temperatur auf 4,2 K gehalten wird. Die Kühlung erfolgt durch flüssiges Helium, das die Magnete ständig umspült. Wie schon erwähnt, sind die Kosten für die Heliumkühlung erheblich niedriger als diejenigen für den Betrieb von Normalmagneten, bei denen nahezu die gesamte zugeführte elektrische Leistung in unerwünschte Wärme umgewandelt wird, die dann ihrerseits wieder durch Kühlung abgeführt werden muß.

Zum Abschluß dieses Beispiels werden nachfolgend noch einige Daten der supraleitenden Magnete für das Projekt HERA genannt. Die Länge der supraleitenden Magnete liegt bei etwa 9 m. Das supraleitende Kabel, aus dem die Magnetspulen gewickelt werden, besteht aus 24 Einzeldrähten von 0,83 mm Durchmesser und ist extrem genau gewickelt. Jeder Einzeldraht besteht seinerseits aus 2460 haarfeinen supraleitenden Fasern, die in Kupfer eingebettet sind. Diese Fasern bestehen aus einer Niob-Titan-Legierung. Die Magnete werden mit einer Stromstärke von 5000 A betrieben. Dabei wirken auf die Spulen Kräfte, die einer Belastung von 600 t entsprechen.

Zu dem Projekt HERA könnten noch eine Reihe von interessanten Aspekten ausgeführt werden. Darauf wird an dieser Stelle verzichtet, da diese den Rahmen dieses Beitrages sprengen würden. In jedem Fall darf gesagt werden, daß außer der angesprochenen Supraleitungstechnologie noch andere technologisch sehr interessante Komplexe zu bearbeiten sind. Dazu gehören neben der Herstellung supraleitender Magnete die Entwicklung einer für europäische Verhältnisse einmaligen Kälteanlage zur Erzeugung des flüssigen Heliums, die Entwicklung von Ultrahochvakuum-systemen für die Speicherringe, die Bereitstellung von Hochfrequenzsystemen gro-

ßer Leistung zur Beschleunigung der Protonen und Elektronen und modernste Datenübertragungssysteme. Insbesondere auf dem Gebiet der Supraleitung und Tieftemperaturtechnik bietet der Bau von HERA in Europa erstmals die Gelegenheit, großtechnische Erfahrungen auf diesem Gebiet zu sammeln. Diese Erfahrungen könnten für die zukünftige industrielle Anwendung dieser energiesparenden Technologie von großer Bedeutung sein.

Ein weiterer Anwendungsbereich für supraleitende Magnete darf bei der kontrollierten Kernfusion angenommen werden. Dabei werden im Prinzip Wasserstoffkerne zu Heliumkernen verschmolzen, wobei eine erhebliche Energie frei wird. Da Wasserstoff in ausreichender Menge zur Verfügung steht, würde die Beherrschung der kontrollierten Fusion das Problem der Energieversorgung auf der Erde für die absehbare Zukunft lösen. Ein Fusionsreaktor dieser Art benötigt allerdings Temperaturen von mehr als 10 Millionen Grad. Bei diesen Temperaturen sind sämtliche Atome in ihre Bestandteile zerlegt, und zwar in positiv geladene Kerne und die negativen Elektronen der Hülle. Materie, die sich in diesem Zustand befindet, bezeichnet man als Plasma. Da dann nur geladene Teilchen vorliegen, können diese Teilchen durch ausreichend große Magnetfelder mit geeigneter Geometrie auf Reaktionsräume konzentriert werden, ohne daß sie dabei mit materiellen Wänden in Berührung kommen (magnetische Flaschen). Die dafür erforderlichen Magnetfelder sind allerdings so groß, daß sie schon aus wirtschaftlichen Gründen sicher nur mit supraleitenden Magneten erzeugt werden können.

Ein ebenso interessanter Aspekt ist der Einsatz supraleitender Kabel für den Stromtransport über große Entfernungen. So gehen bei den heute üblichen Hochspannungsleitungen auf einer Strecke von 200 km ungefähr 15 % und bei Leitungen von 1000 km Länge nahezu 40 % der Energie verloren. Daher sind die potentiellen Einsparmöglichkeiten bei der Verwendung von supraleitenden Übertragungskabeln beträchtlich. Dies läßt sich aus den Daten für die Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1985 ablesen. In diesem Jahr lag das Stromaufkommen bei 364 200 GWh, während die Netzverluste 17 840 GWh ausmachten. Das sind knapp 5 % des gesamten Stromaufkommens. Die Netzverluste entsprechen dabei einer mittleren Leistung von 2 GW. Allein durch die Vermeidung der jährlichen Netzverluste könnten daher 2 Kernkraftwerksblöcke zu je 1300 MW eingespart werden.

Die Frage der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit bei der Verwendung von supraleitenden Kabeln zur Energieübertragung ist ein besonders wichtiger Punkt, da gut funktionierende Leitungsnetze für die-



sen Zweck zur Verfügung stehen. Wenn man für die Leistungsübertragung auf Erdkabel übergeht, gibt es ebenfalls Alternativen, die hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit mit supraleitenden Kabeln verglichen werden müssen. So stehen öl- oder gasgekühlte Kabel für den Betrieb bei Normaltemperatur und Kryokabel zur Verfügung. Das Kryokabel enthält einen Normalleiter, der mit flüssigem Stickstoff auf 80 bis 90 K gekühlt wird. Bei diesen Überlegungen ist zu berücksichtigen, daß zur Zeit nur klassische Supraleiter als Energieübertragungskabel in Frage kommen, die daher mit flüssigem Helium gekühlt werden müssen. Selbst eine auf Stickstoffkühlung basierende Supraleitungstechnologie mit den neuen keramischen Hochtemperatursupraleitern wird es in Konkurrenz mit den bewährten und bis ins letzte ausgefeilten herkömmlichen Technologien sehr schwer haben, sich endgültig durchzusetzen. Gleichwohl werden Konstruktionsvorschläge für die Leistungsübertragung in der Größenordnung bis 100 GW über Entfernungen von 1000 km diskutiert. Größere Chancen werden Supraleitern zur Leistungsübertragung in Ballungsräumen eingeräumt, da man dort in Zukunft immer mehr auf Erdkabel übergehen muß.

Es gibt Konstruktionsvorschläge für Gleichstrom- und Wechselstromkabel aus Supraleitern. Der vollständig verlustfreie Stromtransport ist auf Gleichstrom beschränkt. Allerdings steht dem Vorteil der völlig verlustlosen Stromleitung im supraleitenden Gleichstromkabel die Notwendigkeit des zweimaligen Umtransformierens zwischen Gleich- und Wechselstrom an den Enden des Kabels gegenüber. Dieser Nachteil entfällt zwar beim Wechselstromkabel, wofür aber bei der Wechselstromübertragung auch bei Kühlung auf 4,2 K grundsätzlich Restverluste in Kauf genommen werden müssen (vgl. Abbildung 11 im Teil 2 dieser Artikelserie). Realistische Abschätzungen gehen davon aus, daß supraleitende Kabel für die Leistungsübertragung erst oberhalb einiger GW über Entfernungen von knapp 1000 km mit den herkömmlichen Techniken konkurrenzfähig werden. Diese Daten sind zu vergleichen mit der derzeitigen Gesamtleistung in der Bundesrepublik Deutschland von etwas mehr als 40 GW.

Die meßtechnischen Anwendungen der Supraleitung sind besonders vielschichtig. Es gibt eine Fülle von interessanten Einsatzmöglichkeiten der Supraleiter, bei denen die einmaligen elektrischen und magnetischen Eigenschaften dieser Substanzen ausgenutzt werden. Eine auch nur im Ansatz erschöpfende Behandlung dieser Möglichkeit geht weit über den Rahmen dieses Beitrages hinaus. Es soll daher nur ein Eindruck für die Einsatzmöglichkeiten von Supraleitern in der Meßtechnik vermittelt wer-

den, wobei auf eine Reihe von Anwendungsbeispielen nur hingewiesen wird - allerdings mit kurzen Erläuterungen -, während ein Beispiel etwas ausführlicher dargestellt wird.

Supraleitende Bolometer sind Instrumente, die zum Nachweis elektromagnetischer Strahlung verwendet werden. Diese hochempfindlichen Strahlungsmesser nutzen die extreme Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes, insbesondere beim Übergang vom normal zum supraleitenden Zustand aus. Diese Tieftemperatur-Bolometer sind daher erheblich empfindlicher als Raumtemperatur-Bolometer. In Verbindung mit der modernen Verstärkertechnik haben sich die supraleitenden Bolometer inzwischen zu den empfindlichsten Strahlungsdetektoren entwickelt, was vor allem auch für das heute immer wichtiger werdende fernere Infrarotgebiet des Spektrums gilt, wo die meisten anderen Strahlungsdetektoren versagen.

Zur Regelung von Wärmeströmen werden supraleitende Wärmeventile eingesetzt. Diese Geräte werden vor allem bei extrem niedrigen Temperaturen von weniger als 0,4 K verwendet, um die Schwingungen mechanischer Ventile zu vermeiden. Diese Schwingungen würden zu unerwünschten Temperatursteigungen führen. Mit dieser Technik können heute Temperaturen bis zu 0,003 K aufrechterhalten werden.

Die Ausnutzung der Josephson-Effekte für meßtechnische Anwendungen hat in den vergangenen Jahren eindeutig den größten Fortschritt gemacht. Man darf wohl ohne Übertreibung sagen, daß hier eine kleine meßtechnische Revolution stattfand, da dabei die Meßgenauigkeit zur Bestimmung von Magnetfeldern um fünf Größenordnungen gesteigert wurde. Da sowohl der Josephson-Gleichstromeffekt als auch der Josephson-Wechselstromeffekt eine charakteristische Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld zeigen, sind Josephson-Kontakte als extrem empfindliche Magnetometer besonders geeignet.

Bei der Präzisionsbestimmung von Magnetfeldern wird dabei sowohl der Gleichstromeffekt (d. c. SQUID) als auch der Wechselstromeffekt (a. c. SQUID) ausgenutzt. Die durch die SQUID's gegebene Empfindlichkeit in der Magnetometrie steht allerdings nur dann zur Verfügung, wenn das Erdfeld sorgfältig abgeschirmt wird und bei Verwendung der a. c. SQUID's Einstrahlungen externer Störsignale im gesamten Frequenzbereich bis zu  $10^{12}$  Hz vermieden werden. Dann können mit solchen Anordnungen Magnetfeldänderungen bis zu  $10^{-14}$  T nachgewiesen werden. So gelang es bereits Anfang der 70er Jahre Cohen u. a., die von der Herztätigkeit des menschlichen Herzens hervorgerufenen Magnetfelder nachzuweisen (Magnetokardiogramm). Diese Sensoren sind so empfindlich, daß

man mit ihnen auch die durch elektrische Aktionsströme im menschlichen Gehirn entstehenden Magnetfelder nachweisen kann. Von besonderer Bedeutung ist dabei, daß man diese Informationen völlig kontaktfrei - also berührungslos - und auch ohne jede äußere Beeinflussung erhält.

Außer dem direkten Einsatz der SQUID's als Magnetometer können sie auch zur Steigerung der Empfindlichkeit anderer Instrumente im Bereich der Strom- und Spannungsmessung eingesetzt werden. Unter günstigen Bedingungen lassen sich damit Ströme bis zu  $10^{-11}$  A und Spannungen bis zu  $10^{-17}$  V ausmessen.

Den Josephson-Wechselstrom verwendet man inzwischen auch zur Festlegung eines Spannungsnormals. Der Vorteil eines Spannungsnormals auf dieser Basis beruht darauf, daß Frequenzmessungen mit großer Genauigkeit durchgeführt werden können. Ähnliche Überlegungen werden zur Realisierung eines Stromnormals angestellt. Entsprechendes gilt für ein Normal des elektrischen Widerstandes, wobei der Quanten-Hall-Effekt ausgenutzt wird.

Schließlich wird erwohnen, Josephson-Kontakte auch in Computern einzusetzen. Da die Strom-Spannung-Kennlinie der Josephson-Kontakte ein bistabiles Verhalten besitzt, können diese Kontakte als Gedächtniseinheiten benutzt werden. Mit solchen Anordnungen wurden bereits Schaltzeiten von  $10^{-11}$  bis  $10^{-12}$  s erreicht, so daß diese Kontakte als extrem schnelle Schaltelemente für Großrechner in der nahen Zukunft durchaus eine realistische Möglichkeit darstellen. Die Verwendung mehrerer paralleler Kontakte dieser Art eröffnet die Möglichkeit, Schieberegister mit Transferzeiten von  $10^{-11}$  s zu erreichen.

Abschließend soll nochmals hervorgehoben werden, daß sich die angesprochenen Einsatzmöglichkeiten supraleitender Materialien generell auf klassische Supraleiter beziehen, die grundsätzlich mit flüssigem Helium gekühlt werden müssen. Ein vergleichbarer Einsatz der neuen keramischen Hochtemperatursupraleiter scheidet vorerst noch daran, daß es sich bei diesen um äußerst spröde, inelastische, keramische Materialien handelt, die nur schwer zu bearbeiten sind. Künftige Forschungsvorhaben auf diesem Gebiet werden vor allem die Optimierung der kritischen Parameter  $T_c$ ,  $B_{c2}$  und  $j_c$  vorantreiben müssen. Am ehesten darf der erfolgreiche Einsatz der neuen Hochtemperatursupraleiter in naher Zukunft im meßtechnischen Bereich erwartet werden.

Zusammenfassend darf aus heutiger Sicht gesagt werden, daß die Erforschung der supraleitenden Keramiken mit Sicherheit durch ein zähes Ringen um Detailkenntnisse geprägt sein wird, daß insgesamt jedoch die noch vorhandenen Probleme lösbar erscheinen.

ELV