

SUPRALEITUNG

Die Technik, die aus der Kälte kam

Was als wissenschaftliche Kuriosität begann, hat sich inzwischen zu einem Milliardenmarkt entwickelt, der dank der Hochtemperatur-Supraleiter weiter wächst.

Stefan Jorda

Obwohl heute zigtausende supraleitende Verbindungen bekannt sind, haben nur einige wenige eine kommerzielle Bedeutung. Neben zwei Nioblegierungen gehören dazu in zunehmendem Maße auch Vertreter der vor 25 Jahren entdeckten Kuprat-Supraleiter, deren Durchbruch in der Energietechnik sich abzeichnet. Bevor damit aber wirklich Geld verdient wird, müssen die daraus hergestellten Drähte noch deutlich billiger werden. Angesichts der notwendigen Kältetechnik wird es aber auch dann keinen supraleitenden Staubsauger im Haushalt geben.

Da Zinn und Blei einfach zu verarbeitende Metalle sind, können wir nun alle Arten von elektrischen Experimenten mit widerstandslosen Apparaten in Betracht ziehen.“ Als Heike Kamerlingh Onnes 1913 diese Zeilen schrieb, waren erst wenige Monate vergangen, seit er entdeckt hatte, dass neben Quecksilber auch Zinn und Blei die erstaunliche Eigenschaft aufweisen, supraleitend zu werden. Angesichts des wenige Jahre zuvor erwachten Interesses an Experimenten in starken Magnetfeldern – der Zeeman-Effekt war seit 1896 bekannt – sinnierte Kamerlingh Onnes über eine Magnetspule mit supraleitendem Draht für ein Feld von 10 Tesla und machte Experimente mit Spulen, deren Windungen er mit Seide isolierte und in flüssigem Helium kühlte. Zu seinem Erstaunen stellte er allerdings fest, dass eine Spule aus Bleidraht bereits bei einem viel geringeren Strom normalleitend wurde als ein gerades Drahtstück. Kamerlingh Onnes führte dies auf „schlechte Stellen“ im Draht zurück und zeigte sich überzeugt, dass schon bald supraleitende Spulen viel höhere Magnetfelder ermöglichen würden als konventionelle Kupferspulen. Damit lag er weit daneben, denn entgegen seinen Erwartungen stehen Anwendungen der Supraleitung grundsätzliche Einschränkungen im Weg, da nicht nur eine zu hohe Temperatur dem supraleitenden Zustand den Garaus macht, sondern auch eine zu hohe Stromstärke und ein zu starkes Magnetfeld – wobei diese drei kritischen Größen in komplizierter Weise miteinander zusammenhängen. Da fast alle Elementsupraleiter wie Blei, Zinn oder Aluminium kritische Magnetfelder von wenigen Millitesla aufweisen, sind sie für elektrische Anwendungen denkbar ungeeignet. Im Gegensatz zu diesen sog. Typ-I-Supraleitern kann ein Magnetfeld in die 1936 von dem sowjetischen Physiker Lev Shubnikov und seinen Mitarbeitern ent-



Am Siemens-Standort in Erlangen entstehen aus supraleitenden Magnetspulen, die bereits mitsamt des hier

sichtbaren Kryostaten angeliefert werden, Magnetresonanztomographen für die Medizintechnik.

deckten Typ-II-Supraleitern sukzessive eindringen, mit dem Ergebnis, dass die Supraleitung erst bei sehr viel höheren Magnetfeldern zusammenbricht.¹⁾ Fünfzig Jahre nach der Entdeckung der Supraleitung gelang es dann 1961 Physikern bei den Bell Labs in den USA zu zeigen, dass Nb_3Sn -Draht auch in einem Magnetfeld von mehreren Tesla supraleitend bleibt, und ein Jahr später baute Martin Wood, der Gründer von Oxford Instruments, den ersten supraleitenden Magneten.

Heute sind zigtausende supraleitende Verbindungen bekannt, von denen aber nur eine Handvoll eine kommerzielle Bedeutung hat. Gleichzeitig haben sich Anwendungen der Supraleitung – weitgehend unbemerkt

KOMPAKT

- Drähte aus den Nioblegierungen $NbTi$ und Nb_3Sn bilden heute die Grundlage für supraleitende Magnetspulen, ohne die weder Magnetresonanztomographen für die Medizin noch viele wissenschaftliche Großgeräte möglich wären.
- Inzwischen gelingt es auch immer besser, Leiter aus dem Hochtemperatur-Supraleiter YBCO herzustellen. Die Preise dafür müssen aber vor einer breiten Markteinführung noch deutlich fallen.
- Diese Leiter versprechen vielfältige Anwendungen in der Energietechnik, angefangen von Generatoren über Strombegrenzer bis hin zu Übertragungskabeln.

¹⁾ vgl. den Beitrag auf S. 51 in diesem Heft.



Bruker EST

Von Hand werden bei Bruker EST in Hanau Stangen aus NbTi und Kupferrohre gebündelt. Daraus entstehen dünne supraleitende Drähte, die zahlreiche NbTi-Filamente in einer Kupfermatrix enthalten (links).

von der Öffentlichkeit – zu einem Milliardenmarkt entwickelt, den supraleitende Magnete für die analytische Kernspinresonanz (NMR) bzw. Magnetresonanztomographie (MRT) mit weitem Abstand dominieren. Die Arbeitspferde hierfür sind die Legierungen NbTi und Nb₃Sn des grau-glänzenden Schwermetalls Niob, das zu 90 Prozent aus zwei brasilianischen Minen stammt und überwiegend als Legierungszusatz für Stahl verwendet wird. Im Gegensatz zu diesen Tieftemperatur-Supraleitern (Low Temperature Superconductor, LTS), die eine Kühlung mit flüssigem Helium benötigen, zeichnen sich Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) dadurch aus, dass eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff bei 77 Kelvin ausreicht. Als J. Georg Bednorz und K. Alexander Müller vor 25 Jahren diese keramischen Supraleiter entdeckten, deren gemeinsames Strukturelement Kupferoxid-Ebenen sind, war die Euphorie groß. Mancher Prophet sah bereits allgegenwärtige supraleitende Kabel voraus. Diese und andere hochfliegende Erwartungen haben sich bis heute jedoch nicht erfüllt, auch wenn inzwischen zahlreiche Unternehmen auf erfolgreiche HTS-Pilotprojekte insbesondere für die Energietechnik verweisen können und in den Startlöchern stehen. Noch aber bringt der Physiker Klaus Schlenga, Chief Technology Officer der Firma Bruker EST in Hanau, die ungleiche wirtschaftliche Bedeutung von Tief- und Hochtemperatur-Supraleitern mit den Worten auf den Punkt: „Hier wird's Geld verdient, und dort wird's ausgegeben.“

Bruker gehört mit einigen Tochtergesellschaften wie Bruker Energy and Supercon Technologies (EST) zu den weltweit führenden Unternehmen, die sich

mit allen Aspekten der Supraleitung beschäftigen, angefangen von den Materialien bis hin zu kompletten Geräten. Rund tausend Arbeitsplätze hängen bei Bruker direkt an der Supraleitung. In Hanau produziert das Unternehmen in einem industriellen Prozess und im Dreischichtbetrieb jedes Jahr rund 60 000 Kilometer an LTS-Draht. Davon ist der kleinere Teil für den eigenen Gebrauch bestimmt – Bruker stellt NMR-Spektrometer für die wissenschaftliche Analytik her –, während den Löwenanteil Unternehmen der Medizintechnik abnehmen. Sowohl bei den Spektrometern für die Analytik als auch bei den bildgebenden MRT-Geräten für die Medizin geht der Trend zu immer höheren Magnetfeldern, die sich schon lange nur noch mit supraleitenden Magneten erreichen lassen. Je höher das Magnetfeld, desto mehr Linien kann ein Spektrometer auflösen und desto höher ist die räumliche Auflösung bei der medizinischen Bildgebung.

Das Material der Wahl für die Magnete ist NbTi, mit dem sich Magnetfelder von etwa 10 Tesla erreichen lassen. Während Kamerlingh Onnes seine vergeblichen Versuche noch mit einfachen Drahtwindungen durchgeführt hat, ist heute der supraleitende Draht selbst bereits ein Hightech-Produkt, das je nach Anwendung aus einigen zehn bis einigen tausend in Kupfer eingebetteten NbTi-Filamenten besteht. Das Kupfer ist notwendig, um den Magneten zu schützen, falls dieser „quencht“, also z. B. bei einem Ausfall der Kühlung oder durch einen externen Wärmeeintrag schlagartig normalleitend wird. Oberhalb der Sprungtemperatur ist der Widerstand der NbTi-Filamente nämlich so hoch, dass diese schlagartig verdampfen würden, würde dann nicht das Kupfer den elektrischen Strom tragen.

Viele Köche, viele Rezepte

Aber wie lassen sich so viele Filamente in einen Kupferdraht einbetten? Die Antwort auf diese Frage findet sich in einer über hundert Meter langen Halle auf dem Bruker-Werksgebiet in Hanau. Im so genannten Bündelraum liegen dort sorgfältig verpackt auf einer Palette etwa einen Meter lange Rundstangen aus NbTi, die gegenüber dem optimalen Supraleiter einen Überschuss an Titan haben. Mit Handschuhen und peinlichst auf Sauberkeit bedacht nimmt ein Mitarbeiter einen NbTi-Stab, schiebt diesen in einen gleichlangen hexagonalen hohlen Kupferstab und legt beides zusammen in einen kupfernen Hohlzylinder mit viel größerem Durchmesser. Diese Schritte wiederholt er, bis ein Bündel aus Kupferstäben den Zylinder vollständig ausfüllt. Per LKW gehen diese Rohlinge an einen anderen Standort, wo sie bei einigen hundert Grad Celsius und mit Kräften, die mehreren tausend Tonnen entsprechen, zu zwölf Meter langen armdicken Stangen gepresst werden. Zurück in der großen Halle in Hanau erwartet die Stangen eine Batterie von Drahtziehmaschinen, die den Durchmesser sukzessive auf etwa einen Millimeter reduzieren. Zwischendurch wandern die Drahtspulen zu genau definierten Bedin-



gungen in große Öfen. Durch diese Wärmebehandlung und die mechanische Umformung scheiden sich kleine Titankörnchen aus der Legierung aus, die im Betrieb normalleitend bleiben. Diese so genannten Haftzentren verhindern, dass sich magnetische Flussschläuche, die bei diesen Typ-II-Supraleitern in das Material eindringen, bewegen können, und ermöglichen damit erst die hohe Stromtragfähigkeit der Leiter. Im Prinzip verwenden alle Drahthersteller den gleichen Prozess, „im Detail hat aber jeder sein eigenes Kochrezept“, erklärt Schlenga.

In einem ähnlichen Prozess entstehen auch Nb_3Sn -Drähte, die verglichen mit $NbTi$ zwar zehnmal so teuer sind, mit denen sich aber Magnetfelder von etwa 20 Tesla erreichen lassen. Da Nb_3Sn zu spröde ist, um es mechanisch umzuformen, besteht der besondere Clou darin, dass das Ausgangsbündel Bronze- und reine Niobstäbe enthält. Daraus entsteht wie bei $NbTi$ ein Draht, aus dem eine Spule gewickelt wird. Erst wenn die fertige Spule in einem Ofen steht, diffundiert Zinn aus der Bronze in das Niobfilament, und erst dann entsteht der Supraleiter. Nb_3Sn -Drähte kommen bislang überwiegend bei Highend-Geräten für die wissenschaftliche Analytik zum Einsatz, derzeit bearbeitet Bruker aber auch einen großen Auftrag für den Fusionsreaktor ITER, der insgesamt 500 Tonnen Nb_3Sn verwenden wird.

Wissenschaftliche Großgeräte wie die Fusionsexperimente Wendelstein 7-X und ITER oder Teilchenbeschleuniger bilden eine zweite Gruppe von Abnehmern für supraleitende LTS-Drähte. Der Large Hadron Collider am CERN besteht z. B. aus rund 5000 supraleitenden Magneten, die 1500 Tonnen an $NbTi$ -Draht enthalten. Die großen Drahthersteller sind alle auch in diesen Projektgeschäften tätig. So hat beispielsweise Bruker in Bergisch-Gladbach alle 400 Quadrupolmagnete für den LHC hergestellt. Für Beschleunigerkavitäten kommt darüber hinaus ultrareines Niob zum Einsatz, beispielsweise beim Linearbeschleuniger für den europäischen Röntgenlaser XFEL in Hamburg.

$NbTi$ -Draht ist heute ein ausentwickeltes Produkt, zu dessen wichtigsten Abnehmern die drei großen Unternehmen der Medizintechnik Siemens, General Electric und Philips gehören. „Das ist ein Standardprodukt, eine so genannte commodity, die Siemens weltweit entsprechend unserer Spezifikationen einkauft“, sagt die Physikerin Tabea Arndt, die in der zentralen Forschungsabteilung von Siemens in Erlangen für das Programm „Superconducting Materials and Applications“ verantwortlich ist. 30 bzw. 90 Kilometer Draht benötigt Siemens für ein MRT-Gerät mit einem Magnetfeld von 1,5 bzw. 3 Tesla. Die Spulen selbst fertigt Siemens in der weltgrößten Magnetfabrik in Oxford. Zehn Wochen dauert der Bau einer Spule, die inklusive Kryostat und einer Füllung von rund 1500 Liter flüssigem Helium „kalt“ nach Erlangen geliefert wird, wo drum herum in wenigen Tagen ein komplettes System entsteht. Die Magneten sind das Herzstück jedes einzelnen Systems und machen einen großen Anteil an den Gesamtkosten aus. Im Jahr 1979 hat Siemens mit dem Scan einer Pa-

prika die Ära der MRT eingeläutet, heute ist das Unternehmen mit rund 3000 verkauften Systemen pro Jahr Weltmarktführer.

Ist ein solches System in einer Klinik oder einer Praxis aufgebaut, fährt ein Ladegerät den elektrischen Strom im Magneten über viele Stunden auf den Sollwert hoch. Ein spezieller Schalter schließt die Spule dann kurz, die äußeren Stromzuführungen werden „gezogen“, sodass der Magnet keine elektrische Verbindung mehr zur Außenwelt hat. Im Magneten fließt nun ein Dauerstrom von einigen hundert Ampere, der erst nach Jahren um wenige Millionstel abklingen würde. Bei einem Feld von 3 Tesla beträgt die Feldenergie enorme 12 Megajoule – das entspricht der kinetischen Energie eines 40-Tonnen-LKWs, der mit 90 Stundenkilometern unterwegs ist.

Auch wenn hin und wieder noch neue Anwendungen für LTS auftauchen – so werden z. B. in den letzten Jahren supraleitende Magnete eingesetzt, um die Konvektion in Siliziumschmelzen zu unterdrücken und damit homogenere Siliziumkristalle für die Mikroelektronik zu züchten – ist das Wachstum für diese Supraleiter nur noch moderat. „Der Markt ist gesättigt“, sagt der Physiker Carsten Bühner, Geschäftsführer der Zenergy Power GmbH in Rheinbach, „aber bei Hochtemperatur-Supraleitern geht es um potenzielle Milliardenmärkte.“ Noch umfasst der Weltmarkt für HTS-Systeme allerdings gerade einmal einige zehn Millionen Euro pro Jahr, das ist etwa ein Faktor 1000 weniger als für LTS-Systeme, da es noch kaum industrielle Produkte gibt.²⁾

Eine Ausnahme sind Stromzuführungen für die Versorgung von supraleitenden Magneten. Da diese zwangsläufig „vom Warmen ins Kalte“ führen müssen, ist ein Material gefragt, das Strom gut, aber Wärme schlecht leitet, und genau dafür sind die keramischen HTS prädestiniert. Ein anderes Beispiel ist ein Magnetheizer, den Zenergy Power gemeinsam mit dem Maschinenbauunternehmen Bultmann entwickelt hat. Dieser dient dazu, Bolzen aus Aluminium oder anderen Metallen zu erhitzen, bevor diese durch Strang-

2) Eine Ausnahme sind sog. SQUIDS aus dünnen HTS-Filmen, mit denen sich sehr genau schwache Magnetfelder messen lassen, für die es aber nur einen begrenzten Markt gibt.



Dieser Magnetheizer verwendet eine Magnetspule aus Hochtemperatur-

Supraleitern, um Aluminiumbolzen vor der weiteren Verarbeitung zu erhitzen.

Zenergy Power GmbH

pressen weiter verarbeitet werden, z. B. zu Fensterprofilen. Im Heizer erzeugt ein supraleitender Magnet ein asymmetrisches Feld, in dem sich der Bolzen dreht. Die induzierten Wirbelströme heizen das Metall so effizient, dass der Stromverbrauch gegenüber herkömmlichen Verfahren um 40 Prozent geringer ist. Für dieses „Stück Technikgeschichte“ – so die Laudatio der Deutschen Bundesstiftung Umwelt – wurden die beiden Firmen inzwischen mehrfach ausgezeichnet, u. a. mit dem Deutschen Umweltpreis 2009 und dem Hermes Award 2008. Diese Beispiele mögen interessante Nischenprodukte sein, die für die Weiterentwicklung der Technologie wichtig sind und dafür, ihr Potenzial aufzuzeigen. Den großen Markt sehen aber alle Unternehmen, die sich mit HTS befassen, in der Energietechnik, angefangen von der Stromerzeugung in Generatoren mit supraleitenden Wicklungen über lokale Komponenten des Energienetzes bis hin zu den Übertragungskabeln selbst. Joachim Bock, Geschäftsführer von Nexans Superconductors in Hürth, begründet diese Hoffnung mit den Worten: „Den Charme von Supraleitern für die Energietechnik kann man knapp zusammenfassen mit: kleiner, leichter, effizienter.“

Kleiner, leichter, effizienter

Nachdem es 70 Jahre gedauert hat, den Wirkungsgrad eines konventionellen Generators von bereits eindrucksvollen 98 auf 99 Prozent zu steigern, ist es mithilfe eines Rotors mit einer HTS-Wicklung innerhalb weniger Jahre gelungen, den Wirkungsgrad um ein weiteres halbes Prozent zu steigern. Ausschlaggebend dafür ist, dass im Rotor keine ohmschen Verluste auftreten, die man wegekühlen muss. Außerdem sind die möglichen Stromdichten in HTS-Leitern viel höher als in Kupfer – ein dünnes Bändchen eines HTS-Leiters kann den gleichen Strom tragen wie ein armdickes Kupferkabel. Dies erlaubt ein viel kompakteres Maschinendesign, was immer dann von Vorteil ist, wenn der Platz knapp ist. So soll im denkmalgeschützten Wasserkraftwerk in Hirschaid an der Regnitz ein neuer Generator, für den Zenenergy Power die supraleitenden Komponenten liefert, eine Ausgangsleistung erreichen, die bei gleicher Baugröße rund ein Drittel höher ist als bei

einem konventionellen Generator. Große Vorteile versprechen die kompakten supraleitenden Generatoren auch für Windkraftwerke, wobei noch hinzukommt, dass die konventionellen Generatoren mit Permanentmagneten 250 Kilogramm der knappen seltenen Erden pro Megawatt installierter Leistung benötigen, gegenüber nur wenigen Kilogramm bei den HTS.

Auch die Forschungsabteilung von Siemens, dessen Anfänge ja auf Elektromotoren und Generatoren zurückgehen, beschäftigt sich intensiv mit der neuen Technologie. 2005 hat das Unternehmen den kompaktesten 4-MW-Generator weltweit vorgestellt, der im Nürnberger Siemens-Werk bereits einen Langzeittest bestanden hat. Ein gemeinsames Projekt mit dem KIT in Karlsruhe widmet sich derzeit den technischen Herausforderungen für Kraftwerksgeneratoren bis zu 900 MW. Natürlich müssen diese Maschinen alle gekühlt werden, aber auch in normaleitenden Generatoren entsteht Abwärme, die eine komplizierte konventionelle Kühltechnik abführen muss. Grundsätzlich sei es sogar einfacher, eine supraleitende Maschine kalt zu halten, als die in der konventionellen Maschine kontinuierlich entstehende Wärme abzuführen, sagt Tabea Arndt. Dennoch ist der Aufwand groß, einen supraleitenden Rotor zu realisieren. „Sie haben eine rotierende Thermoskanne“, erklärt sie, „und müssen die Kühlung durch die Achse führen sowie Drehmoment und Strom vom Warmen ins Kalte bringen.“ Man dürfe aber nie den Preis eines supraleitenden Rotors mit dem eines normaleitenden vergleichen, sondern müsse das ganze System über die gesamte Betriebsdauer betrachten. Und da habe eine supraleitende Maschine auch Vorteile, weil bei diesen tiefen Temperaturen fast alle physikalischen Effekte wie Diffusion oder Alterungsprozesse „eingefroren“ sind und diese Maschinen daher weniger Wartung bedürfen. Arndt ist denn auch überzeugt davon, dass die HTS-Technologie das gesamte Generatorgeschäft tiefgreifend ändern wird. Siemens hat darüber hinaus kürzlich auch einen 4-MW-Motor vorgestellt, der sich aufgrund seiner Effizienz und kompakten Bauweise besonders als Schiffsantrieb eignen würde. Ungeachtet dieser Vorteile stehen einem Einsatz solcher Maschinen im großen Maßstab bislang aber noch die zu hohen Kosten der HTS-Leiter im Weg.

Die grundlegende Herausforderung für HTS-Leiter besteht darin, aus diesen spröden keramischen Materialien flexible und lange Leiter herzustellen. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Eigenschaften parallel und senkrecht zu den charakteristischen Kupferoxid-Ebenen stark unterscheiden. Um trotz dieser Anisotropie eine möglichst hohe kritische Stromdichte erzielen zu können, ist es daher essenziell, die HTS-Körnchen innerhalb eines Drahts möglichst gut auszurichten. Seit den 90er-Jahren haben verschiedene Unternehmen Leiter auf der Grundlage von Wismut-HTS (BSCCO) entwickelt, bei denen eine mechanische Umformung diese Texturierung erzeugt. Dazu wird ein Silberrohr mit einem Pulver der oxidischen Ausgangsmaterialien gefüllt, dünner gezogen und anschließend mehrfach gewalzt und erhitzt. Dabei entstehen die ausgerichteten



Im Kraftwerk Boxberg von Vattenfall steht dieser supraleitende Strombegrenzer.

BSCCO-Kristallite innerhalb des Leiters. Bruker und andere Unternehmen vermarkten derzeit diese HTS-Leiter der ersten Generation, aufgrund ihrer Kosten und der eingeschränkten Leistungsfähigkeit gehört die Zukunft aber den Leitern der zweiten Generation mit Yttrium-HTS (YBCO).³⁾ Ausgangsmaterial für diese Leiter ist ein Stahlband, auf dem zunächst mehrere Zwischenschichten aufgebracht werden, von denen die oberste die gewünschte Textur vorgibt. Die supraleitende Schicht lässt sich darauf mittels physikalischer oder chemischer Prozesse kristallin abscheiden. Bislang sind einzig die beiden US-Unternehmen AMSC (American Superconductor) und SuperPower in der Lage, HTS-Drähte in größerem Maßstab herzustellen, während in Deutschland derzeit mehrere Unternehmen viel Geld investieren, um Produktionskapazitäten aufzubauen.

Völlig innovativ

Während die Supraleitung bei Generatoren oder Kabeln „nur“ die konventionelle Technologie verbessert, gibt es auch Anwendungen, bei denen sie völlig innovative Konzepte ermöglicht. Dazu gehören supraleitende Strombegrenzer für Energienetze, die essenziell sind, um auch bei Kurzschlüssen Netzsicherheit und -stabilität zu gewährleisten. Im Gegensatz zu den anderen Anwendungen, bei denen ein Quenchen äußerst unerwünscht ist, beruht das Prinzip des supraleitenden Strombegrenzers gerade auf diesem Effekt. Im Normalbetrieb ist solch ein Strombegrenzer „elektrisch unsichtbar“, übersteigt der Strom aber einen kritischen Wert, wird er schlagartig normalleitend und begrenzt den Strom. Nach diesem Prinzip funktionieren weltweit zahlreiche Prototypen, hauptsächlich für den Mittelspannungsbereich von einigen Kilovolt. So haben sich beispielsweise Prototypen von Nexans bzw. Zenergy Power im Feldeinsatz bewährt. Darüber hinaus ist Bruker derzeit gemeinsam mit den Stadtwerken Augsburg an der Entwicklung eines Strombegrenzers beteiligt, der auf induktiver Rückkopplung beruht. Bei diesen Komponenten gibt es also schon einen echten Wettbewerb zwischen verschiedenen Prinzipien. Ihr großer gemeinsamer Vorteil besteht darin, dass sie nach dem Auslösen nur vom Netz genommen und wieder gekühlt werden müssen, bevor sie wieder einsatzbereit sind. Im Gegensatz dazu trennt bei einem konventionellen Strombegrenzer eine Sprengladung zwei Kontakte, sodass ein Monteur notwendig ist, um ihn wieder betriebsbereit zu machen.

Auch im Hinblick auf supraleitende Kabel gibt es inzwischen weltweit zahlreiche Pilotprojekte. So soll ein HTS-Kabel künftig drei bislang komplett getrennte amerikanische Elektrizitätsnetze erstmals verbinden, um den Stromhandel zwischen Ost- und Westküste zu ermöglichen und die Netzstabilität zu erhöhen. In Deutschland denkt RWE derzeit darüber nach, ein ein Kilometer langes Mittelspannungskabel zusammen mit einem supraleitenden Strombegrenzer in Essen zu installieren. Ein supraleitendes Kabel würde es aufgrund



Zenergy Power GmbH

Dieser supraleitende Rotor soll künftig im Generator eines Wasserkraftwerks zum Einsatz kommen.

der geringeren Verluste ermöglichen, die notwendige Leistung mit einem 10-kV-Kabel in die Innenstädte zu bringen statt wie bisher mit 110-kV-Leitungen. Die 110-kV-Schaltstationen könnten dann an den Stadtrand verbannt werden. „Daher ist ein solches Kabel nicht nur technisch machbar, sondern auch ökonomisch sinnvoll“, ist Joachim Bock von Nexans überzeugt. Hinzu kommt der Vorteil, dass es mit supraleitenden Kabeln möglich ist, bei gleichem Platzbedarf mehr Leistung transportieren zu können, was besonders für Ballungsräume wichtig ist. Dies hat ein koreanischer Energieversorger erkannt und bei American Superconductor supraleitende Kabel für den Großraum Seoul bestellt. Bei den deutschen Energieversorgern ist dagegen noch viel Überzeugungsarbeit zu leisten. „Sie haben es mit einer extrem konservativen Klientel zu tun, die in Lebensdauern von 40 oder 60 Jahren denkt.“, erklärt Werner Pruseit deren bisherige Zurückhaltung. Der Physiker ist Vorsitzender des Industrieverbands Supraleitung (ivSupra) und Geschäftsführer von THEVA Dünnschichttechnik. Bisher seien die Energieversorger eben verwöhnt gewesen, weil sie Kupferkabel vergraben und Jahrzehnte liegen lassen konnten. Aber ein intelligentes Netz, das für die Integration einer wachsenden Zahl von Quellen erneuerbarer Energie ohnehin notwendig ist, benötige auch Komponenten wie Computer, die zwangsläufig kürzere Lebenszyklen aufweisen. „Daher muss ein Umdenken stattfinden“, ist Pruseit überzeugt. Das allein reicht aber nicht, denn noch sind die HTS-Leiter viel zu teuer. Wichtigstes Ziel für die Unternehmen ist daher, die einzelnen Prozessschritte für die Herstellung zu optimieren – eine Aufgabe, die weit über die Grundlagenforschung hinausgeht. Diese konzentriert sich inzwischen auf neue Materialien und setzt die von Kamerlingh Onnes begonnene Suche nach höheren Sprungtemperaturen fort, vielleicht gar mit der Hoffnung auf Supraleitung bei Zimmertemperatur. Für die Unternehmen ist dies wiederum kein Thema. „Das ist die Suche nach einer Nadel im Heuhaufen“, sagt Pruseit, „wobei wir gar nicht wissen, ob überhaupt eine drin ist.“

³⁾ Diese werden auch REBCO genannt, falls Yttrium durch andere seltene Erden (*Rare Earth*) ersetzt wird.