

11,50 DM

11,50 sfr

92 öS / 279 Flux / 14 hfl / 279 bfr

Oktober 10/1994

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Mikroskopie: Eine Kombination aus Laser-, Raster- und Konfokaltechnik ermöglicht bestechend scharfe Schnittbilder von biologischen Objekten – und selbst räumliche Ansichten

Wie Zellen
Antigene
bearbeiten

SQUIDS –
supraleitende
Magnetfeld-
sensoren

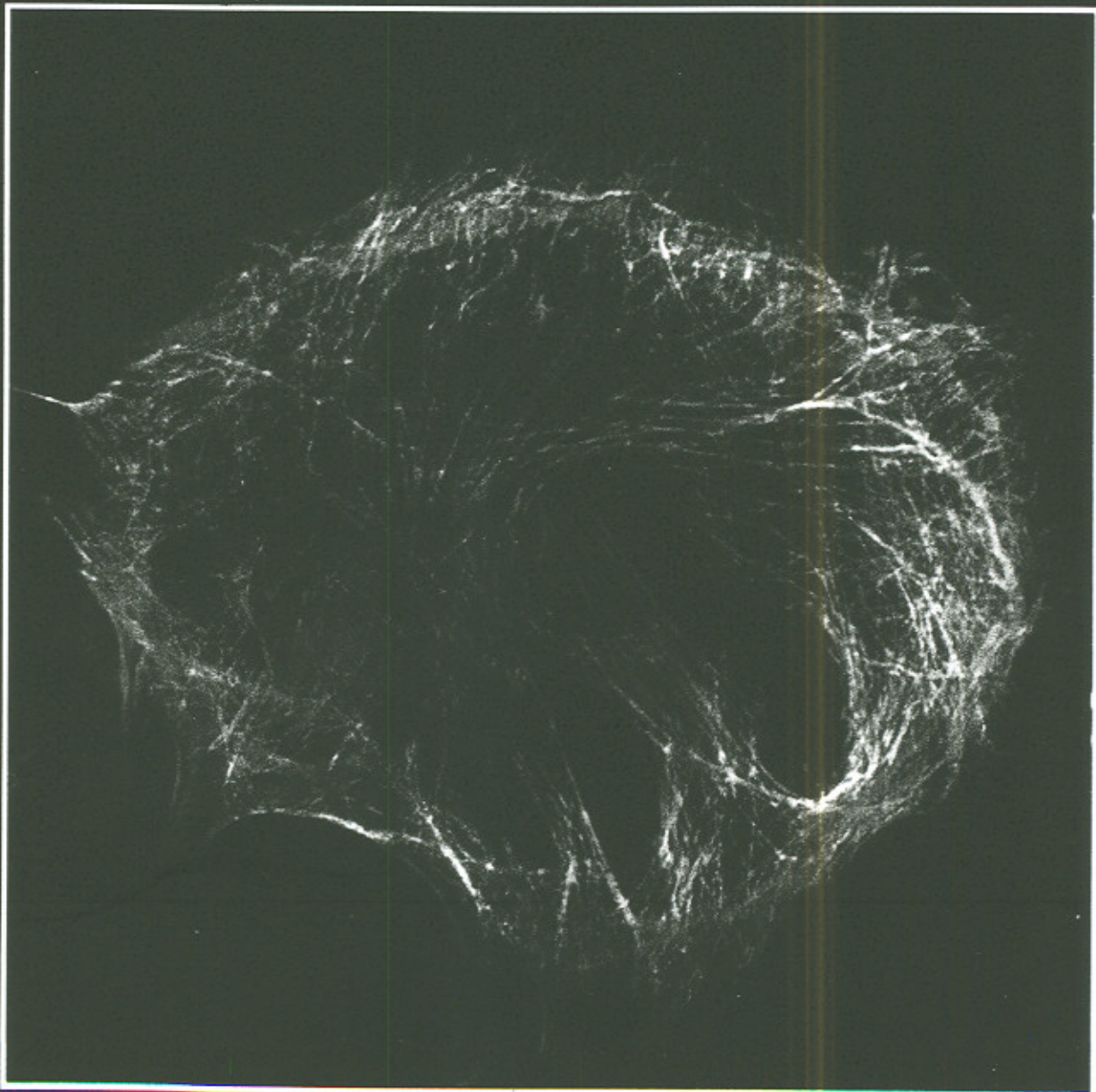
Astronomie
im extremen
Ultraviolett

Reinraum-
technik

Knochenarbeit
in der
Jungsteinzeit

Gifthalgen-
blüten

Entdecker der
Radiowellen:
Heinrich Hertz



Deutsche Ausgabe von
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

D 6179 E

SQUIDS

Die Superconducting Quantum Interference Devices sind höchst empfindliche Magnetfelddetektoren. Der Einsatz der neuen keramischen Hochtemperatur-Supraleiter erschließt ihnen nun weite Anwendungsbereiche – von der Hirntumor-Diagnose bis zur experimentellen Überprüfung der Relativitätstheorie.

Von John Clarke

Ein Feld von Detektoren nahe am Kopf eines an fokaler Epilepsie leidenden Patienten registriert winzige Magnetfeldschwankungen, die durch Vorgänge in seinem Gehirn ausgelöst werden; Ärzte und Medizinphysiker können daraus auf den Ort der Schädigung schließen. Mit einem fünf Tonnen schweren Aluminiumzylinder, bei einer Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt in einer Vakuumkammer erschütterungsfrei aufgehängt, warten Forscher auf die nächste Supernova-Explosion in der kosmischen Nachbarschaft – er soll die davon ausgehenden Gravitationswellen durch winzige Schwingungen und damit verbundene Änderungen eines magnetischen Flusses anzeigen. Im mexikanischen Niederkalifornien zeichnet ein Instrument feine Veränderungen des Erdmagnetfeldes auf, um Quellen geothermischer Energie zu lokalisieren.

Wesentliche Komponente all dieser unterschiedlichen Meßgeräte ist ein SQUID, ein supraleitendes Quanteninterferometer, mit dem sich äußerst geringe Magnetfeldschwankungen registrieren lassen – ihre Nachweisgenauigkeit ist nur durch Quanteneffekte begrenzt. Zwar gibt es diese Technik seit mehr als 30 Jahren, doch initiierte die Entdeckung von Hochtemperatur-Supraleitern gegen Ende der achtziger Jahre eine geradezu sprunghafte Zunahme der Forschungsprojekte, denn damit lassen sich SQUIDS mit flüssigem Stickstoff bei 77 Kelvin (–196 Grad Celsius) betreiben; solche mit konventionellen Supraleitern müssen dagegen mit flüssigem Helium auf Betriebstemperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden.

Ihre einzigartigen Eigenschaften verdanken diese inzwischen mikrominiaturisierten Systeme (Bild 1) verschiedenen quantenmechanischen Effekten, insbesondere dem widerstandslosen Fluß elektrischer Ströme. Im Jahre 1911 hatte der holländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes (1853 bis 1926) dieses Phänomen der Supraleitung bei Quecksilber entdeckt, das mit flüssigem Helium auf 4,2 Kelvin abgekühlt worden war (er erhielt 1913 den Nobelpreis für seine Arbeiten in der Tieftemperaturphysik, insbesondere für das Verfahren der Helium-Verflüssigung). Bald stellte sich heraus, daß zahlreiche weitere Metalle wie Zinn, Blei und Niob – allerdings keine guten Leiter wie Kupfer oder Silber – sowie viele Legierungen bei Abkühlung auf sehr tiefe Temperaturen ebenfalls jeden elektrischen Widerstand verlieren.

Cooper-Paare als Ladungsträger

Die physikalischen Grundlagen der Supraleitung blieben indes lange im dunkeln. Eine richtungsweisende Beschreibung veröffentlichten die Amerikaner John Bardeen, der seinen ersten Nobelpreis 1956 für die Mitentwicklung des Transistors erhalten hatte, Leon N. Cooper und J. Robert Schrieffer im Jahre 1957, für die sie 1972 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden. Kern der nach ihren Urhebern benannten BCS-Theorie ist das sogenannte Cooper-Paar: Zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin und Impuls koppeln zu einem Quasiteilchen, das anderen – vorteilhafteren – Regeln unterliegt.

Die zwischen den Cooper-Elektronen wirkende Anziehungskraft, die größer sein muß als die abstoßende Coulomb-Kraft zwischen den beiden negativen Ladungsträgern, beruht auf einer schwachen Wechselwirkung mit der positiven Ladung der Ionenrümpfe im Supraleiter. (Ionenrümpfe sind Atome des Kristallgitters, die eines oder mehrere ihrer äußeren Elektronen abgegeben haben; diese können sich in dem Festkörper nahezu frei bewegen und leiten elektrischen Strom.) Ein vorbeifliegendes Elektron zieht die Ionen an und verformt so lokal

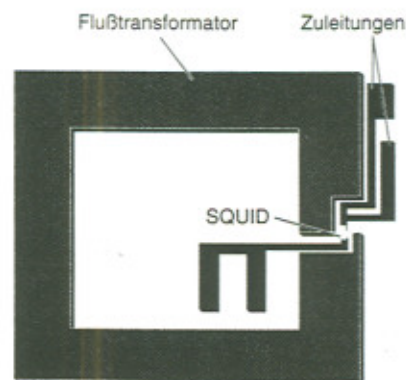
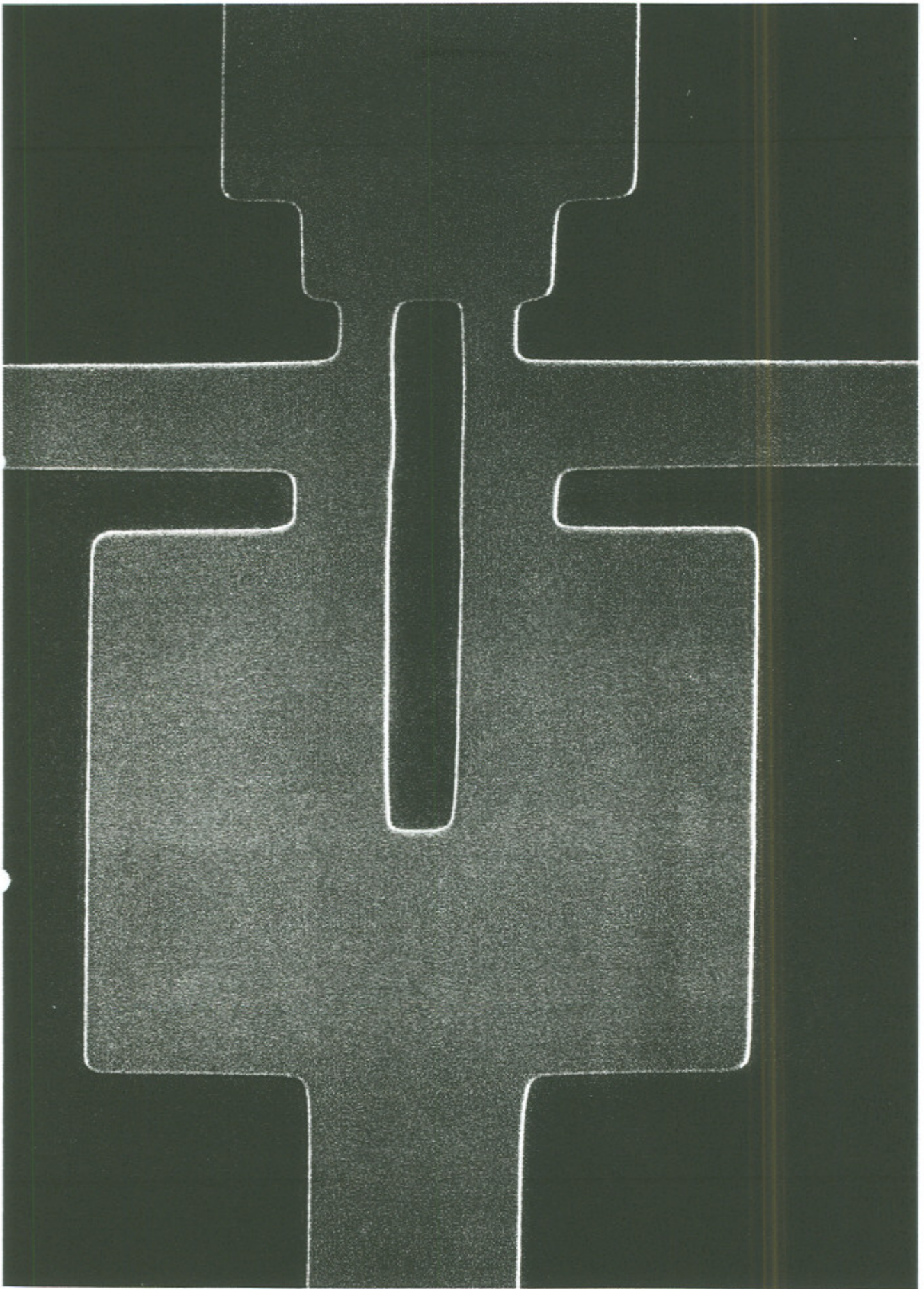


Bild 1: Ein SQUID-Magnetometer wird in eine Schicht eines Hochtemperatur-Supraleiters geätzt. Das SQUID selbst (Photo rechts) ist etwa 30 Mikrometer groß. Die Korngrenzen, die als Josephson-Kontakte dienen (im Bild nicht sichtbar), befinden sich genau oberhalb des waagrecht durch das Bild laufenden Streifens. Das SQUID ist zur Steigerung der Empfindlichkeit zudem mit einer etwa acht Millimeter breiten Sekundärspule gekoppelt (Zeichnung).



das Gitter, das aufgrund seiner Trägheit erst dann in seine Ausgangslage zurückschwingt, wenn das Elektron schon etwa 100 Nanometer weit entfernt ist. Somit bleibt einerseits kurzfristig ein Gebiet erhöhter positiver Ladung erhalten, das attraktiv auf ein zweites, in der Nähe befindliches Elektron wirkt, andererseits aber stoßen sich die beiden negativen Ladungsträger auf diese Entfernung nur noch schwach ab.

Die Energie der so vom Gitter vermittelten Bindung von Cooper-Elektronen beträgt in der Regel lediglich ein Millielektronenvolt. Bei höheren Temperaturen und damit größeren Gitterschwingungen ebenso wie bei kritischen Magnetfeld- oder Stromstärken werden die Cooper-Paare wieder getrennt. Diese Kopplung mit dem Gitter ist auch der Grund dafür, daß Metalle wie Kupfer oder Silber nicht supraleitend werden: Ihre schon bei normalen Umgebungstemperaturen gute elektrische Leitfähigkeit ist auf einer minimalen Wechselwirkung der freien Elektronen mit dem Gitter begründet.

In gewöhnlichen Leitern lenken Verunreinigungen, Gitterfehler und vor allem Gitterschwingungen einzelne Elektronen von ihrer Bahn ab; diese Streuung verbraucht Bewegungsenergie und macht sich darum als elektrischer Widerstand bemerkbar. Warum geschieht dies nicht im Supraleiter?

Verlustfreier Strom ist nur mit dem Instrumentarium der Quantenmechanik zu erklären. Ein wichtiges Werkzeug theoretischer Physiker sind Wellenfunktionen, die Teilchensysteme aufgrund der Dualität von Teilchen und Welle durch ihre Amplitude und Phase beschreiben; eine Folge davon ist, daß ein solches System sich nur in diskreten Energiezuständen befinden kann.

Nun sind Cooper-Paare Quasiteilchen mit ganzzahligem Spin, die nicht mehr den Regeln unterliegen, die für Elektronen (Teilchen mit halbzahligem Spin) gelten: Zwar sind sie wie diese ununterscheidbar, doch es dürfen sich beliebig viele in einem einzigen Energiezustand befinden (Elektronen müssen nach dem Pauli-Prinzip in mindestens einer Quantenzahl verschieden sein; somit besetzen maximal zwei dasselbe Energieniveau). Die Gesamtheit der Cooper-Paare im Gitter läßt sich deshalb durch eine einzige Wellenfunktion beschreiben. Zudem setzt die Kopplung einen Teil der kinetischen Energie der Elektronen in Bindungsenergie um; dadurch befinden sich alle Cooper-Paare in einem gemeinsamen, tiefer gelegenen Energieniveau. Für potentielle Streuzentren im Gitter existiert dann statt einzelner Paare oder gar

Elektronen nur mehr ein Kontinuum, das sich erst mit entsprechend größerem Energieaufwand auf ein höheres Niveau heben ließe; diese Energiedifferenz entspricht derjenigen, die zur Spaltung der Cooper-Paare benötigt wird, und ist größer als jede durch Gitterstreuung vermittelbare. Weil somit keine Energie durch Stoßprozesse verlorengehen kann, ist der Stromfluß verlustfrei.

Der Josephson-Kontakt

Dieses Modell ermöglichte dem englischen Physiker Brian D. Josephson, den heute nach ihm benannten Effekt vorherzusagen; er erhielt dafür 1973 den Nobelpreis. Als Student an der Universität Cambridge untersuchte er 1962 zwei Supraleiter, die durch eine etwa einen Nanometer dünne Schicht isolierenden Materials getrennt waren. An sich sollte sie eine Barriere für den Stromfluß bilden. Die zu den Cooper-Paaren gehörenden quantenmechanischen Wellenfunktionen reichen jedoch, wie Josephson überlegte, von beiden Seiten in diese verbotene Zone hinein und können – wenn die Barriere nicht zu dick ist – sogar einander überlagern. Aus der Sicht des Teilchen-

modells bedeutet das, daß die Cooper-Paare die Isolierschicht zu durchtunneln vermögen. Somit sind die beiden Supraleiter schwach gekoppelt, und die Barriere – der sogenannte Josephson-Kontakt (Bild 2) – verhält sich sozusagen wie ein schwacher Supraleiter.

Der Strom, der sich einstellt, ergibt sich aus der Interferenz der beiden Wellenfunktionen: Er ist maximal gleich dem Strom, der ohne zusätzlich angelegte Spannung auftritt, reduziert nur durch die feste Phasendifferenz. Dabei gibt es keine zeitliche Veränderung, und der Strom im Josephson-Kontakt ist konstant; man spricht darum vom Josephson-Gleichstrom. Seine Existenz haben Philip W. Anderson und John M. Rowell an den AT&T Bell-Laboratorien in Murray Hill (New Jersey) schon Monate nach Josephsons Untersuchung experimentell bestätigt.

Überschreitet der Ladungsfluß in der Kontaktschicht aber aufgrund einer entsprechend hohen angelegten Spannung einen maximalen Wert, verändert sich die Phasendifferenz mit der Zeit, und der Tunnelstrom beginnt schließlich zu oszillieren. Die Frequenz dieses Josephson-Wechselstroms ist direkt von der angelegten Spannung abhängig. Hingegen

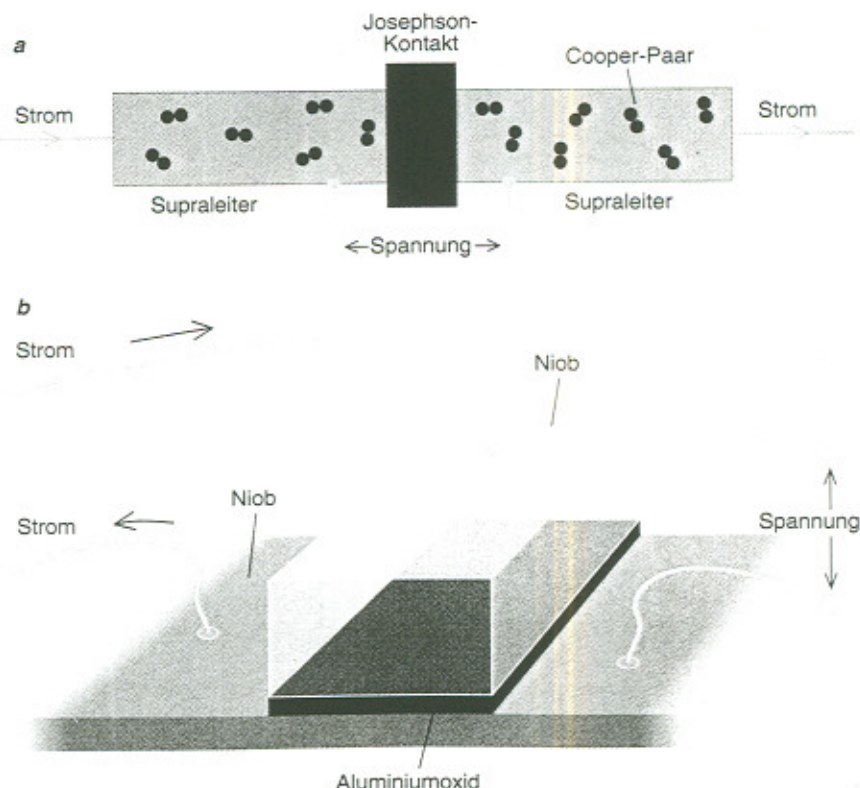


Bild 2: Ein Josephson-Kontakt besteht aus einer Isolierschicht zwischen zwei Supraleitern (a); Cooper-Paare können sie aufgrund des Tunneleffekts durchdringen. In einer Realisierung (b) wirkt ein Aluminium-

oxidfilm als Isolator zwischen zwei Niobschichten. Dieses Sandwich wächst auf einem Siliziumsubstrat auf und wird so weiterverarbeitet, daß wenige Mikrometer dünne Josephson-Kontakte entstehen.

induzieren Mikrowellen einer definierten Frequenz im Kontakt eine Spannung, die sprunghaft jeweils um ein Vielfaches der eingestrahlten Frequenz wächst. Eichinstitute verwenden diesen Effekt deshalb zur Definition des Normalvolts.

Da Josephson-Kontakte innerhalb von nur ein oder zwei Pikosekunden (dem Millionstel einer Millionstel Sekunde) vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand wechseln können, verspricht man sich schon bald auch Anwendungen in der Mikroelektronik. Dafür war die Technik aber noch nicht reif. Erst neuerdings nutzt man solche Kontakte in Prototypen superschneller digitaler Bauelemente wie logischen Schaltungen, Schieberegistern und Analog-Digital-Wandlern.

Ein digitales Magnetometer

Die heute wohl bekannteste Anwendungen aber sind die SQUIDs (siehe Kästen auf dieser Seite). Ihnen liegt noch als drittes quantenmechanisches Phänomen die Flußquantisierung zugrunde. Gemeinhin erwartet man, daß sich Quantisierung nur in atomaren Größenordnungen bemerkbar mache; ein Beispiel sind die diskreten Energiezustände der Elektronen im Atom. Sie zeigt sich indes auch auf makroskopischer Ebene bei supraleitenden Ringen – eine direkte Folge der gemeinsamen und damit quasi makroskopischen Wellenfunktion aller Cooper-Paare.

Angenommen, in einem solchen Ring fließt ein Strom, etwa induziert von einem äußeren Magnetfeld. Wie bei einer Spule erzeugt dieser Suprastrom wieder ein Magnetfeld; dies ist dem äußeren dem Betrage nach gleich, in der Richtung aber entgegengesetzt, so daß es kompensatorisch wirkt und das Innere eines Supraleiters weitgehend feldfrei bleibt.

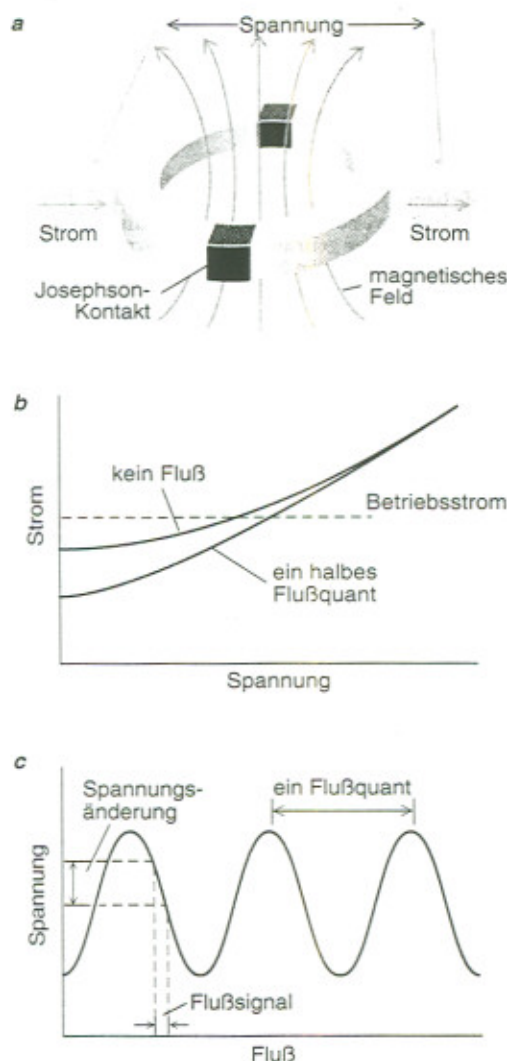
Schaltet man das äußere Feld ab, bleibt der induzierte Strom aufgrund der Supraleitung erhalten, und das zugehörige Magnetfeld ist sozusagen eingefroren. Das Produkt von Magnetfeld und der vom Ring eingeschlossenen Fläche – der magnetische Fluß – kann aber nicht beliebige Werte annehmen, sondern muß immer ein ganzzahliges Vielfaches einer Größe betragen, die man als Flußquant bezeichnet. Es entspricht etwa dem Fluß des Erdmagnetfelds (ungefähr 0,000 05 Tesla) durch ein etwa sieben Mikrometer großes rotes Blutkörperchen, ist also extrem klein.

Ein Gleichstrom-SQUID kombiniert zwei Josephson-Kontakte, die einen supraleitenden Ring bilden; es fließt Jo-

Ein solches Meßgerät besteht aus zwei parallelen Josephson-Kontakten auf einem supraleitenden Ring (a). Ein an das SQUID angelegter Strom fließt durch beide Kontakte. Überschreitet dieser Strom einen kritischen Wert, wird eine Spannung induziert. Trägt man beide gegeneinander auf, erhält man charakteristische Kennlinien (b).

Dieser Strom erzeugt infolge der gemeinsamen Wellenfunktion aller Cooper-Paare im Supraleiter ein gequanteltes Magnetfeld. Erhöht man den magnetischen Fluß durch den Ring kontinuierlich (beispielsweise durch Annäherung eines kleinen Magneten), verändert dies die Phasenbeziehung zwischen den beiden Supraleitern. Die in den Kontakten interferierenden Wellenfunktionen überlagern sich dann derart, daß Intensitätsmaxima und -minima auftreten. Die Überlagerung ergibt ein Interferenzmuster ganz analog dem, das hinter einem beleuchteten Doppelspalt auftritt: Wie dort die Lichtintensität schwingen hier Strom und Spannung. Er ist maximal, wenn ein ganzzahliges Vielfaches des Flußquants durch die Kontakte tritt, beispielsweise wenn der Fluß verschwindet, und minimal bei halbzahligen Vielfachen. Dementsprechend gibt die Schwingungsperiode gerade ein Flußquant an (c).

Das Gleichstrom-SQUID



sephson-Gleichstrom. Das SQUID wird betrieben, indem man zusätzlich von außen Strom anlegt, dabei aber deutlich unter der Grenze bleibt, ab der Josephson-Wechselstrom auftritt. Infolgedessen tunneln mehr Cooper-Paare durch die Josephson-Kontakte. Ein von außen angelegtes Magnetfeld verändert wiederum diesen Elektronenfluß, indem es die Phasendifferenz zwischen den beiden Kontakten beeinflusst. Dies wirkt sich auf den maximalen Strom aus. Bei gleichmäßiger Verstärkung oder Abschwächung des Magnetfeldes schwankt auch er zwischen einem Maximal- und einem Minimalwert. Der Höchstwert wird erreicht, wenn der Fluß im SQUID gleich einer ganzen Zahl von Flußquanten durch den Ring ist, das Minimum bei halbzahligen Vielfachen. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen magnetischen Fluß durch

einen rein supraleitenden Ring kann der durch ein SQUID jeden beliebigen Wert annehmen, weil das Magnetfeld über die Kontakte in den Ring einzutreten vermag und sich die Gesamtwellenfunktion damit ändert.

In der Praxis messen wir nicht den Strom, sondern die am SQUID anliegende, ebenfalls in ihrer Amplitude schwankende Spannung. Dieser Quanteninterferenzeffekt könnte für ein digitales Magnetometer genutzt werden, das jedes Flußquant als ein Bit darstellt. Mit weiter unten beschriebenen Techniken ist es schon mit konventioneller Ausleselektronik möglich, Magnetfeldänderungen zu messen, die kleiner als ein Millionstel eines Flußquants sind. Das SQUID ist vor allem ein Fluß-Spannung-Wandler.

Während meines Studiums in Cambridge schlug mir mein Betreuer Brian

Pippard vor, ein SQUID zur Entwicklung eines hochempfindlichen Voltmeters zu verwenden. Damals waren die Verfahren zur Herstellung von Josephson-Kontakten noch keineswegs ausgereift und kaum zur Herstellung von Instrumenten geeignet. Anfang 1965 besprach ich die-

ses Problem beim traditionellen Nachmittagstee im Cavendish-Laboratorium mit meinem Kommilitonen Paul C. Wraight. Er schlug vor, einen Klecks geschmolzenen Lots (einer Legierung aus Blei und Zinn, die in flüssigem Helium supraleitend wird) auf einen Niob-Draht

aufzubringen, was möglicherweise einen Josephson-Kontakt ergäbe: Die Niob-Oberfläche sei normalerweise mit einer Oxidschicht überzogen, die sich vielleicht als Tunnelbarriere eigne.

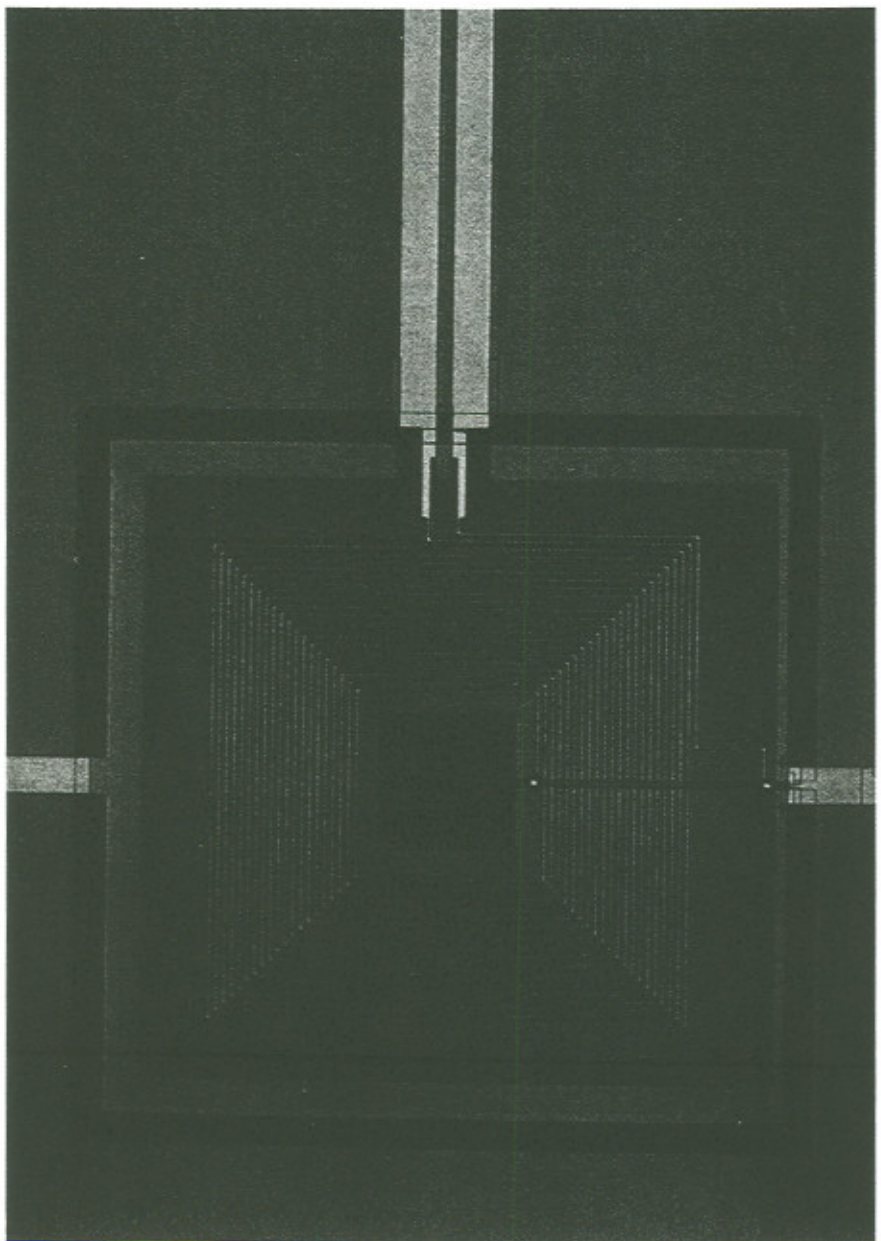
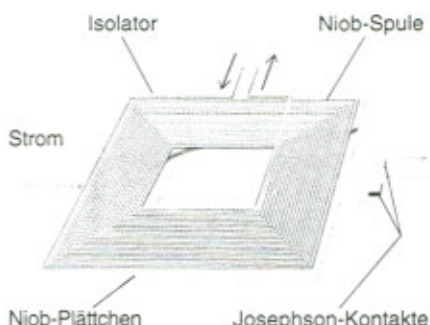
Wir eilten zurück ins Labor, baten einen Kollegen um ein paar Zentimeter Niob-Draht, tropften geschmolzenes Lot darauf, schlossen einige Leitungsdrähte an und kühlten das simple Modell mit flüssigem Helium. Wie wir gehofft hatten, trat der Josephson-Tunneleffekt auf.

Der Umstand, daß Wraights Idee gleich beim ersten Mal funktioniert hatte, war entscheidend. Anderenfalls hätten wir uns wohl kaum die Mühe gemacht, den primitiven Versuch zu wiederholen. Wir taufte unseren Baustein supraleitendes Niedriginduktions-Wellengalvanometer, kurz SLUG (*superconducting low-inductance undulatory galvanometer*). Später stellte ich ein Voltmeter her, mit dem sich noch zehn Femtovolt (10^{-14} Volt) messen ließen – es war hunderttausendfach empfindlicher als herkömmliche Halbleiter-Voltmeter.

Inzwischen ist die Entwicklung von Quanteninterferenz-Sensoren rasant fortgeschritten. Die meisten modernen Gleichstrom-SQUIDs basieren auf einem Entwurf von Mark B. Ketchen und Jeffrey M. Jaycox vom Thomas-J.-Watson-Forschungszentrum der IBM in Yorktown Heights (New York). Sie bestehen aus mehreren Schichten dünner Filme, die auf Siliciumplättchen aufgebracht werden. Die eigentlichen Schaltelemente werden mit den in der Halbleiterindustrie gängigen Verfahren photolithographisch belichtet und ausgeätzt. Auf diese Weise können bis zu 400 SQUIDs auf einer zehn Zentimeter großen Siliciumscheibe untergebracht werden, die anschließend in einzelne Chips zerteilt wird. Auf jedem bildet ein quadratisches Niob-Plättchen mit zwei Josephson-Tunnelkontakten ein SQUID. Die Tunnelbarrieren bestehen aus Aluminiumoxid, einem elektrischen Isolator, der auf eine der Niobschichten aufwächst (Bilder 1 und 3).

Wie empfindlich ist ein solches SQUID? Ein geeignetes Kriterium ist die Energie der kleinsten pro Sekunde nachweisbaren Magnetfeldänderung: in der Regel etwa 10^{-32} Joule. Dieser kaum vorstellbare winzige Wert entspricht ungefähr derjenigen mechanischen Energie, die erforderlich ist, um ein einzelnes Elektron im Schwerfeld der Erde einen Millimeter hochzuheben. Die besten jemals hergestellten SQUIDs sind sogar noch hundertfach empfindlicher und nähern sich der natürlichen, durch die Heisenbergsche Unschärferelation definierten Grenze der überhaupt erreichbaren Meßgenauigkeit.

Bild 3: Ein Gleichstrom-SQUID aus herkömmlichem supraleitendem Material wird typischerweise mit flüssigem Helium betrieben. In seiner gebräuchlichsten Form besteht es aus mehreren Schichten dünner Filme, wobei ein quadratisches Niobplättchen den Rumpf bildet (oben). Ein Josephson-Kontakt befindet sich auf jeder Seite des Schlitzes, der am rechten Rand des Plättchens zu sehen ist. Eine Niobspule mit 20 Windungen ist auf eine isolierende Schicht aufgebracht; die beiden Leitungen oben in der Aufnahme sind die elektrischen Kontakte dieser Spule nach außen.



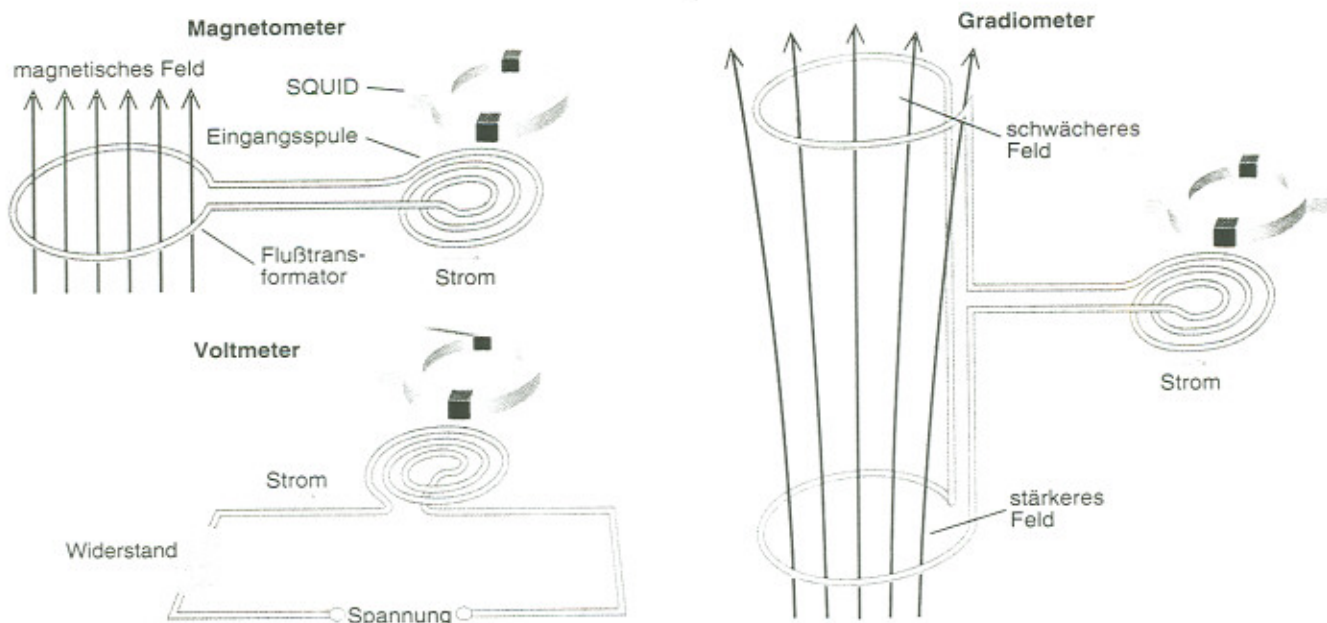


Bild 4: Instrumente mit SQUIDs benötigen gewöhnlich Hilfskomponenten. So ist bei einem Magnetometer die Eingangsspule mit einer als Flußtransformator wirkenden Sekundärspule verbunden. Ein angelegtes Magnetfeld erzeugt darin einen Dauerstrom; dieser fließt zur Eingangsspule und erzeugt im SQUID einen magnetischen Fluß. Eine Kombination aus zwei entgegengesetzt gewickelten Sekundärspulen ergibt ein Gradiometer, mit dem sich

ein Magnetfeld gleichzeitig an verschiedenen Stellen messen läßt. Mithin wird so das gleichförmige Hintergrundrauschen unterdrückt, denn im SQUID entsteht ein magnetischer Fluß nur dann, wenn das Feld an den beiden Meßpunkten ungleich ist. Bei einem SQUID-Voltmeter erzeugt eine Eingangsspannung einen Strom; das Produkt dieses Meßwerts mit dem Wert des Widerstands, der mit der Eingangsspule verbunden ist, ergibt den Spannungswert.

Es sollte erwähnt werden, daß erste SQUIDs nur einen Kontakt hatten und mit einem elektrischen Schwingkreis gekoppelt waren; dieser wurde mit einem hochfrequenten Wechselstrom betrieben. Er erzeugte ein Magnetfeld, das den zu messenden Feldänderungen immer entgegengesetzt war und so dessen Wirkungen auf den Josephson-Kontakt meßbar machte. Man bezeichnet diese Sensoren als Hochfrequenz-SQUIDs, weil sie durch einen im Megahertz-Bereich oszillierenden Fluß betrieben werden.

Diese Version kam deshalb vor dem generell empfindlicheren Gleichstrom-SQUID auf den Markt, weil die Kontakte früher teilweise mechanisch hergestellt werden mußten: Man überzog einen Supraleiter mit einer dünnen Isolatorschicht und schraubte den anderen dagegen, bis er sich fast durch die Schicht gebohrt hatte. Dabei war viel Glück und Geschicklichkeit im Spiel, und zwei Kontakte gleichzeitig gelangen äußerst selten. Dank den Fortschritten in der Dünnschichttechnik lassen sich jedoch heute Kontakte in großer Zahl zuverlässig fertigen; folglich sind die meisten Geräte inzwischen vom Gleichstrom-Typ.

Zusätzliche Komponenten

Um die außergewöhnliche Empfindlichkeit zu nutzen, werden die Instrumente in der Regel mit einem Eingangs-

kreis gekoppelt (Bild 4). Bei Magnetometern kann dies die Meßgenauigkeit um das Hundertfache steigern. Er wird daher als Flußtransformator bezeichnet; dieser besteht aus einem Ring supraleitender Materials, der mit einem SQUID gekoppelt ist; er steigert die Feldempfindlichkeit, weil die Spule ein weitaus größeres Gebiet umschließt. Ein äußeres Magnetfeld läßt dort einen permanenten Suprastrom zirkulieren, der wiederum im SQUID einen Fluß induziert. So kann man eine Auflösung im Femtotesla-Bereich (10^{-15} Tesla) erreichen, was etwa einem Hundertmilliardstel des Erdmagnetfeldes entspricht.

Eine andere Variante ist das Gradiometer, das die Differenz (den Gradienten) zwischen Magnetfeldwerten verschiedener Orte mißt. Dafür verwendet man beispielsweise zwei flußtransformierende Spulen, die mit entgegengesetzter Orientierung gewickelt sind, oder zwei benachbarte Magnetometer, deren Ausgangssignale elektronisch voneinander abgezogen werden. Diese Methode ist besonders dann vorteilhaft, wenn mit Anordnungen vieler Magnetometer gearbeitet wird. Robert H. Koch und seine Kollegen am Thomas-J.-Watson-Forschungszentrum haben auch ein sogenanntes Drei-SQUID-Gradiometer entwickelt, bei dem das Signal des einen Magnetometerkanals das magnetische Umgebungsrauschen der beiden anderen aufhebt.

Medizinische Anwendungen konventioneller SQUIDs

Die Messung von Magnetfeldgradienten eignet sich besonders für die medizinische Diagnostik: Die im Körper fließenden elektrischen Ströme erzeugen vielerlei magnetische Felder, die sich rasch ändern. Ihre Stärke reicht von wenigen Femtotesla beim Gehirn bis zu 50 000 Femtotesla beim Herzen (Bild 5).

Vor der Entwicklung von SQUID-Meßgeräten konnte man solch schwache Signale gar nicht aufnehmen. Zudem werden die Magnetfeldänderungen des Körpers durch Fluktuationen im Magnetfeld der Erde, magnetisches Hintergrundrauschen etwa von Fahrstühlen und Autos und insbesondere durch das 50-Hertz-Netzbrummen überdeckt. SQUID-Gradiometer sind dagegen weitgehend unempfindlich, weil sich diese Rausquellen gewöhnlich in einiger Entfernung vom Patienten befinden und nahezu homogene Felder erzeugen.

In der Praxis zeichnet eine Anordnung von SQUID-Sensoren die räumlichen Veränderungen der vom Körper erzeugten Magnetfelder auf. Aus dieser Konturkarte kann ein Computer berechnen, aus welchen Körperregionen die Signale stammen. Das Verfahren belastet den Patienten nicht. Während der letzten zwanzig Jahre hat sich die Zahl der SQUIDs in solchen Anordnungen von sieben auf mehr als hundert erhöht; und kürzlich

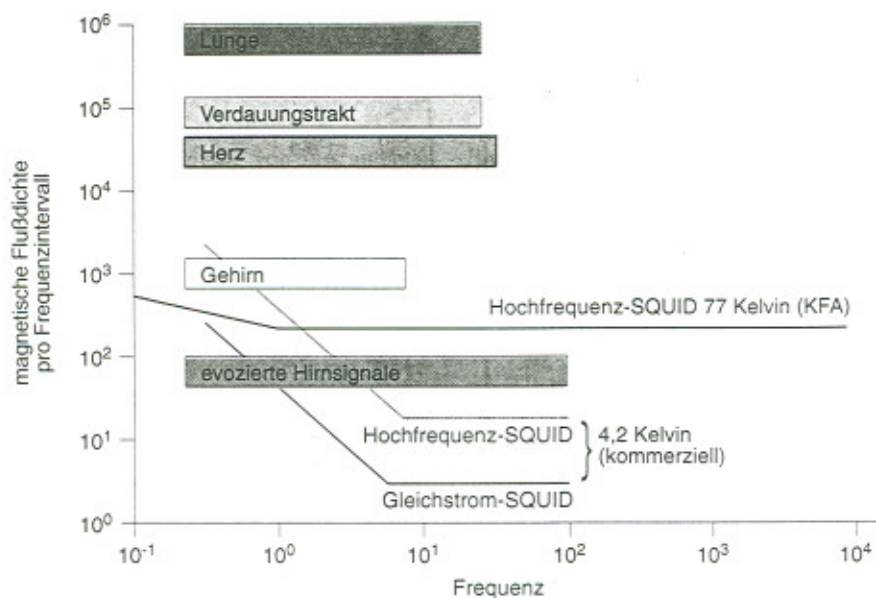


Bild 5: Die hohe Empfindlichkeit von SQUIDs für die Änderung von Magnetfeldern wird sie vermutlich zu einem wertvollen diagnostischen Werkzeug in der Medizin machen. Wie die Graphik zeigt, übersteigt die Grenzemfindlichkeit von Hochtemperatur-SQUIDs – hier eine Entwicklung des Forschungszentrums Jülich – die

Maximalamplituden magnetischer Herzsignale um mehr als zwei Größenordnungen. Geht man zu kommerziellen Supraleitern über, sind sogar evozierte Hirnpotentiale sehr gut meßbar. (Die magnetische Flußdichte ist in Femtotesla, das Frequenzintervall als Quadratwurzel von einem Hertz und die Frequenz in Hertz angegeben.)

hat das Labor für Supraleitsensoren in Inzai Chiba (Japan) sogar den Prototyp eines Systems mit insgesamt 250 Kanälen angekündigt.

Solche Instrumente liefern dem Mediziner entscheidende Informationen über eine Reihe von Krankheiten. Bei Patienten mit fokaler Epilepsie etwa werden die Anfälle von einer eng begrenzten elektrischen Entladung im Gehirn ausgelöst, die sich durch Messung der Magnetfeldänderungen lokalisieren läßt (Magnetoenzephalographie). Indem man diese Daten mit einer Kernspinresonanz-Aufnahme überlagert (Bild 7), sucht man als Quelle der Entladung beispielsweise eine Anomalie auszumachen. Handelt es sich etwa um Narbengewebe, läßt es sich unter günstigen Umständen strahlentherapeutisch zerstören.

Es ist auch möglich, ein magnetisches Signal als Reaktion auf einen bestimmten Reiz auszulösen. So zeichnen Eugene C. Hirschko von der Firma Biometric Technologies in San Diego und Christopher C. Gallen vom Scripps-Forschungsinstitut, La Jolla (Kalifornien), mit einem aus 74 Kanälen bestehenden SQUID-System auf, wie die Hirnrinde in der Umgebung eines Tumors auf Berührungssreize reagiert.

Eine andere medizinische Anwendung von beträchtlichem Interesse ist die Herz-Diagnostik. Herzrhythmusstörungen sind die Folge von Fehlschaltungen elektrischer Leitungswege und können in

schweren Fällen tödlich ausgehen. Zur Therapie mittels einer gezielten elektrischen Entladung müssen diese Erregungsleitungen lokalisiert werden, was häufig eine aufwendige Untersuchung mit einem oder mehreren Kathetern erfordert. Verschiedene Arbeitsgruppen, darunter die um Gerhard Stroink von der Dalhousie-Universität in Halifax (Kanada) sowie Wissenschaftler der Firma Siemens in Erlangen und von der Universität Erlangen-Nürnberg, haben gezeigt, daß der Angriffspunkt mit SQUIDs genau bestimmt und die Störungsursache so wesentlich schneller als mit herkömmlichen Methoden ausgeschaltet werden kann.

Eine interessante Weiterentwicklung dieses Verfahrens könnte die vorgeburtliche Diagnostik von Herzfehlern verbessern. Die Gesundheit des Ungeborenen beurteilt man unter anderem anhand von Schwankungen der Herzfrequenz. Solche Elektrokardiogramme können allerdings nur bis zum siebten oder achten Schwangerschaftsmonat aufgenommen werden; danach verliert das Signal an Stärke, weil das Kind dann von der Mutter elektrisch zunehmend isoliert ist. Davon werden jedoch Magnetokardiogramme nicht beeinträchtigt. Ihre viel höhere räumliche Auflösung erleichtert zudem, die Signale des Fötus und der Mutter zu unterscheiden.

Trotz der eindrucksvollen Ergebnisse biomagnetischer Messungen konnten

sich Vielkanalgeräte und darauf basierende Verfahren wegen ihrer hohen Kosten und ihres teilweise noch experimentellen Charakters bisher nicht allgemein durchsetzen. So hat die Lokalisierung eines Epilepsie-Herdes mit SQUIDs zwar den Vorteil, nichtinvasiv zu sein, während herkömmlich die Schädeldecke über der vermutlich verantwortlichen Hirnregion entfernt werden muß, um Meßelektroden auf der Hirnhaut zu platzieren. Das belastet den Patienten, birgt Infektionsrisiken und ist mit hohen Kosten verbunden. Derzeit werden beide Verfahren aber noch parallel angewendet, um die neue Methode zu beurteilen und zu einem Standarddiagnoseverfahren weiterzuentwickeln. In den USA sind sich manche Krankenversicherungen des kostensenkenden Potentials biomagnetischer Messungen bereits bewußt: Acht Gesellschaften haben die Finanzierung einer präoperativen Untersuchung von Gehirntumoren am Scripps-Forschungsinstitut übernommen. Medizinische Verfahren auf der Grundlage von SQUIDs werden in den USA möglicherweise noch in diesem Jahr zur Abrechnung ohne vorherigen Antrag zugelassen.

Diese Sensoren spielen aber auch in zahlreichen nichtmedizinischen Anwendungen eine bedeutende Rolle, und zwar sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der gewöhnlichen Meßtechnik. Mit ihrer Hilfe wurde kürzlich eine Obergrenze für die Masse des Photons bestimmt (sofern es überhaupt eine Masse hat, was nach der Standardtheorie nicht der Fall ist). Die Meßdaten lassen darauf schließen, daß sie nicht größer als 10^{-46} Gramm sein kann. Dies ist der bislang genaueste in einem Tieftemperatur-experiment ermittelte Wert.

Eine weitere wichtige Anwendung finden SQUIDs bei Versuchen, Gravitationswellen nachzuweisen. Der Relativitätstheorie zufolge ist das Universum von solchen Wellen – Verzerrungen der Raumzeit – erfüllt. Demnach erzeugen Schwarze Löcher, kollabierende Sterne und andere extreme Bewegungen dichter kosmischer Objekte Wellen, die sich in alle Richtungen durch den Raum ausbreiten. Sie sollen mit riesigen Metallzylindern aufgespürt werden, von denen man erwartet, daß sie beim Durchgang von Gravitationswellen in Längsschwingungen versetzt werden. Die erwarteten Auslenkungen wären zwar kleiner als ein Atomdurchmesser, doch würden sie sich beispielsweise einem Metallplättchen mitteilen, das an einem Zylinderende angebracht ist (Stab und Plättchen haben die gleiche Resonanzfrequenz). Auf diesem Plättchen ist ein Magnet angebracht,

und ein SQUID würde die Bewegung als eine Flußänderung mit einer Auflösung von 10^{-18} Metern nachweisen – dies entspricht etwa der 0,001fachen Größe eines Atomkerns.

Weltweit werden mehrere solcher Gravitationswellen-Antennen betrieben, bislang allerdings ohne einen Nachweis. Die nächste Generation solcher Detektoren, die möglicherweise noch um zwei Größenordnungen empfindlicher sein wird, könnte sich jedoch als erfolgreicher erweisen.

Das vermutlich verbreitetste SQUID-Instrument ist ein hochentwickeltes Suszeptibilitätsmeßgerät. Es wird von der

Firma Quantum Design in San Diego hergestellt und ermöglicht die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Materialproben in einem Temperaturbereich von wenigen Kelvin bis über Zimmertemperatur. Hunderte solcher Geräte stehen an den Arbeitsplätzen von Physikern, Chemikern, Materialwissenschaftlern und Biologen.

Hochtemperatur-SQUIDs

Obwohl ihre Nützlichkeit schon seit vielen Jahren erwiesen ist, hat das Interesse an SQUIDs erst in jüngerer Zeit dra-

stisch zugenommen. Anlaß war die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung durch Johannes Georg Bednorz und Karl Alex Müller vom IBM-Forschungslaboratorium in Zürich (sie erhielten 1987 den Nobelpreis; es war der vierte, der auf diesem Gebiet vergeben wurde). In kurzer Zeit erreichten andere Wissenschaftler immer höhere Sprungtemperaturen bis mehr als 100 Kelvin (-173 Grad Celsius).

Die Massenmedien feierten diesen Durchbruch als wissenschaftliche Revolution, die Milliardenengeschäfte ermöglichen. Indes braucht der Fortschritt wie bei allen wissenschaftlichen Neuerungen seine Zeit, und SQUIDs sind seit kurzem die ersten auf dem Markt erhältlichen Geräte mit keramischen Hochtemperatur-Supraleitern (Spektrum der Wissenschaft, April 1989, Seite 50, insbesondere Seiten 57 folgende, sowie September 1989, Seite 32, April 1993, Seite 46, und November 1993, Seite 94).

Anders als die meisten konventionellen Supraleiter haben die keramischen einen komplexen Schichtaufbau. Für Bauteile wie SQUIDs verwendet man in der Regel ein Oxid von Yttrium, Barium und Kupfer; seine chemische Formel ist $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, wobei x etwa 0,15 ist. Diese Substanz ist unter dem Kürzel YBCO bekannt. Ihre Sprungtemperatur beträgt etwa 90 Kelvin, so daß sie in flüssigem Stickstoff supraleitend wird. Der Mechanismus der Supraleitung ist in diesem Falle noch nicht erklärt; selbst die Existenz von Cooper-Paaren ist nicht schlüssig nachgewiesen.

Als keramische Werkstoffe sind die neuen Supraleiter spröde und schwierig zu verarbeiten. Drähte aus diesem Material können nicht ohne weiteres wie solche aus metallischen Tieftemperatur-Supraleitern in die gewünschte Form gebogen werden. Statt dessen stellt man daraus dünne Filme her.

Dabei hat sich besonders das Aufdampfen mit Hilfe eines gepulsten Excimerlasers hoher Leistung bewährt – unter anderem deswegen, weil das Verfahren verhältnismäßig schnell ist. Die Strahlung liegt im ultravioletten Bereich des Spektrums; eine typische Wellenlänge ist 248 Nanometer (Millionstel Millimeter). Die Laser-Pulse treffen in einer Sauerstoffkammer auf eine rotierende YBCO-Probe. Jeder Puls verdampft eine kleine Menge des Materials, die als rosafarbenes Wölkchen aufsteigt und sich dann auf einem in der Nähe befindlichen, 800 Grad Celsius heißen Silicium-Wafer niederschlägt. Die entstehende Schicht wächst mit der gewünschten chemischen Zusammensetzung epitaktisch auf, das heißt, sie nimmt die Kristallstruktur des



Bild 6: Ausschnitt des Porträts von George Washington auf der Ein-Dollar-Banknote, aufgenommen mit einem Hochtemperatur-

SQUID, das über den Geldschein geführt wurde. Die Druckfarbenpartikel verursachen meßbare Magnetfeldänderungen.

Substrats an (siehe Kasten auf dieser Seite).

Um Josephson-Kontakte auf dem Wafer herzustellen, wurde eine Vielzahl raffinierter Hochtemperatur-Verbindungsverfahren entwickelt. Duane Dimos und seine Mitarbeiter am Thomas-J.-Watson-Zentrum von IBM beginnen mit einem Kristall, gewöhnlich Strontiumtitanat, der auseinander geschnitten und ungeordnet wieder zusammengesetzt wird, um eine Fehlorientierung der Kristallachsen entlang einer Linie zu erreichen; diese Versetzungen werden Korngrenzen genannt. Wenn der YBCO-Film epitaktisch auf dem Substrat wächst, macht er gleichsam den abrupten Wechsel der Kristallorientierung mit. Die Korngrenze verringert aber die Supraleitfähigkeit des YBCOs beträchtlich, das sich deshalb an dieser Stelle wie ein Josephson-Kontakt verhält. Eine andere erfolgreiche Metho-

de ist, epitaktisch ein Sandwich aus einer dünnen Schicht normalleitenden Materials zwischen zwei Supraleitern herzustellen.

Hochtemperatur-SQUIDs benötigen nicht anders als die herkömmlichen einen Flußtransformator, damit sich ihre Empfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern noch erhöht. Allerdings ist das nicht ganz einfach, weil es keine Leitungen aus der entsprechenden Keramik zur Verbindung beider gibt. Darum schafft man einen Flußtransformator in derselben YBCO-Schicht wie das SQUID, integriert ihn also mit auf dem Chip; ein zweiter kann die Empfindlichkeit weiter steigern. Mit einem solchen Prototyp erreichten Dieter Koelle und seine Mitarbeiter von der Universität von Kalifornien in Berkeley, den Lawrence-Berkeley-Laboratorien und der Firma Conductus in Sunnyvale (alle im US-Bundesstaat

Kalifornien) einen Rauschpegel von etwa 30 Femtotesla. Michael Mück und seine Kollegen im Forschungszentrum Jülich erzielten 24 Femtotesla mit einem ähnlichen Transformator, der mit einem Hochfrequenz-SQUID gekoppelt war.

Anzumerken ist, daß Hochtemperatur-SQUIDs noch keine so gute Auflösung erzielen wie die in flüssigem Helium betriebenen; aber das könnte sich mit ausgereifteren Fertigungstechniken ändern. Woher rührt dann schon das starke Interesse? Ivar Giaever (Nobelpreis 1973), der gegenwärtig am Rensselaer Polytechnischen Institut in Troy (New York) arbeitet, hat es so begründet: Flüssiges Helium ist so teuer wie Scotch, flüssiger Stickstoff dagegen so billig wie Milch (er verdampft zudem weitaus langsamer, so daß Aufbewahrung und Transport wesentlich unkomplizierter und damit kostengünstiger sind).

Die Herstellung von Hochtemperatur-SQUIDs

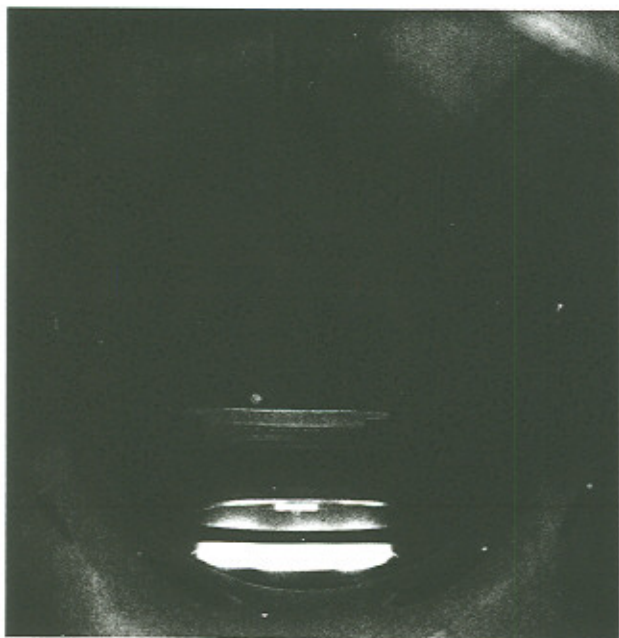
Die ersten SQUIDs aus Hochtemperatur-Supraleitern bestanden aus polykristallinem Material. Das erlaubte dem Suprastrom, zwischen vielen möglichen Wegen zu wählen. Das Umschalten zwischen den einzelnen Strompfaden erzeugte aber ein hohes magnetisches Eigenrauschen und schränkte somit die Empfindlichkeit für die zu messenden Signale ein.

Um dies zu vermeiden, läßt man meist dünne Supraleiterschichten epitaktisch auf einkristallinen Substraten aufwachsen. Zwei gängige Verfahren, die auch im Forschungszentrum Jülich eingesetzt werden, sind die Kathodenzerstäubung (Bild links) und die Laser-Ablation (Bild rechts). Im ersten Fall wird das Target durch Ionen-Bombardement zerstäubt, im zweiten Fall von Laser-Pulsen abgetragen; das Material setzt sich auf dem heißen Substrat ab und nimmt dessen Kristallstruktur an. Ein Maß für die damit erreichte Perfektion ist der kritische Strom, ab

dem die Supraleitung zusammenbricht: Man erreicht heute weit mehr als 1 Million Ampere pro Quadratzentimeter.

Im weiteren Verlauf der Herstellung werden die Josephson-Kontakte lithographisch aufgeprägt. Dabei ist äußerste Sorgfalt geboten, um die supraleitenden Eigenschaften nicht zu stören. Deshalb beschießt man Partien, an denen Material abgetragen werden soll, zunächst mit Argon-Ionen und ätzt das somit zerstörte Material dann heraus.

Eine neuere Entwicklung nutzt wieder Polykristalle, wobei die Korngrenzen der Kristallite die Josephson-Kontakte bilden. Um diese beim Schichtwachstum an den gewünschten Stellen einzurichten, werden mittels Ionenätzen Stufen in das Substrat gefräst. Bei dem anschließenden epitaktischen Aufwachsen wechselt an den Kanten die Kristallorientierung der Supraleiterschicht und bildet so die gewünschten Korngrenzen.



Weiterer absehbarer Nutzen

Besonders für Geophysiker, die häufig an schwer zugänglichen Orten forschen, könnten sich Hochtemperatur-SQUIDs als dienlich erweisen. So lassen sich damit Strukturen tief in der Erdkruste erschließen: Der Sonnenwind, der auf die geladenen Partikelschichten in Magnetosphäre und Ionosphäre trifft, erzeugt sehr niederfrequente elektromagnetische Wellen (von 0,001 bis 100 Hertz), die sich aus der oberen Atmosphäre bis zur Erdoberfläche ausbreiten; dort werden sie größtenteils reflektiert, teils dringen sie aber auch in den Boden ein. Durch Messen der winzigen fluktuierenden magnetischen und elektrischen Felder (mit Magnetometern sowie in den Boden versenkten Elektroden) kann der Widerstand der Gesteine bis in Tiefen von mehreren Dutzend Kilometern ermittelt werden.

Diese Daten geben Aufschluß über Hydrologie und Porosität des Untergrunds und können somit Ölvorkommen oder Quellen geothermischer Energie anzeigen. In einem ähnlichen Verfahren sendet man magnetische Pulse aus und beobachtet deren Wirkung. Solche Methoden werden häufig bei Suchbohrungen in der Erdöl-Prospektion eingesetzt und dürften sich auch zur Ortung gefährlicher Altlasten im Boden eignen.

Die Vorteile der Hochtemperatur-Technologie mit flüssigem Stickstoff werden sicherlich auch die Verbreitung von SQUID-Systemen in der Medizin fördern, denn wo immer möglich senken nicht-invasive Verfahren die Belastung für den Patienten und die Kosten der Untersuchungen.

Inzwischen gibt es des weiteren Versuche, für die technische und industrielle Forschung magnetische Bilder zu erzeugen. Eine Art Raster-SQUID-Mikroskop kann Objekte bis zu einer Größe von wenigen Mikrometern unterscheiden (Bild 6); es wird sowohl zur Untersuchung von magnetischen Materialien verwendet als auch zur Prüfung von Metallen und elektronischen Schaltungen, in denen fließende elektrische Ströme Magnetfelder erzeugen.

Auch bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung – so bei der Suche nach korrodierten Aluminiumblechen in Flugzeugen – können SQUIDs möglicherweise eingesetzt werden. Dazu wird der Einfluß der Flugzeugoberfläche auf ein oszillierendes Magnetfeld gemessen; Änderungen in der elektrischen Leitfähigkeit sind Zeichen für Defekte.

Ein komplettes Hochtemperatur-System aus YBCO-Magnetometern, Kühlung und Auswertungslektronik kostet



Bild 7: Fokale Epilepsie kann von einer örtlich begrenzten Gehirnschädigung verursacht werden, die magnetische Signale erzeugt. In diesem Falle wurden sie mit ei-

ner Anordnung von SQUIDs rund um den Kopf gemessen (gelbe Flächen) und anschließend zum Vergleich einem Kernspintomogramm des Patienten überlagert.

derzeit um die 15000 Mark. Dennoch genügt es nicht höchsten Präzisionsanforderungen, für die auch weiterhin herkömmliche, mit flüssigem Helium gekühlte Geräte eingesetzt werden müssen. Aber der Übergang zu keramischen Supraleitern trägt dazu bei, daß die emp-

findliche SQUID-Meßtechnik nicht mehr vorwiegend in wissenschaftlichen Labors und Forschungsabteilungen von Universitätskliniken angewandt wird, sondern zunehmend unter Marktbedingungen in der medizinischen und industriellen Praxis.

John Clarke ist Professor an der Universität von Kalifornien in Berkeley und arbeitet dort am Lawrence-Berkeley-Laboratorium. Er studierte an der Universität Cambridge (England), wo er 1968 promovierte. Er ist Mitglied der Königlich Britischen Akademie der Naturwissenschaften, der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft sowie der Amerikanischen Vereinigung zur Förderung der Wissenschaften. Den größten Teil seiner beruflichen Laufbahn widmete er der Erforschung der Supraleitung, insbesondere der Entwicklung von SQUIDs und ihren Anwendungen in einer Vielzahl von Bereichen.

Literaturhinweise

SQUID Magnetometers for Low-Frequency Applications. Von T. Ryhänen, H.

Seppä, R. Ilmoniemi und J. Knuutila in: *Journal of Low Temperature Physics*, Band 76, Hefte 5 bis 6, Seiten 287 bis 386, September 1989.

Principles and Applications of Superconducting Quantum Interference Devices. Herausgegeben von A. Barone. World Scientific Publishing, 1992.

Cardiomagnetic Imaging. Von Gerhard Stroink in: *Frontiers in Cardiovascular Imaging*. Herausgegeben von B. L. Zaret, L. Kaufman, A. S. Berson und R. A. Dunn. Raven Press, 1993.

Mapping the Brain with MSI. Von Christopher C. Gallen und Floyd E. Bloom in: *Current Biology*, Band 3, Heft 8, Seiten 522 bis 524, August 1993.

SQUIDs: Theory and Practice. Von John Clarke in: *The New Superconducting Electronics*. Herausgegeben von H. Weinstock und R. W. Ralston. Kluwer Academic Publishers, 1993.