

Kalt, aber feinfühlig

Selbst der menschliche Körper besitzt ein Magnetfeld, wenn auch ein extrem schwaches. Doch mit Hilfe von Phänomenen aus der Welt der Supraleitung lassen sich selbst die winzigen Schwankungen des Magnetfeldes im Gehirn nachweisen.

Das Erdmagnetfeld mit seinen ca. 50 Mikrottesla (abhängig vom geografischen Ort) ist durchaus ein recht schwaches Feld – vor allem wenn man es etwa mit den Magnetfeldern in einem Kernspintomo-



Bei der Untersuchung des Hirns mit Magneto-Enzephalographen spielen supraleitende Bauelemente eine entscheidende Rolle. (Foto: 4d-neuroimaging)

graphen vergleicht, die ca. 3 Tesla erreichen. In Relation zur Magnetaktivität unseres Gehirns ist das Feld unseres Planeten allerdings riesig. Wenn Nervenzellen in Aktion treten, erzeugen sie ein Magnetfeld von gerade mal einigen Femtotesla (10^{-15} Tesla), viele Größenordnungen schwächer als das Erdfeld und auch noch deutlich unterhalb des technisch erzeugten Umgebungsrauschens von einigen Nanoteslas. Trotzdem lassen sich auch solche winzigen Felder messen, und zwar mit einer Technologie, die für die Magneto-Enzephalographie (so nennt man die biomagnetische Untersuchung des Gehirns, abgekürzt MEG) konkurrenzlos ist: den SQUIDs. Sie nutzen den quantenmechanischen Zusammenhang zwischen Supraleitung und Magnetflüssen (daher der Name: Superconducting QUantum Interference Device), um mit unerreichter Präzision im Prinzip alle physikalischen Größen messen zu können, die mit dem Magnetfluss in Zusammenhang stehen, also Magnetfelder, Ströme usw. Die MEG ist die derzeit wichtigste biomagnetische Anwendung der SQUIDs, weil es bei den extremen Anforderungen an die Sensitivität praktisch keine Alternativmethoden gibt und die Aussagekraft allgemein

akzeptiert ist. Im Gegensatz zu anderen Verfahren, mit denen das Gehirn untersucht wird, „sieht“ die MEG dank einer räumlichen bzw. zeitlichen Auflösung im Millimeter- bzw. Millisekundenbereich dem Denkorgan direkt bei der Arbeit zu, erlaubt also nicht nur einen Einblick in die Struktur, sondern auch in die Funktion des Gehirns. Die klinischen Anwendungen konzentrierten sich bisher vor allem auf die Erkennung von Epilepsieherden, werden aber zunehmend auch auf andere Funktionsstörungen ausgeweitet. Außerdem bietet die MEG eine sehr wichtige Hilfestellung bei Operationen am Gehirn: Gehirnareale mit wichtigen Funktionen sollen ja unverletzt bleiben, wenn etwa ein Epilepsieknoten entfernt wird.

Quant im Fluss

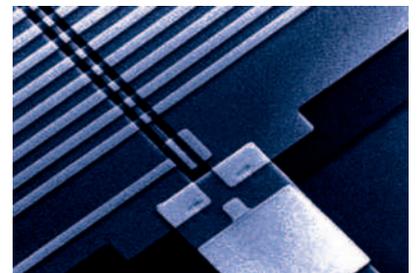
Hinter der Funktionsweise eines SQUID stecken zwei Phänomene aus der Welt der Supraleitung: der Josephson-Effekt und die Flussquantisierung. 1962 sagte der damals 22-jährige britische Student Brian D. Josephson u. a. voraus, dass Elektronen paarweise in Form sog. Cooper-Paare durch eine schwache Koppelstelle (Josephson-Kontakt) in einem supraleitenden Ring tunneln können. Dadurch fließt ein Strom, ohne dass über dem Kontakt eine Spannung abfällt. Dieser Effekt ist allerdings sehr empfindlich gegenüber einem äußeren Magnetfeld. Ab einer kritischen Stromstärke tritt doch ein Spannungsabfall auf, der vom Tunneln einzelner Elektronen herrührt. Die kritische Stromstärke hängt dabei von der magnetischen Flussdichte ab.

Das SQUID zeichnet sozusagen den maximalen Strom auf, der bei einem gegebenen Magnetfluss spannungslos durch den Ring fließen kann. Realisiert man das SQUID durch zwei Schwachstellen im supraleitenden Ring (sog. Gleichstrom- oder dc-SQUID), lässt sich die über sie abfallende Spannung direkt messen. Der magnetische Fluss durch die Öffnung des Rings verursacht bei einem geeigneten Gleichstrom I einen periodischen Spannungsabfall. Die Periode wird dabei von der Größe des magnetischen Flussquants $\Phi_0 = 2 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$ bestimmt – eine direkte Folge der Tatsache, dass Magnetflüsse durch supraleitende Ringe immer quantisiert sind.

Mit nur einer Schwachstelle (Hochfrequenz- oder rf-SQUID ge-

nannt) muss man den Ring induktiv an einen Resonanzschwingkreis koppeln, um ein entsprechendes Signal zu erhalten: Bricht der Suprastrom zusammen, wird der Schwingkreis gedämpft, ändert also seine Amplitude. Der HF-Spannungsabfall über dem Schwingkreis wird eine wiederum periodische Funktion des magnetischen Flusses durch das SQUID mit der gleichen Periodizität wie beim dc-SQUID.

Änderungen des magnetischen Flusses werden also in Spannungssignale umgesetzt und mit größter Genauigkeit gemessen, das SQUID arbeitet als „Fluss-zu-Spannungskonverter“. Selbst Flussänderungen kleiner als $10^{-5} \Phi_0$ lassen sich noch detektieren; zum Vergleich: Der Fluss des Erdmagnetfelds durch eine ein Quadratmillimeter große Fläche beträgt etwa $10^4 \Phi_0$. Die Empfindlichkeit eines SQUID wird oft als Energieauflösung angegeben, definiert als die kleinste Energieänderung, die bei einer standardisierten Bandbreite (z. B. 1 Hz) noch unterschieden werden kann. Typische Werte für metallische SQUIDs, die – mit flüssigem Helium gekühlt – bei einer Temperatur von 4 K arbeiten, liegen im Bereich 10^{-33} J/Hz , was einigen zehn Planckschen Wirkungsquanten entspricht. Man kann also mit Recht behaupten, dass die Ge-



Ein Gleichstrom-SQUID im Rasterelektronen-Mikroskop: Man erkennt die beiden Josephson-Kontakte (gekreuzte Gräben in der unteren Bildhälfte) (Foto: Inst. f. Angew. Physik der Uni Gießen).

naugigkeit von SQUIDs nahe beim quantentheoretischen Grenzwert liegt, der durch die Heisenbergsche Unschärferelation gegeben ist.

Nicht nur das Gehirn produziert Magnetfelder, sondern auch die Muskelaktivität des Herzens, so dass sich neben der MEG auch die Magneto-Kardiographie (MKG) als interessantes medizinisches Anwendungsgebiet der SQUIDs entwickelt hat. Die Basisforschung dazu fand bereits in den 1990er-Jahren statt, allerdings ist die MKG bislang noch nicht allgemein akzeptiert, da ein überzeugender Nachweis des medi-

zinischen Nutzens im Vergleich zu etablierten Methoden wie dem EKG noch nicht erbracht werden konnte – hier fehlen noch die großen Studien.

Ungestörte Empfindlichkeit

SQUIDs messen winzig kleine Magnetfelder – das bedeutet natürlich auch, dass sie sich sehr leicht stören lassen. Nicht nur das Erdmagnetfeld ist ja permanent vorhanden, auch technisch erzeugte Magnetfelder treten überall da auf, wo Energie verbraucht wird und elektrische Ströme fließen bzw. elektromagnetische Wellen schwingen. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt hat deshalb ein eigenes Gebäude für ein SQUID-Labor errichtet, das mit mehreren Lagen Mu-Metall und Aluminium die störenden Felder im Bereich höherer Frequenzen um den Faktor 10^6 abschwächt; für die niedrigen Frequenzen kommen zusätzliche Helmholtz-Spulen zur aktiven Abschirmung zum Einsatz. Dieser Aufwand macht es derzeit zum best- abgeschirmten Labor der Welt und zum geeigneten Ort für Referenzmessungen. Auch Kliniken benutzen abgeschirmte Räume für MEG-Untersuchungen, aber natürlich möchte man SQUIDs auch in „normalen“ oder sogar industriellen, also magnetisch hoch belasteten Umgebungen einsetzen. Diese Störfelder lassen sich durch den Betrieb des SQUID als Gradiometer eliminieren. Ein solches Gradiometer misst an zwei benachbarten Orten, und da die Felder von entfernten Quellen am Messort hinreichend homogen

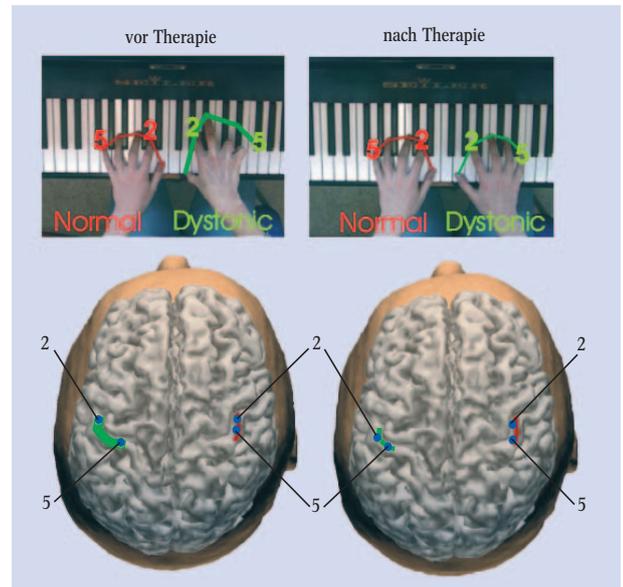
sind – im Gegensatz zu den lokalen Feldern, die man messen möchte –, werden sie durch die Differenz der Messwerte unterdrückt.

Die ersten SQUIDs, die entwickelt wurden, basierten allein auf Tieftemperatur-Supraleitern, die mit flüssigem Helium gekühlt werden müssen. Ganz neue Perspektiven ergaben sich mit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter 1986. Seither lassen sich SQUIDs realisieren, die wesentlich einfacher (und preiswerter) mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden können, ohne voluminöse Kühlaggregate. Hochtemperatur-SQUIDs können heute zuverlässig und preiswert in Dünnschichttechnologie hergestellt werden. Allerdings sind Tieftemperatur-SQUIDs etwa um einen Faktor zehn empfindlicher.

Zerstörungsfreies Prüfen

Ein interessanter Anwendungsbereich ist die zerstörungsfreie Materialprüfung mit SQUIDs. Die elektromagnetische Werkstoffprüfung ist ja an sich nichts Neues; sie basiert auf der Messung lokaler Anomalien im Streufeld des zu testenden Objekts. Dadurch kann man etwa Risse in einer Flugzeugfelge oder in einem Bauwerk erkennen, die dem bloßen Auge verborgen bleiben. Herkömmliche magnetische Prüfverfahren benutzen Induktionsspulen und HF-Wirbelstromfelder zur Suche nach den unerwünschten Fehlern. Da die Empfindlichkeit von Induktionsspulen proportional zur Frequenz sinkt, für eine möglichst große Eindringtiefe

in den Werkstoff jedoch gerade solche tiefen Frequenzen benötigt werden, eignen sich SQUIDs, ganz abgesehen von ihrer überragenden Empfindlichkeit, gerade dann, wenn man tief in das Prüfobjekt hinein-



Bewegt man seine Finger, werden bestimmte Areale in der Großhirnrinde stimuliert. Dies lässt sich mit Hilfe der MEG beobachten. Hier sieht man, wie die Fingerbewegung einer Pianistin mit Bewegungsstörungen (Dystonie) vor (links) und nach einer Bewegungstherapie im Hirn repräsentiert sind. Rot kennzeichnet dabei die gesunde, grün die dystonische Hand, die Zahlen markieren den kleinen Finger (5) bzw. den Zeigefinger (2). (Quelle: Candia et al. / Uni Konstanz)

sehen will, da sie ja selbst bei statischen Magnetfeldern noch funktionieren. Obwohl die hoch empfindlichen supraleitenden Sensoren mit den herkömmlichen Messmethoden in Pilotprojekten problemlos mithalten können, konnten sie sich noch nicht am Markt etablieren.

ULRICH KILIAN

Dr. Ulrich Kilian,
science & more
redaktionsbüro,
uk@science-and-
more.de