

# Supraleitung, Gravitationswellen und Tumore

## - Magnetfelder an der Grenze des Messbaren

von

Peter Pitzius und Uwe Hartmann

Sensoren aus supraleitenden Materialien sind in der Lage, unvorstellbar kleine Magnetfelder nachzuweisen. Daraus ergeben sich verschiedene "exotische" Anwendungen in der physikalischen Grundlagenforschung, aber auch sehr praxisrelevante Innovationen, etwa im Bereich der medizinischen Diagnostik. In der Saarbrücker Experimentalphysik werden die Sensoren entwickelt und auch komplette Messsysteme konzipiert. Wir geben einen Überblick über die physikalischen Grundlagen und verschiedene zur Zeit besonders intensiv diskutierte Anwendungen.

### Supraleitung

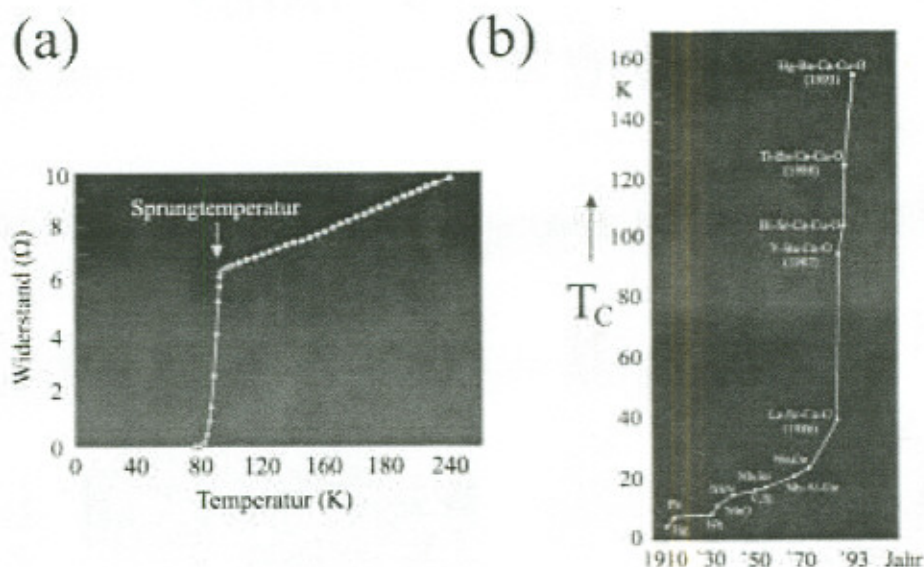
Das Phänomen der Supraleitung wurde im Jahre 1911 erstmals von H.K. Onnes<sup>1)</sup> beobachtet. Es beruht auf einem komplexen Zusammenspiel der Elektronen und des Atomgitters im Festkörper. Die Supraleitung zeigt sich zum einen in einem sprunghaften Absinken des elektrischen Gleichstromwiderstandes unterhalb einer bestimmten Temperatur  $T_C$  (Abb. 1a). Die "Sprungtemperaturen" reichen bis 156 K<sup>2)</sup> (Abb. 1b). Kühlt man einen ringförmigen Supraleiter in Anwesenheit eines äußeren Magnetfeldes ab und entfernt man dann im supraleitenden Zustand das Magnetfeld (Abb. 2), so werden im Supraleiter "Abschirmströme" induziert, die aufgrund der Ringinduktivität und des elektrischen Widerstandes des Supraleiters mit der Zeit exponentiell abklingen sollten. Gemessen wurde für  $Nb_3Zr$  eine Zeitkonstante von mehr

als  $10^5$  Jahren, was auf eine spezifische Leitfähigkeit von mehr als  $3 \times 10^{22} (\Omega \text{cm})^{-1}$  hindeutet. Dies ist das  $10^{18}$ -fache des Leitwertes der Probe bei Raumtemperatur. Das bedeutet, dass selbst große Ströme bis zu einer gewissen Stromstärke verlustfrei in einem Supraleiter fließen können.

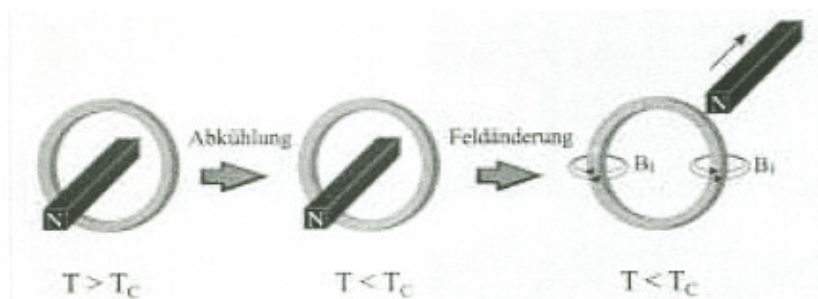
Supraleiter zeigen noch weitere ebenso überraschende Eigenschaften, nämlich z.B. einen perfekten Diamagnetismus (Abb. 3). Das als Meissner-Ochsenfeld-Effekt bekannte Phänomen lässt sich wie folgt beschreiben: Kühlt man einen Supraleiter in Anwesenheit eines äußeren Magnetfeldes ab, so drängt er beim Unterschreiten von  $T_C$  das Magnetfeld aus sich heraus.

Außer diesen beiden spektakulärsten Eigenschaften zeigt ein Supraleiter eine Fülle weiterer Eigenschaften, von denen jedoch hier nur noch eine herausgegriffen sei. Mit Erreichen der supraleitenden Phase geht eine Verringerung der Entropie einher. Da diese thermo-

Abb. 1: (a) Widerstand einer YBCO-Probe, die bei etwa 90 K ihre Sprungtemperatur hat. (b) Erreichte Sprungtemperaturen bis zum Jahr 1993.







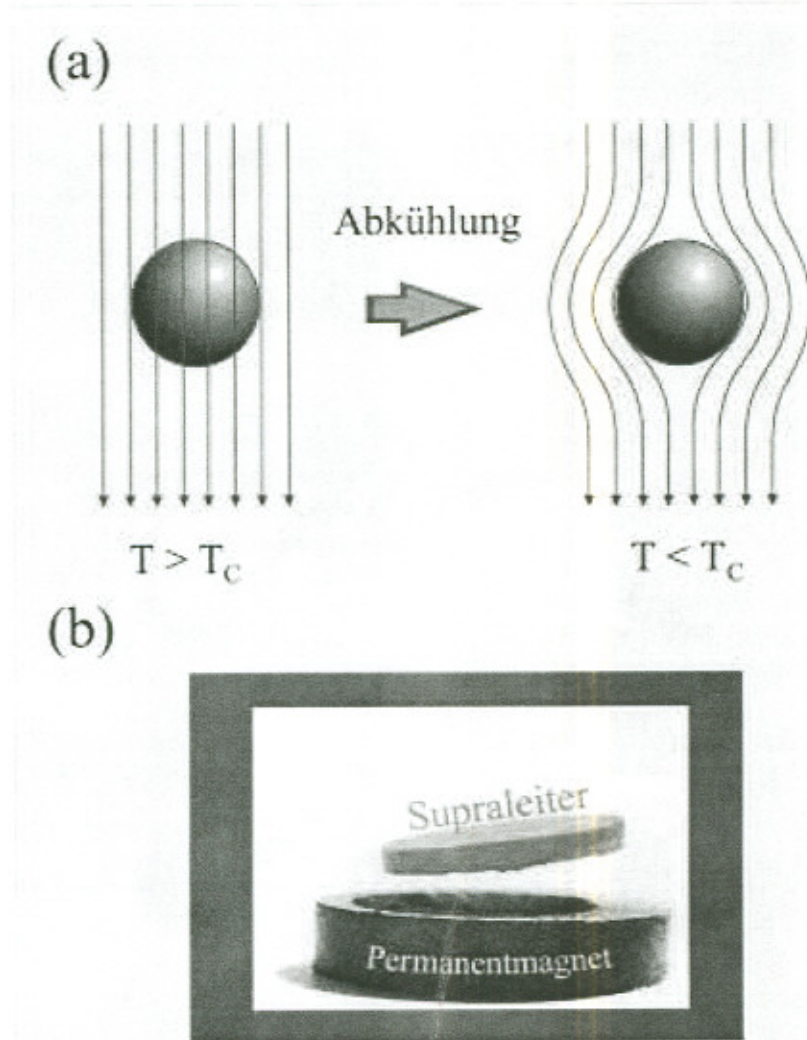
**Abb. 2: Supraleiter reagieren auf Änderungen des Magnetfeldes mit entsprechenden Abschirmströmen.**

dynamische Größe ein Maß für die Unordnung eines Systems ist, liefert die Absenkung der Entropie ein Indiz dafür, dass der supraleitende Zustand gegenüber dem normalleitenden ein Zustand mit höherem Ordnungsgrad ist. Weitere Experimente zeigen, dass die zunehmende Ordnung im Supraleiter bei den Elektronen stattgefunden hat. Ein Teil der freien Elektronen hat sich zu Paaren zusammengefunden, die man als "Cooper-Paare" bezeichnet<sup>4)</sup>.

Der Existenz der Cooper-Paare verdankt die Supraleitung ihren makroskopischen Quantencharakter. Die physikalische Welt der Quantenphysik spielt sich normalerweise in atomaren Dimensionen ab. Möchte man in dieser Welt Informationen z.B. über Energie und Aufenthalt der Elektronen eines Atoms erhalten, so kann man diese aus der sogenannten Schrödinger-Gleichung gewinnen. Die Cooper-Paare können im Gegensatz zu den normalleitenden Elektronen den selben Energiezustand besitzen, den "Grundzustand". Das bedeutet, dass die Energie der Cooper-Paare weitestgehend exakt definiert ist. Aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation gehört zu dieser scharf definierten Energie eine große Ortsunschärfe, was bedeutet, dass die Cooper-Paare untereinander nicht unterscheidbar sind. Dies wiederum hat zur Folge, dass alle Cooper-Paare eines Supraleiters im Gegensatz zu den normalleitenden Elektronen durch eine einzige Wellenfunktion quantenmechanisch be-

ziehung untereinander zu. Sie sind, wie das Laserlicht, kohärent. Man spricht von einem makroskopischen Quantenphänomen, weil sich weit über die Größenordnung eines Atoms hinweg ein einheitlicher Quantenzustand manifestiert.

Um sich ein besseres Bild über die Kohärenz und die damit verbundene feste Phasenbeziehung machen



**Abb. 3: a) Kühlt man einen Supraleiter im Magnetfeld ab, so drängt er beim Erreichen des supraleitenden Zustands die Feldlinien aus sich heraus und wird somit zu einem perfekten Diamagneten. b) Der perfekte Diamagnetismus führt zur magnetischen Levitation über einem Permanentmagneten.**

schreibbar sind, die sich über den makroskopischen Raum des Supraleiters erstreckt. Diese gemeinsame Wellenfunktion weist den Cooper-Paaren während ihrer Bewegung im Supraleiter eine feste Phasenbe-

zu können, sei folgender gedanklicher Exkurs angeführt: Stellt man sich eine extrem lange Einkaufsstraße vor, in der z.B. Sommerchlussverkauf ist, dann bewegen sich die vielen Menschen in ihr





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

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

Seit 1993 ist er als Leiter einer Arbeitsgruppe in der Fachrichtung Experimentalphysik der Universität des Saarlandes tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte sind die Rastersonden- und Nanostrukturphysik als Grundlage zur Entwicklung ultra-kleiner funktionaler Bauelemente.

In den vergangenen Jahren erhielt Prof. Hartmann mehrere Rufe an bundesdeutsche Universitäten und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen. Er ist ständiger Berater verschiedener industrieller Unternehmen im Bereich der Informationstechnologie und Sensorik. 1998 wurde er für seine messtechnischen Entwicklungen im Bereich Nanotechnologie mit dem renommierten Philip-Morris-Forschungspreis ausgezeichnet.

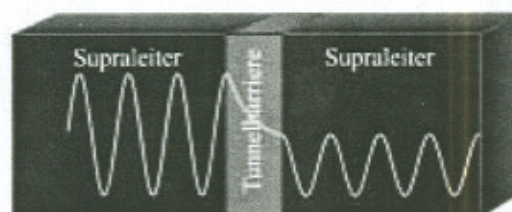
mehr oder weniger statistisch, in dem sie von einem Geschäft ins andere gehen. Findet aber in der selben Straße ein Volksmarathon statt, dann bewegen sich dort die Menschen zu Beginn noch mit der gleichen Geschwindigkeit und in gleicher Richtung. Im Extremfall könnte man sich sogar vorstellen, dass sie sich im Gleichschritt bewegen, was man als "starre Phasenkopplung" der Bewegung bezeichnen könnte. Da aber nun die Kondition der Läufer unterschiedlich ist, wird diese Art der Phasenkopplung mit der Zeit zunehmend gestört: Manche Läufer werden langsamer, andere starten Überholmanöver. Wieder andere ändern sogar ihre Bewegungsrichtung, so dass nach absehbarer Zeit die anfängliche Kohärenz völlig zusammenbricht. In diesem Analogon ist die Kohärenz nur von kurzer Dauer. Die unter Kohärenzbedingungen zurückgelegte Strecke ist relativ kurz. Es handelt sich um einen Vorgang endlicher Kohärenzlänge.

Man könnte sich nun hypothetisch vorstellen, dass alle Teilnehmer die gleiche Kondition mitbringen, mit der gleichen Geschwindigkeit in die

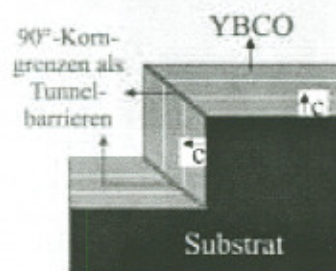
gleiche Richtung laufen und das noch im Gleichschritt. Darüber hinaus werden sie nie müde und bewegen sich so unendlich lange fort.

**Abb. 4:** (a) Schematische Darstellung eines Josephson-Kontaktes und seiner Wirkung auf die makroskopische Wellenfunktion. (b) Prinzipielle Anordnung einer künstlichen Korngrenze an einer Stufe. (c) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Josephson-Kontaktes an einer 300 nm tiefen Stufe.

(a)



(b)



(c)



Diese Bewegung hätte dann eine unendliche Kohärenzlänge, und die einzelnen Läufer wären bzgl. ihres Laufstils nicht voneinander zu unterscheiden. So kann man sich die makroskopische Kohärenz als eine sich ins Unendliche erstreckende kohärente Bewegung der Cooper-Paare vorstellen.

Die makroskopische Kohärenz der Cooper-Paare hat entscheidende Folgen, die bei wichtigen Anwendungen der Physik, Medizin, Geologie und Metrologie zum Tragen kommen.

## Schwache Kontakte zwischen Supraleitern

Sind zwei Supraleiter durch eine hinreichend dünne, nicht supraleitende Schicht getrennt (Abb. 4 a), so können die Cooper-Paare diese Barriere durchdringen, ohne ihre supraleitenden Eigenschaften zu verlieren. Die physikalischen Eigen-



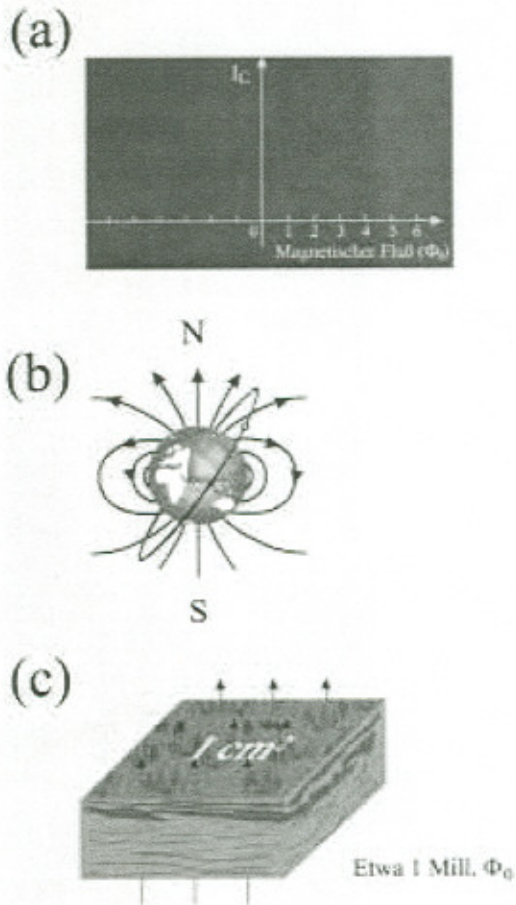


Abb. 5: (a) Abhängigkeit des kritischen Stroms von dem Fluß durch den Josephson-Kontakt. (b) Darstellung des globalen Erdmagnetfelds. (c) Der magnetische Fluß durch einen Quadratzentimeter der Erdoberfläche beträgt etwa eine Million  $\Phi_0$ .

schaften und die damit verbundenen Effekte solcher Barrierenanordnungen (auch Tunnelkontakte bzw. Josephson-Kontakte genannt) wurden erstmals von dem theoretischen Physiker B.D. Josephson<sup>5)</sup> im Jahre 1962 vorausgesagt. Ihre experimentelle Bestätigung fanden sie erstmals im Jahre 1963 durch P.W. Anderson<sup>6)</sup>.

Wie dick darf nun so eine Tunnelbarriere sein und was ist das Kriterium dafür, dass die Cooper-Paare die Barriere durchtunneln können? Im supraleitenden Zustand gibt es eine besondere Wechselwirkungen zwischen den Elektronen, die eine charakteristische Reichweite bzw. Wechselwirkungslänge hat. Inner-

halb dieser Korrelationslänge kann die Paarkorrelation, die Voraussetzung für das Auftreten der Cooper-Paare ist, aufrechterhalten werden. Die Dicke der Tunnelbarriere darf diese Korrelationslänge nicht wesentlich überschreiten. Die Korrelationslänge ist material- und temperaturabhängig und erstreckt sich für verschiedene Supraleiter typisch zwischen 0,1 nm und 1000 nm (1 nm entspricht einem Millionstel Millimeter). Für Hochtemperatur-Supraleiter, die 1986 von J.G. Bednorz und K.A. Müller<sup>7)</sup> gefunden wurden und schon bei der Siedetemperatur des Stickstoffs supraleitend werden, ist diese Korrelationslänge besonders klein, so dass bereits Störungen des Kristalls im atomaren Bereich Tunnelkontakte darstellen oder gar die Supraleitung vollständig unterdrücken können. Eine künstliche, aber definierte Störung auf atomarer Ebene wird

in diesem Fall durch eine Korngrenze, d.h. eine Schnittstelle zweier Kristallkörner erzielt (Abb. 4 b und c). In dieser Tunnelbarriere wird die Supraleitung entscheidend geschwächt, so dass der maximale verlustfreie Suprastrom in der Barriere um Größenordnungen kleiner

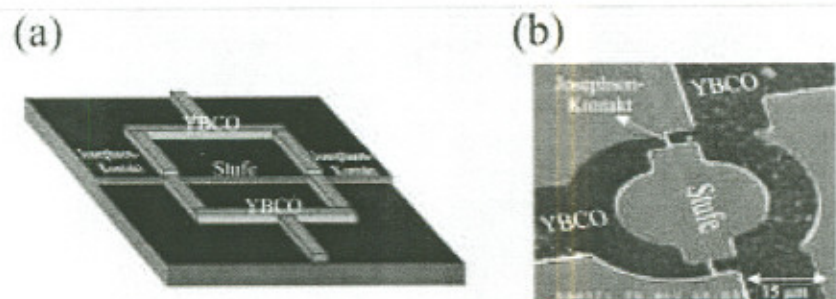
ist als im übrigen Supraleiter. Den maximalen Strom, der verlustfrei durch den Josephson-Kontakt fließen kann, nennt man den kritischen Strom des Kontaktes.

Dieser kritische Strom reagiert periodisch auf kleinste Änderungen eines äußeren Magnetfeldes (Abb. 5 a). Ein charakteristisches Maß für die Änderung der magnetischen Umgebung eines Josephson-Kontaktes ist das Flussquant  $\Phi_0$ . Es handelt sich bei dieser physikalischen Größe um das Produkt aus magnetischer Feldstärke und der von ihr durchsetzten Fläche. Der magnetische Fluss eines Flussquants oder Fluxoids entspricht etwa dem Millionstel Teil des Flusses durch eine Fläche von einem Quadratzentimeter, der durch das schwache Erdmagnetfeld hervorgerufen wird (Abb. 5 b).

#### Höchstempfindliche Magnetfeldsensoren

Man kann bereits mit einem einzelnen Josephson-Kontakt schwache Magnetfelder nachweisen<sup>8)</sup>. Um aber die Grenze der Messung in noch empfindlichere Bereiche zu schieben, konstruiert man einen Sensor mit zwei Josephson-Kontakten, das sogenannte SQUID (Superconducting QUantum Interference Device)<sup>9)-14)</sup>. Abbildung 6 a zeigt eine schematische Darstellung eines SQUID aus einem Hochtemperatur-Supraleiter. Dieser Supraleiter besteht aus einer chemischen Verbindung von Yttrium, Barium, Kupfer und Sauerstoff ("YBCO").

Abb. 6: (a) Schematische Darstellung eines SQUID mit zwei Stufenkontakten. (b) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines SQUID.





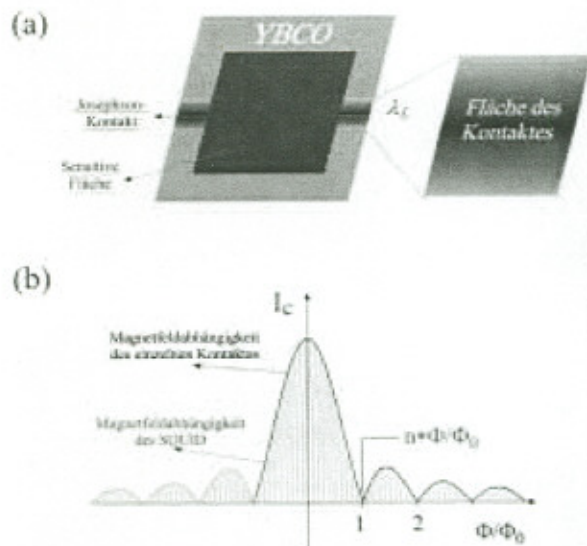


Abb. 7: (a) Eindringen des Magnetfeldes am Josephson-Kontakt. (b) Magnetfeldabhängigkeit des kritischen Stroms für den Einzelkontakt (blaue Kurve) und für das SQUID (rote Kurve).

Die beiden Josephson-Kontakte werden durch künstliche Korngrenzen realisiert. Diese entstehen beim Wachstum der YBCO-Schicht an der dafür vorgesehenen Stufe, die durch moderne Lithographie-Verfahren in das Substrat hinein strukturiert wird (siehe auch Abb. 4 b). Abbildung 6 b zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines solchen in unserer Arbeitsgruppe hergestellten und verwendeten SQUID. Die Auswirkungen der Magnetfeldabhängigkeit des Bauteils gegenüber derjenigen eines einzelnen Josephson-Kontaktes wird aus Abbildung 7 deutlich. Das äußere Magnetfeld dringt senkrecht von der Korngrenze aus nach beiden Seiten mit einer charakteristischen Eindringtiefe in den Supraleiter ein<sup>15)</sup>, so dass man dem Josephson-Kontakt eine Fläche zuordnen kann, wie es in Abbildung 7 a angedeutet ist. Die Steigerung der Magnetfeldempfindlichkeit eines SQUID gegenüber dem Einzelkontakt hängt von dem Verhältnis zwischen der sensitiven Fläche des SQUID und derjenigen der Kontaktfläche ab. Die sensitive Fläche des SQUID ist die Fläche, die von dem Teil des Supraleiters eingeschlossen wird, welcher die beiden

größern darf, wurden verschiedene Methoden entwickelt, um eine möglichst große "effektive Fläche" des SQUID zu erzielen. Man benutzt dazu einerseits Flusskonzentratoren, die mit Hilfe des Meissner-Ochsenfeld-Effektes den Fluss auf einer großen Fläche sammeln, um diesen dann in die kleine SQUID-Fläche zu bündeln (Abb. 8 a). Die supraleitenden Flusskonzentratoren, auch "Washer" genannt, müssen durch eine Isolatorschicht elektrisch vom SQUID getrennt werden. Eine weitere und einfache Methode zur Erhöhung der effektiven SQUID-Fläche ist gegeben, indem man das SQUID mit einer Flusseinfangschleife verbindet (Abb. 8 b). Die sensitivsten SQUID werden derzeit so konstruiert, dass man zusätzlich zwischen dem Washer als Flusskonzentrator und dem SQUID eine spiralförmige Spule anbringt. Ihre Funktion liegt darin,

Abb. 8: Unterschiedliche Methoden zur Vergrößerung der effektiven SQUID-Fläche.

(a) Durch einen Washer, der mit Hilfe des Meissner-Ochsenfeld-Effektes Feldlinien in das SQUID hinein fokussiert. (b) Durch eine direkte Ankopplung einer Flusseinfangschleife mit großer Fläche. (c) Durch eine geschickte Kombination von (a) und (b).

Josephson-Kontakte enthält.

Da man aus physikalischen Gründen die SQUID-Fläche nicht beliebig ver-

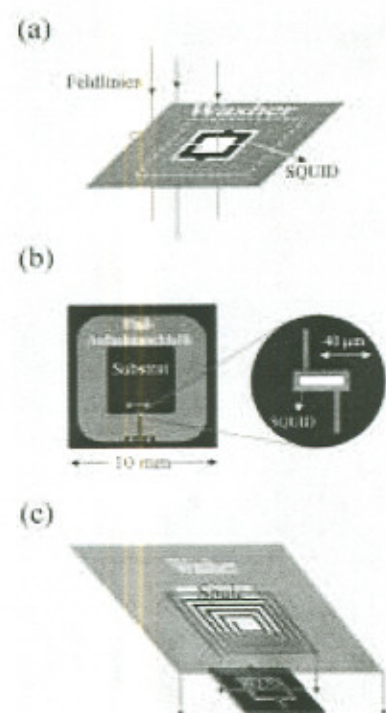
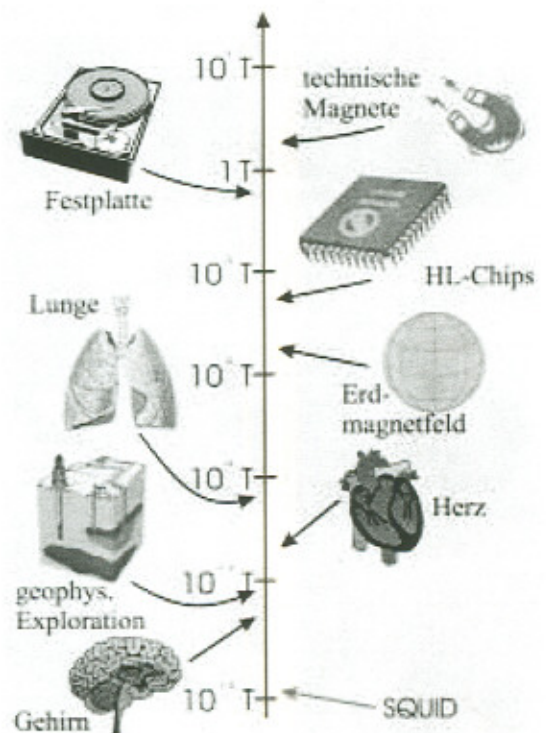


Abb. 9: (a) Überblick über unterschiedliche Quellen für Magnetfelder und die resultierende Feldstärke. Die gewählte Einheit ist das Tesla.



den gesammelten Fluss des großen Washers noch besser in die kleine SQUID-Fläche einzukoppeln (Abb. 8 c).



Mit solchen Anordnungen erreicht man neuerdings für Hochtemperatur-Supraleiter-SQUID eine Feldauflösung von etwa 5 fT, für Tieftemperatur-Supraleiter-SQUID eine Auflösung von etwa 1 fT<sup>16),17)</sup>. Diese Werte entsprechen Feldstärken von weniger als 1 Milliardstel des Erdfeldes.

## Messung kleinster Magnetfelder

Magnetfelder sind allgegenwärtig<sup>18)</sup>. Ein Eindruck von unterschiedlichen Magnetfeldquellen und ihrer Feldstärken lässt sich aus Abbildung 9 gewinnen. Möchte man nun bis an die Grenzen des Messbaren vorstoßen, so muss man zunächst versuchen, unerwünschte Störfelder zu unterdrücken. Dies kann man auf verschiedene Weisen tun. Man kann bereits den Sensor so konstruieren, dass er in sich Störungen kompensiert. Eine solche Anordnung, bei der zwei sensitive Flächen mit entgegengesetzter Wirkung in den SQUID einkoppeln, nennt man Gradiometer (Abb. 10). Ein solcher Sensor reagiert in erster Linie nur auf Feldgradienten. Der Nachteil des Gradiometers liegt zum einen darin, dass nur kleine Gradienten recht gut kompensiert werden und, dass stärkere homogene Felder aufgrund verbleibender Asymmetrien der sensitiven Flächen auch nicht beliebig gut unterdrückt werden

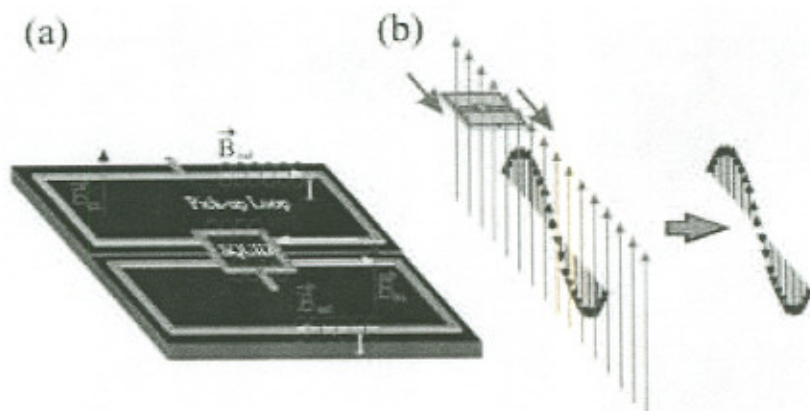


Abb. 10: (a) Typischer Aufbau und Funktionsweise eines planaren Gradiometer-SQUID. (b) Unterdrückung des Gleichfeldanteils (violette Pfeile) und Selektion des Gradientenfeldes (rote Pfeile).

können. Es ist in der Praxis durchaus üblich, die Differenz der Signale zweier Gradiometer zu nutzen. Man erhält so ein Gradiometer zweiter Ordnung, das dann auf den Gradienten des Gradientenfeldes sensitiv reagiert. Die Vorgehensweise lässt sich sukzessiv fortsetzen und man erhält dann Gradiometer höherer Ordnung.

Eine weitere Methode, Störfelder zu unterdrücken, bieten die magnetischen Abschirmkammern (Abb.

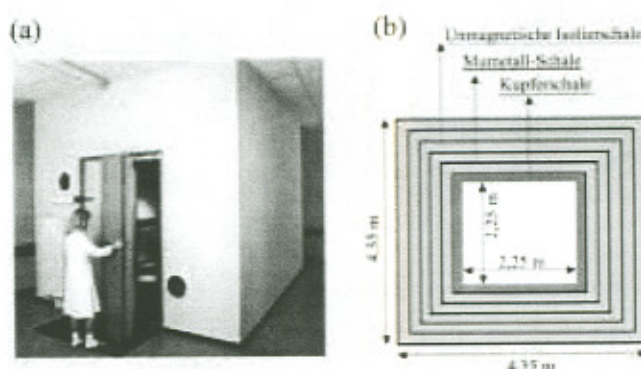


Abb. 11: (a) Begehbare magnetische Abschirmkammer, bestehend aus mehreren weichmagnetischen Schalen. (b) Schematische Skizze einer 6-fach Abschirmkammer, wie sie z.B. in der PTB-Berlin zu finden ist.

11 a). Sie setzen sich je nach Typ und Preisklasse aus etwa 3 bis 6 Schalen zusammen. Die Schalen sind aus weichmagnetischen Legierungen (z.B. Mumetall), die in aufwendigen Verfahren hergestellt werden und auf hohe Abschirmfaktoren hin optimiert werden müssen. Eine Dreifach-Abschirmkammer mit den Innenmaßen von  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$  kostet etwa DM 750.000 und erreicht für statische Magnetfelder einen Abschirmfaktor von etwa 500. Eine der weltbesten Abschirmkammern befindet sich in der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt (PTB) in Berlin. Eine solche Sechsfach-Abschirmkammer ist in Abbildung 11b schematisch dargestellt und erreicht für statische Magnetfelder einen Abschirmfaktor von 10000.

Für bestimmte biologische oder medizinische Versuche ist es nicht nötig, einen großen begehbaren Raum magnetisch abzuschirmen. Dort kommt es vielmehr darauf an, kleine Versuchsräume abzuschirmen. Aus diesem Grund wurde im SAMS (Saarländisches Applikationslabor für Magneto-Sensorik) als Teil unserer Arbeitsgruppe eine aktive



Peter Pitzius, geb. 1959, studierte in Saarbrücken Physik. Während der Promotion arbeitete er im Forschungszentrum Jülich und wirkte an der Entwicklung des Raster-SQUID-Mikroskops mit, was 1998 mit dem Philip-Morris-Preis versehen wurde. Zur Zeit arbeitet er im SAMS (Saarländisches Applikationslabor für Magnetosensorik) als Teil der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. U. Hartmann und beschäftigt sich dort mit der Entwicklung und Applikation unterschiedlicher Magnetfelddetektoren für den Bereich der Medizin, Biophysik und der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.



Abschirmkammer entwickelt. Sie besteht aus drei Spulenpaaren, die mit Hilfe geeigneter Sensoren und einer Regelektronik, die verschiedenen Komponenten der Störfelder aktiv kompensieren (Abb. 12). In der ersten Phase der Entwicklung erreicht das System bereits einen statischen Abschirmfaktor von mehr als 500. In der nächsten Entwicklungsphase wird ein statischer Abschirmfaktor von 10000 angestrebt. Eine weitere Perspektive besteht darin, auch große begehbare Räume aktiv abzuschirmen.

Nutzt man den Meißner-Ochsenfeld-Effekt (siehe Abb. 3 a), so hat man mit einem supraleitenden Behälter eine nahezu perfekte Abschirmung erzielt, allerdings nur in kryogener Umgebung, d.h. im flüssigen Helium oder im flüssigen Stickstoff (Abb. 13).

### Verschiedene Anwendungen der Josephson-Kontakte und SQUID

Die vielfältigen Anwendungen der Josephson-Kontakte füllen das weite Gebiet der Supraleiter-Elektronik aus. Dieses reicht vom Mikrowellensender bis hin zum supraleitenden Computer, vom Strahlungsmesser (Bolometer) bis hin zu den genauesten Normalen für die elektrische Spannung. Darüber hinaus gibt es spezifische Anwendungen in der Medizin, Biologie, Geologie und in der physikalischen Grundlagenforschung. Aus dem weiten Spektrum der Anwendungen sollen im Folgenden nur einige markante Beispiele erläutert werden.

Gravitationswellen sind Änderungen der Raum-Zeit-Struktur, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Vorausgesagt wurden sie bereits 1916 von A. Einstein im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Didaktisch gut aufbereitete Literatur über Gravitationswellen und über ihre Nachweismethoden findet man im Literaturverzeichnis

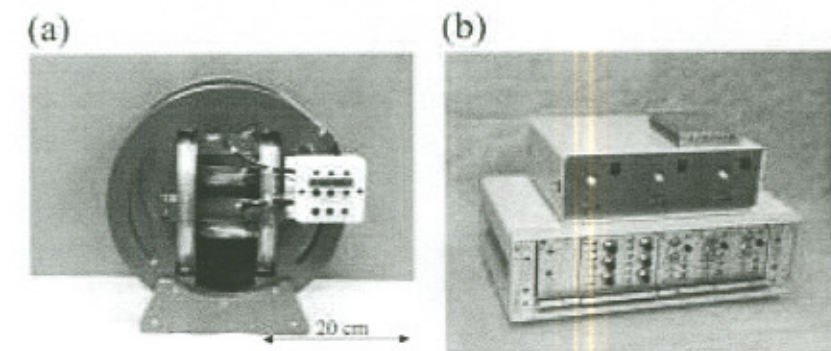


Abb. 12: (a) Die im SAMS entwickelte aktive Abschirmkammer, bestehend aus drei senkrecht zu einander stehenden Spulenpaaren mit ihren elektrischen Anschlüssen. (b) Die dazu entwickelte Steuerelektronik.

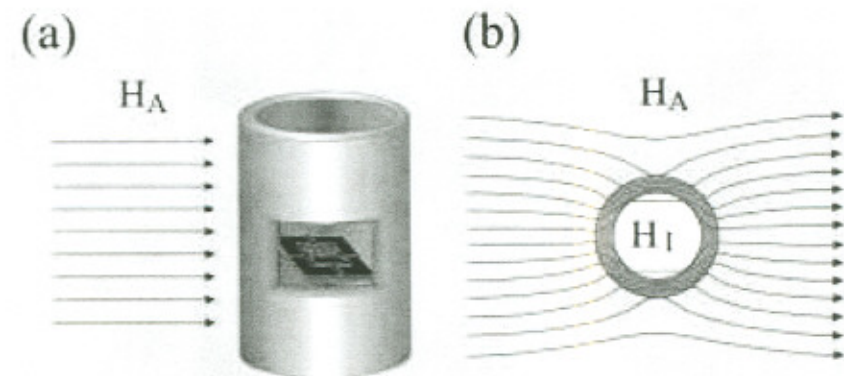


Abb. 13: (a) Abschirmende Wirkung eines supraleitenden Zylinders aufgrund des Meissner-Ochsenfeld-Effektes. (b) Aufsicht und Feldverteilung.

unter 19) -21). Ein indirekter Nachweis der Gravitationswellen gelang den Astronomen R.A. Hulse und J.H. Taylor<sup>22)</sup>, in dem sie die Abnahme der Bahnperiode eines Doppelsternsystems (Binärpulsar PSR 1913+16) über einen Zeitraum von 25 Jahren beobachteten. Die Abnahme der Bahnperiode konnten sie überzeugend auf die Energieverluste zurückführen, die durch das Abstrahlen der Gravitationswellen auftreten.

Gravitationswellen werden von beschleunigten Massen (z.B. rotierenden Doppelsterne, die sich sehr schnell um ihren gemeinsamen Schwerpunkt drehen, bei Sternexplosionen und durch superschwere Schwarze Löcher u.a.) erzeugt. Da sich die dadurch hervorgerufenen Schwankungen des Gravitationsfeldes nur mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten können, wird sich die so hervorgerufene Verzerrung der Raumzeit-Struktur wie eine

Welle im Universum ausbreiten (Abb. 14). Diese Verzerrung zeigt sich in einer periodischen Abstandsänderung zwischen zwei Probmassen. Dabei würde eine kugelförmige Probmasse zu einem Ellipsoid verformt. Das Frequenzspektrum der Gravitationswellen erstreckt sich nach dem heutigen Kenntnisstand über acht Größenordnungen von 0,0001 Hz bis 10000 Hz. Dadurch, dass die Quellen von Gravitationswellen extrem weit von der Erde entfernt sind, sind ihre Auswirkungen auf der Erde äußerst schwach. Die zu erwartenden relativen Längenänderungen für eine Gravitationswellenquelle in einer Nachbargalaxie sollte im Bereich von  $10^{-18}$  bis  $10^{-21}$  liegen. Bei einem Versuchsaufbau, wie er in Abbildung 15 schematisch dargestellt ist, müsste man zum Nachweis einer Gravitationswelle eine Längenamplitude von weniger als  $10^{-20}$  m detektieren<sup>23)</sup>. Um diese gigantische Herausforderung etwas



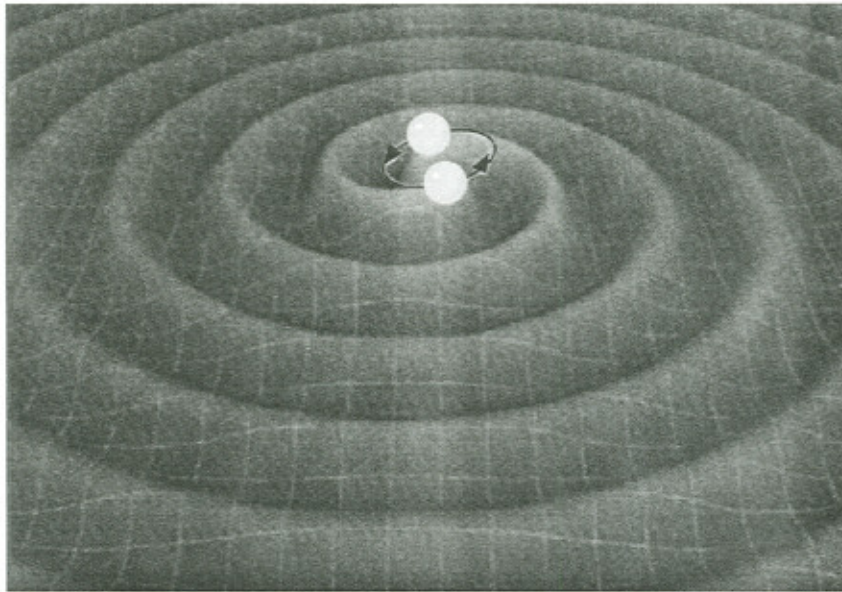


Abb. 14: Verzerrung des Raumzeit-Gefüges aufgrund der von kreisenden Neutronensternen ausgehenden Gravitationswellen.

praktischer zu verdeutlichen, stelle man sich vor, man müsste nachweisen, dass sich die Distanz Saarbrücken - Los Angeles kurzzeitig um den hundertmillionstel Teil eines Millimeters vergrößert oder verkleinert. Ein SQUID, angeordnet wie in Abbildung 15, könnte dazu prinzipiell in der Lage sein.

In der Medizin werden SQUID dazu verwendet, die äußerst kleinen Magnetfelder der schwachen Hirnströme aufzuzeichnen. Es ist bereits gelungen, mit mehreren SQUID (bis zu 256) gleichzeitig die Magnetfelder der Hirnsignale aufzunehmen. Dies ermöglicht es, ihre Entstehungsorte tief im Inneren des Hirns zu lokalisieren (Abb. 16). Die gewonnenen Resultate erleichtern z.B. das Auffinden von Epilepsiezentren im Inneren des Gehirns. Die Magnetfeldempfindlichkeit, die die SQUID-Sensoren bei einer Messzeit von einer Sekunde erreichen, liegt bei etwa 3 fT. Bei SQUID-Systemen, die in der Lage sind, die extrem kleinen Magnetfelder der Hirnaktivitäten zu messen, muss ein enorm hoher Aufwand für die Störsignalunterdrückung betrieben werden.

Neben Hirnaktivitäten (Magneto-EncephaloGraphie, MEG) werden

auch Herzsignale (Magneto-KardioGraphie, MKG) mit unübertroffener Auflösung detektiert. Sowohl MEG als auch MKG sind bei der

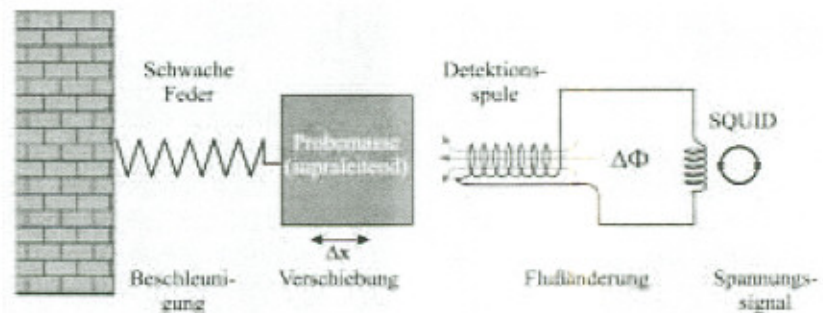
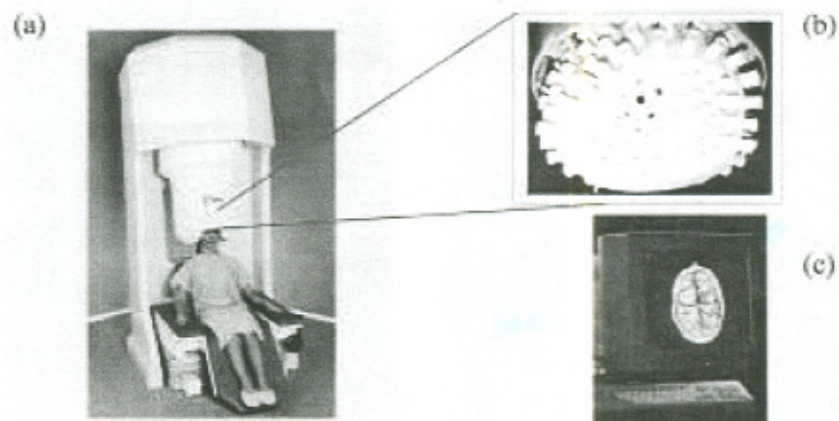


Abb. 15: Darstellung eines Gravitationswellendetektors mit SQUID. Das Verformen der Probemasse bewirkt über die Detektionsspule eine Flussänderung im SQUID und somit eine meßbare Spannungsänderung am SQUID.

Abb. 16: (a) Mehrkanalsystem zur Erfassung der Hirnströme durch SQUID. (b) Helm mit 143 SQUID-Sensoren. (c) Datenerfassung mit dem System.



Verwendung von SQUID kontakt- bzw. berührungslose Messverfahren, die intrinsische Vorteile mit sich bringen.

Auch bei sinnesphysiologischen Fragestellungen setzt man große Hoffnungen in die SQUID. Diesbezügliche Forschungen haben bekanntlich ergeben, dass der Orientierungssinn z.B. der Brieftauben das Erdmagnetfeld nutzt. Bei der Analyse der Rezeptoren, die für die Reizentstehung auf molekularer und zellbiologischer Ebene verantwortlich sind, können SQUID-Untersuchungen wertvolle Informationen liefern.

Im SAMS laufen Vorversuche, die darin bestehen, sowohl SQUID als auch die aktive Magnetfeldabschirmung für spezielle biologische und medizinische Fragestellungen einzusetzen. So soll untersucht werden,



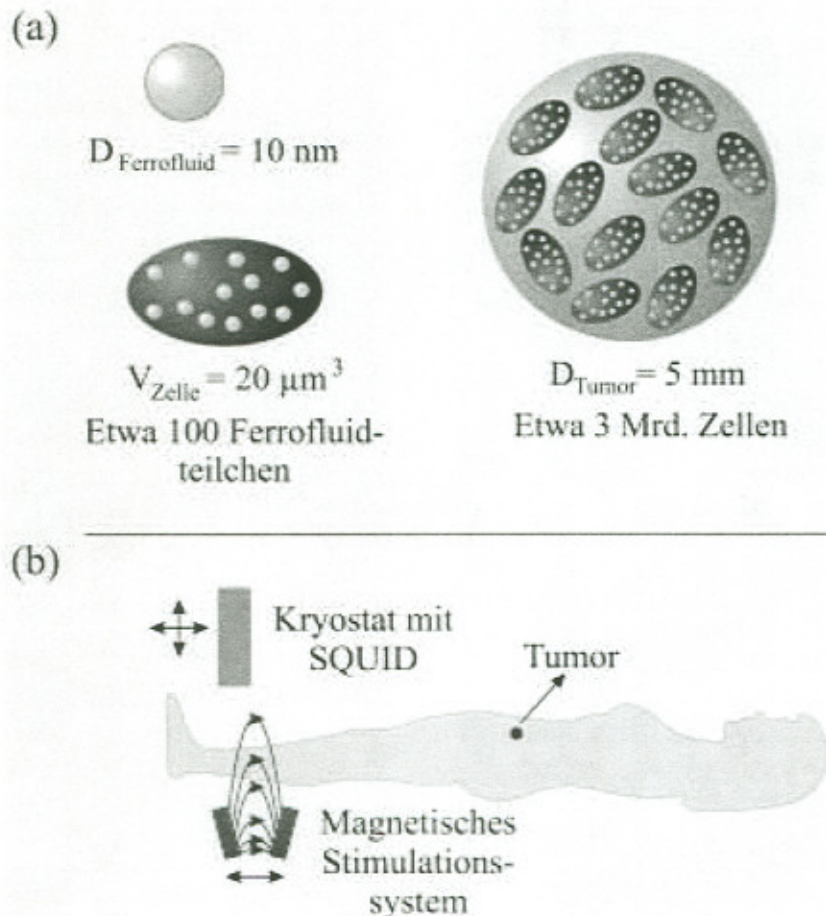


Abb. 17: (a) Qualitative Darstellung der Ferrofluidkonzentration in einer Tumorzelle. (b) Detektion des angereicherten Tumors durch eine magnetische Modulationseinheit und SQUID.

wie sich Zellkulturen in magnetisch abgeschirmter Umgebung und auch unter Einfluss genau definierter Magnetfelder entwickeln. Zugrunde liegend ist hier die Fragestellung, ob sich gewisse Heilungsprozesse im Körper durch Anwendung von statischen oder dynamischen Magnetfeldern positiv beeinflussen lassen oder ob durch lokale Stimulation mit geeigneten Magnetfeldern die Wirkungsweise von Medikamenten verbessert werden kann.

Ein neuer medizinischer Ansatz, bei dem SQUID in unserer Arbeitsgruppe ihren Einsatz finden, basiert auf der Detektion von kleinsten "Ferrofluid"-Konzentrationen im Gewebe. Ferrofluide sind Suspensionen winzig kleiner kristalliner Permanentmagnete mit einem Durchmesser von nur wenigen Na-

nometern. Man kann unter Umständen durch Kopplung an tumorspezifische Antikörper erreichen, dass Tumorzellen einen erhöhten Ferrofluidgehalt in sich einlagern<sup>24</sup>). Durch eine geeignete magnetische Stimulation können die kleinen Permanentmagnete in der Tumorzelle zu einem kollektiven magnetischen Signal angeregt werden (Abb. 17). Da die Ferrofluidkonzentration im Tumor deutlich höher als im übrigen Körper ist, dominiert das magnetische Signal des Tumors gegenüber dem magnetischen "Rauschen" des ihn umgebenden Körpergewebes. Diagnostisch wäre es ein Fortschritt, wenn man bereits sehr kleine Tumore mit wenigen Millimetern Durchmesser zuverlässig durch magnetisches "Scannen" des Körpers nachweisen könnte. So kleine Tu-

more würden dann allerdings auch nur extrem schwache magnetische Signale hervorbringen, die mittels SQUID zu detektieren wären. Ein nützlicher, therapeutisch interessanter Aspekt ergibt sich aus der Möglichkeit, die bereits in dem Tumor angereicherten Ferrofluide zur Tumorbekämpfung heranzuziehen. Dazu lässt sich eine spezielle magnetische Eigenschaft der winzigen Permanentmagnete nutzen: Koppelt man ein magnetisches Feld mit einer geeigneten Frequenz in den Tumor ein, beginnen die Ferrofluidteilchen Energie aus dem magnetischen Wechselfeld zu absorbieren. Dies führt zu einer lokalen Erwärmung und somit im Extremfall zur Zerstörung des Tumorgewebes (Hyperthermie).

Es konnten hier nur ansatzweise die mannigfaltigen Anwendungen supraleitender Magnetfelddetektoren diskutiert werden. Wo immer es Magnetfelder an der Grenze des Messbaren zu detektieren gibt, sind SQUID die häufig einzig geeigneten Sensoren. Sie sind etwa tausendfach empfindlicher als die nächstempfindlichen Magnetfeldsensoren. Dies garantiert den SQUID äußerst interessante Nischenanwendungen in Wissenschaft und Technik.

#### Literatur

- 1) H.K. Onnes, Comm. Leiden 120b (1911).
- 2) H. Ihara, M. Hirabayashi, H. Tanimoto, K. Tokiwa, H. Ozawa, Y. Akahama und H. Kawamura, Jpn. J. Appl. Phys. 32, L 1732 (1993).
- 3) K. Stierstadt, Physik der Materie (VCH, Weinheim, 1993).
- 4) J. Bardeen, L.N. Cooper und J.R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175 (1957).
- 5) B.D. Josephson, Phys. Rev. Lett. 1, 251 (1962).
- 6) P.W. Anderson und J.M. Rowell, Phys. Rev. Lett. 10, 230 (1963).
- 7) J.G. Bednorz und K.A. Müller, Z. Phys. B 64, 189 (1986).



- 8) J. Clarke, W.M. Goubau und M.B. Ketchen, J. Low Temp. Phys. 25, 103 (1976).
- 9) J.E. Zimmermann und A.H. Silver, Phys. Rev. 141, 367 (1966).
- 10) J.E. Zimmermann und A.H. Silver, Solid State Com. 4, 133 (1966).
- 11) R.H. Koch, C.P. Umbach, G.J. Clarke, P. Chaudhari und R.B. Laibowitz, Appl. Phys. Lett. 51, 200 (1987).
- 12) H. Nakane, Y. Tarutani, T. Nishino, H. Yamada und U. Kawabe, Jpn. J. Appl. Phys. 26, L1925 (1987).
- 13) K. Urban, Einführung in die Supraleitung, in Elektrokeramische Materialien, 26. IFF-Ferienkurs, Jülich (1995).
- 14) P. Pitzius, Entwicklung eines Raster-SQUID-Mikroskops mit flussführender ferromagnetischer Sonde, Dissertation, Universität des Saarlandes (2000).
- 15) F. London und H. London, Z. Phys. 96, 359 (1935).
- 16) D. Drung und H. Koch, Supercond. Sci. & Technol. 7, 242 (1994).
- 17) D. Drung und R.H. Koch, Supercond. Sci. & Technol. 7, 242 (1994).
- 18) U. Hartmann, Schwache Magnetfelder in Nanostrukturen, Spektrum der Wissenschaft Dezember, 100 (1999).
- 19) K. Danzmann, Ein zartes Zittern, Bild der Wissenschaft, 80 August (1991).
- 20) K. Danzmann und H. Ruder, Phys. Blätter, 49, 103 (1993).
- 21) W. Winkler, Physik in unserer Zeit, 16, 138 (1985).
- 22) R.A. Hulse und J.H. Taylor, Astrophys. J. 195, L51 (1975)
- 23) H.J. Paik, Analysis and Development of a very sensitive low-temperature gravitational-wave detector, Ph.D. thesis, Stanford University, Stanford, California (1974).
- 24) C. Welter, R. Hanselmann, W. Sannwald und U. Hartmann, Deutsche Patentanmeldung (1999).

Anzeige

Robert Bosch