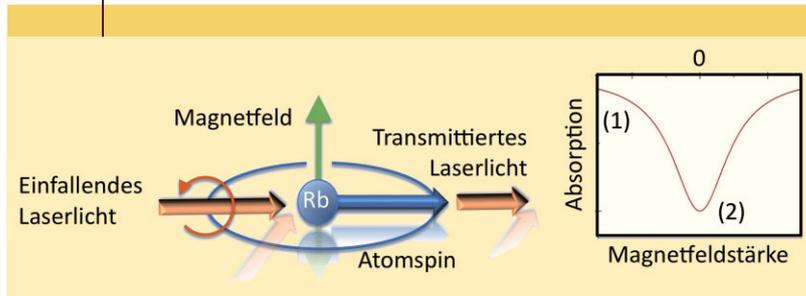


## MEDIZINPHYSIK

## Optische Minimagnetometer

Mit einfachen, auf der Brust angebrachten Elektroden lässt sich bekanntlich ein Elektrokardiogramm (EKG) aufzeichnen. Hierbei nutzt man die Tatsache, dass die Ströme im menschlichen Herzmuskel Potentialänderungen auf der Haut verursachen. Gleichzeitig entstehen schwache Magnetfelder, die sich mit supraleitenden Magnetometern (SQUIDS, Superconducting Quantum Interference Devices) messen lassen. Diese müssen allerdings mit flüssigem Helium auf etwa  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  gekühlt werden. Seit einiger Zeit können auch optische Magnetometer Magnetkardiogramme erstellen [1]. Im Gegensatz zu SQUIDS benötigen sie keine aufwändige Kühltechnik.

ABB. 1 | OPTISCHES PUMPEN



Nach Absorption von zirkular polarisiertem Licht ist der Spin eines Rubidiumatoms ausgerichtet. Der ausgerichtete Atomspin präzediert in einem Magnetfeld. Messprinzip (rechts): Ohne externes Magnetfeld (Zustand (2)) kann das Atom nur wenig Licht absorbieren, da es parallel zum Lichtfeld ausgerichtet ist. In einem Magnetfeld sind Atom- und Photonenspin nicht mehr parallel, und Licht kann absorbiert werden (Zustand (1)).

Optische Magnetometer basieren darauf, dass Atome mit ungepaarten Elektronenspins in Magnetfeldern mit der Larmor-Frequenz präzedieren, die direkt proportional zum Magnetfeld ist (gesamter Elektronenspin: blauer Pfeil in Abbildung 1 links). Alkaliato-

me wie Rubidium besitzen einen solchen ungepaarten Elektronenspin und können resonantes, zirkular polarisiertes Licht absorbieren. Dabei wird der Photonenspin auf das Atom übertragen. So kann man in einem Dampf von Alkaliatomen eine ma-

roskopische Polarisation aufbauen, bis kein weiteres Photon mehr absorbiert wird.

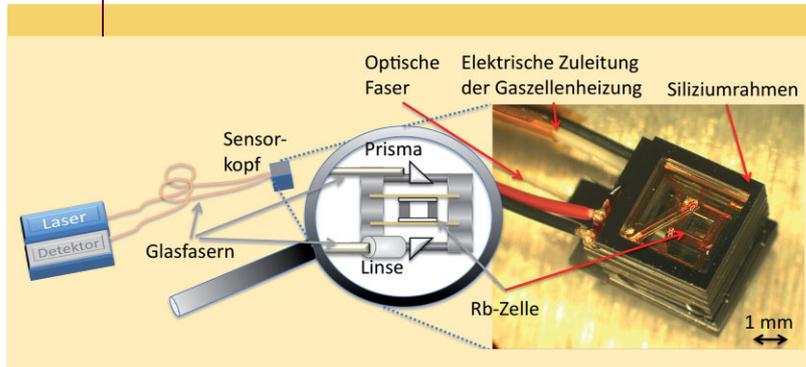
Ändern die Atomspins jedoch ihre Orientierung durch die Präzession in einem Magnetfeld, so können die Atome wieder Photonen mit Spins in Richtung des Laserstrahles absorbieren. Diese Änderung der Absorption (Abbildung 1 rechts) erlaubt das Messen sehr kleiner Magnetfelder, wie sie zum Beispiel bei einem Magnetokardiogramm (MKG) auftreten. Die Feldstärke liegt im Pikoteslabereich und beträgt so nur etwa ein Millionstel der Erdmagnetfeldstärke. Die räumliche und zeitliche Verteilung eines MKG liefert ergänzende Information zum EKG.

Am National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder, Colorado, haben wir für diesen Zweck so genannte Chip-Scale Atomic Magnetometer (CSAM) hergestellt. Wir nutzen dafür eine Ätztechnik, die ursprünglich für miniaturisierte Atomuhren entwickelt wurde [2].

Zunächst haben wir ein Loch durch einen Siliciumwafer geätzt und dieses beidseitig mit Fenstern verschlossen. Das war die mit Rubidium gefüllte Dampfzelle. Durch Dünnschichtheizungen auf den Fenstern kann die Anzahl der Rubidiumatome im Dampf auf etwa 600 Milliarden eingestellt werden. Die Dampfzelle von der Größe eines Reiskorns wird in einem größeren Gehäuse aus Silicium mit einem dünnen Polyamidnetz aufgehängt (Abbildung 2). Dadurch ist die Dampfzelle thermisch weitgehend vom Gehäuse entkoppelt. Eine Mikrooptik lenkt das polarisierte Licht des Lasers durch die Gaszelle und koppelt es zur Detektion auf der Rückseite aus [3]. Die Sensoren lassen sich wie herkömmliche EKG-Elektroden flexibel auf der Brust des Patienten positionieren.

Eine wichtige Voraussetzung für Magnetfeldmessungen im Pikoteslabereich ist eine magnetische Abschirmung, die sowohl das quasi-statische Erdmagnetfeld wie auch technische Wechselmagnetfelder reduziert. Um

ABB. 2 | OPTISCHES MAGNETOMETER



Links: Das Licht eines fasergekoppelten Lasers wird im Sensorkopf über eine Mikrooptik durch eine mit Rubidium gefüllte Dampfzelle geschickt und dann detektiert. Rechts: Sensorkopf.

die Leistungsfähigkeit der optischen Magnetometer ohne diese Störungen zu erproben, wurden die in Abbildung 3 skizzierten optischen MKG-Messungen in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Berlin durchgeführt. Hier befindet sich der wohl am besten magnetisch abgeschirmte Raum der Welt. In der transmittierten Lichtintensität sieht man deutlich die periodische Änderung des Herzmagnetfeldes [4].

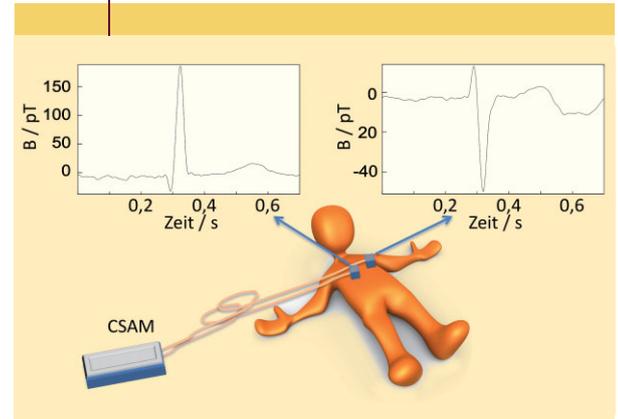
Die optische Messung des MKGs wurde durch eine Messung mit einem SQUID-System validiert. Mit den CSAMs könnte eine robuste und einfach zu handhabende Generation von MKG-Vielkanalmessgeräten hergestellt werden, indem mehrere

Sensoren über die optischen Fasern mit dem Laser verbunden werden. Für die Anwendungen ist dies wichtig, da sich die räumliche Verteilung des Magnetfeldes zeitlich ändert und Informationen über den Gesundheitszustand des Patienten beinhaltet.

- [1] G. Bison, et al., Appl. Phys. Lett. **2009**, 95 (17), 173701
- [2] S. Knappe, et al., Appl. Phys. Lett. **2004**, 85 (9), 1460
- [3] R. Mhaskar, et al., IEEE Intern. Freq. Contr. Symp. **2010**, 376
- [4] S. Knappe, et al., Appl. Phys. Lett. **2010**, 97 (13), 133703

*Svenja Knappe, Jan Preusser, NIST, Boulder (USA);  
Lutz Trabms, Tilmann Sander, PTB, Berlin.*

**ABB. 3 | MAGNETOKARDIOGRAMM**



**Messanordnung von zwei Sensoren auf dem Oberkörper eines Probanden. Die Messkurven zeigen das aus 200 Einzelschlägen gemittelte MKG. Das unterschiedliche Vorzeichen der Signalspitzen ist eine Folge der bipolaren Struktur des Herzmagnetfeldes.**

## KERNPHYSIK

### Die (wirkliche) Dreifachspaltung schwerer Kerne

**Schwere radioaktive Kerne zerfallen in zwei Fragmente mittlerer Masse, wie man seit den ersten Experimenten von Otto Hahn und Fritz Straßmann weiß. Dabei werden große Energiemengen frei. Vor etwa 35 Jahren führten jedoch Rechnungen zu der Voraussage, dass auch Spaltungen in drei mittelschwere Fragmente vorkommen müssten – mit noch höherer Energieausbeute, aber auch mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit. Kürzlich gelang einer russisch-deutschen Kollaboration am Flerov Laboratory im JINR in Dubna (Russland) unter Beteiligung des Helmholtz-Zentrums Berlin (HZB) erstmals der Nachweis dieses seltenen Zerfalls am spontanen Zerfall von Californium-252 und bei der neutroneninduzierten Spaltung von Uran-235 [1].**

Die bei dem Zerfall beispielsweise von  $^{236}\text{U}$  in  $^{138}\text{Ba}$  und  $^{88}\text{Kr}$  freigesetzte Energie ist mit 200 bis 205 MeV sehr hoch. Diese Tatsache konnten Lise Meitner und Otto Robert Frisch im Jahre 1940 im Rahmen des Tröpfchenmodells erklären. In diesem setzt sich die Bindungsenergie aus mehreren Komponenten zusammen: Die Kondensationsenergie entsteht, wenn sich die Nukleonen durch die starke Kernkraft zum Kern vereinigen, die Oberflächenenergie verringert letztere auf Grund der kleineren Bindungsenergie von Nukleonen am Kernrand,

und schließlich wird die Coulomb-Abstoßung von Protonen für größere Kerne immer wichtiger: Kerne jenseits vom Uran ( $Z = 92$ ,  $N = 126$ ) werden instabil. Außerdem gehen der Neutronenüberschuss und die Paarungsenergie gleicher Nukleonen in das Tröpfchenmodell ein.

Die Kernspaltung ist in diesem Modell eine Folge von dynamischer Instabilität. Der zunächst sphärische Kern verformt sich (länglicher Quaderpol), wobei gegen die Oberflächenspannung Energie verrichtet wird. Es ergibt sich eine Spaltbarriere

bei Achsenverhältnissen von etwa 2:1 (Superdeformation). Schließlich schnürt sich der Tropfen ein, und die elektrostatische Abstoßung überwiegt, so dass die zwei Fragmente im abstoßenden Potential auseinander fliegen. Bei einem kleinen Potentialwall reicht teilweise die thermische Energie aus, und es kommt durch den Tunneleffekt zur spontanen Spaltung. Bei vielen Atomkernen ist aber eine Energiezufuhr nötig (Neutronen induzierte Spaltung, wie im Fall  $\text{N} + ^{235}\text{U} \rightarrow ^{236}\text{U}^*(\text{ff})$ ).

Bei einer spontanen Dreifachspaltung von  $^{252}\text{Cf}$  in drei mittelschwere Fragmente sollten nach dem Tröpfchenmodell bei noch höheren Zerfallsenergien als beim binären Zerfall, Werte von 236 bis 251 MeV frei werden. Ursprünglich glaubte man, dass der Kern über eine *oblate* Deformation zerfällt und drei Fragmente in Form eines „Stern“-Ereignisses in drei verschiedene Richtungen emittiert werden. Diese Dreifachspaltung wurde auf dem Niveau von  $10^{-8}$  pro Spaltung nicht gefunden [3]. Schon 1974 fanden Walter Greiner und Herbert Diehl heraus, dass dieser Weg energetisch ungünstiger ist. Sie favorisierten für die wirkliche Dreifachspaltung den Zerfall über eine *prolate* Deformation, das heißt in