Quantensensoren

QUANTENTECHNOLOGIE · MESSEN

Wenn Sie diesen Satz lesen, feuern in Ihrem Gehirn Millionen Nervenzellen, und jeder dieser winzigen Ströme erzeugt ein Magnetfeld. Zusammen ergibt das außerhalb des Kopfes ein Feld von grob hundert Femtotesla, das ist ein Zehntel eines Billionstels Tesla. Das Magnetfeld der Erde, das jede Kompassnadel ausrichtet, ist mehrere hundert Millionen Mal stärker. Trotzdem kann man die Gedankenströme messen, und zwar mit Sensoren, die Quanteneffekte ausnutzen.

Quantensensoren gelten als der Teil der Quantentechnologie, der am schnellsten aus dem Labor in die Anwendung kommt. Weniger spektakulär als Quantencomputer, dafür schon heute in Krankenhäusern, Bergwerken und Observatorien im Einsatz oder kurz davor.

Die Schwäche wird zur Stärke

Wer sich mit Quantencomputern beschäftigt, lernt schnell, wie empfindlich Quantenzustände sind. Ein bisschen Wärme, ein schwaches Störfeld, und die Überlagerung ist dahin. Was beim Rechnen ein Fluch ist, macht man sich beim Messen zunutze. Ein Atom, dessen Zustand schon auf ein winziges Magnetfeld reagiert, ist ein ausgezeichnetes Messgerät für genau dieses Magnetfeld.

Das Grundrezept ist bei fast allen Quantensensoren gleich [1]. Man bringt ein Quantensystem, etwa ein Atom oder einen Elektronenspin, in eine Überlagerung zweier Zustände. Während einer kurzen Wartezeit verschieben die äußeren Einflüsse die beiden Anteile unterschiedlich gegeneinander, so wie zwei Läufer, die auf verschieden langen Bahnen unterwegs sind. Am Ende bringt man die Anteile wieder zusammen und misst, wie stark sie sich gegeneinander verschoben haben. Weil diese Verschiebung von Naturkonstanten und nicht von irgendeiner Eichung abhängt, sind Quantensensoren nicht nur empfindlich, sondern auch außergewöhnlich genau. Das bekannteste Beispiel ist die Atomuhr, die nach genau diesem Prinzip die Zeit misst.

Magnetfelder: vom Gehirn bis zur Zelle

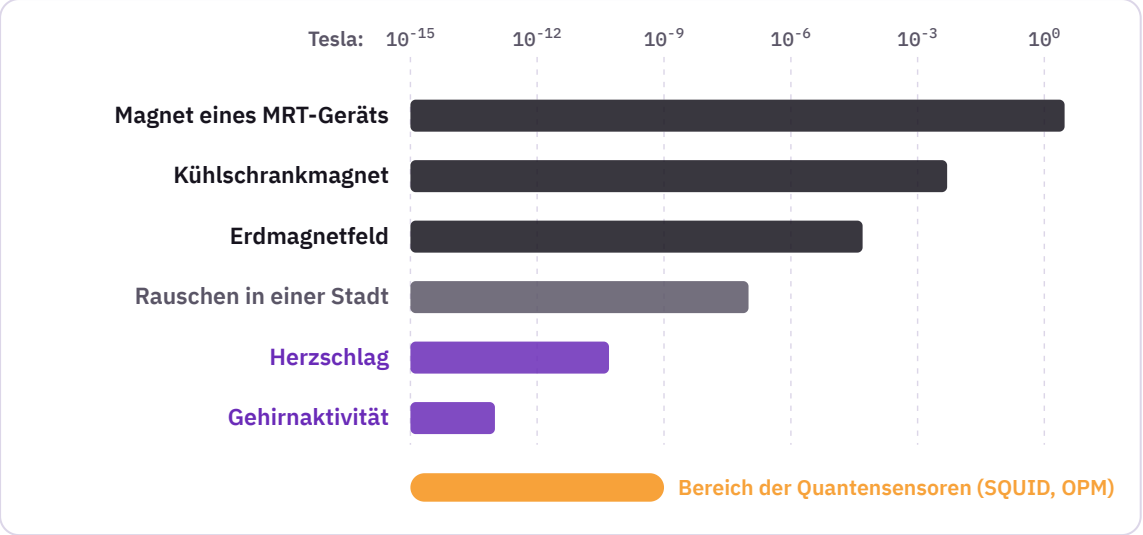


Abb. 1: Wie stark verschiedene Magnetfelder sind, in Größenordnungen. Jeder Teilstrich steht für einen Faktor tausend. Eigene Darstellung, Richtwerte nach [1].

Seit den 1970er-Jahren misst man Gehirnströme mit sogenannten SQUIDs, supraleitenden Ringen, in denen der Strom nur in festen Quantenportionen fließen kann. Diese Magnetoenzephalographie ist so empfindlich wie kaum ein anderes Verfahren, hat aber zwei Nachteile. Die Sensoren müssen mit flüssigem Helium auf rund minus 269 Grad gekühlt werden und sitzen deshalb in einem starren, schweren Helm, in dem der Kopf stillhalten muss. Für kleine Kinder oder Menschen mit Bewegungsstörungen ist das kaum machbar. Dass supraleitende Schaltkreise solche Quanteneffekte zeigen, hat übrigens den Physik-Nobelpreis 2025 eingebracht [2].

Eine Gruppe an der Universität Nottingham hat 2018 einen anderen Weg gezeigt [3]. Ihre Sensoren enthalten ein kleines Glasgefäß mit Rubidiumdampf, dessen Atome mit Laserlicht in einen bestimmten Spinzustand „gepumpt“ werden. Ein Magnetfeld dreht diese Spins, und das verändert, wie viel Laserlicht durch das Gefäß kommt. Solche optisch gepumpten Magnetometer brauchen keine Kühlung und lassen sich direkt auf der Kopfhaut tragen, wie ein Helm. Die Versuchspersonen konnten während der Messung nicken, sich strecken, etwas trinken und sogar Ball spielen [4]. Damit es klappt, muss allerdings das Erdmagnetfeld im Raum weitgehend ausgeglichen werden.

Noch kleiner geht es mit Diamanten. In einem Diamantgitter, in dem neben einem fehlenden Kohlenstoffatom ein Stickstoffatom sitzt, entsteht ein einzelner Elektronenspin, der sich bei Zimmertemperatur mit Laserlicht auslesen lässt. Ein solches NV-Zentrum ist nur so groß wie ein Molekül und kann Magnetfelder auf Nanometerskala abtasten, etwa einzelner Moleküle oder von Strömen in Nervenzellen und Batterien [1].

Schwerkraft aus fallenden Atomen

1999 ließ Steven Chu in Stanford Wolken aus kalten Cäsiumatomen fallen und bestimmte daraus die Erdbeschleunigung mit einer relativen Genauigkeit von wenigen Milliardsteln [5]. Das Prinzip: Laserpulse teilen jedes Atom in eine Überlagerung zweier Wege auf, die unterschiedlich hoch verlaufen, und führen sie wieder zusammen. Wie stark die beiden Wege gegeneinander verschoben sind, hängt direkt von der Schwerkraft ab. Inzwischen gibt es solche Atominterferometer als transportable Geräte.

Wozu man das braucht? Die Schwerkraft ist nicht überall gleich. Über einem Hohlraum, einer Erzader oder einem Grundwasservorkommen ist sie ein winziges bisschen schwächer oder stärker. Geologen suchen damit nach Rohstoffen, Bauingenieure nach alten Bergwerksstollen unter Baugrundstücken, Vulkanologen beobachten, wie sich Magma bewegt. Und weil Quantensensoren auch Beschleunigungen und Drehungen sehr genau messen, arbeiten mehrere Forschungsgruppen an Navigationsgeräten, die ohne Satellitensignal auskommen, etwa für U-Boote oder für den Fall, dass GPS gestört wird.

Licht, das leiser rauscht

Eine besonders elegante Anwendung steckt in den Gravitationswellendetektoren. LIGO in den USA misst Längenänderungen von einem Bruchteil eines Protonendurchmessers auf vier Kilometern Laufstrecke. Irgendwann stößt man dabei an das Quantenrauschen des Lichts selbst, das aus einzelnen, zufällig eintreffenden Photonen besteht. Seit 2019 speisen die Detektoren sogenanntes gequetschtes Licht ein, dessen Rauschen in der entscheidenden Größe unter die übliche Quantengrenze gedrückt ist. Das hat die Empfindlichkeit messbar erhöht und damit die Zahl der Ereignisse, die man beobachten kann [6].

Und in Deutschland?

Quantensensorik ist ein Feld, in dem Deutschland stark ist. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig betreibt einige der genauesten Uhren der Welt, und in Stuttgart und Ulm hat sich der Verbund QSens gebildet, der Forschung zu Quantensensoren gemeinsam mit Industriepartnern in Produkte überführen will. Als Anwendungen nennt er medizinische Bildgebung, Sensoren für autonomes Fahren und den Blick in Batterien, um deren Ladezustand und Alterung zu verfolgen [7].

Bei aller Begeisterung lohnt ein nüchterner Blick. Viele Quantensensoren funktionieren hervorragend im abgeschirmten Labor und deutlich schlechter draußen, wo Autos vorbeifahren und Stromleitungen brummen. Der Schritt vom Prototyp zum robusten, bezahlbaren Gerät ist oft größer als der physikalische Durchbruch selbst. Aber anders als beim Quantencomputer ist der Nutzen hier schon im Kleinen da: Ein Sensor, der zehnmal genauer misst als sein Vorgänger, ist vom ersten Tag an nützlich.

Zum Weiterlesen

Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper

Wolfgang Demtröder · Springer, 2016 · ISBN 978-3-662-49093-8

Die physikalischen Grundlagen, auf denen Quantensensoren beruhen: Spins im Magnetfeld, optisches Pumpen, Atomuhren und Supraleitung.

Bei Amazon ansehen*

Einsteins Spuk. Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik

Anton Zeilinger · Pantheon, 2024 · ISBN 978-3-570-55502-6

Wie Überlagerung und Verschränkung im Labor funktionieren, erzählt vom Physik-Nobelpreisträger 2022.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. C. L. Degen, F. Reinhard, P. Cappellaro: *Quantum sensing.* In: Reviews of Modern Physics 89 (2017), 035002, doi:10.1103/RevModPhys.89.035002.
2. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2025.* nobelprize.org/prizes/physics/2025/summary.
3. E. Boto u. a.: *Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system.* In: Nature 555 (2018), S. 657–661, doi:10.1038/nature26147.
4. University of Nottingham: *Wearable MEG.* Projektseite, nottingham.ac.uk.
5. A. Peters, K. Y. Chung, S. Chu: *Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms.* In: Nature 400 (1999), S. 849–852, doi:10.1038/23655.
6. M. Tse u. a.: *Quantum-Enhanced Advanced LIGO Detectors in the Era of Gravitational-Wave Astronomy.* In: Physical Review Letters 123 (2019), 231107, doi:10.1103/PhysRevLett.123.231107.

7. Universität Stuttgart: *QSens – Quantensensoren der Zukunft im Finale des Wettbewerbs Clusters4Future.* Presseinformation vom 10. Februar 2020. uni-stuttgart.de.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Quantensensoren. Stand: Oktober 2026. URL:
https://quanten.de/quantensensoren.html (PDF:
https://quanten.de/pdf/quantensensoren.pdf)
```

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Atomuhren und die neue Sekunde · Kernspintomographie · Spintronik · Der Tunneleffekt

---

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/quantensensoren.html