

# QUANTENSENSORIK UND QUANTENMETROLOGIE MACHEN GEWALTIGE FORTSCHRITTE

Mittlerweile können Forschende Quantensysteme gezielt erzeugen und ihren Zustand präzise kontrollieren und auslesen. Das nährt nicht nur die Hoffnung auf eine neue Generation von Computern, sondern auch auf präzisere Sensoren sowie deutlich kürzere Messzeiten. Damit befassen sich die Forschungsfelder Quantensensorik und Quantenmetrologie – und machen aktuell große Fortschritte.

Sensoren spielen für die Menschheit eine zentrale Rolle. Sie erlauben es, eine Vielzahl von Messdaten aufzunehmen, die unsere menschlichen Sinnesorgane gar nicht erfassen können. Die Menge der durch Sensoren erzeugten Rohdaten hat in den vergangenen Jahrzehnten so stark zugenommen, dass sie heute oft gar nicht mehr gesichtet werden. Stattdessen extrahieren intelligente Analyseverfahren nur die wirklich nützlichen Informationen aus den riesigen Datenmengen.

Der Wunsch, die Empfindlichkeit von Sensoren zu verbessern und so neue Anwendungsgebiete zu erschließen, ist so alt wie die Sensoren selbst. Schon sehr früh wurden dafür quantenphysikalische Phänomene wie Supraleitung und Magnetismus gezielt ausgenutzt. Solche hochempfindlichen Quantensensoren sind bereits seit Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz. Vor diesem Hintergrund wirkt es zunächst überraschend, dass die Forschungsaktivitäten auf einem technisch so ausgereiften Feld wieder stark zugenommen haben.

#### Neues Interesse an Quantensensorik

Tatsächlich ist das Interesse aus Forschung, Industrie und Politik so stark, dass man von einem neuen Hype

um das Thema Quantensensorik sprechen kann. Dafür gibt es aber einen guten Grund: Mit dem enormen Fortschritt in der Quantentechnologie haben Forschende gelernt, maßgeschneiderte Quantensysteme herzustellen, sie genau zu präparieren, zu manipulieren und auszulesen. Reagieren diese Quantensysteme empfindlich auf Umgebungsvariablen, zum Beispiel elektrische und magnetische Felder, Temperatur oder Beschleunigung, können durch Messung der Zustandsänderung dieser Quantensysteme die Umgebungsvariablen hochgenau bestimmt werden.

Bei Quantensensoren geht es also darum, aus der Änderung des Zustands eines Quantensystems seine Umgebungsvariablen mit höchster Genauigkeit zu bestimmen. Die Grundanforderungen an solche Quantensensoren lauten:

- ▶ Der Sensor wird von einem Quantensystem mit diskreten Energieniveaus gebildet.
- ▶ Das Quantensystem muss in einem wohldefinierten Zustand initialisiert werden können sowie gut manipulierbar und auslesbar sein.
- ▶ Es liegt eine ausgeprägte Abhängigkeit des Quantenzustands von Umgebungsparametern vor.

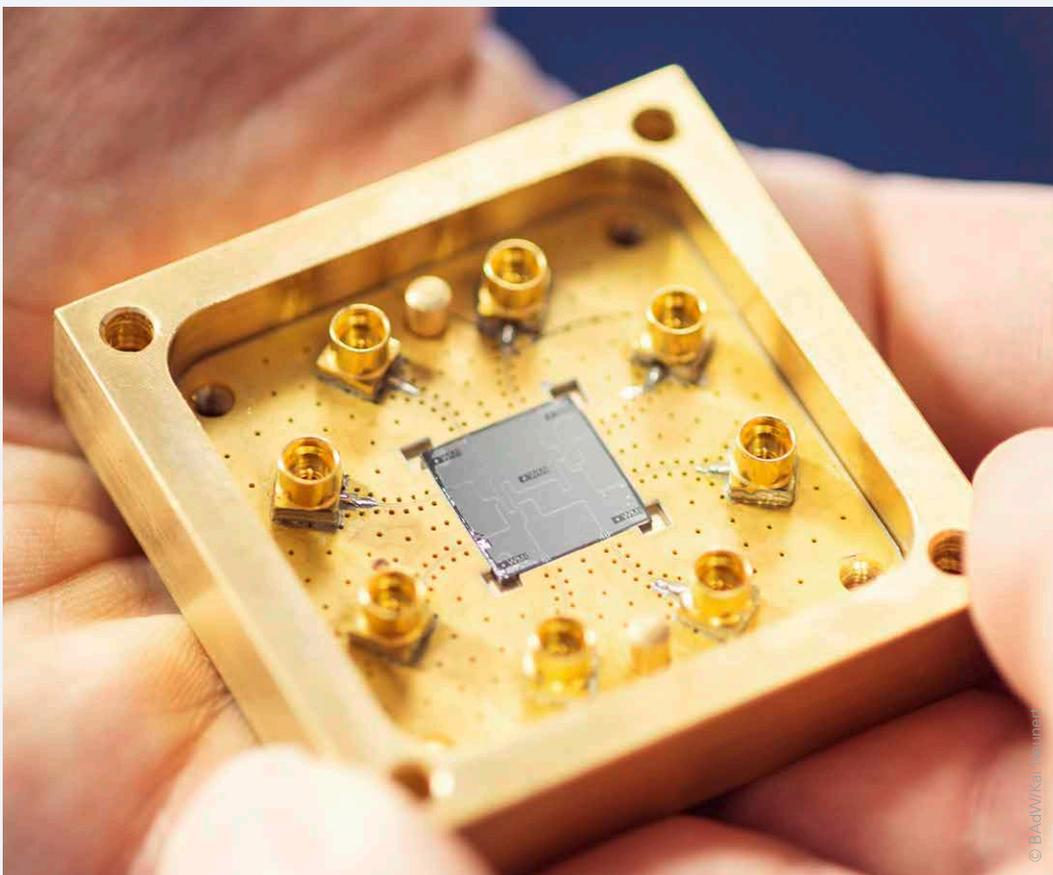
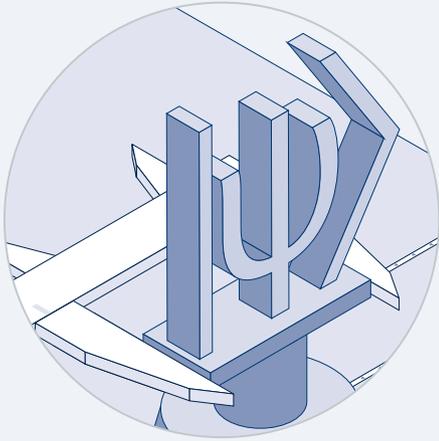


Bild 1: Hergestellt am Walther-Meißner-Institut: Der Chip im HF-Gehäuse beherbergt mehrere supraleitende Schaltkreise.



Glücklicherweise kommt bereits in der Natur eine Vielzahl von Quantensystemen vor, die diese Anforderungen erfüllen. Hierzu gehören einzelne Atome, Ionen und Atomwolken, die sich mit Ionenfallen festhalten lassen. Eine zweite Klasse sind atomartige Defekte in Festkörpern, wie das Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum in Diamant, das oft für Quantensensoren genutzt wird. Für beide Klassen stehen heute ausgefeilte Techniken zur Verfügung, um Quantenzustände kohärent zu manipulieren und zu kontrollieren. Diese Techniken basieren unter anderem auf kontinuierlichen und gepulsten Laser- und Mikrowellensignalen.

#### Wo Quantensensorik und Quantencomputer voneinander profitieren

Die Forschung ist heute sogar noch einen Schritt weiter. Mittlerweile lassen sich auf der Basis von Festkörpern auch maßgeschneiderte Quantensysteme künstlich herstellen. Ihre Eigenschaften können dann für Sensoranwendungen gezielt optimiert werden. Prominente Beispiele sind nanomechanische, supraleitende oder Spin-basierte Systeme. Besonders interessant ist, dass solche Quantensysteme auch für die Realisierung von Quantencomputern verwendet werden. Eigentlich sind Quantencomputing und Quantensensorik zwei getrennte Forschungsfelder, denn während Quantensysteme für Computer im Allgemeinen nur sehr schwach von den Umgebungsparametern abhängen dürfen, gilt für Sensoranwendungen gerade das Gegenteil. Aber bei der Entwicklung von Techniken zur Manipulation und Kontrolle von Quantensystemen gibt es eine deutliche Überschneidung, sodass beide Bereiche stark voneinander profitieren können.

#### Quantenmetrologie und kürzere Messzeiten

Noch viel enger mit der Quantensensorik ist das Gebiet der Quantenmetrologie verbunden. Hier geht es darum, den Zustand eines bestimmten Systems – dies kann ein klassisches oder ein Quantensystem sein – durch eine Messung

möglichst genau zu bestimmen. Ein solcher Messvorgang ist auch das Auslesen eines Quantensensors.

Für diesen Messprozess setzt die Quantenphysik mit der Heisenbergschen Unschärferelation eine fundamentale Grenze. Die Heisenberg-Grenze besagt, dass die Präzision einer Messung mit zunehmender Messzeit  $t$  nicht schneller als proportional zu  $1/t$  oder äquivalent zum Kehrwert  $1/N$  der Zahl der Messvorgänge zunehmen kann. Die Heisenberg-Grenze kann aber nur dann erreicht werden, wenn die einzelnen Messvorgänge quantenkorreliert sind. Erreichen lässt sich das durch nicht-klassische Signale, zum Beispiel gequetschte Quantenzustände. Dann muss aber auch sichergestellt werden, dass die Quantenkorrelationen während des Messprozesses nicht durch Wechselwirkung mit störenden Umgebungseinflüssen verloren gehen. Ohne Quantenkorrelationen liegt nur noch der so genannte Standard-Quanten-Limes im Bereich des Möglichen, bei dem die Messpräzision proportional zu  $1/\sqrt{N}$  skaliert. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist das Quantenradar (siehe Artikel „Quantenkorrelation verbessert Radartechnik“ auf Seite 24), bei dem das Signal-Rausch-Verhältnis durch Verwendung von gequetschten Mikrowellenzuständen verbessert werden kann.

Ein weiteres Beispiel stammt aus der Grundlagenforschung. Gelingt hier die direkte Messung von Gravitationswellen, könnte sich ein neues Forschungsfeld in der Astronomie auf tun. Arbeiten die Laser-Interferometer, die als Gravitationswellendetektoren genutzt werden, statt mit dem üblichen kohärentem Laserlicht mit gequetschtem Licht, lässt sich die Auflösung bei gleicher Messzeit wesentlich verbessern.

Während quantenmetrologische Techniken zum Erreichen der Heisenberg-Grenze Gegenstand aktueller angewandter Forschung sind, deuten jüngste Forschungsergebnisse bereits darauf hin, dass selbst diese Grenze überwunden werden kann. Nötig sind dazu quantenkorrelierte Zustände, bei denen die einzelnen Teilchen des Zustands (Photonen bei gequetschtem Licht) miteinander wechselwirken.

#### Starke nationale Forschungslandschaft, internationaler Anwendermarkt

Aufgrund der großen allgemeinen Bedeutung von Sensorik und Metrologie in Wissenschaft und Technik besteht international riesiges Interesse an der Entwicklung verbesserter



Bild 2: Supraleitende Schaltkreise arbeiten nahe am Temperaturnullpunkt und werden dafür in Kryostaten wie diesem betrieben.

Sensoren und Messverfahren durch die Verwendung von Quantentechnologien. Die Themen Quantensensorik und Quantenmetrologie stellen deshalb auch zentrale Forschungsgebiete des Münchener Exzellenzclusters Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST) und eines Leuchtturmprojekts des Munich Quantum Valley e.V. (MQV) dar. Da die für Quantensensorik und Quantenmetrologie notwendigen Quantensysteme weniger komplex als die für Quantencomputer sind, ist zu erwarten, dass praktische Anwendungen hier früher realisiert werden können. Die Einsatzgebiete sind breit gefächert. Sie reichen von der Mikroskopie, medizinischer Bildgebung und Radartechnik über Positioniersysteme, Sensoren für elektrische und magnetische Felder, Geoprospektion und Seismologie bis hin zu Gravitationswellendetektoren sowie noch präziseren Atomuhren und Spektroskopieverfahren.

Durch die großzügige Forschungsförderung im Bereich der Quantenwissenschaften und Quantentechnologien in Deutschland sind die wissenschaftlichen und technischen Fortschritte bei der Quantensensorik und Quantenmetrologie zurzeit riesig. Ein erwartungsvoller Blick in die Zukunft ist also angebracht, zusammen mit der Hoffnung, dass die wissenschaftlichen und technischen Erfolge auch in kommerzielle Erfolge umgesetzt werden können.

PROF. DR. RUDOLF GROSS,  
WALTHER-MEIBNER-INSTITUT, BaDw  
FABIAN KRONOWETTER, ROHDE & SCHWARZ