

## ■ Die Mischung macht's

Eine Methode der klassischen Signalverarbeitung hilft, Quantensensoren zu verbessern.

Das genaue Messen physikalischer Parameter ist eine Königsdisziplin der Physik und Triebfeder nahezu aller technischen Innovationen. Gewöhnlich bestimmt die Quantenmechanik, wie genau sich eine Größe messen lässt. Manchmal erlauben es aber auch Verfahren der klassischen Signalgewinnung und -verarbeitung, die Empfindlichkeit und spektrale Auflösung zu steigern. Dies zeigten drei Forscherteams in Ulm [1] und Zürich [2] sowie jüngst in Harvard [3].

Die Quantenmechanik beschränkt die Genauigkeit von Messungen über den Beitrag der Messapparatur hinaus. Messungen verursachen in der Regel zusätzliches Rauschen, das so genannte Quantenprojektionsrauschen, welches aus der stochastischen Natur des Messprozesses in der Quantenmechanik resultiert. Andererseits ermöglicht die Quantenmechanik wesentlich genauere Messungen, als dies klassisch möglich wäre, sobald nicht-klassische Ressourcen wie Verschränkung genutzt werden.

Quantenmechanische Präzisionsmessungen basieren auf der genauen Messung der Phase von Wellenfunktionen. Präzidiert z. B. ein Spin für eine Zeit  $t$  in einem äußeren Magnetfeld  $B$ , so ändert sich die Phase seiner Wellenfunktion nach dieser Zeit um  $\Delta\varphi = (g\beta/\hbar) Bt$ . Hierbei sind  $g$  der Landé-Faktor des Spins und  $\beta$  das Bohrsche Magneton. Je genauer diese Phase bekannt ist, desto präziser lässt sich das

Magnetfeld  $B$  bestimmen. Analog laufen z. B. Präzisionsmessungen anhand der Frequenz eines Hyperfeinübergangs in Cs ab.

Neben apparativem Rauschen, das die Genauigkeit jeder Phasenmessung beschränkt, limitiert die Zeit  $t$ , über die man die ungestörte Präzession messen kann, die Genauigkeit der Phasenmessung. Diese Zeit ist durch die Dephasierung des Spins begrenzt. Präzisionsmessungen verlangen daher Systeme, die einerseits maximal mit der zu messenden Größe wechselwirken und andererseits möglichst lange Dephasierungszeiten zeigen, d. h. eine geringe Wechselwirkung mit der Umgebung aufweisen. Spindefekte in Diamant erfüllen als eines der wenigen Festkörpersysteme diese widersprüchlichen Bedingungen, da sie aufgrund der besonderen Materialeigenschaften von Diamant kaum mit der Festkörperumgebung, z. B. mit Phononen, wechselwirken. Sie kamen in den vergangenen Jahren bei einer Reihe von Präzisionsmessungen zum Einsatz. Dazu gehören Messungen von Magnetfeldern, aber auch von Temperaturen und elektrischen Feldern. Da für viele dieser Messungen einzelne Spindefekte, zumeist Stickstoff-Fehlstellenzentren (NV-Zentren), benutzt werden, lassen sich die genannten Größen auf sehr kleinen Längenskalen bestimmen. Jüngst gelang es, NV-Zentren sogar in die Spitze von Rasterkraftmikroskopen zu integrieren.

Eine Anwendung nanoskaliger Präzisionsmessungen hat in der jüngeren Vergangenheit besonders viel Aufmerksamkeit erregt: die ultraempfindliche Messung von Kernspinresonanzsignalen (NMR) [4]. Da die Kernspins selbst in einem von außen angelegten Magnetfeld rotieren, gilt es, diese zeitlich oszillierenden Magnetfelder zu bestimmen. Dazu wird häufig der Elektronenspin des NV-Defektzentrums, der das magnetische Moment der Kernspins nachweisen soll, mit der Periode der Larmor-Präzession der Kernspins umgeklappt und auf diese Weise das oszillierende Signal der Kernspins „gleichgerichtet“. Das so gemessene Signal ist vollkommen analog zu einem klassischen NMR-Signal. Aufgrund der Empfindlichkeit des Quantensensors ist es allerdings möglich, kleinste Probenvolumina bis hin zu einzelnen Proteinen zu detektieren, ein Empfindlichkeitsgewinn gegenüber klassischer NMR von etwa zwölf Größenordnungen.

Während der Empfindlichkeitsgewinn dieser Messungen spektakulär ist, gilt dies nicht für die spektrale Auflösung. Diese ist aber von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit der NMR-Spektroskopie: Erst der Detailreichtum von NMR-Spektren hat die Methode zu einer der wichtigsten in der Materialwissenschaft gemacht, besonders in der Strukturbiologie und medizinischen Analytik (MRT: Magnetresonanztomographie). Denn

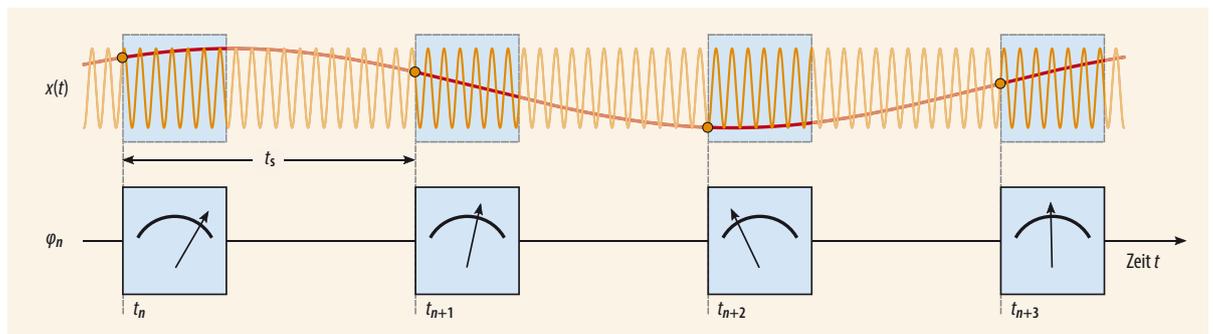


Abb. 1 Ein externer Oszillator (rot) tastet das oszillierende Signal  $x(t)$  eines periodisch variierenden Magnetfelds in Zeit-

abständen  $t_s$  ab, das durch die Larmor-Präzession von Kernspins entsteht (gelb). Ein Elektronenspin, dessen Phase

zu den Zeitpunkten  $t_n$  ausgelesen wird, sorgt für die Wechselwirkung der Felder.

die Frequenz der Larmor-Präzession von Kernspins hängt nicht nur von dem von außen angelegten Magnetfeld ab, wie dies bei freien Kernspins der Fall wäre, sondern auch von ihrer chemischen Umgebung. Die Elektronenhülle führt z. B. zu einer diamagnetischen Abschirmung des äußeren Magnetfeldes (chemische Verschiebung), und die Wechselwirkung zwischen Kernspins ( $J$ -Kopplung) bewirkt ebenfalls eine Feinstruktur von NMR-Spektren. Die Frequenzen dieser Wechselwirkungen liegen meist zwischen einigen Hz und einigen hundert Hz. Die spektrale Auflösung des NV-Quantensensors ist aber durch die Relaxationszeit des Sensors, die einige Millisekunden beträgt, auf etwa 1 kHz beschränkt. Klassisch interpretiert entspricht diese Auflösungsbeschränkung gerade der spektralen Breite eines lokalen Oszillators, der in einem Heterodynverfahren – wie bei einem alten Analogradio – benutzt wird. Stimmt man diesen lokalen Oszillator über eine zu messende Frequenzquelle ab, so ist deren gemessene spektrale Breite durch die Faltung der beiden Signale bestimmt.

An dieser Stelle setzen die Arbeiten der drei Forschergruppen an, indem sie eine Methode verwen-

den, bei der die spektrale Auflösung besser als die Relaxationszeit des verwendeten Quantensensors ist. In ihrem Verfahren ersetzen die Gruppen den Elektronenspin, einen schlechten lokalen Oszillator, durch die viel höhere Frequenzgenauigkeit des Frequenzgenerators (Abb. 1), der den Elektronenspin in einer speziell designten Pulssequenz treibt. Ganz analog zu dem Heterodynverfahren überlagert ein Mischer die beiden Signalquellen: das oszillierende Magnetfeld durch die Larmor-Präzession der Kernspins und den Frequenzgenerator. Bei diesen Experimenten entspricht der Elektronenspin des NV-Zentrums einem nichtlinearen Mischer.

Die erreichte Auflösung hängt dann nur noch von der Frequenzbreite der Signalquellen ab und kann bei genügend langer Mittelungszeit unterhalb  $10^{-3}$  Hz liegen, wie die Ulmer und die Züricher Gruppen zeigten [1, 2]. Die Relaxationszeit des Quantensensors spielt bei dem Verfahren keine Rolle mehr, solange sie länger als die Pulsdauer ist, mit welcher der Elektronenspin kontrolliert wird. Die Ulmer Gruppe demonstrierte zudem, dass das Verfahren immer dann zu einer sehr günstigen Skalierung der gemessenen spektralen Breite mit der Mittelungszeit führt,

wenn das zu messende Signal klassischen Ursprungs ist und keine signifikante Rückwirkung des Sensors bzw. der Messung an dem Sensor auf das Signal vorliegt [1].

Die Methode verspricht eine Reihe von Anwendungen in der Quantensensorik, wobei die spektakulärste derzeit wiederum die NMR ist. Denn mittlerweile hat die Arbeitsgruppe um Ronald Walsworth von der Harvard University das Verfahren genutzt [3], um mit einem Ensemble von NV-Zentren spektral hochaufgelöste NMR an einem Probenvolumen von etwa 30 Pikolitern zu demonstrieren – ein erster Schritt hin zu einer Anwendung der Methode in der Nanoanalytik. Bei sehr viel kleineren Probenvolumina spielt die Rückwirkung zwischen dem zu messenden Kernspin und dem Sensor eine große Rolle. In diesem Fall eignen sich aber Quantenspeicher, um hochauflösende NMR zu realisieren [5].

Jörg Wrachtrup

- [1] S. Schmitt et al., *Science* **356**, 832 (2017)
- [2] J. M. Boss et al., *Science* **356**, 837 (2017)
- [3] D. Bucher et al., arXiv:1707.08887 (2017)
- [4] T. Staudacher et al., *Science* **339**, 561 (2013)
- [5] N. Aslam et al., *Science* **357**, 67 (2017)

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup, Universität Stuttgart, 3. Physikalisches Institut, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

## TURBULENTE ATMOSPHERE AUSGETRICKST

Am Very Large Telescope der ESO in der chilenischen Atacama-Wüste hat die Adaptive Optics Facility (AOF) erstes Licht gesehen. Das komplexe System am Hauptteleskop Yepun besteht aus vier Laserstrahlen, die in der oberen Atmosphäre Lichtpunkte erzeugen, und einem adaptiven Sekundärspiegel. Die „künstlichen Sterne“ erscheinen durch Turbulenzen in der Atmosphäre verzerrt. Um diese Störungen auszugleichen, wird die Form des Sekundärspiegels etwa tausendmal pro Sekunde leicht verändert. Als Resultat zeigen die deutlich schärferen Bilder feinere Details und lichtschwächere Sterne.

Getestet wurde das neue System unter anderem bei Aufnahmen des planetarischen Nebels NGC 6369 im Sternbild Schlangenträger. Der Integralfeld-Spektrograph MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer) erzeugte dafür Datensätze aus tausenden Bildern bei verschie-

denen Wellenlängen. Die Aufnahme mithilfe der AOF (rechts) hat eine signifikant höhere Auflösung.

Eines der wichtigsten Ziele der AOF ist es, sehr weit entfernte und damit sehr junge Galaxien zu beobachten, um zu entschlüsseln, wie sie entstehen.

Außerdem lassen sich mit der AOF die adaptiven Techniken optimieren, die für das Extremely Large Telescope vorgesehen sind. (ESO)

