

# Die wohl größten Quantenobjekte der Welt



10  $\mu\text{m}$

Die Nanosaiten befinden sich  
zwischen diesen Elektroden  
(siehe S. 72)

In der Welt der Quanten, also des Allerkleinsten, der Größte zu sein, das dürfte ja eigentlich keine besondere Schwierigkeit darstellen. Aber dabei gleichzeitig die in dieser Welt üblichen Gesetze einzuhalten, das ist fast ein Ding der Unmöglichkeit. Professorin Eva Weig strebt dies mit ihrem Team an. Die Forschenden bauen mechanische Quantensensoren, die so groß sind, dass man sie unter dem Elektronenmikroskop sehen kann. Sie könnten vielleicht eines Tages wichtige Bausteine einer neuen Quantentechnologie sein.

Full Article (PDF, EN): [www.tum.de/faszination-forschung-30](http://www.tum.de/faszination-forschung-30)

## The World's Largest Quantum Objects

E

Quantum systems are normally minute in size, made up of one or several elementary particles, atoms or, at the very most, molecules. Prof. Eva Weig, holder of the Chair of Nano and Quantum Sensors at TUM, is going far beyond this scale. Together with her team, Weig uses semiconductor materials to develop extremely fine strings that can vibrate with precision, making them macroscopic mechanical objects and quantum objects at the same time. The groundbreaking aspect of these quantum-mechanical objects, which can be seen under an electron microscope, is that they are designed to function at room temperature – which makes it significantly easier to apply them in practice. Until now, such objects had to be cooled to close to absolute zero. One day, these objects could become fundamental components of vital sensors or components in quantum computers. □

Link

[www.ee.cit.tum.de/nan/](http://www.ee.cit.tum.de/nan/)

## Wann ist ein Objekt ein Quantenobjekt?

In der Welt des Allerkleinsten gibt es Objekte, die Eigenschaften besitzen, die unserem natürlichen Empfinden völlig zuwiderlaufen und mit der klassischen Physik nicht zu erklären sind:



Wenn man ihre Energie misst, können sie nicht genau an einem Ort lokalisiert werden und umgekehrt. Man nennt dieses Gesetz die Heisenbergsche Unschärferelation.



Sie können nur ganz bestimmte Energiezustände annehmen. Dazwischen gibt es keinen kontinuierlichen Übergang, sondern nur Quantensprünge. Daher rührt auch ihr Name „Quantenobjekte“.



Sie können aber in einer Überlagerung verschiedener Zustände existieren. Erst wenn man eine Messung vornimmt, nagelt man sie auf einem bestimmten Zustand fest. Diese Eigenschaft benutzt man unter anderem im Quantencomputer.



Sie können mit anderen Quantenobjekten verschränkt sein – Einstein nannte das „spukhafte Fernwirkung“. Wenn eines der Objekte seinen Zustand verändert, tun das die damit verschränkten Objekte ebenfalls. Deshalb lassen sich Quantenobjekte auch teleportieren.



Zeigt ein Objekt eine oder mehrere dieser Eigenschaften, bezeichnet man es als Quantenobjekt.

Für den Normalbürger mit gesundem Menschenverstand klingen die Vorgänge in der Quantenwelt eher nach Märchen: Teilchen, die sich in Wellen verwandeln und umgekehrt; Partikel, die sich per Telepathie verständigen; Katzen, die gleichzeitig tot und lebendig sind, oder Objekte, die simultan an zwei verschiedenen Stellen sind. Aber es sind keine Märchen, sondern die Grundlagen unserer modernen Welt. Ohne diese erstaunlichen Phänomene gäbe es heute keinen Computer, keinen Laser, keine Kernspintomographie, ja nicht einmal einen gewöhnlichen Fernseher. Das, was dem gesunden Menschenverstand so unerklärlich und rätselhaft erscheint, hat seine Existenz inzwischen millionenfach in der Praxis bewiesen.

Und die Entwicklung geht rasant weiter: Diese Eigenschaften der Quantenwelt, die uns jetzt noch so seltsam vorkommen, werden vielleicht bald ebenso selbstverständlich die Grundlage einer neuen Quantentechnologie sein wie heute Elektrizität oder Halbleitertechnik. In ihr werden all diese Phänomene nicht nur im Verborgenen zum Tragen kommen, sondern ganz bewusst eingesetzt werden. Allerdings ist die Wissenschaft gerade erst dabei, die technischen Bausteine für diese neue Quantenwelt zu entwickeln. Da werden Atome oder Ionen in Fallen eingesperrt, Designeratome in Festkörper eingebaut oder feinste elektrische Übergänge in Supraleitern erzeugt. Dazu Bauelemente, die diese Elemente verbinden sowie ein- und ausschalten können.

### Schwingende Nanosaiten

Normalerweise sind Quantensysteme einzelne oder mehrere Elementarteilchen, Atome oder höchstens Moleküle. Eva Weig geht mit ihrem Team aber einen ganz anderen Weg: An ihrem Lehrstuhl für Nano- und Quantensensorik entstehen extrem kleine Saiten aus Keramik- bzw. Halbleitermaterial, die aber makroskopische Objekte sind: Sie enthalten etwa eine Billion, also  $10^{12}$  Atome. Ein solches System als Quantenbaustein? Das klingt exotisch, und das ist es auch, aber dieser Ansatz hat eine ganze Reihe von Vorteilen. „Unsere Objekte kann man vergleichen mit Nano-Gitarrensaiten, die man durch Zupfen in Schwingung versetzt“, erklärt die Physikerin, „und diese können sich unter bestimmten Bedingungen wie quantenmechanische Systeme verhalten. Sie können also bestimmte Zustände annehmen, die gespeichert, übertragen, ja sogar mit anderen verschränkt werden können. Ich finde das faszinierend.“ Mit ihrer Länge von bis zu 50 Mikrometern gehören diese Nano-Strings heute zu den größten quantenmechanischen Systemen, die es auf der Welt gibt. ▶



Bildnachweis: Magdalena Jooss; Grafiken: edlundsepp

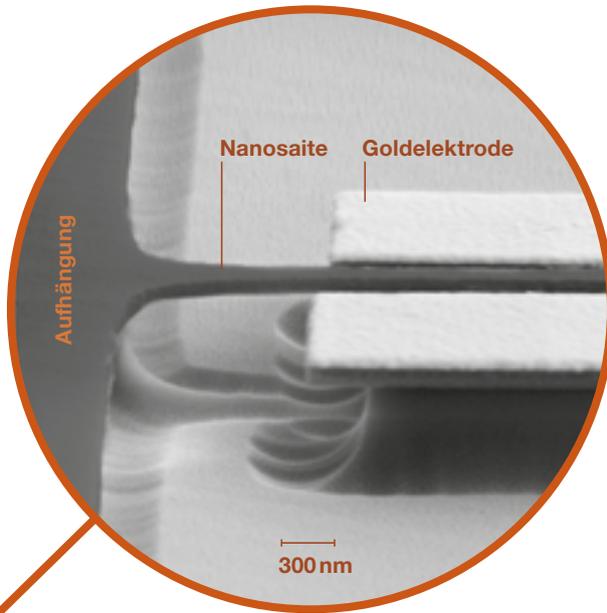
---

### Prof. Eva Maria Weig

---

hat ihre Liebe zu München nie verloren. Hier wurde sie geboren, hier studierte sie Physik an der LMU, hier promovierte sie 2004 am Lehrstuhl für Festkörperphysik. Auch wenn sie danach als Postdoktorandin nach Santa Barbara in Kalifornien ging, kehrte sie 2008 wieder nach München zurück, wo sie von 2007 bis 2012 als Hochschulassistentin und von 2008 bis 2009 als Vertretungsprofessorin an ihrem alten Institut an der LMU tätig war. Ab 2013 leitete sie als Professorin der Universität Konstanz am Fachbereich Physik die Arbeitsgruppe für nanomechanische Systeme. Zum 1. Oktober 2020 wurde sie an die TUM berufen, wo sie seither den Lehrstuhl für Nano- und Quantensensoren inne hat. Eva Weig ist außerdem Direktorin des TUM Zentrums für QuantumEngineering.

---



*„Die Herstellung unserer Prototypen ist heute noch sehr aufwändig.“*

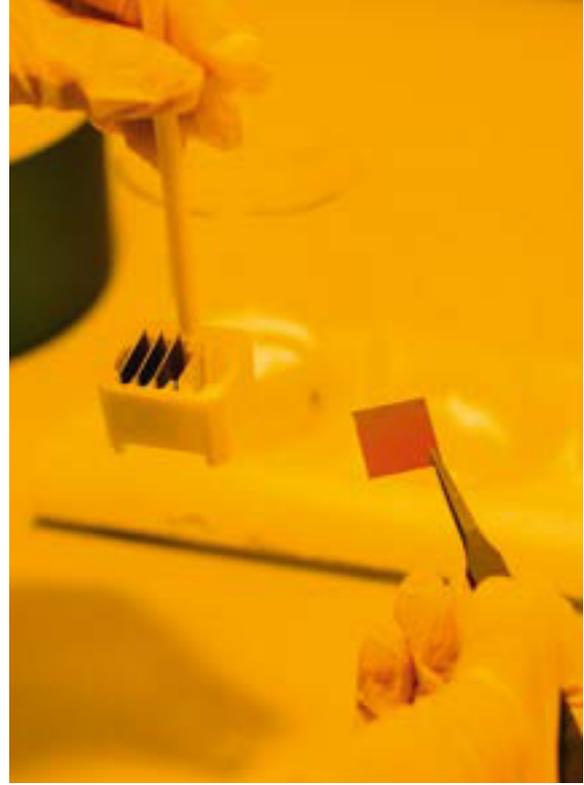
Eva Weig



Bildnachweis: Magdalena Jooss

△ **Oben:** Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer **Nanosaiten** zwischen zwei Goldelektroden.

△ **Unten:** Im Lauf ihrer Forscherinnen-Karriere hat Eva Weig unzählige Tage und Wochen im Reinraum verbracht. Heute, als Professorin, legt sie den Reinraumanzug nur mehr zu besonderen Gelegenheiten an.



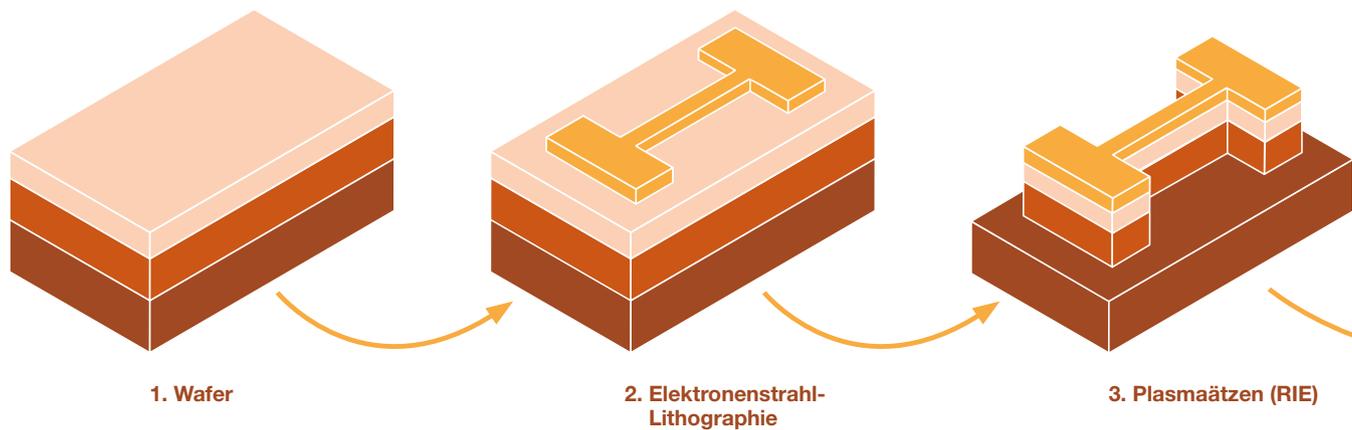
Das Fachgebiet ist noch jung: Im Frühjahr 2010 erregte der 29-jährige Aaron D. O'Connell an der University of California in Santa Barbara mit seiner Doktorarbeit weltweites Aufsehen. Es war ihm unter Anleitung seines Doktorvaters Andrew N. Cleland gelungen, ein supraleitendes Quantenbit, wie es in Quantencomputern verwendet wird, mit einer schwingenden, makroskopischen mechanischen Zunge – er selbst nannte sie „Surfbrett“ – zu koppeln. Das gelang ihm durch einen supraleitenden Schaltkreis. Der Trick dabei war, dass die Zunge piezoelektrisch war, sich also unter einer elektrischen Spannung verformt und umgekehrt. Damit war zum ersten Mal weltweit die Verbindung zwischen der Quantenwelt, also der Welt des Allerkleinsten, mit unserer „normalen“ Makrowelt gelungen. Die Fachzeitschrift Science zeichnete diese Errungenschaft als „Durchbruch des Jahres 2010“ aus und nannte sie „die erste Quantenmaschine“.

Dieser Durchbruch gelang nur deshalb, weil das schwingende Objekt von allen äußeren Einflüssen abgeschirmt wurde: Es wurde sehr stark gekühlt und befand sich in einer abgedunkelten Vakuumkammer. Inzwischen haben mehrere Gruppen auf der Welt ähnliche Erfolge erzielen können, allerdings immer nur im Bereich tiefster Temperaturen.

△ **Chipbearbeitung im Reinraum:** Unter dem Abzug wird die Probe belichtet, um sie für die Lithographie vorzubereiten. Nach der Belichtung wird die Lackschicht entwickelt.

### Extreme Kühlung ist nicht nötig

Die Nanostrings von Eva Weig sind allerdings noch wesentlich feiner als das System von O'Connell. Sie und ihre zehn Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter versuchen nun, es bei Zimmertemperatur zu einem quantenmechanischen System zu machen. Das würde die Anwendbarkeit für viele Zwecke erleichtern oder überhaupt erst ermöglichen. Bei der Herstellung ihrer Nanosaiten benutzen die Forschenden Reinräume, in denen sie mit Hilfe von Elektronenstrahl-Lithographie in mühsamer Kleinarbeit Schicht auf Schicht auf Silizium-Wafer auftragen und an bestimmten Stellen wegätzen oder wegbrennen. So entsteht am Ende ein kleines Wunderwerk, bei dem die Saite eine typische Länge von 30 bis 50 Mikrometern und eine Dicke von weniger als 100 Nanometern hat. „Die Herstellung unserer Prototypen ist heute noch sehr aufwändig“, sagt Eva Weig, „unsere Masterstudenten wenden dafür etwa die Hälfte ihrer Arbeitszeit auf, aber man kann das später mit der entsprechenden Prozessführung auch industriell fertigen.“ Anschließend werden die Saiten in einer Vakuumkammer erst einmal exakt vermessen. Sie dürfen nicht mit Luft in Berührung kommen, denn der Zusammenstoß mit Luftmolekülen würde sie sofort abbremsen, ähnlich wie der Wind die Wasserwellen auf einem See stört. Das „Anzupfen“ besorgt man mit Laserlicht, elektrischen Feldern oder auch Schallwellen. ▶



▷ **Links:** Die Nanosaiten werden bei Raumtemperatur in einer Vakuumkammer gemessen. Das Labor verfügt über verschiedene Messanordnungen.

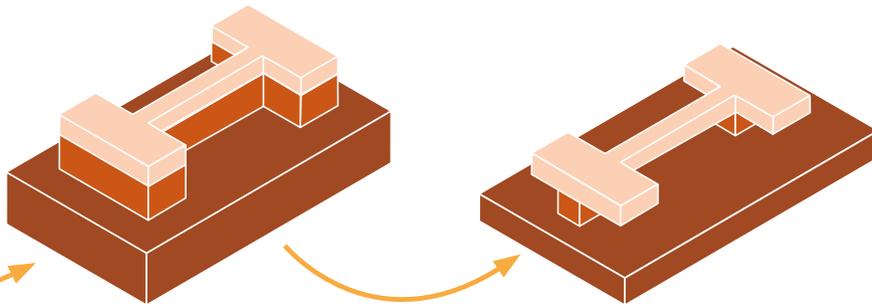
**Rechts:** Blick von oben in eine Kammer mit einem Mikrowellenhohlraum zur Messung der Schwingungen der Saite. Der transparente Chip enthält die – für das menschliche Auge unsichtbare – Nanosaiten.

Solche Nanostrings haben eine außergewöhnliche Güte: Eva Weig und ihr Team haben sie inzwischen ständig weiter verbessert, und so können heute manche dieser Saiten für ein paar Millisekunden immer mit der gleichen Frequenz schwingen. Für quantenmechanische Vorstellungen bedeutet dies eine ungeheuer lange Zeit. Übertragen auf eine normale Gitarrensaite würde diese etwa eine Stunde lang im gleichen Ton schwingen. „Das ist wirklich aufsehenerregend“, sagt die Physikerin, „denn aufgrund dieser Fähigkeit könnte man solche Systeme als Zwischenspeicher für quantenmechanische Informationen nutzen, zum Beispiel zum Parken von Qubits in Quantencomputern.“ Das gibt es bis heute noch nicht. Für die Übertragung gäbe es verschiedene Wege, entweder ähnlich wie im Experiment von O’Connell oder mit Lasern.

Die Fähigkeit der schwingenden Nanosaiten, ihre Frequenz sehr lang konstant zu halten, war bisher nur bei extrem tiefen Temperaturen möglich. Mit den neu produzierten Prototypen gelingt dies jedoch sogar bei Raumtemperatur, weil die Saite nur sehr wenig Energie an ihre Umgebung abgibt. Allerdings reagiert sie besonders empfindlich auf jede äußere Störung. Das kann man sich aber zunutze machen und sie mit gezielten „Störungen“ beeinflussen. Auf diese Weise kann man sie an andere Systeme

▷



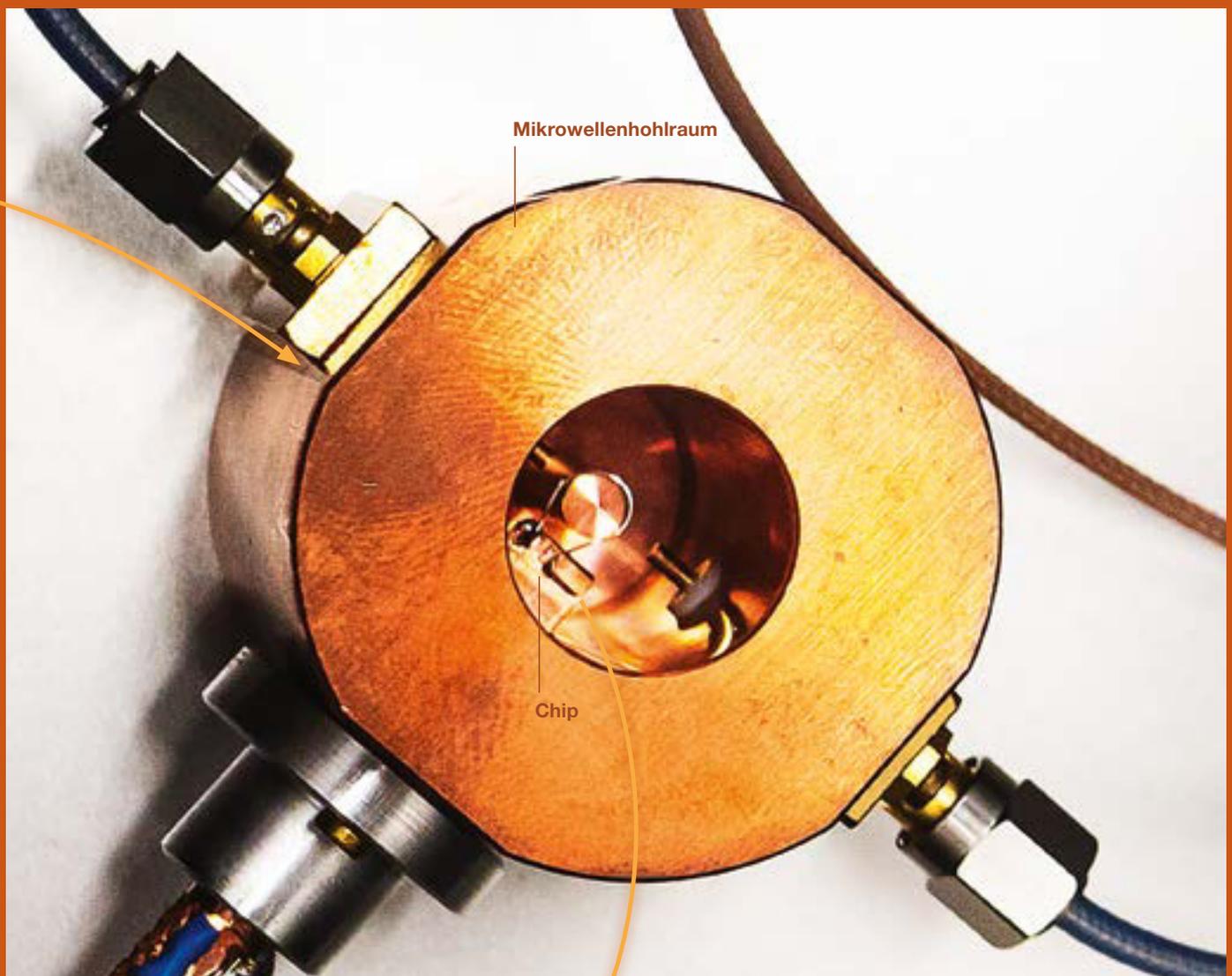


4. Entfernung der Maske

5. Nasschemisches (HF) Ätzen;  
überkritisches Trocknen

- Bauelemente-  
schicht
- Substratschicht
- Opferschicht
- Metallmaske

Die aus **Keramik oder Halbleiter-Material** bestehenden Nanosaiten werden größtenteils genauso hergestellt wie konventionelle Computerchips. Schicht für Schicht wird die gewünschte Struktur aufgetragen und dann an bestimmten Stellen wieder entfernt.



*„Es gehört noch zur Grundlagenforschung, aber erste Anwendungen spitzen schon raus.“*

Eva Weig



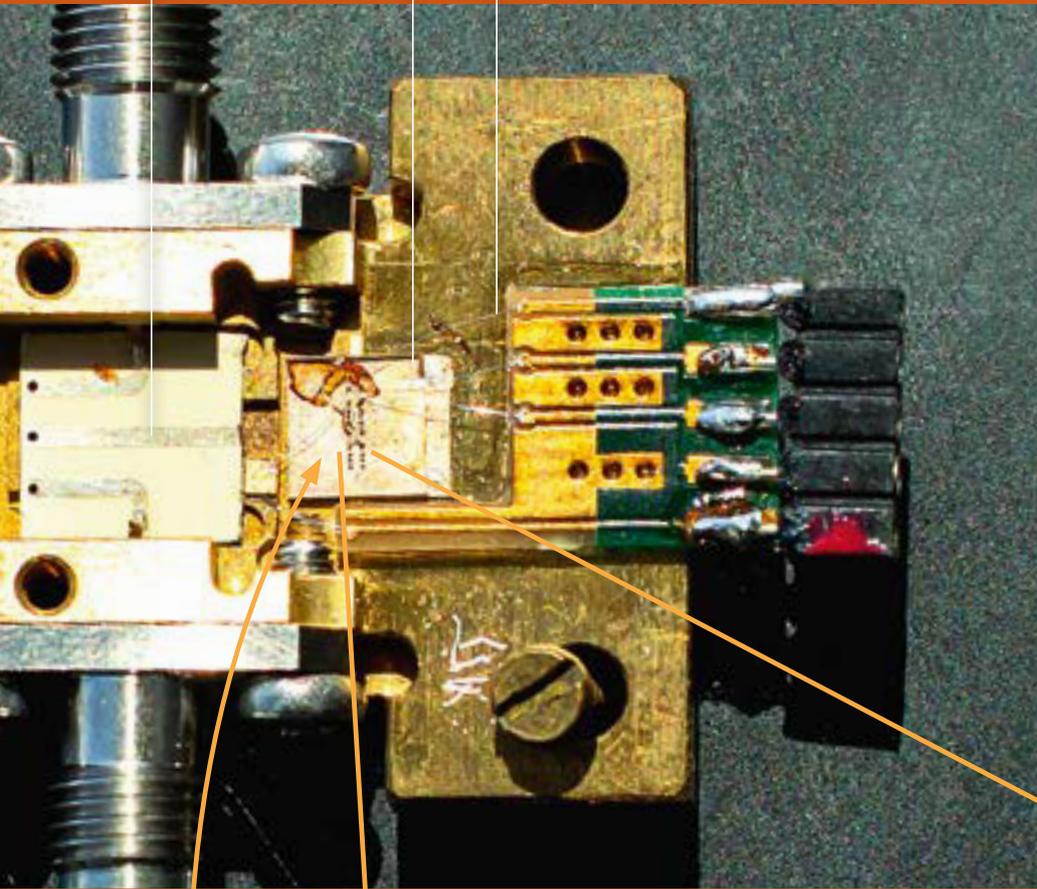
ankoppeln, sie damit manipulieren oder als Detektor verwenden. „Mich fasziniert dieses Gebiet“, sagt Eva Weig. „Es gehört noch zur Grundlagenforschung, aber erste Anwendungen spitzen schon raus. In zehn Jahren wird es die sicherlich geben.“

Bei derartigen praktischen Anwendungen zielt man im Prinzip immer auf die Wechselwirkung der Saite mit dem, was man messen möchte. Dabei hilft eine quantenmechanische Eigenschaft, die sie hat: Sie kann neben ihrem Grundzustand auch angeregte Energiezustände annehmen. Diese Zustände sind hier aber durch die Gesetze der Quantenmechanik genau festgelegt. So kann man die Saite durch die Kopplung mit einer Messgröße beispielsweise zwischen zwei Zuständen hin- und herspringen lassen, also genau die Eigenschaft, die man für einen Quantensensor benötigt. Das Team um Eva Weig hat zu diesem Zweck schon eine ganze Reihe von Testplattformen aufgebaut. „Unser Ziel ist tatsächlich ein Quantensensor, der bei Raumtemperatur arbeitet“, sagt die Forscherin. „Damit könnte man kleinste magnetische Felder detektieren oder auch Kräfte, vielleicht sogar Spin-Effekte.“

Demnächst wird der Lehrstuhl von Eva Weig in neue Labore auf dem Garching Forschungsgelände umziehen. Die derzeitigen sind für die Experimente nicht hundertprozentig geeignet, denn lassen sich nicht gut genug gegen äußere Einflüsse wie etwa Schwingungen abschirmen. Die Arbeiten gehen dann in viele Richtungen weiter: So wollen die Forschenden versuchen, den Grundzustand ihrer Systeme zu erreichen. Das ist bisher noch nicht gelungen, wäre aber für die Grundlagenforschung von großem Interesse. Eine weitere Forschungsrichtung zielt auf andere Formen, denn das Prinzip, mechanische Schwingungen als Quantenobjekt zu benutzen, funktioniert nicht nur mit einer Saite. Die Garchinger untersuchen auch Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die wie ein Grashalm auf einer Unterlage wachsen, oder Nanomembranen, die wie ein winziges Trommelfell aussehen, oder Säulenreihen im Nanoformat, deren Mini-Köpfchen gleichmäßig hin- und herschwingen. Was sich am Ende in der Praxis am besten bewährt, werden weitere Untersuchungen zeigen. ■

*Brigitte Röthlein*

Mikrowellenhohlraum Chip Bonddrähte



◁ **Integrierte Plattform zur Steuerung der Nanosaiten.** Der 5 x 5 mm große Chip mit den Nanosaiten befindet sich in der Mitte. Der Mikrowellenresonator links davon kontaktiert über Bonddrähte an die Goldelektroden, die ein elektrisches Feld um die Nanosaiten erzeugen. Die Platine auf der rechten Seite stellt die Verbindung zum Messsystem her.

▽ **Der durchsichtige Chip** aus Keramik enthält ein Set mit 12 verschiedenen langen Nanosaiten. Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme zeigt die Saiten, die sich jeweils zwischen zwei Goldelektroden befinden. Jede Saite lässt sich einzeln ansteuern und messen.

