

Strukturierter Stahl, kolloidale Kristalle

Highlights aus dem Programm der Sektion Kondensierte Materie (SKM)

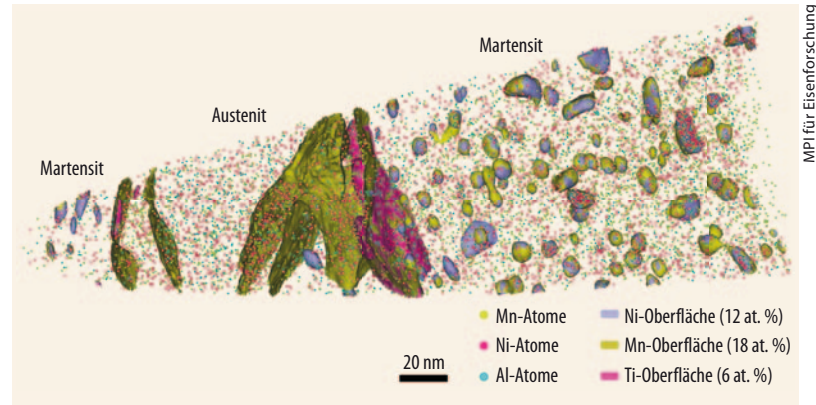
Rainer Scharf

An der diesjährigen Frühjahrs- tagung der Sektion Kondensierte Materie (SKM) nahmen in Berlin mehr als 6000 Physikerinnen und Physiker teil. Sie hielten 3345 Vorträge und präsentierten 1976 Poster. Es folgt eine kleine Auswahl aus der Vielfalt an Themen.

Tonnenweise Nanostrukturen

Bei „Nanostrukturierung“ denkt man an kleine Stoffmengen mit kompliziertem atomarem Aufbau. Doch beim Stahl, von dem weltweit jährlich 1,4 Milliarden Tonnen produziert werden, dient die Nanostrukturierung dazu, dieser polykristallinen Legierung aus Eisen, Mangan und anderen Elementen die gewünschten Eigenschaften zu geben. Schon geringfügige chemische oder strukturelle Änderungen beeinflussen das thermodynamische oder mechanische Verhalten eines Stahls dramatisch, erklärte Dierk Raabe vom Max-Planck-Institut für Eisenforschung (MPIE) in Düsseldorf. Unter Zugspannung dehnt sich ein Stahl zunächst elastisch aus, doch oberhalb der „Streckspannung“ kommt es zusätzlich zu plastischer Verformung, wobei Versetzungen im Kristallgefüge irreversibel zu gleiten beginnen. Die Versetzungslinien in einem Kubikmeter Stahl können eine Gesamtlänge von 10^{16} Metern oder einem Lichtjahr haben! Durch die langreichweitige elastische Wechselwirkung dieser Defekte entstehen komplexe Muster von Versetzungen, welche die mechanischen Eigenschaften von Stählen bestimmen.

Einige Stahlliegierungen sind sehr fest und verformen sich kaum, wie die martensitischen Stähle, die eine kubisch-raumzentrierte Struktur haben und eine Zugfestigkeit



MPI für Eisenforschung

Abb. 1 Der komplexe atomare Aufbau einer Spitze aus TRIP-Stahl wird durch Atomsondentomografie sichtbar.

von bis zu 1,1 GPa aufweisen. Ein haarfeiner Draht aus solch einem Stahl kann ein Kilogramm tragen. Andere Stähle sind weich und stark verformbar wie die Ferrite, die sich unter Zug um bis zu 60 % dehnen, bevor sie reißen. Zwischen diesen beiden Extremen liegen Legierungen mit „transformationsinduzierter Plastizität“ (TRIP), die sich bei plastischer Dehnung kontinuierlich selbst härten. Sie enthalten mikroskopische Bereiche mit einer metastabilen austenitischen Phase, die eine kubisch-flächenzentrierte Struktur hat und sich unter Zugspannung in eine harte, martensitische Phase umwandelt, die aufgrund ihres höheren Volumens ihre Umgebungsmatrix stark verformt. Solche Stähle, die sehr fest sind und sich dennoch stark verformen können ohne zu brechen, eignen sich vor allem für Autokarosserien, da sie die Energieaufnahme und damit die Sicherheit bei Kollisionen erhöhen.

Einblicke in die Nanostruktur eines Stahls ergeben sich dadurch, dass man die Atome einer Stahlspitze mit einem gepulsten Laserstrahl schichtweise ionisiert. Bei dieser Atomsondentomographie lenkt eine elektrische Spannung die davonfliegenden Ionen auf einen positionsempfindlichen Detektor, sodass sich die ursprüngliche Lage der verschiedenen Atomsorten

rekonstruieren lässt. Ergänzt durch elektronenmikroskopische Aufnahmen folgt daraus die Mikrostruktur des Stahls (Abb. 1). Aufgrund solcher Analysen und mit ab initio-Berechnungen haben Raabe und seine Kollegen einen neuartigen TRIP-Stahl entwickelt, der zunächst zu 80 % aus Martensit und zu 20 % aus der austenitischen Phase bestand. Deren Anteil erhöhte sich durch Tempern bei 450 °C auf 40 %, wie Atomsondentomografie zeigte. Bei Belastung des Stahls wandelte sich die austenitische Phase nach und nach in die martensitische um. Dadurch bekam dieser Stahl eine hohe Zugfestigkeit von bis zu 1,3 GPa und konnte sich dennoch um 22 % dehnen.

Wie oberflächlich ist Adhäsion?

Ob eine Flüssigkeit eine Materialoberfläche benetzt, ob sich Bakterien auf einer Unterlage festsetzen, oder ob ein Gecko an der Zimmerdecke entlanglaufen kann – darüber entscheidet das Zusammenspiel molekularer Kräfte. Das sind vor allem die langreichweitigen van der Waals-Kräfte, mit denen sich molekulare elektrische Dipole anziehen, sowie die stark abstoßenden kurzreichweitigen Kontaktkräfte. Sie treten auf, sobald die Elektronenwolken zweier Moleküle über-

lappen. Befindet sich ein Molekül in der Nähe einer Grenzfläche, so nimmt man oft vereinfachend an, dass die auf das Molekül wirkenden Kräfte nur von seinem Abstand zur Grenzfläche abhängen. Doch wie Karin Jacobs von der Universität des Saarlandes erklärte, beeinflusst auch die Materialzusammensetzung weit unter der Grenzfläche die van der Waals-Kräfte.

Karin Jacobs und ihre Mitarbeiter haben die Reichweite der van der Waals-Kräfte gemessen, indem sie beobachteten, wie sich ein Flüssigkeitsfilm aus Polystyrol auf Siliziumwafern verhielt, die von unterschiedlich dicken Siliziumoxidschichten bedeckt waren. Wurden die Polystyrolmoleküle stärker von der Waferoberfläche angezogen als die Luftmoleküle, so bedeckte ein stabiler Flüssigkeitsfilm die Oberfläche. Andernfalls konnte die Flüssigkeit die Oberfläche nicht benetzen. War die Siliziumoxidschicht einige Nanometer dick, so „spürten“ die Polystyrolmoleküle fast die gleiche van der Waals-Kraft, wie sie von einem unbeschichteten Wafer ausging, und es bildete sich ein metastabiler Flüssigkeitsfilm. War die

Siliziumoxidschicht hingegen etwa 200 nm dick, so reichte die van der Waals-Kraft des Wafers nicht mehr bis zu den Polystyrolmolekülen. Sie waren jetzt nur noch der van der Waals-Kraft der Siliziumoxidschicht ausgesetzt, sodass der Flüssigkeitsfilm löchrig wurde und Entnetzung auftrat.

An verschiedenen Beispielen zeigte Karin Jacobs, wie sich die Adhäsion und Adsorption von Oberflächen beeinflussen lassen, indem man die von ihnen ausgehenden molekularen Kräfte verändert. So adsorbiert ein mit Siliziumoxid beschichteter Siliziumwafer je nach Schichtdicke unterschiedlich schnell Proteine wie die α -Amylase. Dabei kann die vom Wafer ausgehende van der Waals-Kraft, die durch eine 2 nm dicke Siliziumoxidschicht hindurch auf die Proteine wirkt, deren Kinetik beeinflussen, indem sie die Konformation der Proteine ändert. Auch Bakterien setzen sich schneller auf beschichtete Wafer, wenn die Siliziumoxidschicht nur 2 statt 150 nm dick ist. Die mit einem Rasterkraftmikroskop gemessene Adhäsionskraft, mit der Bakterien

auf der Oberfläche haften, ist bei dünner Beschichtung doppelt so groß wie bei dicker. Hier macht sich wieder die van der Waals-Kraft bemerkbar. Auch der Gecko nutzt diese Kraft aus, wenn er an glatten Wänden empor läuft. Mit zahllosen mikrometerfeinen Härchen an seinen Zehen stellt er einen intensiven Kontakt mit der Unterlage her. Kraftmessungen ergaben, dass der beschichtete Siliziumwafer diese Härchen umso stärker anzieht, je dünner die Beschichtung war. Die Adhäsion ist also kein reines Oberflächenphänomen, sondern kann bis zu 100 nm in die Tiefe reichen!

Kolloide Quasikristalle

Im vergangenen Jahr erhielt Dan Shechtman den Chemie-Nobelpreis für die Entdeckung der Quasikristalle, die ihm 1984 geglückt war. In ihnen sind die Atome aperiodisch angeordnet, wobei acht-, zehn- oder zwölfzählige Symmetrie vorliegt. Inzwischen kennt man rund hundert quasikristalline Verbindungen, die größtenteils binäre oder ternäre intermetallische Legierungen sind. Zudem können auch Polymere Quasikristalle bilden. 2011 hat ein internationales Team um Stephan Förster von der Universität Bayreuth erstmals kolloidale Quasikristalle hergestellt und deren verräterische Symmetrien durch Beugungsexperimente sichtbar gemacht. Dabei handelte es sich um Kolloide aus zahllosen 5 bis 100 nm großen kugelförmigen polymeren Mizellen mit hydrophobem Kern und hydrophiler Hülle.

In Wasser gelöst, ordnen sich die Mizellen unter bestimmten Bedingungen von selbst zu einer kristallinen Struktur mit kubischer Symmetrie an. Unter Einwirkung von Scherkräften entstehen in Kolloiden zentimetergroße monokristalline Bereiche. Förster und seine Mitarbeiter haben untersucht, wie solche Kristalle schmelzen, wenn sich die Temperatur oder die Konzentration der Lösung ändert. Dazu bestimmten sie die Struktur der Kolloide durch Kleinwinkelstreuung mit Röntgenstrahlen (SAXS)

SKM-DISSERTATIONSPREIS

Den Dissertationspreis der Sektion Kondensierte Materie (SKM) erhielten in diesem Jahr Yan Zeng (Mitte) und Henning Döscher (links).

Yan Zeng hat in ihrer an der TU Berlin durchgeführten Doktorarbeit den Einfluss einschränkender Geometrie auf die interne Ordnung kolloidaler Dispersionen untersucht. Ihre Ergebnisse sind wichtig für Anwendungen der Kolloidwissenschaft wie die Strukturbildung in Kanälen (lab on the chip) und in dünnen Filmen (Benetzungsfilme).

Henning Döscher untersuchte in seiner am Helmholtz-Zentrum Berlin durchgeführten Arbeit die epitak-



tische Integration von III-V-Halbleitern auf Silizium mit den Methoden der Oberflächenphysik. Das Wachstum dünner GaP-Schichten diente als Modellsystem für die Entstehung von Defekten an der kritischen III-V/Si(100)-Grenzfläche.

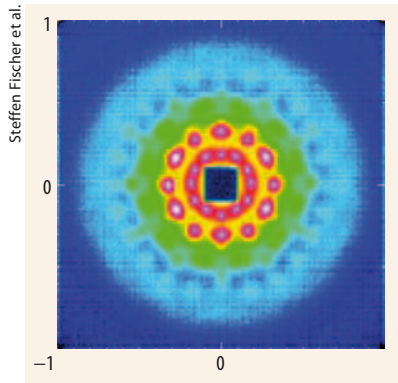


Abb. 2 Das Neutronenbeugungsmuster eines kolloiden Quasikristalls weist zwölfzählige Symmetrie auf, die für kristalline Strukturen unmöglich ist.

und mit Neutronen (SANS). Diese Untersuchungen fanden am DESY in Hamburg bzw. am Institut Laue Langevin in Grenoble statt. Wie die Beugungsmuster zeigten, lag bei einer Temperatur von 20 °C und einer Konzentration von mehr als 18 % eine kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur vor. Verringerte man die Konzentration, so trat zunächst eine quasikristalline Phase (Q12) mit 12-zähliger Symmetrie auf, die unterhalb von 13 % in eine ungeordnete Phase überging (**Abb. 2**). Bei konstanter Konzentration ließ sich die Q12-Phase durch Abkühlung auf 10 °C in die Q18-Phase umwandeln, die eine zuvor noch nie beobachtete 18-zählige Symmetrie hat.

Zusammen mit Walter Steurer von der ETH Zürich fanden Förster und seine Kollegen für die quasikristallinen Phasen Q12 und Q18 dekorierte Parkettierungen, aus denen sich die räumliche Anordnung der Mizellen ergab. Dass Kolloide mit „weichen“ Wechselwirkungspotentialen Quasikristalle bilden können, hatte Hartmut Löwen von der Universität Düsseldorf schon 1998 vorhergesagt. Sie sind stabil, wenn sich die quasikristalline Koordination nächster Nachbarn gegen die Tendenz zu einer möglichst dichten kristallinen Packung durchsetzt. Das ist der Fall, wenn zwei natürliche Längenskalen vorliegen und Drei-Körper-Wechselwirkungen auftreten. Bei den Mizellen sind diese Bedingungen erfüllt: Die unterschiedlichen Durchmesser ihres festen Kerns und ihrer weichen Hülle legen zwei Längenskalen

fest, und zwischen den Polymeren in den einander durchdringenden Hüllen benachbarter Mizellen treten Drei-Körper-Wechselwirkungen auf. Förster sieht interessante Anwendungsmöglichkeiten für kolloide Quasikristalle. So wäre es möglich, aus ihnen photonische Materialien mit weiten Bandlücken zu erhalten, aus denen sich photonische Bauelemente herstellen ließen. Diese photonischen Quasikristalle entstünden unter geeigneten Bedingungen in einer wässrigen Lösung von selbst.

Phasen im Elektronenmikroskop

Das Transmissionselektronenmikroskop (TEM) erlaubt es, Phasenumwandlungen in Materialien auf der atomaren Ebene zu verfolgen, wie Erdmann Spiecker von der Universität Erlangen-Nürnberg berichtete. Während sich mit dem hochauflösenden TEM die atomare Struktur eines Materials abbilden lässt, ermöglicht es das Raster-TEM gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (STEM-EDX), die verschiedenen Atomarten anhand ihrer Röntgenstrahlung zu identifizieren. So erhält man Einblicke in den bei einer Phasenumwandlung auftretenden lokalen Materialtransport und kann untersuchen, welche Rolle Defekte und Grenzflächen dabei spielen, wie Spiecker am Beispiel des Schichtaustauschs von amorphem Silizium erläuterte.

Normalerweise liegt die Kristallisationstemperatur von amorphem Silizium bei etwa 700 °C. Sie verringert sich jedoch erheblich – auf bis zu 150 °C – wenn Metallatome etwa von Aluminium oder Gold in der Nähe sind. Dies kann man dazu nutzen, dünne Schichten von polykristallinem Silizium wirtschaftlich auf billige Substrate aufzubringen. Bei dem als aluminiuminduzierten Schichtaustausch oder ALILE (Al-Induced Layer Exchange) bezeichneten Verfahren wird ein Substrat wie Glas mit einer etwa 50 nm dicken Aluminiumschicht überzogen. Darauf folgt eine 2 nm dicke Barriere aus Aluminiumoxid und

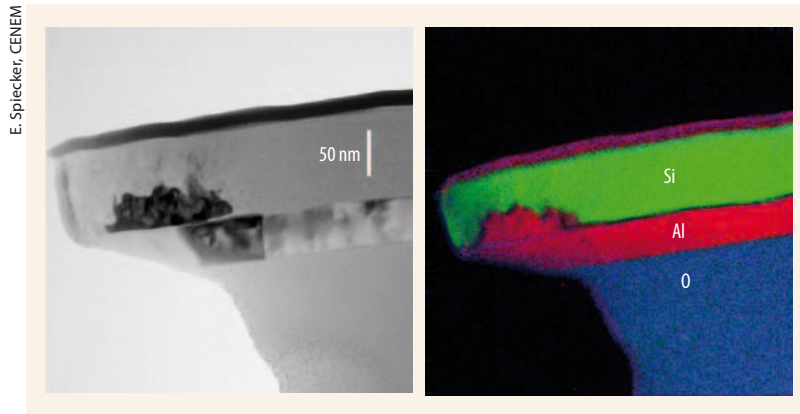


Abb. 3 Das hochauflösende Transmissions-elektronenmikroskop zeigt, wie sich beim ALILE-Prozess das Aluminium in die Siliziumschicht schiebt: links die Hellfeld-

aufnahme des Probenquerschnitts, rechts die energiegefilterte Aufnahme, auf der sich die verschiedenen chemischen Elemente unterscheiden lassen.

eine etwa 100 nm dicke Schicht aus amorphem Silizium. Wird dieser Schichtstapel bei 400 °C getempert, wandert das Silizium durch die Zwischenschicht in das Aluminium und kristallisiert dort an Korngrenzen. Das verdrängte Aluminium wird in die obere Schicht abtransportiert. Entfernt man die überflüssigen Schichten und legt die so entstandene polykristalline Siliziumschicht frei, lassen sich auf ihr epitaktisch weitere Halbleiterschichten aufbringen. So entstehen Dünnschichtsolarzellen und -transistoren sowie flexible elektronische oder optoelektronische Bauelemente.

Wie sich die verschiedenen Atomsorten beim ALILE-Prozess bewegen und umverteilen, konnten Spiecker und seine Kollegen mit einem TEM direkt beobachten (Abb. 3). Sie untersuchten, wie das überschüssige Aluminium in Verlauf der Siliziumkristallisation abtransportiert wird. Dabei beobachteten sie, dass das Aluminium nicht lokal an der Kristallisationsfront in die obere Schicht verdrängt wird, sondern zum Teil große Entfernungen bis zu 10 μm zurücklegt, bevor es durch Schwachstellen der Aluminiumoxidbarriere nach oben gelangt. Die TEM-Aufnahmen zeigten, dass die Kristallisationsfront des Siliziums nicht kontinuierlich fortschreitet, sondern an Korngrenzen des Aluminiums stoppt. Dabei bauen sich kompressive Spannungen auf, die vermutlich die Perforation der Barrierschicht verursachen und eine

wichtige Rolle beim Abtransport des Aluminiums spielen. Bisher hatte man angenommen, dass die Diffusion des Siliziums durch die Aluminiumoxidbarriere die Geschwindigkeit des ALILE-Prozesses bestimmt. Die Untersuchungen von Spiecker und seinen Mitarbeitern legen indes den Schluss nahe, dass ein effizienter Abtransport des Aluminiums genauso wichtig ist.

Multiferroische Tunnelkontakte

In der Spintronik nutzt man neben der elektrischen Ladung des Elektrons auch sein magnetisches Moment oder seinen Spin. So dienen Magnetfelder in Magnetspeichern wie den MRAMs dazu, spinpolarisierte Elektronenströme, die durch ferromagnetische Tunnelkontakte fließen, zu kontrollieren. Da für diese Felder bislang starke elektrische Ströme notwendig sind, ist dieses Vorgehen energieaufwändig und langsam. Doch es geht auch sparsamer und schneller, wie Marin Alexe vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik berichtete. Seine Mitarbeiter und er haben einen multiferroischen Tunnelkontakt entwickelt, der Spinströme schnell und reversibel mit elektrischen Feldern schaltet.

Herkömmliche ferromagnetische Tunnelkontakte bestehen aus zwei ferromagnetischen Elektroden, die durch eine dünne, nichtmagnetische Isolatorschicht voneinander getrennt sind. Liegt eine elektrische Spannung an den

Elektroden, so fließt ein spinpolarisierter Tunnelstrom, dessen Stärke davon abhängt, wie die Magnetisierungsrichtungen der beiden Elektroden zueinander stehen. Bei paralleler Magnetisierung fließt ein stärkerer Strom als bei antiparalleler. Der Tunnelmagnetwiderstand des Kontaktes verändert sich also, wenn man die Magnetisierung der einen Elektrode festhält und die der anderen mithilfe eines Magnetfeldes verändert. Die Isolatorschicht spielt dabei nur eine passive Rolle. Ersetzt man sie durch eine 1 bis 4 nm dicke ferroelektrische Isolatorschicht, so gewinnt der Tunnelkontakt eine neue Funktionalität. Ein elektrisches Feld erlaubt es, seine elektrische Polarisation reversibel umzukehren, was sich auf seinen Magnetwiderstand auswirkt.

Der untersuchte multiferroische Tunnelkontakt bestand aus einem Strontiumtitanatkristall, auf den epitaktisch je eine Schicht aus ferromagnetischem Lanthanstrontiummanganat (LSM), ferroelektrischem Bleizirkontitanat (PZT) und Kobalt aufgetragen worden war. Mit einem 250 ns langen elektrischen Puls richteten die Forscher die elektrische Polarisation der PZT-Schicht so aus, dass sie auf die LSM-Schicht zeigte. Dann änderten sie mit einem Magnetfeld die relative Ausrichtung der Magnetisierungen der Kobalt- und der LSM-Schicht und maßen den Tunnelmagnetwiderstand. Er betrug etwa 62 k Ω und war bei antiparallelen Magnetisierungsrichtungen etwa 5 % größer als bei parallelen. Ein weiterer elektrischer Puls kehrte die elektrische Polarisation der PZT-Schicht um, sodass sie zur Kobaltschicht zeigte. Jetzt betrug der Tunnelmagnetwiderstand nur noch 5,6 k Ω .

Anhand des gemessenen Tunnelwiderstands ließ sich die Polarisationsrichtung der PZT-Schicht bestimmen. Zudem konnte mit sehr kurzen elektrischen Pulsen der Widerstand um eine Größenordnung verändert und die Spinpolarisation der tunnelnden Elektronen umgekehrt werden. Die relative Ausrichtung der Magnetisierungen der beiden ferromagnetischen Schichten und die Polarisierungsrichtung

der PZT-Schicht konnten jeweils ein nichtflüchtiges Bit speichern, die sich elektrisch auslesen ließen. Wieso die elektrische Polarisierung den Widerstand des Tunnelkontakts so stark verändert, ist noch unklar. Vermutlich ist dafür eine magnetoelektrische Kopplung an der Kobalt-PZT-Grenzfläche verantwortlich. Untersuchungen mit dem Synchrotron sollen dies klären.

Kollektive Weisheit?

Wie ein Kollektiv möglichst genaue Vorhersagen machen kann und wie wissenschaftliche Paradigmenwechsel stattfinden, wurde in zwei soziophysikalischen Vorträgen erörtert. Die sprichwörtliche „Weisheit der Vielen“ ist die verblüffende Erscheinung, dass der Mittelwert über einzelne Vorhersagen vieler Individuen auf Basis unvollständiger Information oft näher an der Wahrheit liegt als Vorhersagen von Experten. Doch wie jede Panik zeigt, verhalten sich die Vielen bisweilen auch „dümmer“ als der Einzelne. Frank Schweitzer von der ETH Zürich berichtete, dass schwache soziale Einflüsse die „Weisheit der Vielen“ untergraben können. Seine Kollegen und er haben Experimente mit ETH-Studenten durchgeführt, die das belegen.

Die Studenten erhielten einzeln sechs Fragen, z. B. nach der Länge der Grenze zwischen der Schweiz und Italien, für die sie jeweils eine Schätzung abgeben mussten. Allen Befragten wurde jede Frage fünfmal vorgelegt. Dabei bekam eine Gruppe keine zusätzlichen Informationen; eine zweite Gruppe erfuhr jeweils den Mittelwert der zuvor abgegebenen Schätzungen; eine dritte Gruppe wurde über alle abgegebenen Antworten informiert. Die zusätzlichen Informationen führten dazu, dass viele Befragte ihre Schätzungen revidierten, etwa weil sie die anderen Studenten für besser informiert hielten. Das ließ die Schätzungen schnell konvergieren, ohne dass sie genauer wurden. Die abnehmende Varianz der Schätzungen war irreführend, da der wahre Wert nicht mehr in

der Mitte der Verteilung lag, sondern an ihrem Rand. Mit einem stochastischen Modell, in dem einzelne Agenten durch Informationsaustausch gekoppelt waren, haben Schweitzer und seine Kollegen diese Ergebnisse reproduziert. Demnach nimmt die „Weisheit der Vielen“ umso schneller ab, je mehr Information die einzelnen über das Verhalten der anderen bekommen.

Wissenschaftlicher Fortschritt ist indes ohne Informationsaustausch nicht möglich. Es gilt nicht nur, die Wahrheit zu finden, sie muss sich auch durchsetzen. Wie sich wissenschaftliche Ideen behaupten und wie andere Ideen sie wieder verdrängen, haben Stefan Bornholdt von der Universität Bremen und seine Kollegen mit einem Modell untersucht. Sie nahmen an, dass es eine unbegrenzte Zahl von Ideen gibt. Jeder Agent sitzt auf einem zweidimensionalen Gitter und vertritt eine Idee, die sich zufällig ändern kann: Entweder übernimmt der Agent die von der Mehrheit seiner Nachbarn vertretene Idee („Herdenmentalität“), oder er erfindet eine neue („Innovation“). Eine von ihm abgelegte „falsifizierte“ Idee greift der Agent nicht wieder auf. Die aus diesen Regeln folgende Ideendynamik, die von der Konsenssuche und von der Innovationsrate der Agenten abhängt, haben die Forscher eingehend untersucht. Die Mehrheit der Agenten vertrat ein und dieselbe Idee, die so zum Paradigma wurde. Doch alle 10 000 bis 20 000 Zeitschritte fand ein Paradigmenwechsel statt. Der mittlere Zeitabstand zwischen zwei Paradigmenwechseln hing übrigens kaum von der Innovationsrate ab. War diese sehr groß, so traten viele neue Ideen auf, die das bestehende Paradigma zu stürzen versuchten. Das führte indes nur dazu, dass die Abstände zwischen den Paradigmenwechseln regelmäßiger waren.

Bei gleicher Innovationsfreudigkeit kam es in kleinen Populationen häufiger zu Paradigmenwechseln als in großen. Außerdem behinderte die Herdenmentalität Innovation und Wahrheitssuche. Bornholdt schloss daraus: Höre nicht auf die Menge, wenn du Wissenschaft betreibst.

Optomechanische Kristalle

Photonische Kristalle beeinflussen die Lichtausbreitung, indem sie als optische Resonatoren manche Frequenzbereiche durchlassen und andere nicht. In ähnlicher Weise beeinflussen phononische Kristalle die Ausbreitung mechanischer Schwingungen. Normalerweise stören optische und mechanische Schwingungen einander kaum. Doch in optomechanischen Kristallen breiten sich beide Schwingungsformen stark eingeschränkt aus, sodass die lokalisierten optischen und mechanischen Oszillationen intensiv miteinander wechselwirken, wie Oskar Painter vom California Institute of Technology in Pasadena berichtete. Er präsentierte einen leiterförmigen optomechanischen Kristall, der aus einem freistehenden, durchlöcherten Siliziumnanobalken bestand (Abb. 4). Die Leitersprossen hatten einen einheitlichen Abstand von etwa 360 nm, abgesehen von einigen Sprossen in der Mitte der Leiter. Durch diesen Defekt konnte der Nanobalken lokalisierte elektromagnetische Schwingungen tragen und wurde so zum optischen Resonator. Die lokalisierten Moden wurden mit infrarotem Laserlicht von variabler Wellenlänge angeregt, das über eine Glasfaser in den Balken ein- und ausgekoppelt wurde und dessen Intensität eine Photodiode registrierte. Der Nanobalken konnte auch lokalisierte mecha-

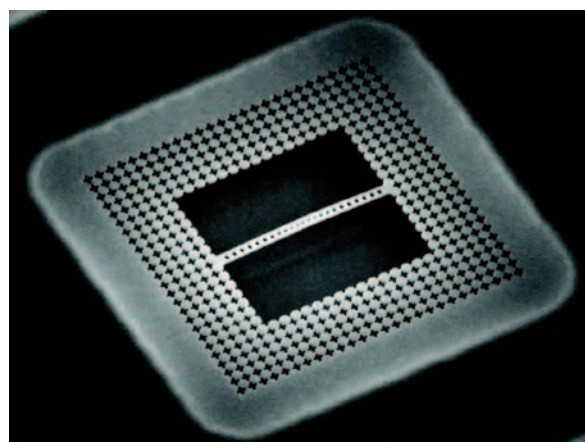


Abb. 4 Optomechanischer Resonator mit phononischer Abschirmung: Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt den rund 15 μm langen leiterförmigen Resonatorbalken aus Silizium, umgeben von einem phononischen Kristall, der ihn gegen Störungen abschirmt.

Jasper Chan et al.

nische Schwingungen ausführen, bei denen die Sprossen und Holme der Leiter an der Defektstelle oszillierten. Aus dem Diodensignal ergaben sich die Frequenzen und die Amplituden sowohl für die lokalisierten optischen Moden bei 200 THz als auch für die bei 2 GHz auftretenden lokalisierten mechanischen Schwingungen.

Da die optischen und mechanischen Schwingungen im selben Bereich des Nanobalkens lokalisiert waren, trat eine starke optomechanische Kopplung zwischen den 200 THz-Photonen und den 2 GHz-Phononen auf. Dadurch ließen sich diese Schwingungen auf neuartige Weise anregen, nachweisen und nutzen. So haben Painter und seine Mitarbeiter einen optomechanischen Resonator aus einem leiterförmigen Nanobalken hergestellt, den ein zweidimensionaler phononischer Kristall gegen äußere mechanische Schwingungen abschirmte. Zunächst wurde der Resonator mit flüssigem Helium auf 20 K vorgekühlt, sodass für eine bestimmte mechanische Schwingung bei 3,68 GHz nur etwa 100 Phononen vorhanden waren. Dann wurde über eine Glasfaser abstimmbare Laserstrahlung in den optomechanischen Resonator eingekoppelt, die eine lokalisierte optische Mode bei etwa 195 THz anregte. Allerdings war der Laser um 3,68 GHz rotverstimmt, sodass die fehlende Anregungsenergie dem mechanischen Oszillator entnommen wurde, der sich daraufhin abkühlte. So brachte Painters Team, in Zusammenarbeit mit Forschern um Markus Aspelmeyer von der Universität Wien, den mechanischen Oszillator praktisch in seinen quantenmechanischen Grundzustand.

Eine vielversprechende Anwendungsmöglichkeit der optomechanischen Resonatoren ist die Umwandlung von optischen Photonen in Phononen, die dann ein anderer Resonator in Mikrowellenphotonen umwandelt. Es ist möglich, den Schwingungszustand des mechanischen Resonators sehr genau optisch zu ermitteln und sogar einzelne Phononen nachzuweisen. So lassen sich äußerst

kleine Verstimmungen der Resonanzfrequenz des mechanischen Resonators etwa durch einzelne anhaftende Moleküle oder durch auftretende Beschleunigungen feststellen. Dies ist interessant für extrem empfindliche Kraft- oder Beschleunigungsmesser.

Durchblick mit Terahertz

Im elektromagnetischen Spektrum liegt zwischen den Mikrowellen und dem Infrarotlicht die Terahertzstrahlung mit Frequenzen von 0,1 bis 10 THz und Wellenlängen zwischen 3 und 0,03 mm. Hier tat sich bis vor wenigen Jahren eine technologische Lücke zwischen Elektronik und Optik auf, da die effiziente Erzeugung und der Nachweis der THz-Strahlung Probleme bereiteten. Doch in letzter Zeit hat die THz-Technologie große Fortschritte gemacht, wie Karsten Buse vom Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) in Freiburg berichtete. Metalle oder Wasser absorbieren THz-Strahlung stark. Sie durchdringt hingegen nichtleitende Materialien wie Plastik oder Keramik und kann darin submillimetergroße Einschlüsse und Defekte aufspüren.

THz-Strahlung lässt sich z. B. mit photoleitenden Antennen aus Halbleitermaterial erzeugen. Laserpulse setzen darin elektrische Ladungen frei, wodurch sich die elektrischen Felder zwischen den Elektroden abrupt ändern und ein THz-Puls entsteht. Auch nichtlineare optische Effekte eignen sich zur Emission von THz-Strahlung. Beim optisch parametrischen Oszillator generiert z. B. ein räumlich periodisch gepolter ferroelektrischer Lithiumniobatkristall aus kontinuierlicher infraroter Laserstrahlung zwei langwelligere Strahlen, von denen einer als Pumpwelle in einem nichtlinear-optischen Prozess THz-Strahlung erzeugt. Im vergangenen Jahr hat Karsten Buse zusammen mit Forschern der Universität Freiburg auf diese Weise kontinuierliche THz-Strahlung mit Frequenzen von 1,2 bis 2,9 THz erzeugt. Dieses Konzept haben Buse



Fraunhofer IPM

Abb. 5 Zukünftige Terahertz-Quelle: ein 6 mm großer Flüstergaleriemoden-Resonator aus Lithiumniobat.

und Kollegen auf die Anregung von Flüstergaleriemoden in einem millimetergroßen zylindrischen Lithiumniobatkristall übertragen (Abb. 5). Dabei läuft der infrarote Pumpstrahl, den ein Prisma in den Kristall einkoppelt, durch vielfache Totalreflexion an der Zylinderwand im Kristall um. Der Kristall ist in Tangentialrichtung periodisch gepolt, sodass die unterschiedlich gepolten Bereiche Tortensegmente bilden. In solch einem optischen parametrischen Oszillator könnte die umlaufende Infrarotstrahlung THz-Strahlung erzeugen, die sich durch das Prisma auskoppeln lässt. Durch Erhitzen des Kristalls verändert sich die Frequenz der THz-Strahlung.

THz-Strahlung hat zahlreiche interessante Anwendungen. So erlaubt sie es, verborgenen Sprengstoff in Briefen zu entdecken und von harmlosen Substanzen zu unterscheiden. Sie lässt sich zur Analyse von Medikamenten einsetzen, indem man verschiedene Generika desselben Wirkstoffs anhand ihrer THz-Absorptionsspektren voneinander unterscheidet. Zudem dient die THz-Strahlung dazu, Risse in Keramiken und Polymeren aufzuspüren oder die Dicke von unzugänglichen Strukturen in Werkstücken zu messen – ohne die bei Verwendung von Röntgenstrahlen auftretenden Probleme. Schließlich eröffnet die THz-Strahlung durch ihre hohe Frequenz neue Möglichkeiten für die drahtlose Kommunikation und Datenübertragung.