maßstäbe
Das wissenschaftsjournalistische Magazin der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
PTB

Aus den *maßstäben*, Heft 5 „Kleine Größen“ (2004)

Brigitte Röthlein

Die Elektronen-Dompteure

Tunneln und Surfen für kleine Tiger

Entweder umhüllen sie wie eine Wolke die Atomkerne, oder sie sind rasend schnell auf dem Weg und machen Strom. In beiden Fällen sind Elektronen schwer zu fassen. Mit raffinierten Methoden gelingt es Wissenschaftlern jedoch, die winzigen Ladungsträger einzeln zu manipulieren, zu beobachten und zu registrieren. Und wer das kleine Elektron bändigt, hat einen großen wissenschaftlichen Schritt getan.

(Stichwort: Ampere)

Mehr entdecken: Der QR-Code führt Sie zur Webseite dieser *maßstäbe*-Ausgabe.

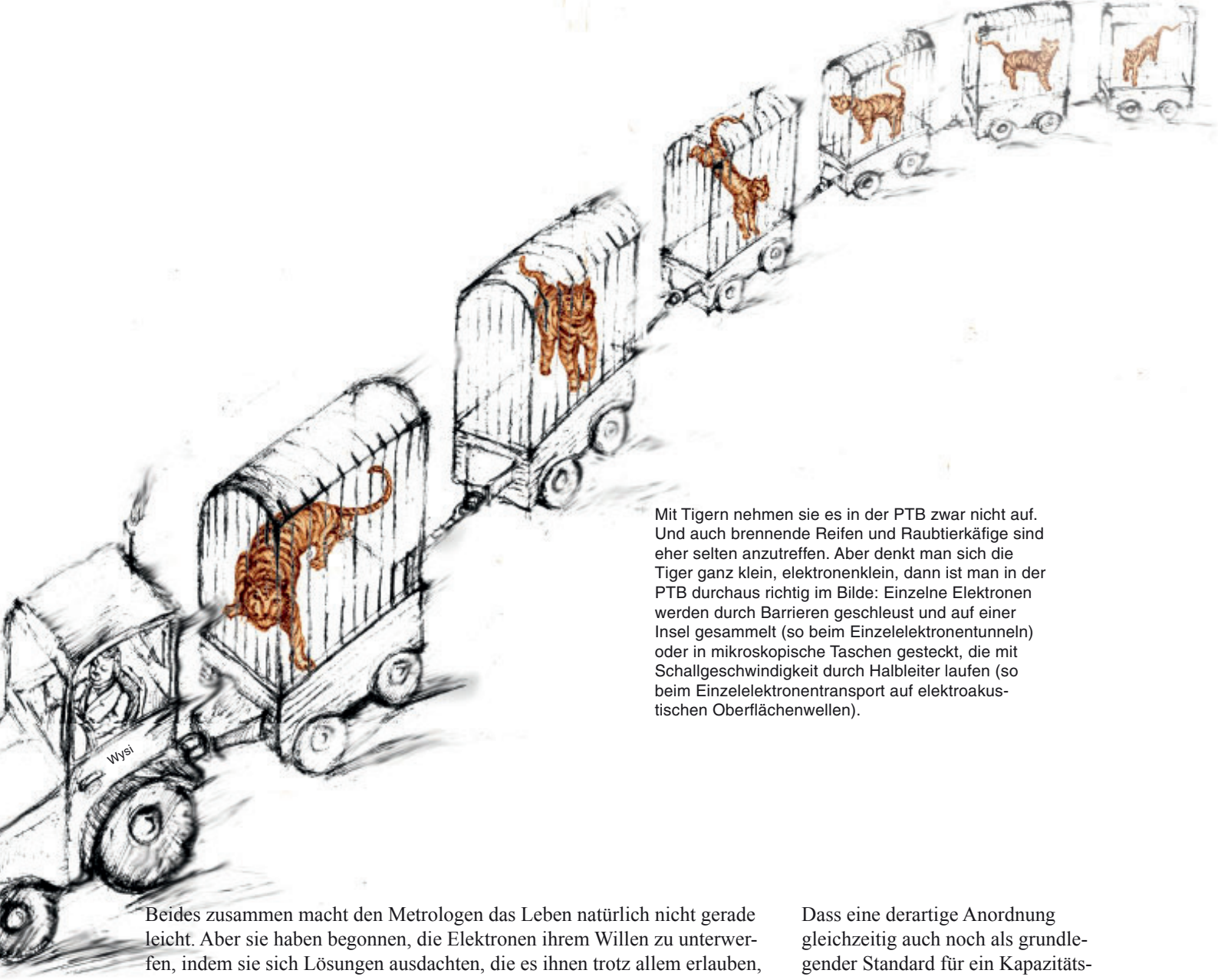
Die Elektronen-Dompteure

Entweder umhüllen sie wie eine Wolke die Atomkerne oder sie sind rasend schnell auf dem Weg und machen Strom – in beiden Fällen sind Elektronen schwer zu fassen. Mit raffinierten Methoden gelingt es Wissenschaftlern jedoch, die winzigen Ladungsträger einzeln zu manipulieren, zu beobachten und zu registrieren. Und wer das kleine Elektron bändigt, hat einen großen wissenschaftlichen Schritt getan.

Wie misst man elektrischen Strom? Normalerweise durch die Kraft, die er auf andere Stromleiter ausübt. So ist auch die Grundeinheit der Stromstärke auf diese Weise festgelegt, das Ampere. Die Definition stammt noch aus den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts, und sie funktioniert seither, aber elegant ist sie nicht. „Eine Rückführung der wichtigen Maßeinheiten Ampere und Kilogramm auf Naturkonstanten ist bisher nicht gelungen, obwohl dadurch eine enorme Steigerung der Präzision und Stabilität von Messungen möglich würde“, erklärt Franz Josef Ahlers, Leiter der Arbeitsgruppe „Niedrigdimensionale Elektronensysteme“ in der PTB.

Ideal wäre es, wenn man die Stromstärke direkt durch die Ursache des Stroms definieren könnte, also durch die Elektronen. Bedeutet doch das Fließen eines Stroms nichts anderes, als dass eine hohe Anzahl der winzigen, negativ geladenen Teilchen sich durch ein Material bewegen, und zwar im Großen und Ganzen in eine Richtung. Da läge es eigentlich nahe, zur Definition von 1 Ampere einfach die Zahl der Elektronen abzuzählen, die nötig ist, um diesen Wert zu erreichen.

Klingt gut, ist gut, aber in der Praxis lässt sich das nicht ohne weiteres machen. Denn dort treten Elektronen praktisch immer in großen Schwärmen auf; einzelne zu identifizieren, zu messen oder gar zu manipulieren ist äußerst schwer. Das hat zwei Gründe: Erstens sind Elektronen extrem klein, und die negative Ladung, die sie tragen, ist ebenfalls minimal: Sie beträgt ganze 1,602 mal 10^{-19} Coulomb. Kein Messgerät der Erde kann das registrieren. Und zweitens gehorchen die Elektronen den Gesetzen der Quantenmechanik: Sie befinden sich nicht an einem festen Ort, sondern „verschmieren“ sich als Welle über das Material, lassen sich nicht exakt fassen, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit an einem bestimmten Ort detektieren.



Mit Tigern nehmen sie es in der PTB zwar nicht auf. Und auch brennende Reifen und Raubtierkäfige sind eher selten anzutreffen. Aber denkt man sich die Tiger ganz klein, elektronenklein, dann ist man in der PTB durchaus richtig im Bilde: Einzelne Elektronen werden durch Barrieren geschleust und auf einer Insel gesammelt (so beim Einzelelektronentunneln) oder in mikroskopische Taschen gesteckt, die mit Schallgeschwindigkeit durch Halbleiter laufen (so beim Einzelelektronentransport auf elektroakustischen Oberflächenwellen).

Beides zusammen macht den Metrologen das Leben natürlich nicht gerade leicht. Aber sie haben begonnen, die Elektronen ihrem Willen zu unterwerfen, indem sie sich Lösungen ausdachten, die es ihnen trotz allem erlauben, einzelne Elektronen zu manipulieren und zu messen. Etwa mit Hilfe einer „Einzelelektronenpumpe“. Sie nutzt einen Effekt aus, den der Japaner Leo Esaki 1957 an Germanium entdeckte. 1973 erhielt er dafür den Nobelpreis. Es handelt sich um das verblüffende Phänomen, dass Elektronen bei tiefen Temperaturen durch sehr dünne Isolatorschichten hindurchdriften können. Man spricht dann vom Tunneleffekt. Diese Fähigkeit, Barrieren zu überwinden, die nach den Gesetzen der klassischen Physik undurchdringbar sein müssten, lässt sich nur durch die Quantenphysik erklären.

Single Electron Tunnelling (SET) heißt der Fachausdruck dafür, und die Physiker im Fachbereich „Quantenelektronik“ der PTB setzen das Phänomen ein, um einzelne Elektronen zu zählen. Wie ein Dompteur im Raubtierkäfig bauen sie eine Umgebung auf, in der die Tiger – hier die Elektronen – keine Möglichkeit mehr haben, sich frei zu bewegen. Sie stellen dem Strom in einem elektronischen Schaltkreis aus extrem dünnen Aluminiumbahnen zwei Barrieren in den Weg. Beide bestehen aus Aluminiumoxid, das als Isolator wirkt. Zwischen den beiden Barrieren entsteht dann sozusagen eine kleine „Insel“, die für die Elektronen normalerweise nicht erreichbar ist. Regt man sie aber mit elektromagnetischen Wellen an – allez hopp –, gelingt es aufgrund des Tunneleffekts einzelnen Elektronen, die erste Barriere zu überwinden und auf die Insel zu springen. Wegen der zweiten Barriere können sie aber nicht mehr ohne weiteres wieder entkommen. Eine raffinierte Messanordnung, die einem Transistor nachgebildet ist, erfasst die Anzahl der Elektronen auf der Insel.

Dass eine derartige Anordnung gleichzeitig auch noch als grundlegender Standard für ein Kapazitätsnormal herhalten kann, ist ein schöner Nebeneffekt. Forscher der PTB sind ebenso wie ihre Kollegen am NIST, dem amerikanischen National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg, zurzeit dabei, einen solchen Standard zu entwickeln. Bisher wurde die Kapazitäts-Einheit Farad durch Kondensatoren auf Quarzbasis definiert. Diese Vergleichsnormale sind von hoher Qualität, trotzdem können sie sich mit der Zeit verändern, außerdem sind sie abhängig von Temperatur oder Druck. Deshalb versuchen die Metrologen, einzelne Elektronen so zu manipulieren, dass man mit ihrer Hilfe ein Kapazitätsnormal definieren kann. Rund 6 Millionen Elektronen muss man auf der Platte eines winzigen Kondensators von einem Pikofarad sammeln, um die Spannung von einem Volt zu erreichen.

Die Bedingungen für die Präzisionsmessungen mit einzelnen Elektronen sind technisch extrem anspruchsvoll: Die Strukturen müssen ultraklein sein, kleiner als ein Mikrometer, und die Temperaturen ultrakalt, in der Nähe des absoluten Nullpunkts.

Tief im Keller, hinter doppelten Stahltüren mit Superdichtung ist der Arbeitsplatz von Hansjörg Scherer. Hier führt er die Messungen in einem extrem gut gegen äußere elektromagnetische Störungen abgeschirmten Labor durch. „Vier bis fünf Stunden muss unsere Spielwiese für elektronische Tunnelsysteme gekühlt werden, bis sie die nötige tiefe Temperatur erreicht hat“, erklärt er. Auf dieser „Spielwiese“ befindet sich beispielsweise die bereits angesprochene Einzelelektronenpumpe. Sie besteht aus zwei Inseln, zwischen denen Elektronen wandern können. Angeregt wird diese Wanderung durch ein von außen kommendes Hochfrequenzsignal. „Stellt man alle Parameter passend ein, kann man pro Zyklus genau ein Elektron zwischen den beiden Inseln verschieben“, so Scherer.

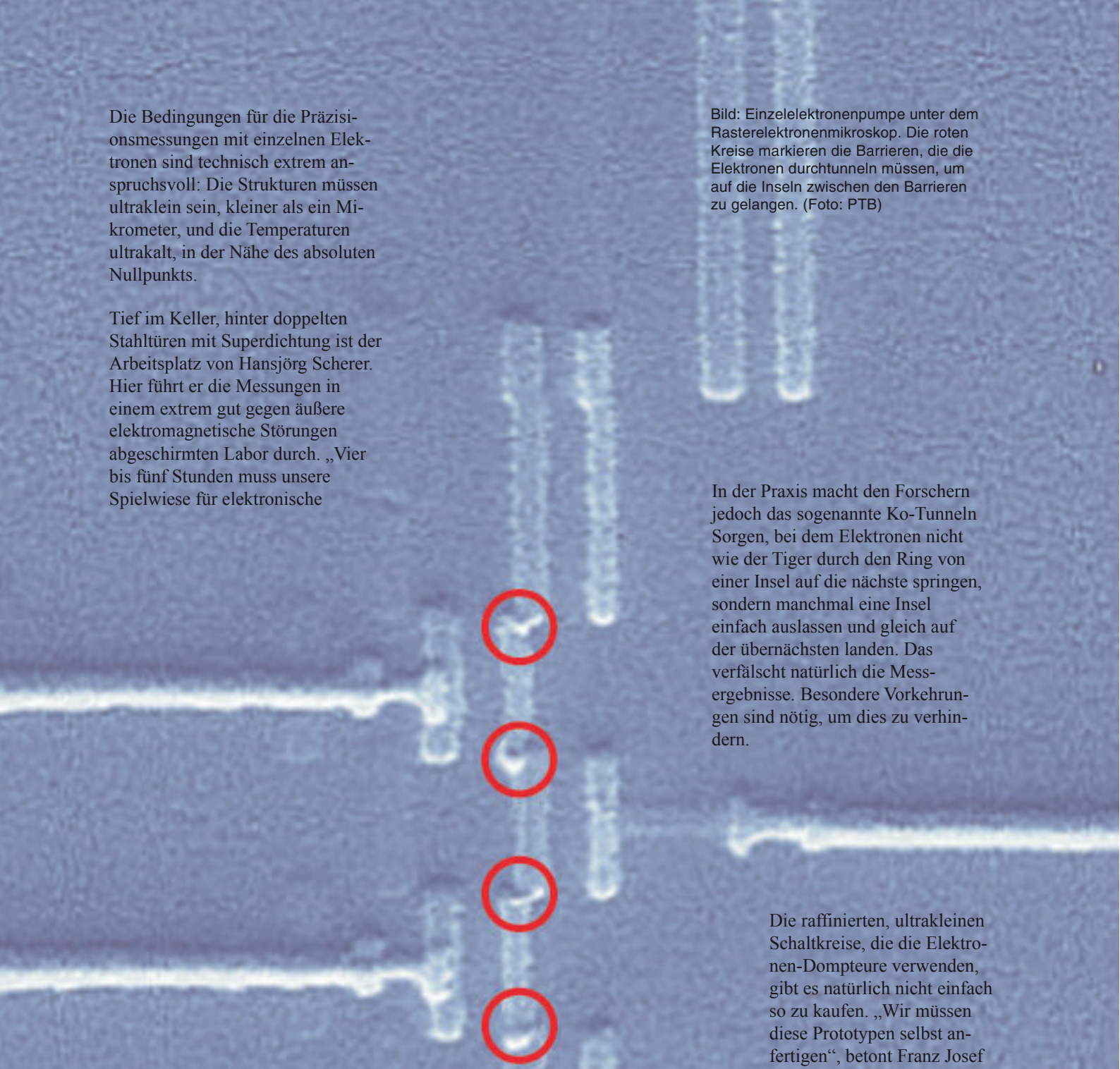
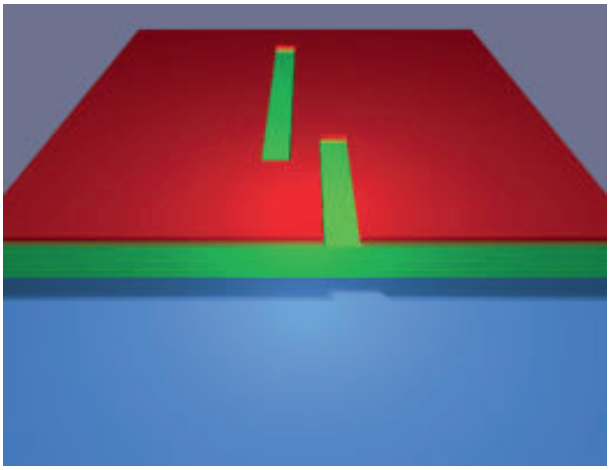
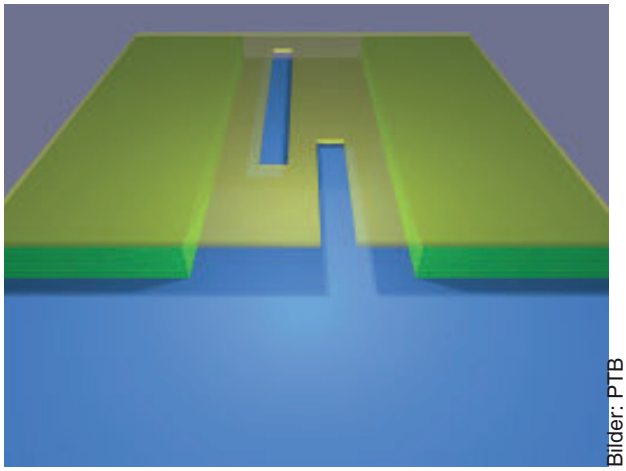


Bild: Einzelelektronenpumpe unter dem Rasterelektronenmikroskop. Die roten Kreise markieren die Barrieren, die die Elektronen durchtunneln müssen, um auf die Inseln zwischen den Barrieren zu gelangen. (Foto: PTB)

In der Praxis macht den Forschern jedoch das sogenannte Ko-Tunneln Sorgen, bei dem Elektronen nicht wie der Tiger durch den Ring von einer Insel auf die nächste springen, sondern manchmal eine Insel einfach auslassen und gleich auf der übernächsten landen. Das verfälscht natürlich die Messergebnisse. Besondere Vorkehrungen sind nötig, um dies zu verhindern.

Die raffinierten, ultrakleinen Schaltkreise, die die Elektronen-Dompteure verwenden, gibt es natürlich nicht einfach so zu kaufen. „Wir müssen diese Prototypen selbst anfertigen“, betont Franz Josef Ahlers, „und dies geschieht im Reinraumzentrum der PTB.“ Dort stehen die modernsten Maschinen zur Verfügung, mit denen man die Oberfläche von Silizium-Wafern beschichten, bedampfen und auf alle möglichen Arten verändern kann. Mit einem Laser- oder Elektronenstrahl „schreiben“ die Spezialisten die geplanten Strukturen auf Masken, die anschließend die beschichtete Oberfläche des Wafers abdecken. In einer Vielzahl von Schritten ätzen sie dann





Bilder: PTB

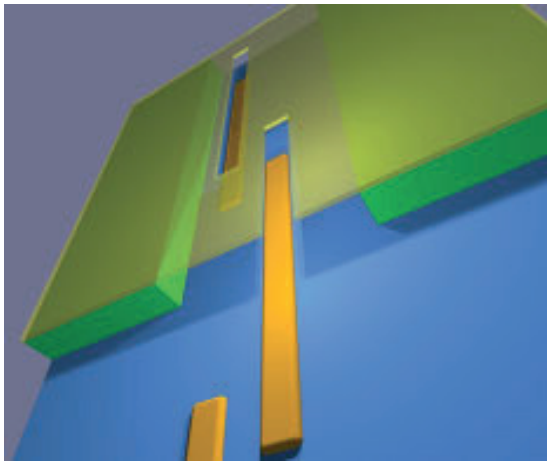
winzige Kanäle in die Beschichtungen. Um die Barrieren und Inseln zu erzeugen, benutzen die PTB-Forscher ein besonders raffiniertes Verfahren, die so genannte Schrägbedampfungstechnik. Bei ihr wird der Schatten ausgenutzt, den die winzigen Strukturen auf ihre Unterlage werfen. In den Schattenzonen erreichen beim Bedampfen keine Atome den Wafer, und so lassen sich winzige, genau definierte Überlappungen zwischen den einzelnen Leiterbahnen herstellen.

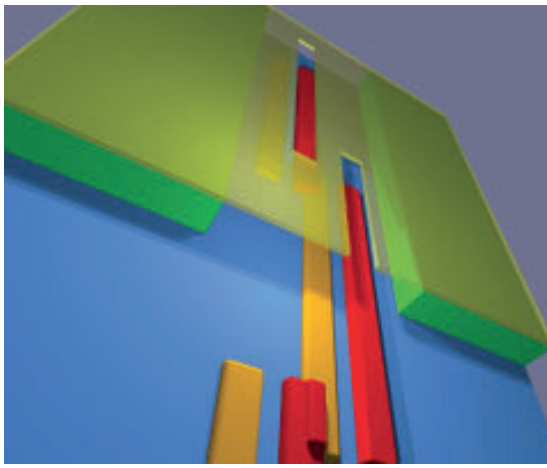
Im Labor von Franz Josef Ahlers hat die Einzelelektronenpumpe durch ein ganz anderes Verfahren Konkurrenz bekommen: Er zwingt seine Elektronen-Tiger nicht zum Sprung durch den Reifen, sondern lässt sie auf einer Art Förderband an der Oberfläche eines Halbleiterchips entlang surfen. Dies gelingt ihm mit elektrischen Feldern, die durch Schallwellen im piezoelektrischen Kristall entstehen. Ahlers spricht gern von „Nanobeben“, weil sie sich typischerweise wie ein Erdbeben an der Festkörper-Oberfläche ausbreiten. Und obwohl ihre Abmessungen extrem klein sind – die Länge der Wellen liegt im Maßstab von tausendstel Millimetern, ihre Höhe ist noch tausendmal kleiner – erzeugen sie große Spannungen im Inneren des Materials: bis zu 100 000 Volt pro Zentimeter.

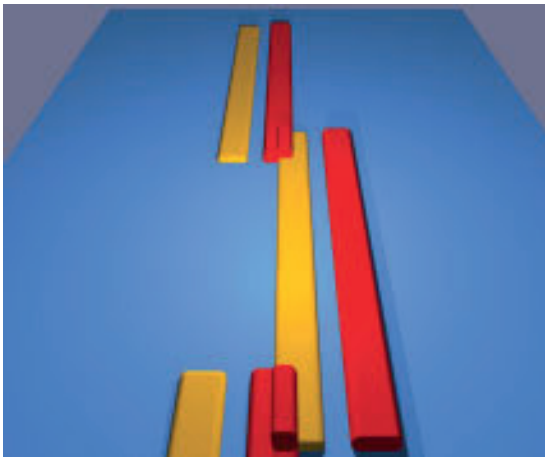
Einzelne Elektronen reiten nun auf dieser elektroakustischen Welle an der Kristalloberfläche entlang, und zwar mit Schallgeschwindigkeit. Unregelmäßigkeiten im Material können den Ritt stören, aber „was man nicht vermeiden kann, sollte man für seine Zwecke nutzen“, so Ahlers. Bestimmte Konstellationen an der Oberfläche wirken wie so genannte Quantenpunkte. Sie bilden einen Potentialtopf, in dem einzelne Elektronen gefangen und aufbewahrt werden können.

Der Effekt bietet neben der Anwendung als Standard für die Stromstärke eine weitere Riesen-Chance: Er könnte eines Tages dabei helfen, einen Quantencomputer zu konstruieren. Denn dieser beruht darauf, einzelne Quanten oder Teilchen zu manipulieren, zu transportieren und zu speichern. Und er könnte das neue Superwerkzeug werden für viele Probleme, an denen heutige Großrechner noch scheitern.

Brigitte Röthlein







Bilder:
Im Reinraumzentrum wird sie in mehreren Prozessschritten strukturiert: eine Einzelelektronenpumpe. Nachdem ein Siliziumsubstrat (in der Bildfolge: blauer Untergrund) mit einer 3-stufigen Lackmaske (grün: Co-Polymer, gelb: Germanium, rot: PMMA) überzogen wurde, schreibt zunächst ein Elektronenstrahl Streifen in die beiden oberen Lagen der Lackmaske. Nach dieser Vorbereitung wird in die Lackmaske eine Höhle geätzt (Bild oben rechts). Jetzt kommen die eigentlichen Leiterbahnen: Zunächst wird die Probe nach links gekippt, eine Aluminiumschicht schräg aufgedampft und anschließend oxidiert (gelbe Streifen). Diese Oxidschicht wird die spätere Tunnelbarriere. Die nächste Aluminiumschicht wird, nachdem die Probe zur anderen Seite gekippt wurde, überlappend aufgedampft (rote Streifen). Wird jetzt noch die Lackmaske abgelöst, ist die Metallstruktur für die Einzelelektronenpumpe fertig.