

# Atome schlagen Wellen

Für **Ragnar Fleischmann** war es eine überraschende Entdeckung: Was er in Simulationen beobachtete, die den Elektronenfluss in Halbleitern wiedergeben, ähnelte dem Verhalten von Tsunamis und Kaventsmännern auf offener See. Heute erforscht sein Team am Göttinger **Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation** elektronische Prozesse, um so möglicherweise auch einmal die Vorhersagen der zerstörerischen Wellen zu verbessern.

TEXT **KLAUS JACOB**





Ein Modell für Monsterwellen: Göttinger Max-Planck-Forscher simulieren die Flussverzweigungen von Elektronen, die in einem Halbleitersystem von einem Kontakt (links, hellgelb) zu einem zweiten (rechts, hellrot) strömen. Daraus lernen sie auch etwas über die Entstehung der von Seeleuten gefürchteten Kaventsmäner.

**W**ie gefährlich ein Tsunami sein kann, weiß man spätestens seit den Weihnachtstagen 2004. Damals löste ein starkes Erdbeben vor der indonesischen Küste eine Welle aus, die um die halbe Welt raste und mehr als 200 000 Menschen tötete. Stundenlang war das Monster unterwegs, ehe es an weit entfernten Küsten zuschlug. Noch nach Tausenden Kilometern Weg riss es ahnungslose Strandurlauber in den Tod.

Seitdem haben deutsche Wissenschaftler im Indischen Ozean ein Frühwarnsystem installiert. Es beruht darauf, dass Erdbebenwellen wesentlich schneller durchs Gestein laufen als Wasserwellen über den Ozean. Oft blei-

ben mehrere Stunden zur Warnung. Die seismischen Wellen liefern den Wissenschaftlern nicht nur die Stärke des Erdbebens, sondern auch das Epizentrum, also den Ort, an dem sich die Welle in Bewegung setzt. Eine Software modelliert daraufhin den Verlauf, den der Tsunami nehmen wird, und berechnet, wann an den verschiedenen Küsten mit dem Eintreffen zu rechnen ist. Dann werden die Menschen vor Ort mit Radio-durchsagen, Sirenen oder anderen Signalen gewarnt.

Doch die Modellierung des Wellenverlaufs kann trügerisch sein, das haben Ragnar Fleischmann und seine Mitarbeiter vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen nachgewiesen. Nach ihren

Berechnungen sind die Monsterwellen sogar noch tückischer als bisher angenommen. Um das zu verstehen, muss man den großen Ozean zunächst verlassen und sich winzigen Nanostrukturen zuwenden, die nur mit sehr empfindlichen Techniken wie atomaren Rastermikroskopen zugänglich sind.

#### **FOLGENREICHE ENTDECKUNG IN HALBLEITERSYSTEMEN**

Denn Fleischmann ist kein Ozeanforscher, er beschäftigt sich als theoretischer Physiker vor allem mit komplexer Dynamik und Quantenphänomenen, etwa in elektronischen Halbleiterstrukturen. In solchen Systemen hat er vor 18 Jahren mit zwei Kollegen – er arbei-



tete damals als Postdoktorand bei dem Physiker Eric Heller in Harvard – eine Entdeckung mit weitreichenden Folgen gemacht. Sie suchten damals nach einer Erklärung für ein Experiment, das zwar wunderschöne Bilder lieferte, aber für Laien nur schwer zu verstehen ist: Es ging darum, wie sich Elektronen in einem zweidimensionalen elektrischen Leiter bewegen.

Ein solcher Leiter entsteht an der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Halbleitern – einer Halbleiterheterostruktur. Elektronen werden dort in einer Potenzialfalle gefangen wie Wasser in einer Rinne. Ihre Bewegungsfreiheit ist somit auf zwei Dimensionen – entlang der Grenzfläche – beschränkt.

### **FREMDATOME ZWINGEN ELEKTRONEN AUF NEUE BAHNEN**

Zwei winzige, auf die Oberfläche des Kristalls aufgebrachte Metallkontakte, die durch einen schmalen Schlitz voneinander getrennt sind, bildeten eine Engstelle, durch die sich die Elektronen zwingen mussten, einen sogenannten Quantenpunktkontakt. Da das verwendete Halbleitermaterial sehr rein war, erwarteten die Wissenschaftler, dass sich die Elektronen vom Quantenpunktkontakt fächerförmig in alle Richtungen ausbreiten würden, ähnlich wie das Licht einer Straßenlampe.

Denn eigentlich sollten die Teilchen freie Fahrt haben. Sie haben nur vernachlässigbare Hindernisse zu meistern: Der angrenzende Halbleiter ist zwar mit Fremdatomen dotiert, die Einfluss auf den Stromfluss haben. Allerdings liegen diese Störstellen relativ weit von der Grenzfläche entfernt, sodass sie die Elektronen nur unwesentlich aus ihrer Richtung ablenken und sich daher kaum bemerkbar machen sollten. So jedenfalls die Annahme.

Das Experiment ergab jedoch etwas ganz anderes. Das Bild, das ein atomares Rasterkraftmikroskop lieferte, zeigte, dass sich die Elektronen nicht gleichmäßig auffächerten, sondern in Filamenten



Foto: dpa





Foto: Ragnar Fleischmann

bündelten. Was die Forscher sahen, erinnerte eher an eine neuschwänzige Peitsche als an einen gleichmäßigen Lichtschein. „Wir befürchteten zunächst ein Scheitern des Messprinzips“, sagt Fleischmann. Doch die Methode funktionierte einwandfrei, wie er und seine Kollegen durch detaillierte Modellrechnungen zeigen konnten. Allerdings hatten Physiker den Einfluss der Fehlstellen erheblich unterschätzt. Obwohl die Fremdatome nicht auf der Grenzfläche zwischen den beiden Halbleitern lagen, zwangen sie die Elektronen auf neue Bahnen.

Gemeinsam bewirkten die vielen kleinen Störungen Fokussierungen, die zur Verästelung des Flusses führten, die die Forscher im Mikroskop beobachteten. Die Strukturen solcher Fokussierungen sind in der Wissenschaft schon lange bekannt. Experten sprechen von Kaustiken. Der Begriff stammt aus der Optik, wo er für bestimmte Abbildungsfehler von Linsen verwendet wird.

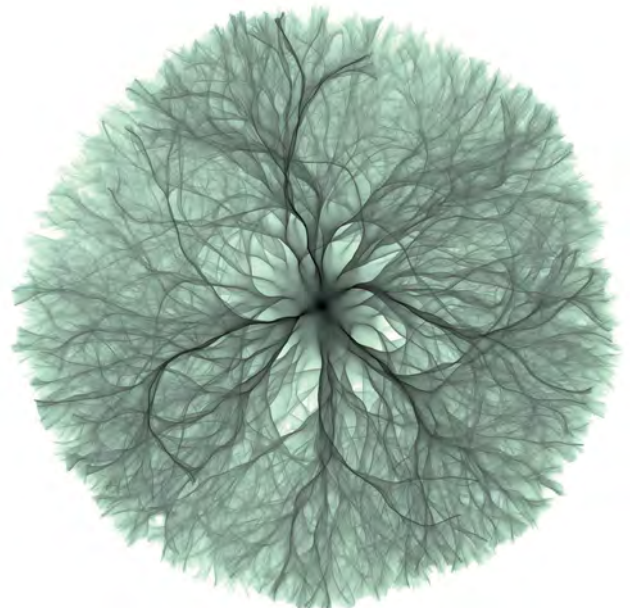
Kaustiken lassen sich im Alltag oft beobachten, etwa im Freibad: Wenn die

Sonne auf die Wasseroberfläche scheint, sieht man am Grund oft ein Netz aus hellen Linien. Dort wird das Sonnenlicht in Kaustiken oder Brennlinsen fokussiert. Fleischmann und seine Kollegen haben mit ihren Rechnungen gezeigt, dass schon minimale Störungen ausreichen, um ein solches Phänomen hervorzurufen. Kleine Ursachen können eine große Wirkung haben – bisher wurde das schlicht übersehen.

Jetzt kommt der Tsunami ins Spiel, genau genommen der katastrophale Tsunami vom 11. März 2011, der in Japan mehrere Kernkraftwerke zerstörte und so letztlich zum Ende der Kernenergie in Deutschland führte. Wissenschaftler des Center for Tsunami Research des NOAA rekonstruierten, wie sich die Welle auf dem Pazifik ausbreitete und wie sich ihre Höhe veränderte. Sie benutzten dafür Daten von Sensoren im offenen Ozean, die die Wellenhöhe an einigen Orten registriert hatten. Diese Messdaten passten sie dem modellierten Verlauf des Tsunami an. Was dabei herauskam, sah dem

**Links** Völlig zerstört hat der Tsunami von 2004 diesen Teil der nordindonesischen Stadt Banda Aceh. Zwei Luftaufnahmen im Vergleich: oben sechs Monate vor der Katastrophe und unten zwei Tage danach.

**Rechts** Wie die von Seebeben ausgelösten Wellen durch das Relief des Meeresbodens gebündelt werden, lässt sich mit Elektronen simulieren, die von einer Punktquelle in alle Richtungen strömen. Dabei fokussieren kleine Fehler in der leitenden Schicht den Fluss der Ladungsträger zu kleinen Verästelungen.



Elektronenbild im Halbleiter verblüffend ähnlich. „Das könnte etwas miteinander zu tun haben“, vermutete Ragnar Fleischmann sofort. Auch hier gab es keine homogene Wellenfront, sondern die Wellenenergie fokussierte in einzelnen Bändern, die sich verästelten – wie es Fleischmann aus den Nanostrukturen kannte. In den Bändern erreichte die Welle eine viel größere Höhe als im Umfeld. Die Werte unterschieden sich zwar nur um wenige Dezimeter, doch das hat bei einem Tsunami am Ende große Auswirkungen.

### DAS RELIEF DES MEERESBODENS BEEINFLUSST TSUNAMIS

Denn ein Tsunami ist eine sehr ungewöhnliche Welle. Auf dem offenen Ozean übersteigt ihre Höhe selten einen Meter. Dafür ist sie ungeheuer lang: Zwischen zwei Wellentälern liegen oft mehrere Hundert Kilometer. Ihre Form gleicht keinem steilen Berg, sondern eher einer sanft geneigten Ebene. Wer sie sich vorstellen will, sollte eher an einen Gezeitenberg denken als an Windwellen. Die Besatzungen von Schiffen spüren meist nicht einmal, wenn sie einen Tsunami unter den Kiel nehmen. Ihr Schiff hebt sich ganz langsam und sinkt ebenso langsam wieder ab.

Experten sprechen von einer Flachwasserwelle. Denn die Wellenlänge ist wesentlich größer als die Wassertiefe. Man kann auch sagen: Für den Tsunami ist das Meer nicht mehr als eine Pfütze. Wichtig ist: Flachwasserwellen haben ganz andere Eigenschaften als die kurzen Wellen, die der Wind aufwirft. Ihr Charakter wird wesentlich vom Meeresgrund bestimmt.

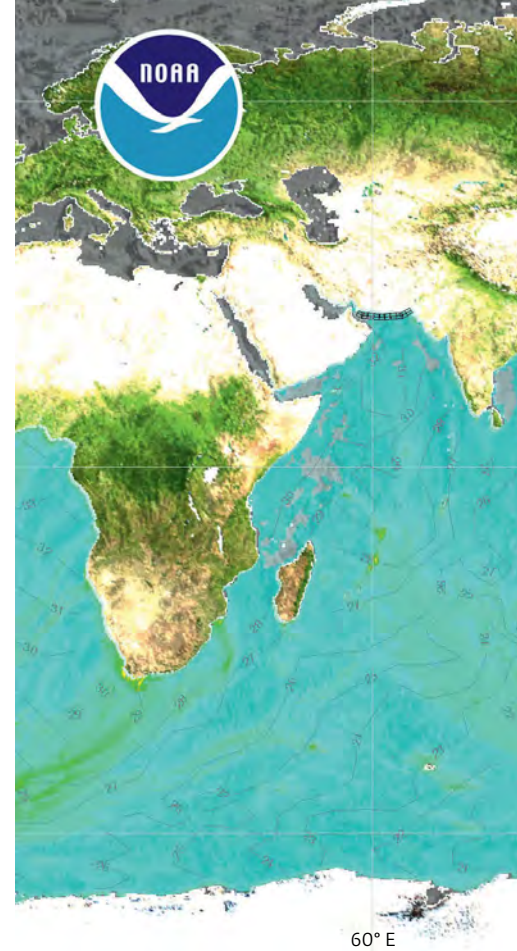
Das fängt mit der Geschwindigkeit an, mit der ein Tsunami über den Ozean rollt. Dieses Tempo ist allein von der Wassertiefe abhängig. Bei einer Tiefe von 5000 Metern erreicht ein Tsunami

rund 800 Stundenkilometer – das Tempo eines Jets. Bei 3000 Meter Wassertiefe sind es noch immer gut 600 Stundenkilometer. Erst an der Küste wird die Welle heftig abgebremst, stellt sich dabei steil auf und erreicht ihre katastrophalen Ausmaße. Die wenigen Dezimeter Höhenunterschied in einem Tsunami, der sich über das offene Meer bewegt, wachsen sich am Ufer dann zu vielen Metern aus.

Das Relief des Meeresbodens bestimmt aber nicht nur das Tempo, sondern auch den Kurs und die Gestalt der Welle. So wirkt ein Unterwasserberg wie eine Sammellinse und fokussiert die Energie. Vertiefungen wirken dagegen wie Streulinien, lange Gräben wie Führungsschienen. Dazu kommen Inseln, die der Wellenfront ebenfalls zusetzen. Das alles berücksichtigen Experten, die den Weg eines Tsunamis modulieren. Doch sie haben bisher nur große Strukturen im Visier. Kleine Störungen, Erhebungen von nur 100 oder 200 Metern, gehen nicht in die Berechnungen ein – was zu erheblichen Fehlern führen kann, wie Fleischmann und seine Kollegen nun gezeigt haben.

Sie nahmen sich ein Quadrat im Indischen Ozean vor, 1500 mal 1500 Kilometer groß, ohne störende Inseln oder größere Unterwasserberge. Tiefe: rund 4000 Meter plus/minus sieben Prozent. Das Relief des Meeresbodens entnahmen sie dem offiziellen Datenpool. Daraufhin ließen sie im Computer einen Tsunami, von einer fiktiven Quellen ausgelöst, darüberlaufen und beobachteten, wie der Meeresboden die Welle veränderte.

In einem zweiten Durchlauf variierten sie das Relief des Meeresbodens ein wenig. Kein große Sache, denn die vorhandenen Daten über die Meerestiefe sind alles andere als exakt. Die Genauigkeit liegt bei einigen Hundert Metern. Also bauten die Forscher ein paar Hü-

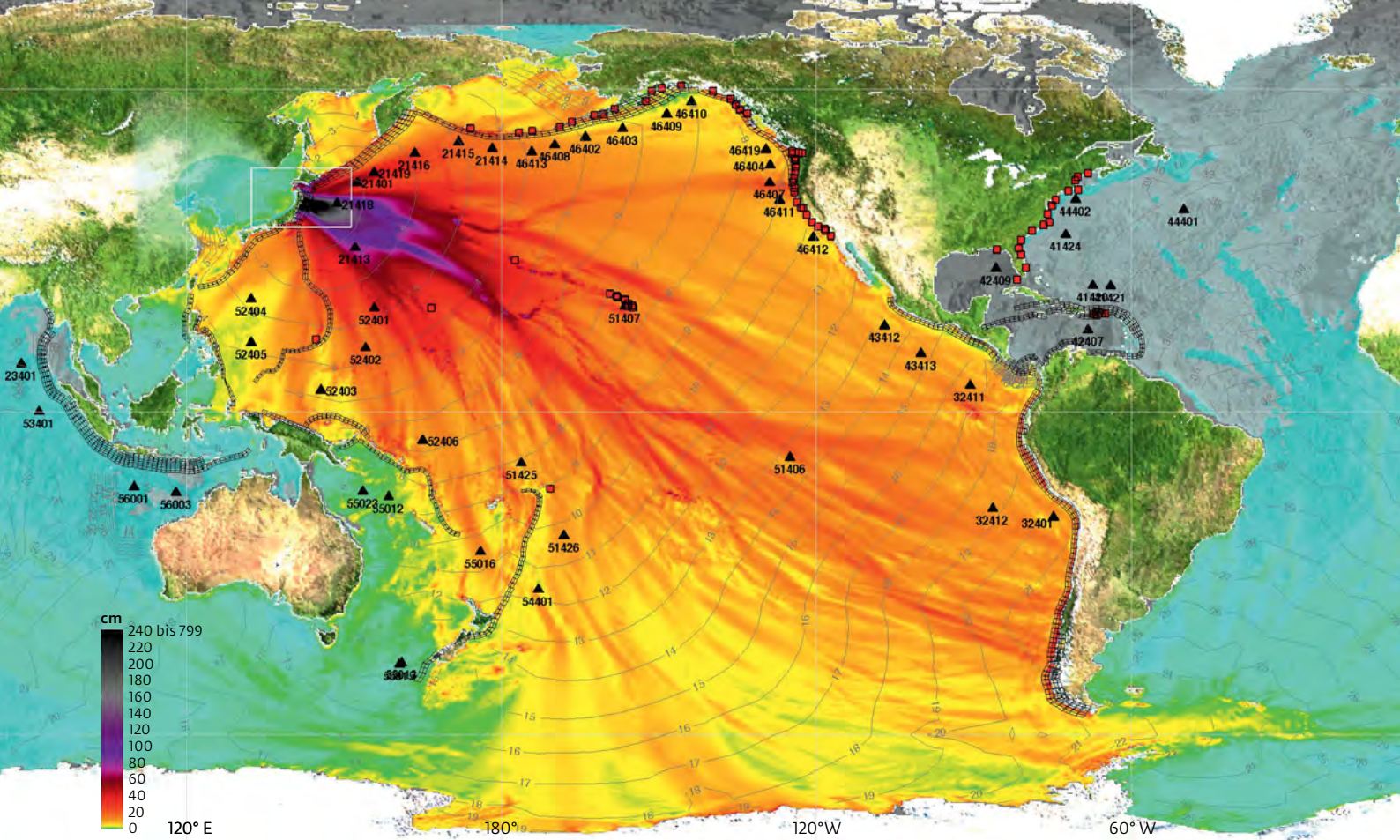


**Oben** Der Tsunami, der 2011 nach dem Beben vor der japanischen Küste entstand, raste mit deutlichen Höhenunterschieden durch den Pazifik. An einigen Stellen ragte die Welle nur 20 Zentimeter über den mittleren Meeresspiegel (gelb), an anderen erreichte sie eine Höhe von acht Metern (schwarz).

**Unten** Wenn Elektronen von einer Punktquelle durch die Grenzschicht zwischen zwei Halbleitern fließen, werden sie von Fremdatomen in dem Material gebündelt, wie diese Simulation demonstriert. Solche Kaustiken lassen sich auch auf dem offenen Meer beobachten. Hier können Strömungen Wellen so bündeln, dass sie mindestens die doppelte Höhe des Seegangs in ihrer Umgebung erreichen.







gel ein, kleiner noch als die Fehlertoleranz. Dieses zweite Relief entsprach demnach noch immer der realen Topografie. Wieder ließen sie einen Tsunami darüberlaufen – und bekamen ein völlig anderes Bild. An manchen Punkten unterschied sich die Energie der Wellen zwischen den beiden Berechnungen um den Faktor zehn. Und eine Zehnerpotenz macht sich in enormen Höhenunterschieden bemerkbar und kann über Leben und Tod entscheiden. Wie schon im Halbleiter hat eine kleine Ursache eine große Wirkung.

Aber was bedeutet diese Erkenntnis für die Vorhersage? Solange keine exakten Karten vom Ozeanboden existieren, lassen sich die Kaustiken leider nicht verlässlich vorhersagen. Die Modelle bleiben wohl oder übel fehlerhaft. „Doch man muss sich bewusst machen, dass es diesen Effekt gibt“, sagt Fleischmann. So könnten die Warndienste überprüfen, welchen Einfluss kleine Schwankungen der Ozeantiefe auf ihre Berechnungen haben, und dadurch die Zuverlässigkeit ihrer Vorhersagen besser einschätzen.

Freilich haben die Dienste noch mit ganz anderen Problemen zu kämpfen. Vor allem müssen sie dafür sorgen, dass

ihre Warnungen noch im kleinsten Fischerdorf ankommen und dort auch ernst genommen werden. Fehlalarme machen ihre Bemühungen zunichte, denn sie lassen die Menschen abstumpfen. Wer sich dreimal unnötigerweise in Sicherheit gebracht hat, tut es beim vierten Mal nicht mehr. Das Problem: Nicht jedes Erdbeben erzeugt einen Tsunami. Nur wenn sich der Meeresboden in vertikaler Richtung bewegt, bringt er das Wasser in Wallung.

### VIELE BEISPIELE, WO DER MECHANISMUS GREIFT

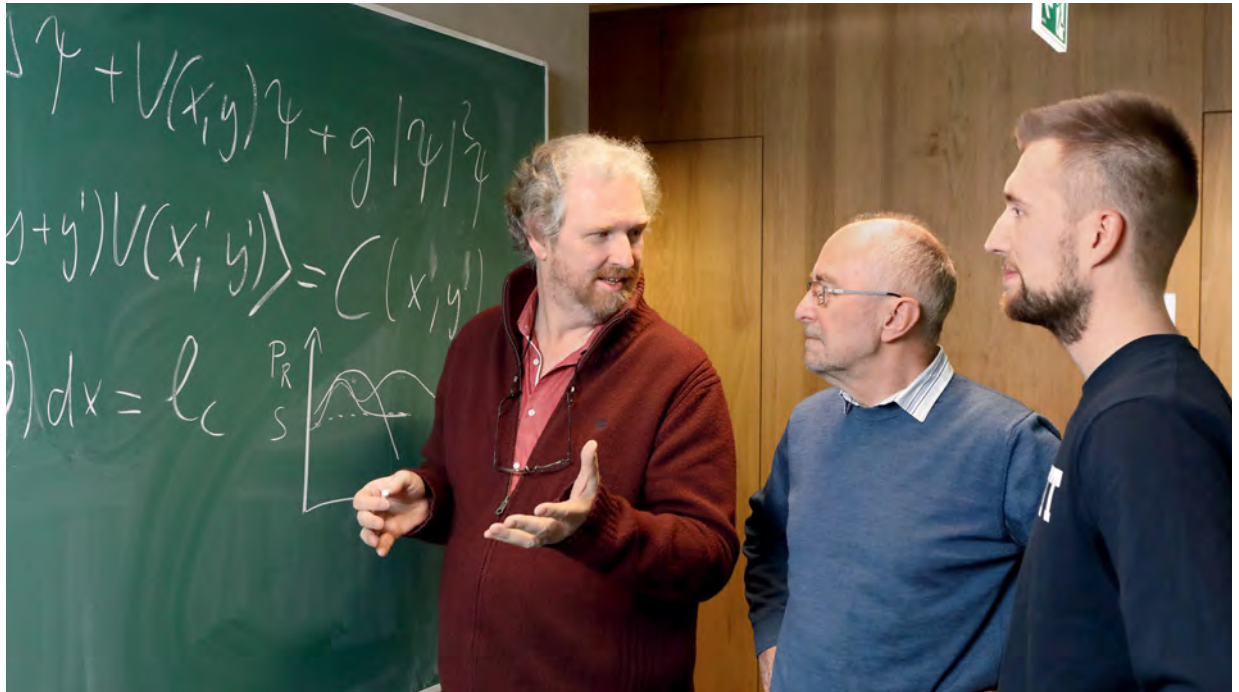
Ein Tsunami, der um die halbe Welt rast, und der Elektronenfluss in einem Halbleiter – dazwischen liegen etwa zwölf Größenordnungen. Dennoch greift jeweils derselbe Mechanismus. Mehr noch: Die Zusammenhänge, die Fleischmann im Halbleiter gefunden hat, haben universelle Gültigkeit. Überall, wo sich eine Welle durch ein ungeordnetes Medium ausbreitet, können kleine Störungen große Folgen haben und die Energie zu verästelten Strukturen bündeln.

Natürlich müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Zum einen

darf das Medium die Wellen nur relativ schwach ablenken. Würde jede Begegnung mit einer Störstelle die Wellen in alle Richtungen streuen, träte der Effekt nicht auf. Zum anderen muss das Medium ungeordnet sein, weil ein Meeresboden, der so regelmäßig strukturiert ist wie ein Eierkarton, eine Welle nicht beeinflussen würde. Dass sich Erhebungen und Senken unregelmäßig in einer Landschaft verteilen, ist jedoch eher die Regel als die Ausnahme.

Kein Wunder also, dass es viele weitere Beispiele gibt, wo dieser Mechanismus greift. Zum Beispiel das Funkeln der Sterne. Natürlich funkeln Sterne nicht wirklich, doch wenn man länger hinschaut, hat man diesen Eindruck. Ursache sind auch hier Kaustiken: Bis es zu unseren Augen gelangt, muss das Licht durch die Atmosphäre dringen. Und dort lauern viele kleine Störungen, die eine Bündelung der Lichtintensität bewirken. Für den Betrachter bedeutet das: Der Stern wird mal heller, mal dunkler. Trifft eine Kaustik auf das Auge, gleicht das einem kleinen Lichtblitz – und wir haben den Eindruck, der Stern blinke. Das erklärt auch, warum Sterne dann besonders intensiv funkeln, wenn es in der Atmosphäre turbulent zugeht. >





Ein besonders beeindruckendes Beispiel sind die Riesenwellen, auch Kaventsmänner oder Freakwaves genannt. Sie haben nichts mit Tsunamis zu tun, es sind einfach nur ungewöhnlich hohe, windgetriebene Wellen, die sich mitten im Ozean plötzlich auftürmen. Sie sind mindestens doppelt so hoch wie die umgebenden Wellen und sollen schon viele Schiffe verschlungen haben. Bis vor wenigen Jahrzehnten hat man Geschichten darüber für Seemannsgarn gehalten.

### STRÖMUNGEN KÖNNEN WELLEN ZU KAVENTSMÄNNERN BÜNDELN

Inzwischen ist man schlauer, zumindest die Beobachtungen von Seeleuten gelten als gesichert, die sogar mehrere Kategorien von Monsterwellen kennen: Neben der ungewöhnlich hohen Welle gibt es die „Weiße Wand“, die besonders steil aufragt und durch den Schaum hell leuchtet. Tückisch sind auch die „Drei Schwestern“, drei aufeinanderfolgende Riesenwellen, die manches Schiff so stark abbremsen, dass es den letzten Wellenkamm nicht mehr erklimmen kann.

Wenn Berichte von solchen unheimlichen Begegnungen auf dem Ozean nicht mehr als Mythen abgetan werden, liegt das auch daran, dass der

Schiffsverkehr enorm zugenommen hat und kaum ein Meeresabschnitt unbeobachtet bleibt. Zudem zeichnen die Ölplattformen die Wellenbewegungen auf, auch manche Satelliten können die riesigen Brecher erkennen. Im Februar 1995 registrierte ein Lasersystem auf der Bohrinsel Draupner in der Nordsee eine 26 Meter hohe Woge, und im November 2007 raste eine 21 Meter hohe Wasserwand auf die Ekofisk-Plattform in der Nordsee zu. Es soll die steilste Welle gewesen sein, die jemals gemessen wurde. Der Sturm hatte damals lediglich die Stärke neun, und die Welle kam wie aus dem Nichts.

Jedes Jahr gehen Schiffe auf unerklärliche Weise verloren, viele vermutlich als Folge einer Begegnung mit einer Killerwelle. Glück hatte das Kreuzfahrtschiff Bremen, als es 2001 östlich von Argentinien in einen Brecher geriet, der eine Höhe von 35 Metern gehabt haben soll. Die Wucht des Aufpralls drückte die Fenster auf der Brücke ein, die sonst haushoch über das Wasser ragt. Das eindringende Wasser verursachte einen Kurzschluss, sodass die Maschine ausfiel. Das Schiff legte sich quer zu den Wellen – eine brenzlige Situation. Erst nach einer halben Stunde gelang es der Mannschaft, den Hilfsdiesel zu starten.

Seit etwa 20 Jahren befasst sich die Wissenschaft ernsthaft mit Monsterwel-

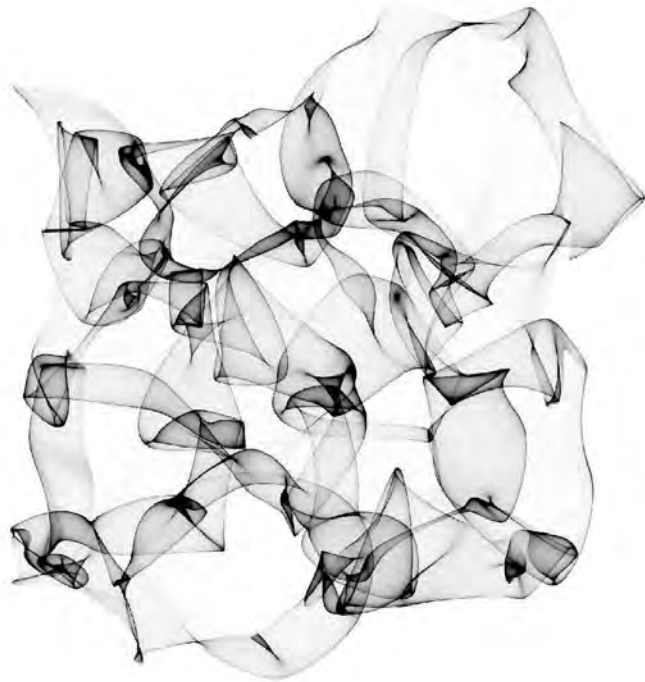
len. Doch eine schlüssige Erklärung für ihre Entstehung konnte sie bislang nicht liefern. Nach den einfachen Wellenmodellen dürfte es sie sogar gar nicht geben. Aber was hat das alles mit Kaustiken und Experimenten in Halbleitern zu tun? Die Antwort findet man, wenn man mit einem Schiff in die Mündung eines Flusses einfährt. Die Strömung des Flusses verändert die Wellen, die vom Meer heranrollen, und kann sie zu gefährlichen Brechern auftürmen.

Die Strömung entspricht den Fremdatomen im Halbleiter oder den Unterwasserhügeln beim Tsunami. Sie beeinflusst die Welle, verändert ihren Lauf und führt so an manchen Stellen zu einer Bündelung der Energie. Was an Flussmündungen gut sichtbar ist, geschieht auch auf offener See. Denn das Wasser ist überall in Bewegung. Trägt man die oberflächennahen Strömungen auf einer Karte auf, erhält man ein buntes Muster von Spiralen.

Gefahr droht vor allem dort, wo sich Strömungen kreuzen. Auch hier kann die Wellenenergie gebündelt werden, sodass sich wie aus dem Nichts ein haushoher Wellenberg auftürmt. Eric Heller, der Wissenschaftler, mit dem Fleischmann einst das Elektronen-Experiment machte, hat sich besonders intensiv mit den Monsterwellen beschäftigt. Sein Fazit: Berücksich-

**Links** Ragnar Fleischmann diskutiert mit Max-Planck-Direktor Theo Geisel und Doktorand Gerrit Green (von links) mathematische Gesetzmäßigkeiten, die sowohl für die Elektronendynamik als auch für Meereswellen gelten.

**Rechts** Wie Licht durch Wasser mit einer bewegten Oberfläche zu einem Gespinst von Kaustiken fokussiert wird, hat Ragnar Fleischmanns Team simuliert. Die Forscher stellen den Effekt in invertierter Form dar, sodass die eigentlich hellen Brennlinsen dunkel erscheinen.



sichtigt man die Verästelungen des Wellenflusses, die von den Strömungen verursacht werden, sagt er, erhalte man 50-mal so viele Freakwaves wie ohne diese Annahme. Das klingt realistisch. Denn dass es viel mehr Kaventsmänner gibt, als bisher angenommen wurde, haben inzwischen auch andere Untersuchungen bestätigt.

## MIT ZWEI THEORIEN ZU REALISTISCHEN VORHERSAGEN

Doch es gibt noch eine andere Theorie zur Entstehung der Freakwaves. Sie beruht auf speziellen Eigenschaften der Wellengleichung, sogenannten Nicht-linearitäten, mit denen die Wasserwellen beschrieben werden. Fleischmann ist überzeugt, dass nur die Verbindung der beiden Theorien ermöglichen wird, realistische statistische Vorhersagen von Freakwaves zu machen. Dies ist daher eines der Forschungsprojekte, mit denen er sich derzeit beschäftigt.

Darüber hinaus widmet er sich vor allem dem tieferen Verständnis und der statistischen Beschreibung der Flussverästelung. Denn Kaustiken sind nur deren augenfälligstes Merkmal. Tatsächlich kommt es in einem verästelten Fluss zu einem diffizilen Wechselspiel von chaotischer Streckung, Stauchung und Faltung der Wellenfronten, bei

dem Kaustiken ebenso auftreten wie Interferenzerscheinungen. Nur wenn Wissenschaftler verstehen, wie diese Faktoren zusammenwirken, können sie

zu belastbaren Vorhersagen gelangen, wie oft Monsterwellen auftreten und wo Tsunamis die größte Zerstörungskraft entfalten. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Fremdatome in winzigen Halbleiterstrukturen bewirken, dass sich ein Elektronenfluss durch das System verästelt. Daraus ziehen Max-Planck-Physiker Analogieschlüsse, warum Tsunamis mit unterschiedlicher Wucht auf verschiedene Küstenabschnitte treffen. Denn ähnlich wie Defektatome die Elektronen ablenken, werden die zerstörerischen Wellen durch Unregelmäßigkeiten im Meeresboden fokussiert.
- Mithilfe von Untersuchungen an den Nanosystemen lässt sich auch besser verstehen, warum sich auf offener See immer wieder Monsterwellen auf türmen. Hier werden die vom Wind angetriebenen Wellen durch Meeresströmungen gebündelt.
- Die Erkenntnisse können dazu beitragen, Frühwarnsysteme für Tsunamis zu verbessern und statistische Vorhersagen zu präzisieren, wie oft Schiffe auf Kaventsmänner treffen können.

### GLOSSAR

**Flussverästelung:** Der Fluss von Elektronen oder Wasserwellen kann durch Störungen gebündelt werden.

**Kaustik:** Bei dem aus der Optik bekannten Effekt wird Licht zu Brennlinsen fokussiert, etwa wenn es durch bewegtes Wasser fällt. Ähnlich können aber auch Elektronen oder Wasserwellen zu Kaustiken gebündelt werden.

**Monsterwelle:** Meeresströmungen können die vom Wind angetriebenen Wellen so bündeln, dass sie mehr als die doppelte Höhe der umgebenden Wellen erreichen. Monsterwellen werden auch Kaventsmänner genannt.

**Quantenpunktkontakt:** Nanoskopische Verengung in einem Leiter. Wenn Elektronen durch eine solche Engstelle fließen, treten Quanteneffekte auf, die in gewöhnlichen Leitern nicht zu beobachten sind.

**Tsunami:** Von einem Seebeben ausgelöste Welle.