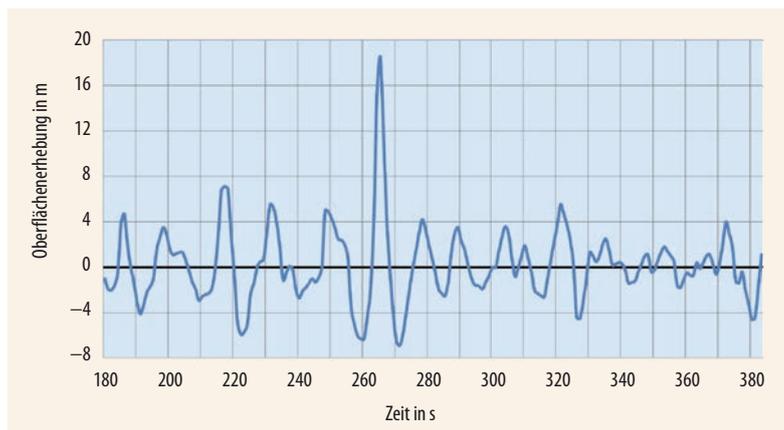


## ■ Vorwarnung möglich?

Methoden der Chaosforschung deuten darauf hin, dass sich Monsterwellen prinzipiell vorhersagen lassen.

**T**od und Verderben bedrohen jedes Schiff, das sich von Europa aus entlang der westafrikanischen Küste zu weit nach Süden vorwagt: Seeungeheuer werden es verschlingen oder in die Tiefe ziehen. So war der Stand der Kenntnis, bevor der portugiesische Prinz Heinrich „der Seefahrer“ ab etwa 1420 Entdeckungsreisen ausrüstete, bei denen sich jedoch keine Monster zeigten. Allerdings berichteten Schiffsbesatzungen seither immer wieder von Monsterwellen auf hoher See. Dies traf bis vor 20 Jahren auf Unglauben, aber seitdem mehren sich harte Fakten, die solche Monsterwellen belegen (Abb. 1). Doch welcher Mechanismus liegt ihrer Entstehung zugrunde? Sind es Interferenzphänomene aus mehreren Wellen, die sich treffen? Oder liegen spezielle Lösungen der nichtlinearen Schrödinger-Gleichung, die Tiefwasserwellen beschreibt, zugrunde, z. B. das sog. Peregrine-Soliton?<sup>#)</sup>

Die Debatte erhielt 2007 einen weiteren Schub, als eine Analogie zwischen Lichtpulsen in Glasfasern und Monsterwellen des Ozeans hergestellt wurde [1]. Immerhin beschreibt die nichtlineare Schrödinger-Gleichung auch die Ausbreitung von Lichtpulsen in Glasfasern. So gibt es beispielsweise für die Anregung von Wellen durch da-



**Abb. 1** Am 1. Januar 1995 wurde an der Offshore-Plattform Draupner in der nördlichen Nordsee eine plötzlich auftretende Riesenwelle registriert. Sie hat-

te eine Höhe von etwa 25 Metern in einem Seegang mit mittlerer Wellenhöhe von rund 8 Metern.

rüber blasenden Wind die genaue optische Entsprechung: Bei kontinuierlicher Einstrahlung in Glasfasern bildet sich ein periodisches Muster. Im Experiment wurden intensive Laserpulse in eine Glasfaser eingekoppelt. Dort erzeugte das Zusammenwirken verschiedener linearer und nichtlinearer Prozesse ein optisches Superkontinuum [2], also ein Lichtsignal mit sehr breitem optischen Spektrum. Das Besondere war nun, dass die Autoren von [1] das langwellige Ende des erzeugten Spektrums durch ein Filter herauspräparierten und seinen zeitlichen Verlauf analysierten. Der Hintergrund: Die Raman-Fre-

quenzverschiebung [3] führt dazu, dass gerade die intensivsten Pulse, die aus welchen Gründen auch immer entstehen, sich am stärksten zum langwelligen Ende des Spektrums hin verschieben und dort gehäuft auftreten. So zeigten sich tatsächlich einzelne Impulsspitzen, deren Höhe aus dem zeitlichen Durchschnitt weit herausragte. Im Histogramm der beobachteten Spitzenintensitäten erzeugen sie in der sonst eher Gauss-förmigen Verteilung einen „langen Schwanz“ zu hohen Spitzenwerten hin.

In den Folgejahren ist sehr viel über Monsterwellen in verschiedenen Konfigurationen in der Optik gesagt und geschrieben worden. Der „lange Schwanz“ der Verteilung wird dabei in informellem Konsens zusammen mit dem völlig unvermittelten Auftreten und mit der extremen Höhe als Definition einer Monsterwelle angesehen. Natürlich gibt es profunde Unterschiede zwischen Licht in Glasfasern und Wellen auf dem Ozean: Die Ausbreitung in Glasfasern geschieht in einer einzigen Raumdimension, während die Meeresoberfläche zweidimensional ist. Auch wird der Raman-Effekt der Optik durch einen Zusatzterm zur nichtlinearen Schrödinger-Gleichung erfasst; im Ozean hat er keine Entsprechung. Von einer einheitlichen Beschreibung oder

#) N. Hoffmann und A. Chabchoub, Monsterwellen im Modell, Physik Journal, Oktober 2012, S. 25

### KURZGEFASST

#### ■ CPT-Symmetrie bestätigt

Mit dem BASE-Experiment am Antiproton Decelerator des CERN konnten Forscher die CPT-Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie noch genauer bestätigen. Dafür maßen sie das Verhältnis von Ladung zu Masse von Proton bzw. Antiproton. Nach den neuen Messungen stimmen diese bis auf 69 Billionstel miteinander überein. S. Ulmer et al., Nature 524, 196 (2015)

#### ■ Hochaufgelöst bei Raumtemperatur

Einem Team von Forschern der Universitäten Regensburg und Barcelona ist es gelungen, organische Moleküle (PTCDA–Perylentetracarbonsäuredianhydrid) bei Raumtemperatur atomar aufgelöst abzubilden. Mit einer neuartigen Kombination aus Rastertunnel-

und Rasterkraftmikroskop konnten sie dabei nicht nur die Kräfte der chemischen Bindungen bestimmen, sondern auch die elektronische Ladungsdichte um die Moleküle untersuchen. F. Huber et al., Phys. Rev. Lett. 115, 066101 (2015)

#### ■ Interstellare Fullerene

In Sternspektren finden sich mehr als 400 „diffuse interstellare Banden (DIB)“, deren Herkunft bislang ungeklärt war. Basler Forscher haben nun im Labor mit Gasphasenspektroskopie an ionisierten Buckminsterfullerenen ( $C_{60}^+$ ) nachgewiesen, dass die „Fußballmoleküle“ die zwei stärksten DIB im nahen Infrarot erzeugen. E. K. Campbell et al., Nature 523, 322 (2015)

gar Erklärung von Monsterwellen-Phänomenen kann also einstweilen noch keine Rede sein.

Vor diesem Hintergrund haben sich kürzlich Forscher in Berlin und Hannover von einer ganz anderen Seite der Frage nach dem Mechanismus genähert. Sie setzen eine Methode ein, die einem völlig anderen Kontext entstammt: der Chaosforschung [4]. Dabei gehen sie von einer Zeitreihe aus, einer Serie von zeitlich äquidistant aufgezeichneten Datenpunkten einer relevanten Variablen wie der momentanen Höhe der Wasseroberfläche.

Sowohl deterministisch-chaotische als auch stochastische Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass das Fourier-Spektrum einer Zeitreihe eine kontinuierliche Verteilung hat. Gemäß dem Wiener-Khinchin-Theorem haben damit beide auch ähnliche Autokorrelationsfunktionen. Der Unterschied zwischen Determinismus und Zufall kann sich also nur durch Korrelationen höherer Ordnung ausdrücken. Diese werden hier mit einem Algorithmus ausgewertet, welcher ursprünglich zur Ermittlung der fraktalen Dimension chaotischer Attraktoren diente: dem Grassberger-Procaccia-Algorithmus [5]. Im vorliegenden Fall interessiert der Attraktor allerdings nicht, noch nicht einmal, ob überhaupt einer existiert. Leider neigt der Algorithmus dazu, je nach Form der Autokorrelationsfunktion gewisse Artefakte zu produzieren, die zu Fehlschlüssen verleiten können. Daher kommt hier eine Technik hinzu, die solche Artefakte entlarvt.

Dazu wird die Zeitreihe mit geschickt randomisierten Versionen ihrer selbst verglichen. Zur Randomisierung wird zunächst die diskrete Fourier-Transformation der Zeitreihe berechnet. Darin lässt man bei allen Koeffizienten die Beträge bestehen, ersetzt aber die Phasen durch im Intervall  $\pm \pi$  gleichverteilte Zufallszahlen. Nach der Rücktransformation sind in der resultierenden „Surrogatdatei“ Leistungsspektrum und Autokorrelationsfunktion unverändert, sodass Artefakte aufgrund der Form der Autokorrelationsfunktion in beiden

Versionen gleichermaßen auftreten. Hingegen sind in der Surrogatdatei alle Korrelationen höherer Ordnung beseitigt. Wendet man nun den Grassberger-Procaccia-Algorithmus auf Original- und Surrogatdateien an und findet zwischen ihnen keine Unterschiede, waren solche Korrelationen wohl von vornherein nicht vorhanden [6]; das Signal war demnach stochastisch. Tritt doch ein Unterschied auf, weist er auf einen zugrunde liegenden Determinismus hin.

Die Autoren von [4] untersuchen Zeitreihen von drei sehr unterschiedlichen Systemen: Ozeanwellen, Filamentbildung in intensiven Laserstrahlen in Gas und Erzeugung von optischen Superkontinuum in Glasfaser. Diese Systeme zeigen einen recht verschiedenen Grad von Determinismus: sehr ausgeprägt bei der Filamentation, geringer bei den Ozeanwellen und bei der Glasfaser so gut wie nicht vorhanden. Letzteres erklärt sich aber wohl zwanglos aus dem Quantenrauschen der verwendeten Lichtquelle.

Der Vergleich von Teilabschnitten einer Zeitreihe unmittelbar vor und nach Extremereignissen mit zufällig ausgewählten anderen Segmenten ergibt signifikante statistische Unterschiede, was letztlich bedeutet, dass in enger zeitlicher

Nachbarschaft eines Monsterereignisses die Dynamik einen bestimmten charakteristischen Verlauf hat. Dies relativiert das definierende Merkmal des völlig überraschenden Erscheinens, denn eine solche Regelmäßigkeit impliziert eine prinzipielle Möglichkeit der Vorhersage. In [4] wurde eine Vorhersagbarkeit von bis zu fünf Autokorrelationszeiten gefunden; bei Übertragung auf Ozeanwellen entspräche das einer Vorwarnzeit von etwa anderthalb Minuten.

Die potenzielle Vorhersagbarkeit wird allerdings erst *post factum* festgestellt, gilt nicht in allen Fällen und erstreckt sich nur über einen kurzen Zeitraum. Dennoch ist bereits die Erkenntnis elektrisierend, dass es die *prinzipielle Möglichkeit* einer Vorhersage gibt.

Fedor Mitschke

- [1] D. R. Solli, C. Ropers, P. Koonath und B. Jalali, *Nature* **450**, 1054 (2007)
- [2] J. M. Dudley, G. Genty und S. Coen, *Rev. Mod. Phys.* **78**, 1135 (2006)
- [3] F. Mitschke und L. F. Mollenauer, *Opt. Lett.* **11**, 659 (1986)
- [4] S. Birkholz, C. Brée, A. Demircan und G. Steinmeyer, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 213901 (2015)
- [5] P. Grassberger und I. Procaccia, *Phys. Rev. Lett.* **50**, 346 (1983)
- [6] J. Theiler, S. Eubank, A. Longtin, B. Galdrikian und J. D. Farmer, *Physica* **58D**, 77 (1992)

Prof. Dr. Fedor Mitschke, Universität Rostock, AG Nichtlineare Optik, Universitätsplatz 3, 18059 Rostock

## PLUTO VOLL IM BILD

85 Jahre nach Plutos Entdeckung liefert die NASA-Sonde New Horizons scharfe Bilder vom Zwergplaneten und seinen Monden. Am 14. Juli um 13:49 Uhr MESZ näherte sich die Sonde nach neuneinhalb Jahren Reise Pluto auf nur 12 400 Kilometer. Seine rötliche Oberfläche zeigt überraschend viele unterschiedliche Details, die auf komplexe geologische Aktivitäten schließen lassen. Die Übertragung aller Daten wird wegen der geringen Rate noch rund 15 Monate dauern. New Horizons derweil fliegt weiter in Richtung des Sternbilds Schütze, ohne dass nennenswerte Kurskorrekturen möglich sind. Die Forscher hoffen aber auf weitere spannende Begegnungen im Kuiper-Gürtel in den kommenden zwei Jahrzehnten. So lange soll der Radioisotopengenerator der Sonde noch Energie liefern. Mehr zur Mission findet sich auf <http://pluto.jhuapl.edu/>. (AP)

