

■ Monsterwellen aus der Unordnung

Erstmals ist es gelungen, Monsterwellen mithilfe nichtlinearer Fokussierung und durch Ausnutzung von Zeitinversion zu erzeugen.

Monsterwellen sind besonders große Einzelwellen oder Wellenpakete auf dem Meer, die aus dem umgebenden Seegang heraus scheinbar spontan entstehen und wieder vergehen. Für Schiffe und Strukturen, aber auch für Bauwerke und Personen an der Küste, stellen diese besonders extremen Wellen eine erhebliche Bedrohung dar.¹⁾

Beobachtungen legen nahe, dass Monsterwellen wesentlich häufiger auftreten, als dies zu erwarten wäre, wenn sich die Wellenanteile bei der Ausbreitung rein zufällig linear überlagern würden. Die Ursachen hierfür werden kontrovers diskutiert und intensiv untersucht. Zwei Mechanismen stehen im Zentrum aktueller Arbeiten. Zum einen könnten heterogene Strömungsfelder, Bodeneinflüsse oder auch Atmosphärenbedingungen zu Linseneffekten und Kaustiken führen, die sich in Gebieten mit räumlich lokal verstärkter Wellenamplitude äußern [1]. Zum anderen könnte eine nichtlineare Fokussierung zu räumlicher und zeitlicher Lokalisierung von Wellenenergie führen [2].

Nichtlineare Fokussierung kann grundsätzlich auftreten, wenn die dispersiven Eigenschaften der betrachteten Wellen, also Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten, von der Wellenamplitude abhängen. Bei nahezu periodischen Wellen lässt sich eine schwach nichtlineare dispersive Wellenausbreitung mithilfe der nichtlinearen Schrödinger-Gleichung beschreiben. Sie ergibt sich aus der linearen Schrödinger-Gleichung, wie sie aus der Quan-



EpicStockMedia, Fotolia

Riesige Wellen, die wie aus dem Nichts zu kommen scheinen und Schiffe versenken können, galten lange als See-

mannsgarn. Mittlerweile ist unstrittig, dass Monsterwellen existieren. Doch wie sie entstehen, ist nach wie vor unklar.

tenmechanik zur Beschreibung dispersiver Wellenpaketdynamik bekannt ist, durch Hinzufügen eines kubisch nichtlinearen Terms. Dieser berücksichtigt in niedrigster Ordnung, dass die dispersiven Eigenschaften von der Amplitude abhängen. Für die nichtlineare Schrödinger-Gleichung sind seit längerem sog. Breather-Lösungen bekannt. Diese stellen die generische nichtlineare Entwicklung von schwach modulierten periodischen Wellen dar. Die nichtlineare Fokussierung bündelt dabei kurzzeitig die Wellenenergie in räumlich eng begrenzten Bereichen. Aus dynamischer Sicht sind Breather-Lösungen homokline

Orbits. Anschaulich bedeutet das, dass sich aus einem periodischen Wellenzustand mit beliebig kleiner Störung transient starke Fokussierungszonen herausbilden, die anschließend wieder verschwinden und rein periodische Wellen hinterlassen. Die entstehenden Monsterwellen kommen so quasi „aus dem Nichts“ und verschwinden ebenfalls wieder „spurlos“.

Eine Reihe jüngerer experimenteller Arbeiten hat eindrücklich die Existenz derartiger Breather-Dynamik bei Wasserwellen gezeigt [3]. Sind die nichtlinearen Effekte so schwach, wie es der elementaren nichtlinearen Schrödinger-Gleichung entspricht – bei vergleichs-

1) vgl. auch den Überblicksartikel „Monsterwellen im Modell“, Physik Journal, Oktober 2012, S. 25.

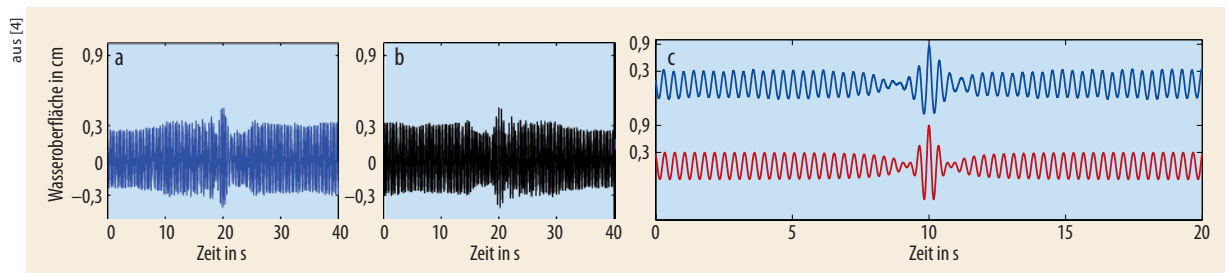


Abb. 1 Das Oberflächenprofil des Wassers ist neun Meter von der wellenerzeugenden Klappe entfernt nach Abklingen

des Breathers irregulär (a). Das zeitinvertierte Signal (b) liefert die Anfangsbedingungen für die erneute Wellenanregung.

Als Resultat entsteht ein Breather (c, blau), der identisch ist zum theoretisch erwarteten Wellenprofil (rot).

weise flachen periodischen Wellenzügen ist dies der Fall –, stimmen Theorie und Experiment hervorragend überein. Bei steileren Wellen, die etwas stärkerer Nichtlinearität entsprechen, gibt es verschiedene Abweichungen. Unter anderem verschwinden die Monsterwellen nicht mehr vollständig, nachdem sie sich aufgetürmt haben, sondern hinterlassen einen leicht irregulären Wellenzustand. Streng formal sind die Monsterwellenzustände keine Breather mehr, also homokline Orbits des dynamischen Systems.

Die bisherigen experimentellen Arbeiten, aber auch die zugrunde liegenden theoretischen Erkenntnisse aus dem Gebiet der nichtlinearen Schrödinger-Gleichung, waren meist auf nichtlineare Fokussierung von schmalbandigen, im Grenzfall periodischen Hintergrundwellen beschränkt. Realer Seegang, der in der Regel durch Wind entsteht, ist aber üblicherweise alles andere als regulär periodisch. Daher stellt sich die Frage, ob nichtlineare Fokussierung und damit auch breatherartige Dynamik an sich überhaupt für die Entstehung realer Monsterwellen auf See von Bedeutung sein können.

Amin Chabchoub und Mathias Fink haben nun in einer experi-

mentellen Arbeit gezeigt, wie sich Monsterwellen durch nichtlineare Fokussierung auch aus nichtperiodischen Wellenzuständen heraus entwickeln können [4]. Hierzu haben sie ausgenutzt, dass der Wellenzustand von Breathern bei etwas stärkerer Nichtlinearität, also etwas steileren Hintergrundwellen, beim Abklingen der Fokussierung nicht zum periodisch regulären Ausgangszustand zurückführt, sondern zu einem ungeordneten Wellenzustand. In einem Wellenkanal haben sie hierfür auf vergleichsweise steile periodische Hintergrundwellen Störungen aufmoduliert, die zunächst zu breatherartiger Monsterwellenbildung führten. Im Gegensatz zu früheren Arbeiten haben Chabchoub und Fink aber auch die weitere Entwicklung des Wellenfeldes zugelassen. Dabei stellte sich ein ungeordnetes Wellenfeld ein. Da die zugrunde liegenden Wellengleichungen auch bei der hier betrachteten etwas stärkeren Nichtlinearität nach wie vor symmetrisch gegenüber Zeitumkehr sein sollten, stellte sich die Frage, ob sich diese Zeitumkehrsymmetrie auch im Experiment nachvollziehen lassen würde. Ob es also möglich wäre, das aus der Vor-

wärtsentwicklung in der Zeit erhaltene irreguläre Wellenfeld als neue Anfangsbedingung zu verwenden, und die Wellenentwicklung tatsächlich rückwärts verlaufen zu lassen. Um diese Hypothese zu testen, haben Chabchoub und Fink weit stromab der ursprünglichen Monsterwellenposition die resultierende irregulär schwankende Wasseroberfläche vermessen, zeitlich invertiert und quasi „rückwärts“ als neues Eingangssignal am Wellengenerator zur Wellenerzeugung verwendet (Abb. 1). Dabei zeigte sich, dass sich die Zeitinversion erfolgreich realisieren lässt und dass sich somit nichtlinear fokussierende Monsterwellen tatsächlich auch spontan aus irregulären Wellenfeldern heraus erheben können.

Mit der Arbeit sind den Forschern zwei Durchbrüche gelungen. Zum einen konnten sie bestätigen, dass Zeitinversionssymmetrie auch bei schwach nichtlinearen Wasserwellen vorliegt und sich im Versuch nutzen lässt. Auch wenn dies aus Sicht der beschreibenden Modellgleichungen zwar grundsätzlich zu erwarten war, zeigen die Ergebnisse, dass Theorie und Experiment trotz schwer quantifizierbarer dissipativer Effekte im Versuch geradezu verblüffend übereinstimmen. Darüber hinaus, und aus konzeptioneller Sicht wohl wesentlich bedeutender, zeigen die Versuche, dass sich die bislang fast ausschließlich auf nahezu periodischen Wellen untersuchte nichtlineare Fokussierung auch aus irregulären Wellenfeldern heraus entwickeln kann. Dieses Ergebnis dürfte eine Vielzahl weiterführender Untersuchungen initiieren, auch bei Wellenphänomenen in anderen Medien, wie z. B. der Nichtlinearen Optik oder Plasmaphysik.

Norbert Hoffmann

Prof. Dr. Norbert Hoffmann, Arbeitsgruppe Dynamik, TU Hamburg, Schlossmühlendamm 30, 21073 Hamburg

KURZGEFASST

■ Je länger, desto leitfähiger

Die ungewöhnlichen Eigenschaften von Graphen sind um eine Facette reicher: Ein internationales Wissenschaftlerteam hat gezeigt, dass die thermische Leitfähigkeit κ von Graphen keine materialspezifische Konstante ist, wie nach dem Fourier-Gesetz der Wärmeleitfähigkeit zu erwarten. Stattdessen wächst κ logarithmisch mit der Länge eines Graphenstreifens.

X. Xu et al., Nat. Comm. 5, 3689 (2014)

■ Ein Quantentrio, zum zweiten

In den 1970er-Jahren sagte Vitaly Efimov voraus, dass drei Teilchen quantenmechanisch gebunden sein können, obwohl sie paarweise nicht zur Bindung imstande sind. Diese Zustände hat die Gruppe um Rudi Grimm in Innsbruck 2006 erstmals mit einem ultrakalten Cäsiumgas nachgewiesen. Doch Efimovs Theorie geht weiter: Vergrößert man die Entfernung zwischen den Teilchen um den Faktor $\lambda \sim 22,7$, dann sollte sich wieder ein Dreiteilchenzustand bilden. Nun ist in Inns-

bruck der Nachweis dieses äußerst schwach gebundenen Efimov-Zustands gelungen – ein experimentelles Kunststück, da der Abstand zwischen den Teilchen auf einen Mikrometer vergrößert werden musste. Die Bindungsenergie ist dabei um λ^2 reduziert.

Bo Huang et al., Phys. Rev. Lett. 112, 190401 (2014)

■ Kein Hinweis auf dunkles Photon

In einigen Experimenten wurde ein Überschuss an kosmischen Positronen gemessen. Rührt dieser aus dem Zerfall eines bislang unbekanntes Teilchens in Elektron-Positron-Paare? Aus theoretischer Sicht käme hierfür das „dunkle Photon“ infrage, ein schwach wechselwirkendes Teilchen, das mit dem „normalen“ Photon mischt. Eine Analyse von Elektron-Positron-Paaren am Hades-Detektor des GSI-Helmholtzzentrums in Darmstadt hat keinerlei Hinweise auf dieses hypothetische Teilchen erbracht.

Hades Collaboration, Phys. Lett. B 731, 265 (2014)

- [1] R. Höhmann, U. Kuhl, H.-J. Stöckmann, L. Kaplan und E. J. Heller, Phys. Rev. Lett. 104, 093901 (2010)
- [2] A. Chabchoub, N. Hoffmann und N. Akhmediev, Phys. Rev. Lett. 106, 204502 (2011)
- [3] A. Chabchoub, N. Hoffmann, M. Onorato und N. Akhmediev, Phys. Rev. X 2, 011015 (2012)
- [4] A. Chabchoub und M. Fink, Phys. Rev. Lett. 112, 124101 (2014)