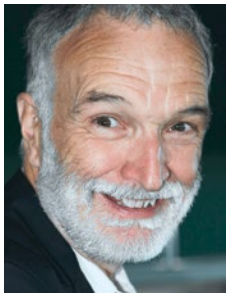
SCHLICHTING!
SOLITONEN AM STRAND



Im Watt sind bei auflaufendem Wasser vereinzelte, flache Wellen zu beobachten. Sie sind erstaunlich stabil: Ihre Form und Geschwindigkeit bleiben über weite Strecken und sogar bei Zusammenstößen erhalten. Das liegt an einem nichtlinearen Rückkopplungsmechanismus.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für »Spektrum« über physikalische Alltagsphänomene.

spektrum.de/artikel/1875817

Jede von der Bewegung geschaffene Gestalt erhält sich mit der Bewegung

Leonardo da Vinci (1452–1519)

Wer sich an die Nordseeküste begibt, um die Flut im Watt zu erleben, sollte sich einfinden, kurz bevor das Wasser aufläuft. Dann erstreckt sich vor den Augen ein bis zum Horizont reichendes Gebiet aus Schlick, weitgehend trocken und nur von einzelnen Pfützen durchsetzt. Plötzlich ändert sich über das gesamte Sichtfeld der Farbton des Watts: Das Wasser kommt. Es dauert nicht lange, bis sich ein breiter, nur wenige Zentimeter hoher Wasserfilm in Richtung Ufer schiebt. Sobald dort die letzten Lücken geschlossen sind, steigt der Pegel allmählich, und das größte Spektakel scheint vorbei zu sein.

Doch wieder ändert sich nach einiger Zeit die Situation unversehens, wenn über das inzwischen 10 bis 20 Zentimeter hohe Wasser einzelne Wellen auf das Ufer zulaufen (siehe »Wasserfronten«). Sie sind merkwürdig stabil und durch nichts zu bremsen. Sogar beim Aufprall auf die Böschung gehen sie nicht wie normale Wellen plätschernd verloren, sondern sie werden am Ufer gewissermaßen reflektiert und laufen zurück zum Meer. Dabei behalten sie ihre Gestalt bei. Selbst wenn sie auf ihrem Rückweg auf weitere einlaufende Fronten stoßen, durchqueren beide einander einfach. Im Bereich der Begegnung summieren sich kurzfristig die individuellen Höhen (siehe »Unbeirrbar«).

Es ist erstaunlich, dass die Wellen über lange Entfernungen hinweg und ohne erkennbaren äußeren Antrieb so stabil bleiben. Aus dem Alltag kennen wir normalerweise ein ganz anderes Verhalten. Wirft man etwa einen Stein in einen See, erzeugt das lokal eine Aufwölbung des Wassers, ein so genanntes Wellenpaket. Es weitet sich über die Oberfläche aus und geht währenddessen in ein wohlgeordnetes System einzelner Ringe über (siehe »Ringwellen«). Solche mit größerer Wellenlänge, das heißt mit weiter voneinander entfernten Bergen, eilen denen mit kleinerer voraus. Die Geschwindigkeit hängt von der Wellenlänge ab. Darum läuft ein Wellenpaket im Wasser auseinander; die Erscheinung heißt Dispersion. Wegen ihr sollten kompakte Erhebungen eigentlich in einzelne Bestandteile zerlegt werden, und die Hügel dürften nicht so unbeeindruckt und klar abgegrenzt weitermarschieren wie die am Strand beobachteten Einzelgänger.

Bei der Erscheinung im Watt kommt aber neben der Dispersion ein weiterer Mechanismus zum Tragen. Der

RINGWELLEN Nach einem Steinwurf zerfließt die Aufwölbung des Wassers in ein System konzentrischer Wellen.

H. JOACHIM SCHLICHTING

H. JOACHIM SCHLICHTING

WASSERFRONTEN In unregelmäßigen Abständen laufen äußerst stabile Wellenpakete auf das Ufer zu.

UNBEIRRBAR Stoßen die Wellen zusammen, so durchdringen sie einander, ohne ihre Form und Geschwindigkeit zu verändern.

H. JOACHIM SCHLICHTING

flache Untergrund bremst die Basis des Wellenpakets. Darum bewegt sich der Kamm vergleichsweise schneller, und die Welle wird steiler. Das kennen wir in anderer Form von Wellen, die auf die Meeresküste zulaufen, schließlich vornüber kippen und sich brechend überschlagen. Wenn jedoch der aufsteilende Einfluss nicht zu stark ist, sondern exakt so groß ist wie die zerstreuende Dispersion, bleibt das Wellenpaket in Form und Geschwindigkeit erhalten. Das ist gerade im extrem flachen Watt der Fall. Die nach außen sichtbare Stabilität ist kein statisches Phänomen, vielmehr ein dynamisches: In dem Maß, wie die Wellen eines Pakets infolge der Dispersion auseinanderlaufen sollten, werden sie durch Wechselwirkungen mit dem Boden komprimiert. Damit diese Rückwirkung das Auseinanderlaufen gewissermaßen einholen kann, muss sie stärker als linear agieren, also nichtlinear.

Historisch sind Wissenschaftler auf die Zusammenhänge nicht etwa durch Beobachtungen im Watt gestoßen – vermutlich ist der Vorgang hier zu unscheinbar –, sondern in einem ganz anderen Kontext. 1834 beobachtete der britische Ingenieur John Scott Russell, wie ein Boot mit hoher Geschwindigkeit von Pferden durch einen Kanal gezogen wurde. Als die Tiere und damit das Boot plötzlich anhielten, setzte das vor dem Bug zusammengeschobene Wellenpaket seinen Weg allein fort. Kilometerweit trieb es mit unveränderter Form und gleichem Tempo den Kanal entlang.

Anschließend untersuchte Russell mit eigenen Experimenten das Phänomen eingehend und stellte weitere Unterschiede zu gewöhnlichen Wellen fest. Beim in den See geworfenen Stein transportieren die Ringwellen entlang ihrer Ausbreitungsrichtung kein Wasser, obwohl es den Anschein haben mag. Vielmehr bleiben die bewegten Flüssigkeitsportionen lokal begrenzt auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen. Nicht so bei den einsamen Wellenpaketen: Sie reißen das sie erfüllende Wasser mit sich. Russell konnte zeigen, dass in einem von dem Paket durchquerten Kanal das hintere Ende um die der Aufwölbung entsprechende Wassermenge höher stand als das vordere. Die Wellenpakete verhalten sich in mancher Hinsicht quasi wie Teilchen. Heute heißen sie daher Solitonen – in Analogie zu den aus der Mikrophysik bekannten Vertretern wie Protonen und Elektronen.

In der Natur sind Solitonen möglicherweise nicht nur in harmloser Gestalt zu beobachten. Einige Wissenschaftler vermuten, die Einzelgänger könnten bei zerstörerischen Tsunamis in Erscheinung treten. Für entsprechend große Wellenpakete würden küstennahe Bereiche des Ozeans wie Flachwasserbecken wirken und unaufhaltsame Wasserberge auftürmen – analog zum Watt, nur in einer ganz anderen Größenordnung. Allerdings wird die Ansicht nicht allgemein geteilt, weil die Dimensionen der mittlerweile dokumentierten Tsunamis nicht zweifelsfrei zur Theorie der Solitonen zu passen scheinen.

Wellenphänomene sind nicht nur auf Wasser beschränkt. Sie treten an vielen weiteren Stellen auf, und im Lauf der Entwicklung der neuzeitlichen Physik wurden Solitonen auch in Bereichen wie der Optik entdeckt. So spielen sie heute bei der Datenübertragung in Glasfaserkabeln eine wichtige Rolle. Die aus mehreren Wellenlängen bestehenden Lichtpulse laufen in Glas normalerweise durch Dispersion auseinander. Darauf passend abgestimmte nichtlineare Effekte können der Verbreiterung der Impulse exakt entgegenwirken und die Signalqualität und -reichweite deutlich verbessern.