

Eine Veranstaltung von:



Wellen wellen

Partner:



Medienpartner:

WESER KURIER

BREMER

INHALT

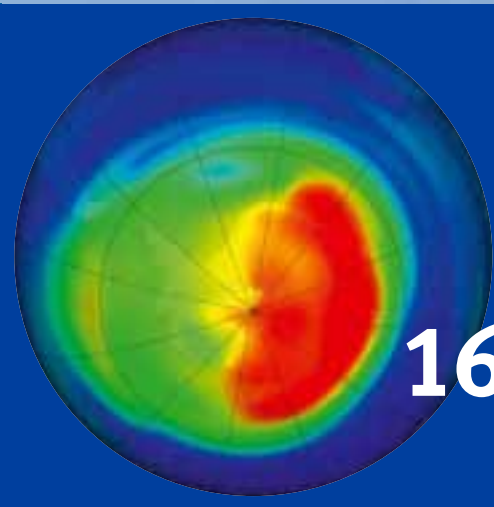
Wellen Welt



4



10

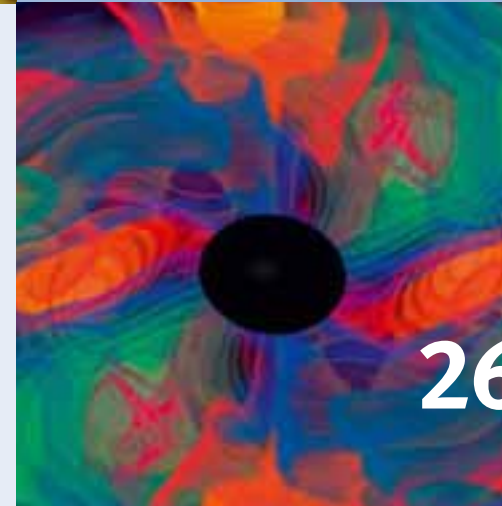


16



20

- 4** Mit Hightech die Ohren spitzen
- 10** Welle der Zerstörung
- 16** Alles auf einer Wellenlänge
- 20** Die Welt in neuem Licht
- 26** Kräuselungen der Raumzeit



26

IMPRESSUM

HERAUSGEBER
Deutsche Physikalische
Gesellschaft e.V. (DPG)
Bundesministerium für
Bildung und Forschung

AUTOR
Thomas de Padova

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG
Prof. Dr. Eberhard F. Wassermann

INFORMATIONEN ZUM INHALT
Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Pressestelle
Rathausplatz 2-4
53604 Bad Honnef
Tel. (0 22 24) 95 195 - 18
Fax (0 22 24) 95 195 - 19
presse@dpg-physik.de

KONZEPT, REDAKTION UND GESTALTUNG
iserundschmidt
Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bad Honnef – Berlin
(Verantwortlich: Timo Meyer, Claudia Oly)

November 2006



Mit Hightech die Ohren spitzen

Verkehrslärm, Klingeltöne, Radiocharts – Schall umtost uns fast pausenlos. Und nicht nur Sound Designer wissen, wie wichtig die Dichtewellen für uns sind. Stoßen sie einmal auf taube Ohren, muss digitale Technik ran.

Als junger Mann plagten Ludwig van Beethoven zuerst pfeifende Ohrgeräusche. Später hörte er nicht mehr, wenn Besucher an seine Tür klopfen. Die zunehmende Taubheit schnitt ihn von der Außenwelt ab, mit der er bald nur noch über Briefe verkehrte. Und über seine Musik. Verzweifelt sah man den Komponisten in späten Jahren über die Tasten seines Klaviers geneigt, auf die er mit aller Gewalt einhämmerte und schrie: „Ich höre nichts, nichts!“

Schwerhörigkeit kann für Betroffene zur Qual werden und in eine mehr oder weniger ausgeprägte akustische Isolation führen. Beethovens Leidensgenossen des 21. Jahrhunderts können jedoch auf technische Hilfe hoffen. Moderne Hörgeräte ermöglichen ihnen, an Gesprächen teilzunehmen, sich im Straßenverkehr sicher zu bewegen oder Veranstaltungen zu besuchen, von denen sie sonst ausgeschlossen wären. Bevor wir uns allerdings den künstlichen Hörhilfen zuwenden, zunächst noch ein Blick auf die natürlichen Schallempfänger des Menschen.

Unsere Ohren verwandeln die Luftdruckschwankungen einer eintreffenden Schallwelle über mehrere Einzelschritte in elektrische Signale. Erste Station ist die Ohrmuschel, über die die Wellen in den



Gehörgang und weiter zum Trommelfell gelangen. Diese Membran ist nicht glatt gespannt, sondern wie ein Trichter geformt. Sie kann die Luftschwingungen nicht direkt an die Lympflüssigkeit des Innenohrs übertragen, weil sonst fast der gesamte Schall an der Grenzfläche reflektiert würde wie an einer Schallschuttmauer. Die Weiterleitung der Vibrationen übernehmen daher zunächst drei winzige, miteinander verkoppelte Knöchelchen: der ans Trommelfell angewachsene „Amboss“, der „Hammer“ und der nur 3 Milligramm leichte „Steigbügel“. Letzterer besitzt an seinem Ende ein winziges Plättchen, das an der Hörschnecke des Innenohrs anliegt und auf das nun die gesamte Kraft der aufgefundenen Druckwelle wirkt. Der Schalldruck am Innenohr ist dadurch erheblich höher als der Druck, der das

Digitale Hörsysteme – bei der neuesten Generation können linkes und rechtes Hörgerät miteinander kommunizieren und sich so zeitgleich und automatisch auf neue Hörsituationen einstellen. (Bild: Siemens-Pressebild)



(Bild: picture-alliance/ dpa)

Der Quotient aus der Geschwindigkeit v einer Welle und ihrer Frequenz f ergibt ihre Wellenlänge L (in Formelsprache $L = v / f$) – die Distanz zwischen zwei Wellenpunkten, die die gleiche Auslenkung sowie Bewegungsrichtung haben. Hier einige ausgewählte Beispiele zu diesem Kapitel.

	4 mm Ultraschallruf der „Großen Hufeisennase“ (Rhinolophus ferrumequinum)
	8 - 25 cm Körperschallwellen, die bei einem Crash durch die Autokarosserie laufen
	3 m Brummen marokkanischer Sanddünen

größere Trommelfell in Schwingung versetzt – der ursprüngliche Wert wächst während der Weiterleitung entlang der Gehörknöchelchenkette um das 22fache.

Diese ausgeklügelte Verstärkung macht unser Ohr zu einem sehr empfindlichen Sinnesorgan. Das lauteste, gerade noch erträgliche Geräusch ist mehr als eine Million Mal lauter als die leisesten wahrnehmbaren Töne. Die Verstärkung wird an den jeweiligen Schallpegel angepasst. Das gesunde Ohr spricht bei 0 bis 20 Dezibel an, Kühlschrankschall liegt bei 40 und eine typische Unterhaltung bei 50 Dezibel. Menschen mit hochgradigem Hörverlust registrieren den Schall jedoch erst oberhalb von 60 bis 90 Dezibel, wobei der letzte Wert bereits dem Lärmpegel direkt an einer Autobahn entspricht.

Auch die Spanne der hörbaren Frequenzen ist groß. Beim gesunden Ohr liegt sie im Schnitt zwischen 20 und 20.000 Hertz. Das Innenohr zerlegt dieses „Schallspektrum“ in seine verschiedenen Frequenzen. Die akustischen Schwingungen der Lympflüssigkeit reizen eine Membran und die Haar-Sinneszellen entlang der Gehörschnecke. Die Abschnitte der Membran und die Haarzellen, die die hohen Frequenzen registrieren, sitzen am Eingang der Schnecke. Tiefe Töne erregen dagegen das Ende der Schneckenwindung. So ist jeder Frequenz – ähnlich wie auf einer Tonleiter – ein bestimmter Platz in unserem Hörorgan zugeordnet.

Im Alter sinkt die Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehörs. Vor allem höhere Töne, auf die das Gehör sehr rasch an-

ANPFIFF

Ein gellender Pfiff – Startsignal für die Reise durch die „WellenWelten“ und so manches Fußballmatch. Im Kampf des Schiedsrichters mit der Schwerhörigkeit der Spieler hat sich die kleine Trillerpfeife besonders bewährt. Aber warum?

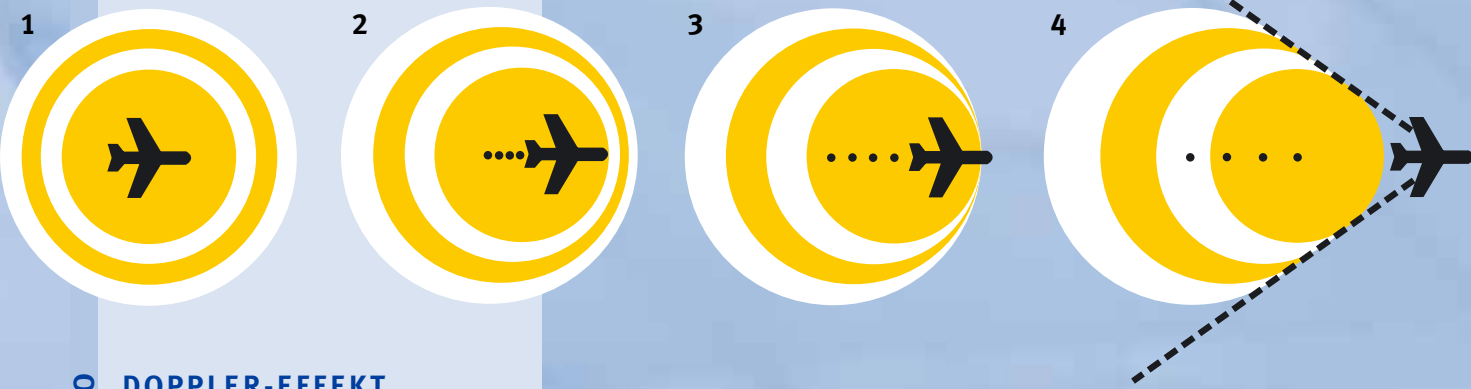
Wenn scharfer Wind eine Häuserecke trifft, pfeift er eigenartig. Es bilden sich Luftwirbel, die sich in zufälligen Zeitabständen von der Kante lösen. Auch bei Trillerpfeifen oder Flöten bläst man eine Schneide an. Um den erhofften Ton zu treffen, muss das Ablösen der Wirbel auf die Länge des Instruments abgestimmt sein.

Schauen wir zunächst ins Rohr einer Blockflöte, in dem sich die Druckschwankungen der Luft ausbreiten. Sie werden an den Enden reflektiert, hin- und zurücklaufende Schwingungen können sich zu stehenden Wellen überlagern: den Eigenschwingungen des Instruments. Eine kurze Flöte erlaubt nur kleine Wellenlängen und hohe Töne, ein drei bis vier Meter langes Alphorn schallt tief.

Es sind vor allem die tiefen Töne, die beim Flötenunterricht Probleme bereiten. Man darf sie nur anhauchen. Pustet man zu stark, kommen plötzlich störende Obertöne ins Spiel. Bei hohen Tönen passiert das nicht so leicht. Man kann in das isolierte Mundstück einer Blockflöte oder in eine Trillerpfeife lautstark hineinblasen, ohne dass sich der Ton in ein Gemisch von Frequenzen auflöst. Oder aber man überbläst das Instrument bewusst, wenn die Tonhöhe keine entscheidende Rolle spielt.

Um noch mehr aus den kleinen Trillerpfeifen herauszuholen, gibt es einige Tricks. Ein eingebautes Kügelchen etwa lässt die ausgestoßenen Schallwellen fluktuieren: das berühmte Trillern. Oder man verzichtet auf die Kugel und baut mehrere Kammern ein, die gleich mehrere Töne auf einmal erzeugen. Diese markerschütternden Dissonanzen moderner Schiedsrichterpfeifen garantieren die nötige Aufmerksamkeit angepiffener Spieler.

↳ Für Schallwellen gilt in Luft ein Tempolimit von 1180 km/h, allerdings nicht für die dazugehörigen Lärmquellen. So können manche ihren eigenen Krach durchaus „überholen“: Sobald ein Düsenjet nicht mehr steht (1), sondern in Bewegung ist, drängen sich die Wellenfronten vor ihm immer mehr zusammen, während sie hinter ihm zusehends auflockern (2) – „Doppler-Effekt“ genannt. Bei Erreichen der Schallgeschwindigkeit laufen die Wellen zur Schallmauer auf (3), bei noch höherem Tempo fallen sie als Machkegel hinter dem Jet zurück (4) und erzeugen am Boden den berühmten Überschallknall. (Grafik: ius)



↳ Mikrochips verleihen diesen Hörgeräten ein Gedächtnis. So können sie nicht nur erstmals Impulsgeräusche wie das Klackern von Absätzen dämpfen, sondern sich sogar die Vorlieben ihrer Träger merken und die für sie optimale Lautstärke errechnen. (Bild: Siemens-Pressebild)



sprechen muss, lassen sich dann immer schlechter registrieren. Eine Tatsache, die jugendliche Handynutzer in den USA hat aufhorchen lassen. Sie nutzen Klingeltöne mit extrem hohen Frequenzen um 17.000 Hertz, um unbemerkt von den älteren Lehrkräften auch im Unterricht simsen zu können. Übrigens nicht die erste technische Anwendung: So beschallt eine Sicherheitsfirma aus Großbritannien Gebäude mit dem kurzweiligen Dauerfiepen, um die meist jüngeren Graffiti-Sprayer von einladend weißen Hauswänden fernzuhalten.

Wie schnell die obere Frequenzgrenze sinkt, ist von Mensch zu Mensch verschieden. Nicht nur Straßenlärm oder Diskobeats, sondern auch Stoffwechselerkrankungen und Durchblutungsstörungen können die Haar-Sinneszellen im Innen-

ohr nachhaltig schädigen. Die Betroffenen hören laute Töne genauso gut wie Normalhörende, leises Sprechen allerdings nicht. Anstatt alle Signale gleichermaßen zu verstärken, muss eine Hörhilfe daher den Schall in Abhängigkeit von der Frequenz heraufsetzen und dabei zwischen leisen und lauten Tönen unterscheiden.

Genau hier setzen die **digitalen Hörgeräte** an. Seit 1996 gibt es die winzigen High-tech-Apparate. Die Mikrofone, die den Schall aufzeichnen, der Audioprozessor, der ihn nach Frequenzen unterteilt verarbeitet, und der Lautsprecher, der das Ausgangssignal in den Gehörgang leitet, sie alle sitzen auf engstem Raum beieinander. Inklusiv der Stromversorgung nehmen alle Komponenten so wenig Platz ein, dass die Geräte im oder hinter dem

↳ Sichtbare Schallmauer: Am Heck dieses Jets kondensiert in der Schockwelle des Überschallknalls Wasser aus und bildet kurzzeitig eine Wolke. Grund für den „Wolkenscheibeneffekt“: Beim Überschallflug folgt der Schockfront des Machkegels eine schmale Unterdruckzone, die die wasserdampfgeschwängerte Luft beim Durchflug für Sekundenbruchteile abkühlt. (Bild: Jonathan Chandler, U.S. Navy)



↳ Als ob die Techno-Gruppe „Dune“ es geahnt hätte – Sanddünen können singen. Reiben Milliarden von Sandkörnern aneinander, etwa wenn eine Düne wandert, können niederfrequente Schallwellen entstehen, die dem Brummen eines Propellerflugzeugs ähneln und in ihrer Tonhöhe sogar von Land zu Land unterschiedlich sind. (Bild: Claudia Oly)



(Bild: Sarah Jane, Flickr.com)

HEILIGER BIMBAM

Jede Glocke hat ihren eigenen Klang. Der Klöppel versetzt sie in die Schwingungen, die für ihre Form, ihre Größe sowie die Zusammensetzung ihres Materials charakteristisch sind. Diese Abhängigkeiten machen es schwierig, den Klang vor dem Gießen genau zu berechnen. Wie schwierig, das zeigt sich am Beispiel der neuen Dresdner Frauenkirche: Sechs der insgesamt sieben für das wieder aufgebaute Gotteshaus neu angefertigten Glockenkörper mussten nach dem ersten Guss noch einmal eingeschmolzen werden. Zu massive Verzerrungen hatten bei der Klangprobe zu deutlichen Misstönen geführt.

Je größer die Glocke, desto tiefer ist die Tonlage ihres Geläuts, bestehend aus einem Grundton und einer ganzen Fülle von Obertönen. Das lautmalersche „Bimbam“ gibt es dabei wirklich, Ergebnis von Dopplereffekt und dem nach unten geöffneten Klangkörper. Die Schallabstrahlung der Glocke muss man sich dabei vorstellen wie den Lichtkegel eines hin und her pendelnden Deckenstrahlers:

„Bim“ – die Glocke schwingt in unsere Richtung und wirft uns das gesamte Klangspektrum inklusive Klöppelgeräusche entgegen. Durch die auf uns zukommende Schallquelle gelangen die Schallwellen mit erhöhter Frequenz zu uns. „Bam“ – die Schallkeule schwingt in die andere Richtung und überlässt unseren Ohren den an Obertönen ärmeren Sound ohne Klöppelgeräusche. Außerdem erreichen uns die Schallwellen durch das Wegpendeln der Glocke jetzt mit niedrigerer Frequenz, ganz wie bei der Sirene eines davonfahrenden Krankenwagens. Nur dass im Falle des Geläuts die Unterschiede nur für Messinstrumente hörbar sind. Für das menschliche Gehör gilt: Eine große Glocke macht „Bambam“, eine kleine „Bimbim“.

INFO DOPPLER-EFFEKT

Christian Doppler wurde 1803 in Salzburg geboren. In einem Haus zwischen dem Wohnhaus von Wolfgang Amadeus Mozart und dem Geburtshaus Herbert von Karajans. Kein Wunder also, dass Dopplers Forschungen 1845 durch ein Konzert berühmt wurden: Mehrere Trompeter stellten sich auf einen Eisenbahnzug und spielten während der Fahrt zuvor verabredete Töne. Was die Zuhörer an den Gleisen damals wahrnahmen, kennen wir vom vorbeirasenden Martinshorn eines Krankenwagens: den „Doppler-Effekt“. Nähert sich eine Schallquelle, steigt die Frequenz der heranwogenden Schallwellen an, weil diese in schnellerer Folge ans Ohr des Zuhörers geworfen werden. Die Sirene klingt höher als normal. In dem Moment, in dem diese den Hörer passiert, schlägt die Tonhöhe um. Jetzt werden die Wellen durch die Bewegung der Quelle gedehnt. Der Doppler-Effekt tritt nicht nur bei Schall auf, sondern bei Wellen jeglicher Art. Mediziner kommen durch reflektierte Ultraschallwellen, die am fließenden Blut oder den schnappenden Herzklappen dopplerverschoben werden, Herzfehlern auf die Spur. Und Astronomen nutzen die Frequenzverschiebung des Lichts sich entfernender Galaxien, um die Lebensgeschichte des Universums zu rekonstruieren.

Ohr getragen werden können. Sie eliminieren Störgeräusche und verarbeiten die aufgenommenen akustischen Signale je nach Art und Grad der Schwerhörigkeit und der aktuellen Hörsituation.

Die Entwicklung digitaler Hörgeräte hat in den vergangenen Jahren ungeheuer von der Miniaturisierung in der Chipindustrie profitiert. Ebenso rasant wie die Leistung der Heim-PCs steigt die Leistung der winzigen Audioprozessoren und damit auch die bei der digitalen Signalverarbeitung anfallende Datenmenge. Um den Speicherbedarf nicht ins Uferlose wachsen zu lassen, bedienen sich die Hörgeräte-Entwickler ähnlicher Tricks wie die Musikindustrie: Sie verzichten auf alles, was vom Gehör sowieso nicht wahrgenommen wird. Auf CDs werden grundsätzlich keine

Frequenzen gespeichert, die oberhalb der menschlichen Hörgrenze liegen, und das MP3-Verfahren berücksichtigt von vorneherein nur die Musikanteile, die für das Hörerlebnis relevant sind.

Vor der Datensammlung steht jedoch zunächst einmal die möglichst ungestörte Datenerfassung. Das Hörgerät zerlegt die Eingangssignale zunächst in ihre verschiedenen Frequenzen. Diese Kanäle lassen sich einzeln verstärken. Oder teilweise ausblenden. So unterdrücken Filter das Eigenrauschen der Mikrofone. Das unangenehme Pfeifen der Geräte, wenn der vom Lautsprecher erzeugte und in den Ohrkanal gelangende Schall von den Mikrofonen noch einmal aufgenommen und erneut verstärkt wird, stellt da schon höhere Ansprüche an die Technik. Weil die



(Bild: BMW)

AUFHORCHEN, WENN'S KRACHT

In Luft rasen Schallwellen mit über 1100 km/h dahin, in Stahl und Blech erreichen sie leicht den 15fachen Wert. Genau dies haben sich Ingenieure zunutze gemacht, um Autos extrem reaktionsschnelle Sicherheitssysteme zu verpassen.

Im Ernstfall – noch ehe der Airbag gezündet und die Gurte gestrafft werden – bleiben den Unfallsensoren nur Sekundenbruchteile, um die Schwere eines Crashes zu erfassen. Bisher verantwortlich für die Frühwarnung: Systeme in der Stoßstange, die Verformungen erkennen und Drucksensoren in der B-Säule, die die Intensität eines Seitenaufpralls erfassen. Tatkräftige Unterstützung kommt jetzt von einem neuen Sensor der Firma Siemens. Dieser kann die Stärke eines Unfalls „hören“, und das doppelt so schnell wie alle bisherigen Systeme.

Dazu lauscht der Crash Impact Sound Sensor den Körperschallwellen, die beim Verformen der Karosserie in der Atomstruktur des Stahls entstehen und die je nach Unfallart und -schwere ganz unterschiedliche Frequenzspektren mit Maximalfrequenzen bis zu 16 Kilohertz ergeben. Dieses „Crash“-Geräusch liefert zusammen mit Beschleunigungssignalen ein rasches Bild vom Unfallgeschehen. Von der ersten Berührung mit dem Hindernis bis zum Scharfschalten aller Sicherheitssysteme vergehen so gerade einmal 15 Millisekunden.

→ Schallwellen sind Druckwellen, und genau diese Eigenschaft machen sich Techniker der Europäischen Weltraumorganisation ESA zunutze, wenn sie Satelliten einem „Akustik-Test“ unterziehen. Mit bis zu 144 dB – absolut tödlich für einen Menschen – setzen sie hier das Automatische Transferfahrzeug „Jules Verne“ den gleichen Vibrationen aus, die es auch in den ersten Minuten nach dem Start an der Spitze der Ariane-5-Trägerrakete verkraften muss. (Bild: ESA - Anneke Le Floch)



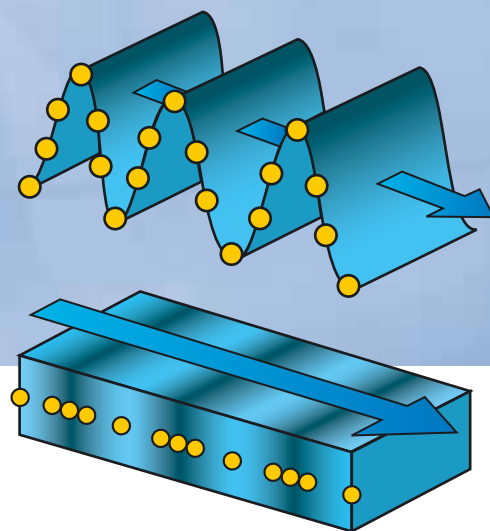
→ Wasserfledermaus auf Jagd (Bild: Dietmar Nill/linnea images)



→ Nicht nur Fernseher, sondern auch Motoren kann man in Zukunft vielleicht per Knopfdruck leiser stellen. Forscher arbeiten bereits heute an einer „Lärmdämmung“, bei der die für die Schallwellen verantwortlichen Schwingungen mit künstlich erzeugten Gegenschwingungen gedämpft werden. So verstummt die abgebildete Stimmgabel nach dem Anschlagen sofort, da aufgeklebte Piezokeramiken die angeregte Schwingung blitzschnell erfasst und das passende Gegensignal in die Gabel eingeleitet haben. (Bild: Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF)



→ Wellen unterteilt man in zwei verschiedene Typen: Bei den „Transversalwellen“ (oben) erfolgt die Schwingung bzw. Störung des Mediums quer zur Ausbreitungsrichtung. Prominente Vertreter dieser Gruppe sind Wasser- und Lichtwellen. Bei den „Longitudinalwellen“ (unten) hingegen erfolgt die Schwingung bzw. Störung des Mediums in Ausbreitungsrichtung der Welle. Mitglied dieser Gruppe: der Schall. (Grafik: ius)



elektronischen Bauteile so dicht beieinander liegen, lässt sich eine solche Rückkopplung, auch bekannt aus Konzerten und Festreden, nur schwer vermeiden.

Das Pfeifen tritt zwar nur bei bestimmten Frequenzen auf. Leider ist die Rückkopplungsfrequenz jedoch nicht immer gleich. Sie kann sich verschieben, wenn man das Hörgerät neu aufsetzt oder einen Telefonhörer ans Ohr hält. Spezielle „adaptive Filter“ passen sich dieser Verschiebung an. Sie erzeugen dasselbe Rückkopplungssignal noch einmal – allerdings in Gegenphase. Überlagert man beide Signale, löschen sie sich aus und das störende Pfeifen wird unterdrückt. Ein Prinzip, nach dem man nicht nur die pfeifenden Rückkopplungen winziger Hörgeräte, son-

dern in Zukunft auch den Krach sehr viel größerer **Maschinen stumm schalten** will.

Die häufigsten Störlaute kommen allerdings nicht aus dem Hörgerät selbst, sondern z.B. als Nachbargespräche aus der direkten Umgebung. Da man sich bei Unterhaltungen dem Gesprächspartner meist zuwendet, sind Richtmikrofone hier besonders geeignet, von hinten oder der Seite kommende Nebengeräusche zu unterdrücken. In modernen Hörgeräten haben trotz der geringen Abmessungen bis zu drei Einzelmikrofone Platz, deren Eingangssignale miteinander verglichen werden können. So lässt sich die Empfindlichkeit für die verschiedenen Raumrichtungen kontinuierlich regeln. Schwierig ist dies vor allem bei Veranstaltungen,

wo viele Personen durcheinander reden und es darum geht, den jeweiligen Sprecher herauszuhören – „Cocktail-Party-Effekt“ genannt. Er ermöglicht es, anvisierte Geräusche bis zu dreimal lauter als den Umgebungslärm wahrzunehmen und ist eng mit der Geräuschortung verknüpft. Hat das Gehör eine Schallquelle nämlich erst einmal lokalisiert, kann es diese von störenden Einflüssen aus dem restlichen Umfeld unterscheiden. Daher funktioniert der „Cocktail-Party-Effekt“ nur in Stereo. Menschen mit nur einem funktionstüchtigen Ohr oder Hörgerät gelingt die selektive Wahrnehmung deutlich schlechter.

Für Schwerhörige sind daher zwei Hörgeräte in der Regel besser als eins. Wenn der Schall sowohl am rechten als auch am

linken Ohr der Schädigung entsprechend verstärkt wird, kommt dies dem Sprachverständnis, dem Richtungshören und der Raumwahrnehmung zugute. Deutsche Ingenieure haben aus diesem Grund 2004 ein System auf den Markt gebracht, bei dem linkes und rechtes Hörgerät über Funk miteinander in Verbindung stehen. Beide Komponenten tauschen Informationen über die jeweiligen Höreindrücke aus, die manchmal stark voneinander abweichen können, etwa weil der eigene Kopf den Schall nach einer Seite hin abschattet. Zwei unabhängige Hörhilfen arbeiten auf diese Weise wie ein einheitliches, binaurales Empfängersystem – fast so wie zwei gesunde Ohren.

ECHOORTUNG DER FLEDERMÄUSE

Sie schlafen am Tag und fliegen los, wenn es dunkel wird. Licht brauchen sie nicht, denn sie sehen mit den Ohren. Ihr außergewöhnliches Ortungssystem hat die Fledermäuse berühmt gemacht. Sie stoßen Ultraschalllaute aus, deren Wellenfronten an Objekten der Umgebung reflektiert werden und den Tieren als Echo einen akustischen Raumeindruck vermitteln. Abstand, Größe und Gestalt von Hindernissen und Beutetieren haben sie daher auch bei Nachtflügen „vor Ohren“.

Die Fledermaus hört nur kleine Ausschnitte aus der Umgebung. Einem mit einer blinkenden Taschenlampe ausgerüsteten Nachtwanderer vergleichbar, wirft sie gerichtete Signale in den Raum. Fliegt sie über ein freies Feld, sendet sie nur wenige Peilgeräusche aus, bei Annäherung an die Beute deutlich mehr. Manche Arten rufen immer mit derselben Frequenz, andere senken die Tonhöhe gegen Ende des Signals oder geben ein breit gefächertes Lautspektrum von sich. Die Fledermäuse, deren Jagdhorn in den höchsten Tönen bläst, fangen die kleinsten Insekten. Denn in einer schnell schwingenden Schallwelle machen sich auch winzige Insekten als Störungen bemerkbar. Langsam schwingende Wellen gehen über solche Hindernisse fast ungestört hinweg.

Die aufgefangenen Echos sind ungeheuer schwach. Selbst bei großen Beutetieren wie Fröschen sind sie bis zu 100mal leiser als das Ausgangssignal. Um die reflektierten Wellen möglichst gut wahrnehmen zu können, nutzen Fledermäuse unter anderem den Dopplereffekt: So wie die Tonhöhe einer sich nähernden Polizeisirene ansteigt, erhöht sich auch die Frequenz des Echos infolge der eigenen Flugbewegung der Tiere. Die Fledermaus moduliert die Frequenz ihrer Ortungsrufe bei der Jagd gerade so, dass nicht das Rufsignal, sondern das Echo im eigenen Hör-Optimum liegt. So kann sie selbst die Frequenzänderung eines in ihrer Richtung hin und her schwingenden Insektenflügels unterscheiden.



Welle der Zerstörung

Manche Ozeanwellen verschlucken ganze Supertanker, andere branden mit der Energie einer Atombombe ins Landesinnere. Gegen ihre Entstehung ist kein Kraut gewachsen, gegen ihre Zerstörungswut schon. Man muss nur rechtzeitig wissen, dass die Woge kommt.

26. Dezember 2004, 7:58 Uhr Ortszeit: In den Ozeantiefen vor Sumatra startet eine Wellenfront, die wenig später weltweit zum Inbegriff des Schreckens wird. „Tsunamis“ hatten schon in der Vergangenheit Küsten verheert. Trotzdem konnten nur wenige Menschen die Vorzeichen ihres Kommens richtig deuten. Selbst Einheimische folgten an jenem zweiten Weihnachtstag aus Neugier der zurückweichenden Uferlinie, anstatt vor der heran-

rollenden Flutwelle ins Landesinnere zu flüchten. Bald darauf überfluteten meterhohe Wellen, ausgelöst durch das zweitgrößte jemals gemessene Erdbeben, die Küstengebiete. Insgesamt kamen durch den Tsunami mehr als 230.000 Menschen ums Leben, etwa 1,8 Millionen wurden obdachlos.

Bereits eine Viertelstunde nach dem Beben überrollten die Flutwellen Sumatra. Hier waren die Verwüstungen am schlimmsten. In einigen Gegenden drang das Wasser kilometerweit ins Landesinnere vor. Anderthalb Stunden später erreichte der Tsunami Thailand und Sri Lanka und noch eine Stunde später Indien. Auch dort riss er Zehntausende in den Tod. Selbst im fernen Ostafrika kamen sieben Stunden nach dem Beben noch 300 Menschen in der Flut ums Leben.

Im Sundagraben vor Indonesien sind starke Erdbeben keine Seltenheit. Dort verläuft die Nahtstelle zweier Erdplatten: Die Indisch-Australische-Platte taucht langsam unter die Eurasische Platte ab. Zwar nur mit einer Geschwindigkeit von sechs Zentimetern pro Jahr. Verhaken sich die verkeilten Blöcke aber ineinander, bauen sich gewaltige Spannungen auf, die sich irgendwann schlagartig entladen können. Das geschah auch im Dezember 2004, als die Eurasische Platte plötzlich nach vorne rückte und die Erde erzittern ließ. Das Beben erreichte eine Stärke von 9,3 auf der Richter-Skala. Noch 10.000 Kilometer entfernt in Europa registrierten die Seismographen des in Potsdam entwickelten Geofon-Messnetzes Bodenbewegungen von anderthalb Zentimetern, als die vom Sundagraben ausgehenden Stoßwellen elf

↪ Ein Bruch des Seebodens im Indischen Ozean hob im Dezember 2004 mehr als 30 Kubikkilometer Wasser empor ... und durch den anschließenden Tsunami tonnenschwere Lastkähne und Kutter bis tief ins Landesinnere. Das ungewohnte Straßenbild stammt aus der Region um die Stadt Lhoknga, 40 km südwestlich von Banda Aceh an der Westküste Sumatras. (Bild: Ryan Schmidt)

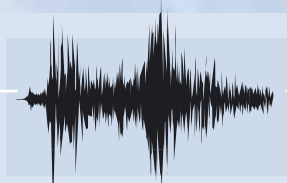
↪ Unterseeisches Wellenkraftwerk: Über die Anlage hinwegziehende Meereswogen stauen die luftgefüllten Zylinder. Die Relativbewegung zwischen beweglichem Ober- und fest verankertem Unterteil wird mittels Generator direkt in elektrische Energie umgewandelt. (Bild: AWS Ocean Energy Ltd)

↪ Der Quotient aus der Geschwindigkeit v einer Welle und ihrer Frequenz f ergibt ihre Wellenlänge L (in Formelsprache $L = v / f$) – die Distanz zwischen zwei Wellenpunkten, die die gleiche Auslenkung sowie Bewegungsrichtung haben. Hier einige ausgewählte Beispiele zu diesem Kapitel.



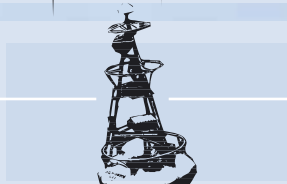
10 m

Normaler Seegang im Küstenbereich



160 km

Primärwellen eines Erdbebens



200 km

Tsunami auf hoher See bei einer Wassertiefe von 4000 Metern

Minuten nach dem Beben einliefen. Das Messnetz analysierte die Daten automatisch und verbreitete zwei Minuten später eine Erdbebenmeldung im Internet.

Bei dem Beben riss die Erdkruste auf einer Länge von 1200 Kilometern auf. Der Meeresboden wurde ruckartig angehoben, die Erdkruste um bis zu fünfzehn Meter versetzt. Entlang des Bruches bildeten sich Wellen, die sich nach allen Seiten hin ausbreiteten. Mit katastrophalen Folgen.

Anders als bei einem Sturm wird bei einem Tsunami nicht nur die Meeresoberfläche aufgewühlt, sondern unabhängig von der Meerestiefe werden alle Wassermoleküle vom Grund bis zur Oberfläche in Bewegung gebracht. Weil Wasser nicht komprimierbar ist, wird durch den plötz-

lichen vertikalen Versatz des Meeresbodens der gesamte darüber liegende Ozean angehoben – im Falle des Sumatrabebens eine etwa 5000 Meter hohe Wassersäule um einige Dezimeter. In ihr steckt eine ungeheure potenzielle Energie, die mit der Flutwelle über viele 1000 Kilometer zu den umliegenden Küsten transportiert wird.

Unterwegs geht von dieser Energie zunächst kaum etwas verloren. Bei Tiefen von mehreren Kilometern merkt der Tsunami die Reibungsverluste am Ozeanboden kaum. Da seine Geschwindigkeit und seine Wellenlänge proportional zur Quadratwurzel aus der Wassertiefe sind, ist er auf offenem Meer eher unscheinbar. Bei 5000 Meter Wassertiefe rast der Tsunami mit der Reisegeschwindigkeit



ANATOMIE EINER WELLE

Zwei Kräfte liegen innerhalb einer Wasserwelle im Widerstreit. Die eine wird durch verdrängte Wassermoleküle ausgeübt und schiebt das Wasser in die Höhe. Die andere ist die Schwerkraft, die die Moleküle wieder nach unten zieht. Diese schwingen wie bei einer Pendelbewegung über die Ruhelage hinaus, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Benachbarte Flüssigkeitsteilchen werden erneut verdrängt und bilden einen neuen, jetzt weiter außen liegenden Wellenberg. So wandert die Störung der Wasseroberfläche davon und ebbt erst ab, wenn die angreifenden Kräfte durch Reibung aufgezehrt sind.

Auch wenn es nicht so aussieht – der Wellenkamm schreitet zwar voran, die Wasserteilchen aber nicht. Sie bewegen sich auf geschlossenen, ortsfesten Kreisbahnen. Etwa so wie ein im Wellengang tanzendes Papierschiffchen, das mit jedem Wellenkamm nach oben und nach vorne getragen wird, nur um dann wieder nach unten ins Wellental zurückzufallen. Statt Wasser transportieren Ozeanwellen Energie. Genug, um in Form eines rasenden Tsunamis ganze Küstendörfer einzuebrennen. Aber auch genug, um in den Wellenkraftwerken der Zukunft elektrische Energie en masse zu produzieren.

BRANDUNG AUS DEM UNTERGRUND

Die Platten der Erdkruste bewegen sich langsam, nicht schneller als ein Fingernagel wächst. Die Erdbebenwellen, die sie anregen, wenn sie sich verhaken und wieder ruckartig befreien, sind ungleich schneller.

Seismische Wellen treten im Erdinneren als Kompressions- sowie Scherwellen auf, mit Frequenzen zwischen 0,1 und 30 Hz. Die Ersteren stauchen und strecken das Gestein und lassen die Teilchen wie beim Schall in Ausbreitungsrichtung schwingen. Sie sind mit 6 - 13,5 Kilometern pro Sekunde besonders schnell und werden auch Primärwellen (P-Wellen) genannt. Manche Tierarten können sie offenbar wahrnehmen – als Vorboten der nahenden Katastrophe. Die zweite Wellenart, auch Sekundär- oder S-Wellen genannt, ist nur halb so schnell und lenkt die Teilchen quer zur Ausbreitungsrichtung aus, ähnlich der Schwingungen des Lichts.

Während die Laufzeitunterschiede zwischen P- und S-Wellen eine Auskunft über die Lage des Erdbebenherds geben, gibt die Art, wie sie den Planeten durchlaufen, Auskunft über dessen Aufbau. Die Wellen werden auf ihrem Weg gebrochen, reflektiert und gebeugt. Dabei durchdringen S-Wellen lediglich feste Schichten, P-Wellen laufen auch durch den flüssigen, äußeren Kern unseres Planeten. Mit ihrer Hilfe können Forscher den ganzen Erdball durchleuchten, ähnlich einem Arzt, der das Innere des menschlichen Körper mittels Ultraschall in einer Tomographie abbildet.

Erreichen die Wellen schließlich die Erdoberfläche, richten sie u. a. in Form der nach dem britischen Physiker Lord Rayleigh (1842 – 1919) benannten Rayleigh-Wellen große Zerstörungen an. Der Boden bewegt sich dabei ähnlich wie das Wasser in einer Meeresschwall auf elliptischen Bahnen, spürbar als Rollen des Untergrunds. Bei starken Beben können die Oberflächenwellen sogar den gesamten Erdball umrunden. Und das mehrmals.

☞ Seismograph am Johnston Ridge Observatory, US-Bundesstaat Washington. Das Gerät verzeichnet die seismische Aktivität des nur 8 Kilometer entfernten Vulkans Mount St. Helens. (Bild: Pixelkunst, Flickr.com)

☞ Vor Neptuns Launen ist auch das Mittelmeer nicht sicher. So verwüstete im Sommer 2006 eine rund drei Meter hohe Flutwelle den Hafen von Ciutadella auf der Ferieninsel Menorca. Zahlreiche Boote wurden dabei an Land gespült oder endeten auf dem Grund des Hafenbeckens. Solche „Rissagas“ gibt es auf Menorca immer wieder, historisch belegt seit dem 15. Jahrhundert. Auslöser sind keineswegs Seebeben, sondern Luftdruckschwankungen, die die Meeresoberfläche aufschaukeln. Weil die Wetterlage für das Phänomen verantwortlich ist, spricht man von einem „Meteotsunami“. (Bild: picture-alliance / dpa)

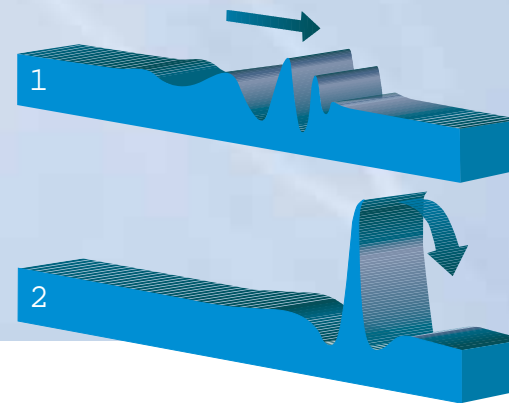


eines Jumbo Jets dahin, allerdings nur als „Hügelchen“ von einigen Dezimetern Höhe und langgestreckt auf eine Breite von 250 Kilometern.

In flacheren Küstengewässern jedoch wird der Tsunami zum Inferno. Geschwindigkeit und Wellenlänge nehmen zwar schnell ab, doch die Amplitude steigt rapide, weil die Reibung am Boden die Wassermoleküle festhält. Die zuvor flache Welle wird zur riesigen Wasserwand aufgestaucht – und alle Energie ist immer noch in ihr enthalten. Der Tsunami transportiert nun auch plötzlich Wasser, weil Teile der potenziellen Energie in Bewegungsenergie verwandelt werden. Eine mehrere Stockwerke hohe Riesenwoge schlägt an Land. Besonders tückisch: Wenn die Welle durch ein plötzliches Absinken des bebenden Meeresbodens erzeugt wurde, läuft das Wellental dem

Wellenberg voraus. Erreicht ein solcher Tsunami die Küstenlinie, weicht das Wasser zunächst um bis zu mehrere hundert Meter zurück. In Unkenntnis laufen Neugierige auf die freigelegte Landzunge hinaus und damit geradewegs in ihr Unglück.

Gefährdet sind vor allem Häfen und spitz zulaufende Buchten, in die die Wellen hineinströmen – eine Tatsache, der die Flutwelle auch ihren Namen verdankt. „Tsunami“ steht für „Hafenwelle“ und ist eine Wortschöpfung japanischer Fischer, die bei ihrer Rückkehr in völlig zerstörte Heimatdörfer fälschlicherweise annahmen, die verheerende Flut hätte sich erst vor Ort gebildet. Schließlich war auf dem Ozean alles ruhig gewesen – den auf hoher See unter ihnen hindurchrollenden flachen Wellenberg hatten sie nicht bemerkt.



☞ Forscher der TU Berlin lassen Miniaturausgaben der „Freak Waves“ zu Testzwecken auf einen Wellenbrecher krachen. Dazu schicken sie lange, schnelle Wellen langsam vorauslaufenden kurzen Wellenbergen hinterher. (Bild: Meerestechnik - Technische Universität Berlin)

☞ Monsterwelle als Summe vieler kleiner Wellenberge (1), die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aufeinander auflaufen und sich für kurze Zeit zur haushohen Wasserwand addieren (2). (Grafik: ius)

Das Ausmaß der Verwüstungen im Dezember 2004 brachte eine neue Diskussion darüber in Gang, wie Menschen in Küstengebieten vor Tsunamis gewarnt werden können. Im Gegensatz zum Pazifik gab es im Indischen Ozean bis dato keinerlei Vorkehrungen für eine derartige Naturkatastrophe. Deutschland sagte rasch seine Hilfe zu. Im März 2005 unterzeichneten Deutschland und Indonesien gemeinsam einen Vertrag über den Aufbau eines Tsunami-Warnsystems unter der Koordination der UNESCO. Es soll bis zum Jahr 2008 einsatzfähig sein, um 2010 vollständig an die indonesische Regierung übergeben werden zu können.

Zu den wesentlichen Komponenten dieses Frühwarnsystems gehören kontinuierliche Erdbebenmessungen. Seismische Primärwellen sind mit bis zu 13,5 Kilometern pro Sekunde schneller als jeder Tsu-

nami und daher ein erstes deutliches Warnsignal. So gilt auch im Indischen Ozean: Sind genügend Seismometer in verschiedenen Abständen rund um den Sundabogen verteilt, kann man ein Beben dort binnen Minuten registrieren, seine ungefähre Stärke und die Lage des Epizentrums abschätzen. Weil aber nicht jedes starke Beben einen Tsunami verursacht, reichen Erdbebenmessungen alleine nicht aus.

Ein weiteres Alarmsignal sollen die Hafenwellen selbst liefern – und zwar auf hoher See. Entlang des Sundabogens setzen Forscher des GeoForschungsZentrum Potsdam dazu Sensoren am Meeresboden aus, die den Druck der auf ihnen lastenden Wassermassen registrieren können. In der Tiefe unempfindlich gegenüber dem „normalen“ Seegang an der Oberfläche, sollen insgesamt zehn solcher Bodendrucksensoren den Durchgang möglicher Tsunamis aufzeich-

EIN MONSTER VON WELLE

Logbucheintrag des deutschen Kreuzfahrtschiffes „Bremen“, 22.01.2001: „Unsere harmonische Seereise wird heute jäh unterbrochen: Um ca. 06.20 Uhr erlitten wir bei sehr schwerer See einen Seeschaden. Ein großer Brecher (Seeschlag) von ca. 35m Höhe zerstörte das Brückenfenster ...“ Der Luxusliner war von einer so genannten Monsterwelle getroffen worden und trieb danach für mehr als eine halbe Stunde manövrierunfähig und mit vierzig Grad Schlagseite in der tobenden See.

Monsterwellen, auch „Freak Waves“ genannt, erheben sich im Gegensatz zum Tsunami auf hoher See zu voller Größe. Sie treten einzeln auf wie die „Weiße Wand“ und der „Kaventsmann“ oder aber in Gruppen, den „drei Schwestern“. Früher als bloße Einbildung abgetan, beschäftigen sie heute Forscherteams aus aller Welt, die die Entstehung der hochhaushohen Wellenberge entschlüsseln wollen. Verschiedene Geburtshelfer kommen in Frage: etwa das Auflaufen des Seegangs auf eine Meeresströmung wie im Agulhasstrom vor Südafrika oder auch das Aufsatteln unterschiedlich schneller Wellenberge. Bochumer Physiker konnten zeigen, dass bereits zwei Meereswogen, die sich vereinigen, vollkommen anderen Regeln folgen als die Einzelwellen – und sich so beispielsweise zu extrem hohen Wänden aufsteilen können.

Monsterwellen versenkten 1978 vermutlich das 263 Meter lange Containerschiff „München“ und 1982 die Ölplattform „Ocean Ranger“ vor Neufundland. An der Draupner-Plattform in der Nordsee wurde 1995 eine Monsterwelle von 25,6 Metern registriert, und der Satellit „Envisat“ hat im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „Maxwave“ auf der Nord- wie auf der Südhalbkugel viele 20 oder 30 Meter hohe Wellen aufgezeichnet. „Freak Waves“ sind keine Seltenheit und bergen größere Gefahren für Schiffe als lange gedacht. Als Seemannsgarn gelten sie jedenfalls schon lange nicht mehr.



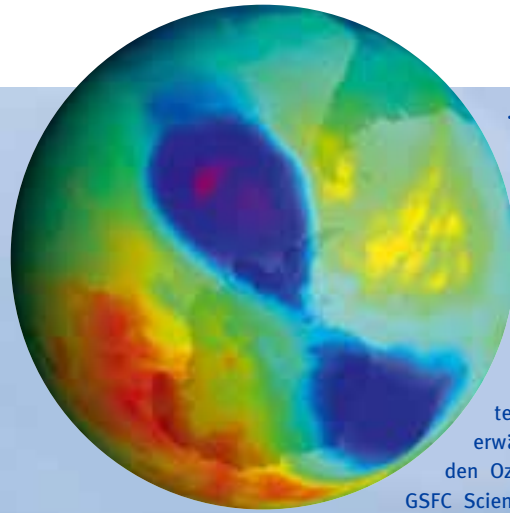
(Bild: Photocase.com)

RITT AUF DER WELLE

Der Wind weht aus allen möglichen Himmelsrichtungen, trotzdem laufen Wellen meist gerade an den Strand. Egal ob man sich an der Luv- oder Leeseite einer Insel aufhält, die Wellen treffen in der Regel parallel zur Uferlinie ein. Die Küste scheint eine geradezu magische Anziehungskraft auf das Wasser auszuüben.

Der wahre Grund ist allerdings weniger mystisch: Wenn Wellen ins flache Gewässer geraten, werden sie zur Küste hin gedreht. Der Meeresboden bremst sie. Am stärksten ist diese Abbremsung auf der dem Land zugewandten Seite der Welle. Das erlaubt dem landabgewandten Teil der Welle aufzuholen. Eine zunächst schräg einlaufende Woge dreht sich auf diese Weise so lange, bis der Wellenzug parallel zu den Tiefenlinien des Meeresbodens an die Küste brandet.

Steigt die Küste flach an, gibt die Welle ihre Energie nach und nach ab und trudelt langsam aus. Bei stärkerer Neigung rücken die Wellenkämme enger zusammen, die Welle türmt sich auf. Sie wird am Boden gebremst, während sie an der Oberfläche noch unbeeinflusst voranschreitet. Daher eilt der Kamm der Welle voraus, die sich schließlich überschlägt und bricht. An besonders steilen Kanten wie vor Hawaii oder Indonesien kommt es so zu den „Big Waves“ – den 15 Meter hohen Träumen jedes Wellenreiters.



Rekordverdächtig klein erschien das antarktische Ozonloch dem NASA-Satelliten AURA im Herbst 2002. Verantwortlich für das Schrumpfen der Lücke waren so genannte planetare Wellen. Diese branden als extrem langwellige Druckschwankungen um den gesamten Erdball. Ihre Wellenkämme erstrecken sich mitunter über Dutzende von Kilometern bis in die Stratosphäre hinein, erwärmen diese und unterbinden dadurch den Ozonabbau. (Bild: Greg Shirah, NASA GSFC Scientific Visualization Studio, based on data from EPTOMS)

Riesenwellen als Kinostars. In James Camerons „The Abyss“ werden sie als 300-Meter-Giganten von Außerirdischen erzeugt. Das ist natürlich reine Fantasie, vermittelt aber einen guten Eindruck von der Höhe realer „Megatsunamis“, wie sie von Erdstößen ausgelöst werden können. (THE ABYSS ©1989 Twentieth Century Fox Film Corporation. All Rights Reserved. "THE ABYSS" AVAILABLE TO OWN ON DVD. Photo courtesy of Twentieth Century Fox Home Entertainment LLC.)



nen. Jede Unterwassereinheit sendet die gesammelten Daten dann an eine schwimmende Boje. Im Regelfall alle zwei Minuten. Falls der Wasserstand allerdings mehrmals hintereinander einen Schwellenwert überschreitet, verkürzt sich der Zeittakt.

Die Bojen sind Relais- und Messstationen in einem. Sie sorgen für den reibungslosen Datenaustausch zwischen dem Messgerät am Ozeanboden und einem Satelliten, über den die Kommunikation mit dem Warnzentrum in Jakarta läuft. Gleichzeitig zeichnen sie meteorologische Daten wie den aktuellen Luftdruck und die Windgeschwindigkeit auf. Auf diese Weise soll ein Tsunami bereits während seiner Entstehung beobachtet werden, um wertvolle Minuten Vorwarnzeit zu gewinnen. Pegelstationen an vorgelagerten Inseln messen dann noch einmal die

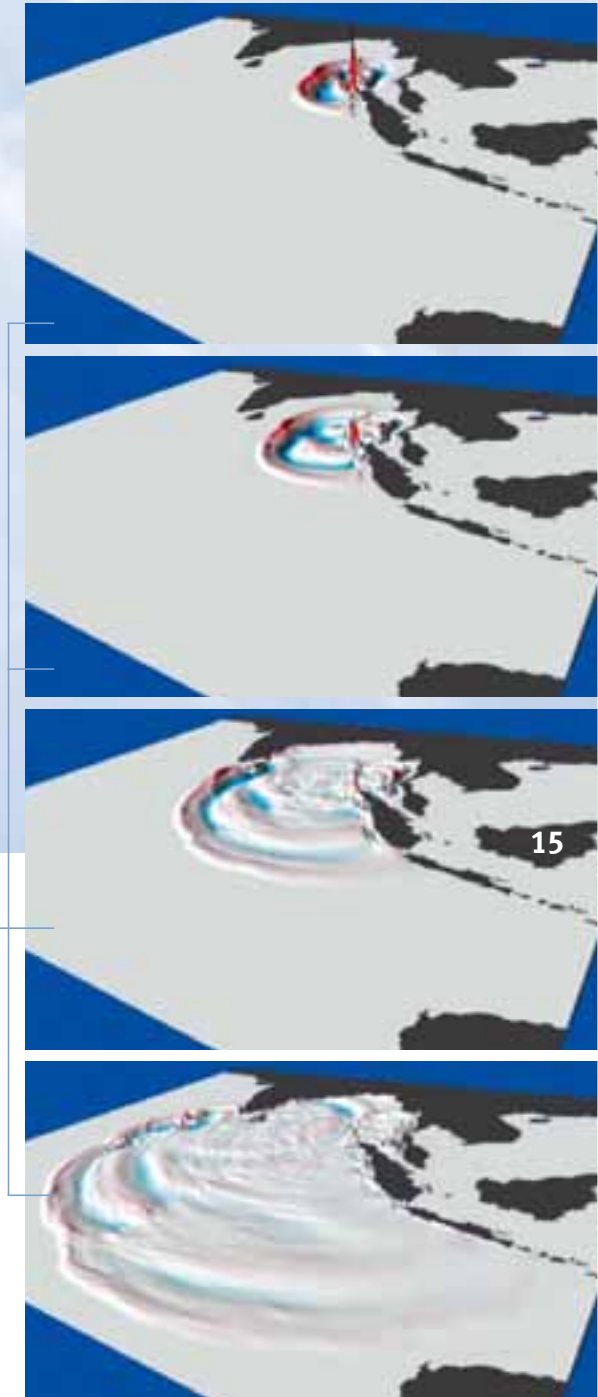
Höhe der Flutwellen, wenn diese schließlich den Küstenschelf erreicht haben.

Eine Tsunami-Warnung sollte möglichst präzise Informationen darüber beinhalten, welche Küstengebiete wie stark gefährdet sind. Dies lässt sich wegen der abwechslungsreichen Topografie des Ozeanbodens und der zerklüfteten Küstenlandschaft nicht auf die Schnelle ermitteln. Um für den Katastrophenfall gewappnet zu sein, modellieren Wissenschaftler daher die Ausbreitung der Tsunami-Wellen schon im Voraus für Hunderte potenzieller Erdbebenherde entlang des Sundabogens und für unterschiedliche Erdbebenstärken. Auch das deutsche Forschungsschiff „Sonne“ hat zu diesem Zweck in den zurückliegenden Jahren weite Teile der Unterwasserlandschaft vor Indonesien ausgemessen.



Tsunami-Warnschilder an der Küste des US-Bundesstaats Oregon (Bild: snaperture, Flickr.com)

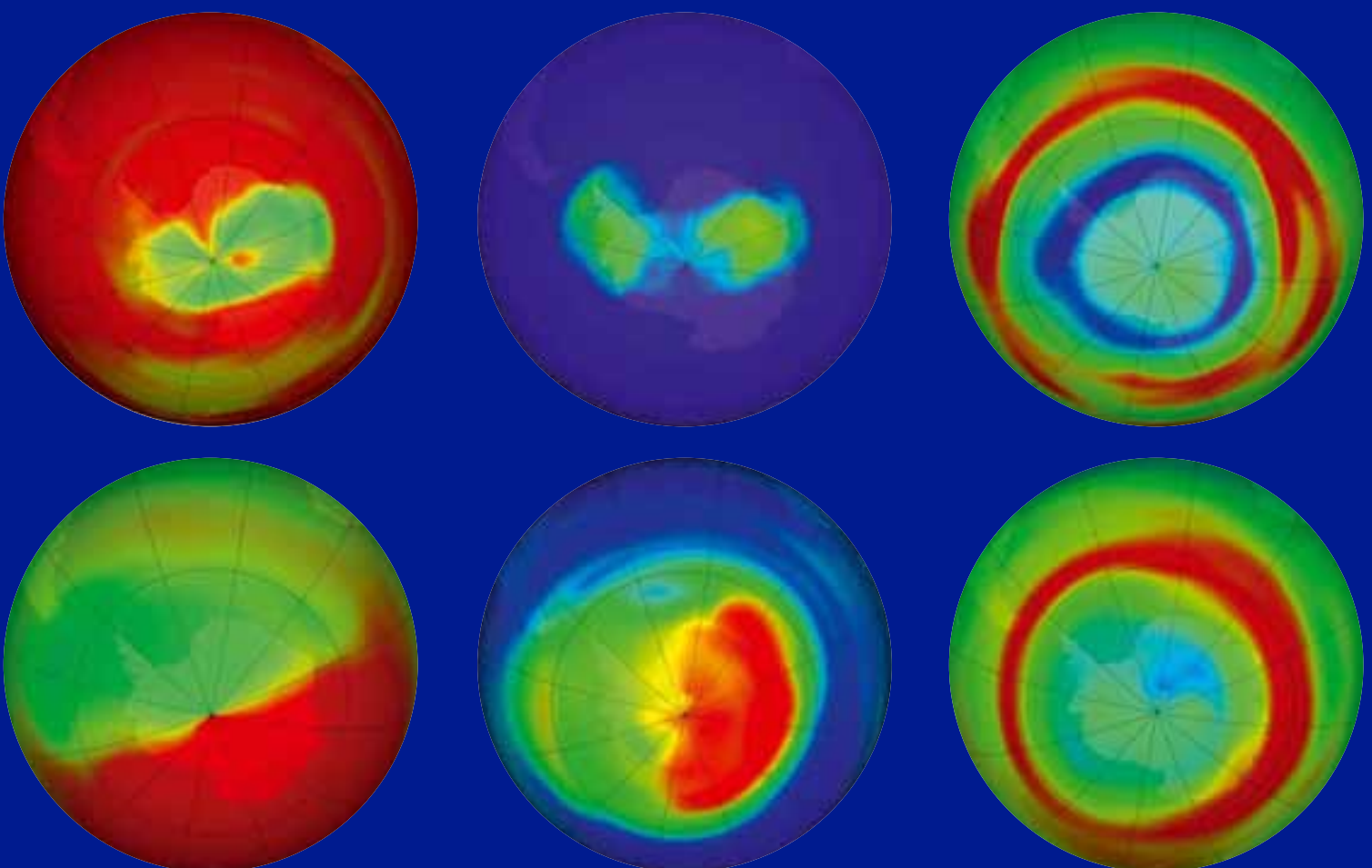
Diese Tsunami Modellierung zum Sumatra-Beben vom 26. Dezember 2004 zeigt die Flutwelle jeweils eine halbe, eine, zweieinhalb sowie vier Stunden nach ihrer Entstehung. Rote Flächen kennzeichnen in dieser Simulation bis zu 10 Meter hohe Wellenberge, blaue Flächen bis zu zwei Meter tiefe Wellentäler. Die Amplitude der Wellen ist hier stark überhöht dargestellt. (Bilder: A. Babeyko, Universität Frankfurt/Main; S. Sobolev, GeoForschungsZentrum Potsdam)



Im Falle eines Bebens können die Mitarbeiter der Warnzentren auf die [Computersimulationen](#) zugreifen, die mit den aktuellen Daten am besten übereinstimmen. Die Zeit ist allerdings denkbar knapp. Im Gegensatz zu Indien oder Thailand liegt Indonesien sehr nah am Sundabogen. Das nationale Lagezentrum in Jakarta muss eine verlässliche Tsunami-Warnung bereits innerhalb von etwa zehn Minuten nach dem Beben ausgeben, um die Bevölkerung in den nächstgelegenen Gebieten beizeiten alarmieren zu können. Als eine der größten Herausforderungen gilt dabei die Überbrückung der „letzten Meile“ – die Weitergabe der Warnung vom Datenzentrum an Abertausende potenziell Betroffener. Viele Möglichkeiten sind denkbar: Sirenenalarm, Lautsprecherdurchsagen, sogar SMS. Institutionen wie beispielsweise das Deutsche Zentrum für

Luft und Raumfahrt sollen hier beim Aufbau der entsprechenden Kommunikations- und Kommandostrukturen sowie bei der Ausbildung des Personals helfen.

Gerade weil Tsunamis so selten sind, ist es eine der vordringlichen Aufgaben, das Wissen um die Gefahr langfristig in der Bevölkerung zu verankern: über Schulen, Erwachsenenbildungsstätten und regelmäßige Evakuierungsübungen. Nur dann wird es bei künftigen Tsunamis möglich sein, Menschenleben mit der Unterstützung durch moderne Technik zu retten. In ferner Zukunft könnte die Tsunami-Frühwarnung dann durch eine kontinuierliche Überwachung der Meere mit Hilfe von Satelliten erleichtert werden.



Alles auf einer Wellenlänge

In der Küche erwärmen Mikrowellen das Essen, in der Kosmologie gewähren sie einen einzigartigen Blick in die Kindheit des Alls. Zwei Anwendungen, die eines gemeinsam haben: Sie sind beide Zufallsprodukte der Radartechnologie.

Fast jeder Superheld, der in den 50er Jahren etwas auf sich hielt, hatte sie: Energie wellen speiende Strahlenkanonen. Wer hätte damals gehaut, dass nur wenige Jahrzehnte später fast jeder Durchschnittsbürger Geräte mit ähnlichen Fähigkeiten zuhause haben würde – und mit ihnen statt auf Superschurken auf Fertiggericht zielen würde.

Der Mikrowellenofen, kurz Mikrowelle, hat unsere Nahrungsaufnahme wohl

ebenso revolutioniert wie Gasherd und Backofen, wenn auch nach Meinung mancher Küchenchefs nicht unbedingt zum Besseren. Aber egal, was man von der Mikrowelle hält, ein technisches Wunderwerk ist sie allemal. Sie macht „Fast Food“ im wahrsten Sinne des Wortes. Und dabei wird nicht einmal das Geschirr heiß. Denn während ein normaler Umluftherd Wärme über erhitzte Luft ans Essen weitergibt, ist die Strahlung des Mikrowellenherds mit einer Frequenz von 2,45 Gigahertz so gewählt, dass sie in die Speisen eindringt und diese „von innen“ erwärmt. Der Legende nach entdeckte der amerikanische Ingenieur Percy Spencer dieses Prinzip im Jahre 1945 eher zufällig, als er beim Bau von Radaranlagen für die Firma Raytheon spürte, wie ein Schokoriegel in seiner Hosentasche schmolz.


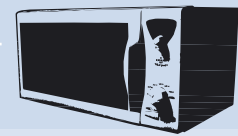

Spencer, der sich bereits als Erfinder einen Namen gemacht hatte, roch den Braten sofort. Ein Jahr später patentierte Raytheon den Mikrowellenherd.

In Lebensmitteln spricht vor allem Wasser auf die Mikrowellenstrahlen an. Der Grund: Die H₂O-Moleküle sind durch die Wellen der Mikrowelle besonders leicht in Erregung zu versetzen. Was das genau bedeutet, wird klar, wenn man sich die Flüssigkeitsteilchen einmal etwas genauer ansieht: Wassermoleküle sind kleine elektrische Dipole, im Grunde Miniaturausgaben der Stabantennen auf Fahrzeugen und Kofferradios. Sie besitzen einen negativen und einen positiven Pol, erzeugt durch die gemeinsame Elektronenwolke von Sauerstoff und Wasserstoff und permanent voneinander getrennt durch die gewinkelte

← Keine Murrel-Sammlung, sondern unsere Erde durch Mikrowellen-Augen: Der „Microwave Limb Sounder“ an Bord des NASA-Satelliten Aura misst die natürliche Mikrowellenstrahlung der Erdatmosphäre. Dadurch registriert er (von oben links im Uhrzeigersinn) neben der Verteilung von Salzsäure, Chlormonoxid, Ozon und Salpetersäure auch den Wasserdampfgehalt sowie die Temperatur der Lufthülle an der Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre. (Bild: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio)

→ Simulation der von einer Dipolantenne abgestrahlten elektromagnetischen Wellen. Der Schnappschuss zeigt lediglich die Berg- und Talfahrt der elektrischen Feldstärke (rot: maximaler positiver Ausschlag, blau: maximaler negativer Ausschlag). (Bild: Prof. Dr.-Ing. T. Weiland - Technische Universität Darmstadt)

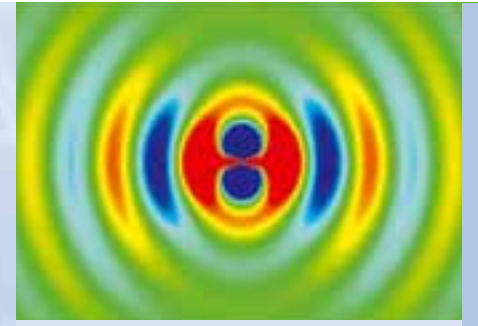
↓ Der Quotient aus der Geschwindigkeit v einer Welle und ihrer Frequenz f ergibt ihre Wellenlänge L (in Formelsprache $L = v / f$) – die Distanz zwischen zwei Wellenpunkten, die die gleiche Auslenkung sowie Bewegungsrichtung haben. Hier einige ausgewählte Beispiele zu diesem Kapitel.

	5,3 cm Wetterradarwellen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)
	12 cm Strahlung eines handelsüblichen Mikrowellenofens
	7,5 m Stabile „La Ola“

Anordnung der atomaren Molekülbausteine. Bringt man die kleinen Dipole nun in ein äußeres elektrisches Feld, richtet sich ihre Stabachse immer parallel zur Feldrichtung aus, ähnlich einer Kompassnadel im Erdmagnetfeld. Kehrt man die Richtung des elektrischen Feldes um, so folgen auch die kleinen Dipole und drehen sich um ihren Mittelpunkt in die neue Richtung. Im rasch wechselnden Strahlungsfeld der Mikrowelle kommen die Wassermoleküle daher so richtig in Bewegung. Dabei müssen sie auch noch ihre Teilchennachbarn zur Seite schubsen. Kaum auf dem Hinweg geht es bereits wieder zurück, die Drehungen sind auf diese Weise nie vollständig. Dieses Hin und Her kostet Kraft bzw. Energie, die aus dem Mikrowellenfeld entnommen wird. Wesentliches Resultat: Das Essen wird warm.

Ein Generator, auch „Magnetron“ genannt, erzeugt die Mikrowellenstrahlen, über Antenne und Hohlleiter werden sie in den Garraum gebracht. Dieser wirkt wie ein Hohlraumresonator auf die Wellen: Die Metallwände reflektieren die Strahlung, hin und her laufende Wellen überlagern sich, und es bilden sich stehende Wellen aus. Die eingestrahlte Leistung ist dadurch nicht überall gleich. Um das Essen trotzdem gleichmäßig erhitzen zu können, hält man es in Bewegung und lässt es auf einem Teller rotieren.

Die Mikrowellen werden nicht nur an den metallischen Seitenwänden, sondern auch am vorderen Sichtfenster reflektiert, durch das man in das Gerät hineinschauen kann. Dazu ist das Fenster mit Metallpartikeln durchsetzt, die nur Millimeter



NEUE DEUTSCHE WELLE

Es war der deutsche Physiker Heinrich Hertz, der als erster elektromagnetische Wellen nachweisen konnte. Bereits in den Jahren 1887/88 erzeugte er eine Strahlung, die wir heute u. a. aus der Küche kennen: die Mikrowellen. Ihre Frequenz wie auch die aller anderen Wellenphänomene wird heute in der Einheit Hertz angegeben – Würdigung einer wahrhaft funkensprühenden Forschung.

Für seine Versuche benutzte Hertz einen geraden Metalldraht, so lang wie sein Unterarm und auf halber Strecke durch eine schmale Lücke von 1 cm unterbrochen. Beide Drahhälften, bestückt an ihren Enden mit zwei großen Metallkugeln, verband er mit einem Induktionsapparat, um sie dann elektrisch aufzuladen. War eine bestimmte Grenzmarke erreicht, sprang in der unterbrochenen Drahtmitte ein Funke über. Gleichzeitig wurde von gleicher Stelle aus eine elektromagnetische Welle in den Raum ausgesandt. Der „Hertz'sche Dipol“ war geboren.

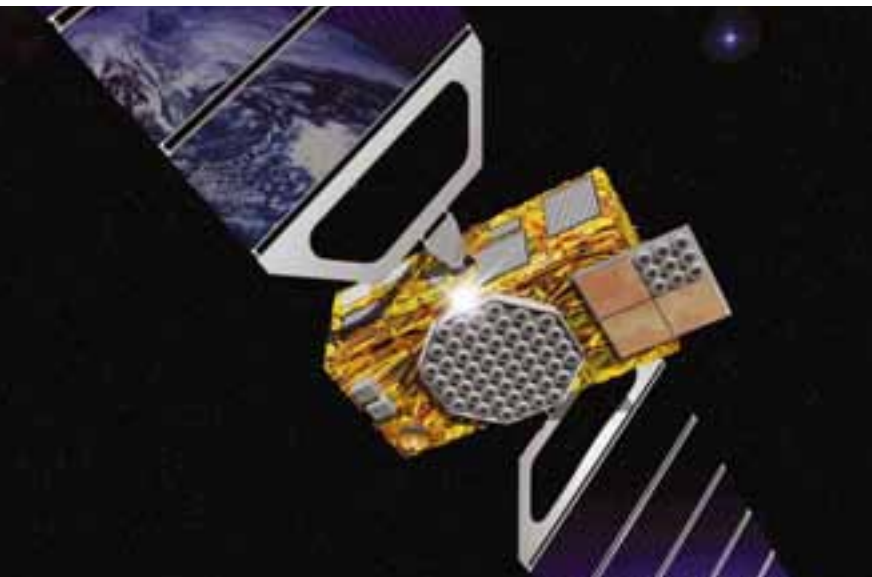
Hertz räumte seinen Hörsaal an der Technischen Hochschule Karlsruhe, entfernte Gaslampen und Zuleitungen, um die Wellen in einem möglichst störungsfreien Raum sichtbar zu machen. Er installierte eine Metallplatte an der gegenüberliegenden Hörsaalwand als Spiegel, um die dort reflektierten Wellen mit jenen vom Dipol abgestrahlten zu stehenden Wellen zu überlagern. In diesem eigentlich unsichtbaren Meer fischte Hertz mit einem speziellen Sensor – eine zum Ring gebogene Miniversion der „Sendeantenne“ – nach sichtbaren Zeichen der Überlagerung, und fand sie. Immer wenn das Gerät auf einen der aufgesattelten Schwingungsbäuche des Wellenfeldes traf, schlug es Funken. Der Nachweis eines Prinzips, ohne das Radio, Handys, Fernsehen und Radar undenkbar wären.

WO BIN ICH?

Immer weniger Autofahrer nehmen eine Straßenkarte zur Hand. Stattdessen vertrauen sie auf Navigationssysteme und damit auf das mit Mikrowellen arbeitende Global-Positioning-System (GPS). Ein Empfänger auf der Erde kann dabei jederzeit Kontakt zu vier von insgesamt 24 GPS-Satelliten herstellen. Er bekommt Informationen über die Bahnkoordinaten und über die Zeit, zu der die Mikrowellensignale ausgesandt wurden. Laufen die Borduhr des Satelliten und die Empfängeruhr synchron, kann die Laufzeit des Signals und daraus die Distanz zum jeweiligen Satelliten bestimmt werden. Drei solche Entfernungsmessungen zu drei verschiedenen Satelliten liefern die eigene Position im Raum. In der Praxis sind die Uhren von Wanderern oder in Autos aber nicht genau genug, um die Laufzeiten mit der gewünschten Präzision zu berechnen. Ein viertes Satellitensignal macht dieses Defizit zum Teil wett.

Auch relativistische Effekte müssen beim GPS berücksichtigt werden. Weil nach Einsteins Spezieller Relativitätstheorie schnell bewegte Uhren langsamer gehen, geht auch die Atomuhr im Satelliten ein wenig nach. Gleichzeitig sorgt die Allgemeine Relativitätstheorie dafür, dass aufgrund der Erdanziehungskraft die Uhren in der Umlaufbahn schneller laufen. Leider heben sich beide Effekte nicht gegenseitig auf und würden daher bei Nichtbeachtung zu einer Abweichung des GPS um elf Kilometer pro Tag führen.

Neben dem amerikanischen System soll bis 2010 auch das europäische „Galileo“ mit 30 Satelliten einsatzbereit sein. Wenn alles wie geplant funktioniert, wird die Präzision des frei zugänglichen Satellitennavigationssystems dazu ausreichen, selbst die langsame Kontinentaldrift zu messen.



☛ Galileo-Satellit aus Sicht eines Künstlers (Bild: ESA-J.Huart)

☛ Um Flugzeugen wie der abgebildeten B-2 „Spirit“ eine Tarnkappe gegen die Mikrowellen der Radarstrahlung aufzusetzen, werden sie u. a. mit speziellen Außenhüllen versehen. Diese absorbieren die Radarwellen anstatt sie zu reflektieren. Die Wellenenergie wird dabei – fast wie in einem Mikrowellenofen – einfach in Wärme umgewandelt. (Bild: SrA D. Myles Cullen, USAF)

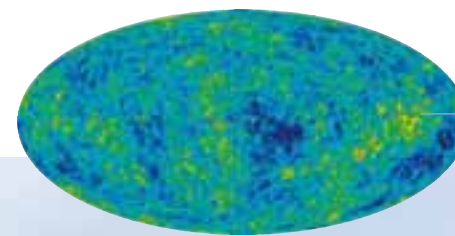


auseinander liegen. Sichtbares Licht hat eine Wellenlänge von weniger als einem tausendstel Millimeter und gelangt ungehindert durch das Metallgitter. Die Mikrowellen mit etwa 12 Zentimetern Wellenlänge können hingegen nicht passieren.

Ganz dicht ist ein Mikrowellenherd, vor allem an der Tür, aber nie. Ausprobieren kann man dies mit einem weit verbreiteten „Mikrowellensensor“: dem Handy. Mobiltelefone sprechen auf ähnliche Wellenlängen wie Mikrowellenöfen an. Das D1-Netz arbeitet mit einer Frequenz von 900 Megahertz, also 33 Zentimetern Wellenlänge, das E-Netz mit 1,8 Gigahertz entsprechend 17 Zentimetern. Man könnte also erwarten, dass ein Mikrowellenherd auch die Handystrahlung gut abschirmt. Dies ist jedoch nicht der Fall. Bei gutem Empfang klingelt ein angewähltes Mobiltelefon selbst dann noch, wenn man es in eine Mikrowelle legt und die Tür ver-

schließt. Dass der Ofen bei diesem Versuch besser ausgeschaltet sein sollte, versteht sich von selbst.

Verantwortungsvolle Aufgaben kommen den Mikrowellen auch abseits von Küche und Mobilfunk zu. So nutzt man sie zum Beispiel in der Radartechnik, um Autobahnraser dingfest zu machen oder um Flugzeuge und Schiffe aufzuspüren. Auch Erdbeobachtungssatelliten wie Envisat verfügen über leistungsfähige Radargeräte und Mikrowellensensoren, um zum Beispiel die Ausdehnung von Wüsten, Meereis oder Gletschern zu erfassen oder topographische Karten der Landoberfläche und des Ozeanbodens anzufertigen. Insbesondere lässt sich mit aktivem Radar der Abstand zwischen Satellit und Erdoberfläche zentimetergenau bestimmen. So registrierten neben Envisat auch der französisch-amerikanische Satellit Jason-1 und der amerikanische Satellit



☛ Der Mikrowellenhintergrund aus Sicht der Raumsonde WMAP. Farbunterschiede entsprechen Temperaturdifferenzen von weniger als einem tausendstel Grad Celsius. (Bild: NASA/WMAP Science Team)

☛ Physik-Nobelpreisträger 2006 George F. Smoot (links) und John C. Mather. Die beiden Astrophysiker hatten mit dem 1989 gestarteten Satelliten COBE erstmals den kosmischen Mikrowellenhintergrund im Detail vermessen und so nicht nur die Temperatur, sondern auch die feinen Variationen des kosmischen Nachglühens bestimmt. (Bilder: picture-alliance/ dpa)



☛ La Ola im Nürnberger Franken-Stadion, Fußball-Weltmeisterschaft 2006 (Bild: Dirk Paessler, Flickr.com)

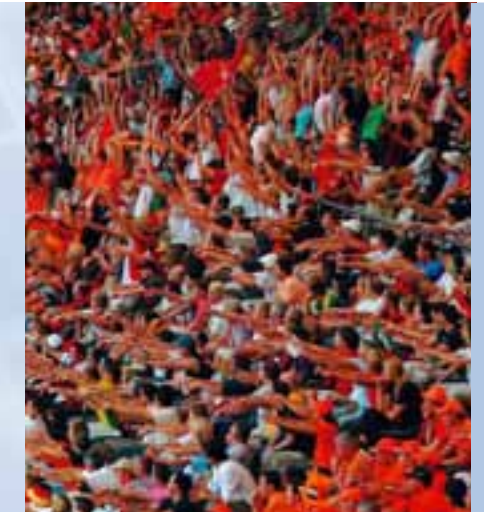
☛ Die stärkste Mikrowellenheizung der Welt heißt „Gyrotron“. Im Bild: Eines von zehn Exemplaren, die mit jeweils dem Tausendfachen der Ausgangsleistung eines normalen Mikrowellenofens das Plasma des künftigen Fusionsreaktors W7-X auf beeindruckende 100 Millionen Grad Celsius aufheizen sollen – Zündtemperatur der Kernfusion. (Bild: Forschungszentrum Karlsruhe)

Geosat während des Tsunami im Indischen Ozean im Dezember 2004 die Änderung der Meeresspiegellhöhe vom Weltraum aus.

Und auch das All selbst hat in Sachen Mikrowellen so einiges zu bieten. 1964 testeten zwei Wissenschaftler der Bell Telephone Gesellschaft in den USA eine neue Antenne für Satellitenexperimente. Dabei stießen Arno Penzias und Robert Wilson auf ein seltsames Mikrowellensignal. Es variierte nicht, sondern traf aus allen Richtungen des Raumes mit gleicher Stärke ein. [Spätere Messungen](#) zeigten, dass sich das Signal über Wellenlängen zwischen einem Millimeter und zehn Zentimetern erstreckte und einer Strahlungstemperatur von 2,725 Kelvin entsprach – also knapp 270 Grad Minus.

Die eher zufällige Entdeckung entpuppte sich später als nobelpreiswürdige Sensa-

tion, gewährte sie doch einen direkten Einblick in die Kinderstube unseres Kosmos. Gerade einmal 400.000 Jahre waren seit dem Urknall vergangen, als die Strahlung freigesetzt wurde – das Nachglühen eines dichten, heißen Plasmas, welches den Kosmos ursprünglich ausfüllte. In ihm konnten sich keine Lichtteilchen ausbreiten, ohne sofort durch freie Elektronen und Atomkerne geblockt zu werden. Die Welt war undurchsichtig. Erst als sich das Universum auf etwa 3000 Kelvin abgekühlt hatte und sich die Elektronen mit Wasserstoff- und Heliumkernen zu Atomen verbanden, lichtete sich der Nebel und die Strahlung konnte entweichen. Seither ist sie mit der Expansion des Alls zunehmend abgekühlt und liegt heute – mehr als 13 Milliarden Jahre später – nur noch wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt. Als „[kosmischer Mikrowellenhintergrund](#)“ ist sie das Zeugnis einer wahrhaft feurigen Geburtsstunde.



WOGENDES PUBLIKUM

Spätestens seit der WM 1986 im mexikanischen Azteken-Stadion gehört sie zum Fußballspiel wie Fahnenmeer und Fangesänge: die „La Ola“. Die Woge der Begeisterung hat seitdem nicht nur Fans, sondern auch Forscher erfasst. Anhand von Videoaufnahmen haben Wissenschaftler der TU Dresden und der Universität Budapest das Wellenphänomen analysiert. Sie wollten herausfinden, wie „La Ola“, „die Welle“, entsteht. Den Anfang bildet eine kritische Masse von mindestens 25 bis 35 Personen, die sich gemeinsam unter Hochreißen der Arme von ihren Sitzen aufschwingen. Kleinere Zuschauergrüppchen sind dagegen nicht imstande, eine Stadionwelle ins Rollen zu bringen. Auch ein falsch gewählter Zeitpunkt kann die La Ola frühzeitig verebben lassen. Wenn man gebannt auf einen Elfmeter wartet, rückt das Verhalten des Sitznachbarn eher in den Hintergrund. Am besten eignen sich daher Phasen, in denen das Spiel unterbrochen ist oder ohne nennenswerte Torszenen dahinplätschert. Wen die Stimmung im Stadion übrigens manchmal an kollektiven Wahnsinn erinnert, der liegt – zumindest was die La Ola angeht – gar nicht so weit daneben. Wissenschaftler beschreiben die Welle mit ähnlichen Modellen, mit denen sich auch Massenhysterien und Massenpaniken analysieren lassen. In der Simulation sind die Zuschauer leicht erregbare Einheiten, die auf äußere Reize hin aufspringen. So wandert die Welle von Sitz zu Sitz und rollt meist im Uhrzeigersinn mit ungefähr 45 km/h durch die Arena.



Die Welt in neuem Licht

Albert Einstein lieferte die Theorie, Theodore Maiman das erste funktionstüchtige Modell. Im Jahre 1960 begann der Siegeszug des Lasers durch Haushalte und Forschungslabore. Jetzt steht der nächste Quantensprung unmittelbar bevor.

In Salzkorngröße sitzen Laser in den Leseköpfen der Unterhaltungselektronik, im Kugelschreiberformat dienen sie im OP als Skalpell, und mit einigen Metern Länge schweißen sie Autokarosserien in robotischen Fertigungsstraßen. Was aber macht man mit einem Laser, der beeindruckende 3,4 Kilometer lang ist?

In Hamburg wird von 2007 an eine solche riesige Apparatur gebaut. Unter der Erde. Sechs Jahre wird es dauern, ehe am Ende

des Tunnels brillantes Röntgenlicht aufblitzt. Die Wellenlänge der Strahlung soll nur Bruchteile eines Millionstel Millimeters betragen und Forschern einen Einblick in kleinste Strukturen gewähren: in molekulare Prozesse und lebende Zellen. Physiker und Chemiker möchten mit dem Röntgenlaser zerstörerische Korrosionsvorgänge auf Oberflächen verfolgen, Biologen und Mediziner die Sauerstoffaufnahme von Myoglobin, das die Versorgung unseres Muskelgewebes sicherstellt.

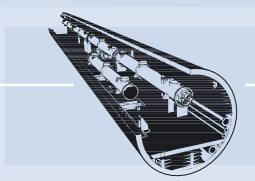
Egal ob als kilometerlanger Gigant oder als Däumling im heimischen CD-Laufwerk, Laser sind ganz besondere Lichtquellen. Im Unterschied zur herkömmlichen Glühbirne erzeugen sie einen einfarbigen, intensiven und gut gebündelten Lichtstrahl. Die Wellenlänge dieses Lichts ist dabei durch den Abstand der Energie-

niveaus der Atome im Lasermedium festgelegt. Durch das „Pumpen“ – der äußeren Zufuhr von Energie etwa durch eine gleißend helle Blitzlampe – werden Elektronen innerhalb der Atome auf höhere Energieniveaus angehoben. Bei der sogenannten „spontanen Emission“ fällt dann irgendeines dieser Elektronen plötzlich von einem höheren in einen niedrigeren Energiezustand zurück. Die dabei frei werdende Energie wird als Licht ausgesandt, dessen feste Wellenlänge gerade der Energiedifferenz zwischen den beiden betroffenen Niveaus entspricht. Damit die Lichtemission nicht wie bei einer Glühbirne zufällig und in beliebige Raumrichtungen erfolgt, lässt man das Licht zwischen zwei Spiegeln hin und her laufen. So durchquert es das Lasermedium immer wieder und es kommt zur „stimulierten Emission“, die Albert Einstein

Selbst staunende Kinderaugen sind in ihrer Wahrnehmung auf das sichtbare Licht mit Wellenlängen zwischen den 380 Nanometern von Blau-Violett und den 780 Nanometern des Tiefroten beschränkt. (Bild: Photo Case.com)

Zerlegung des Sonnenlichts durch Glasscheiben (Bild: _Lev_, Flickr.com)

Der Quotient aus der Geschwindigkeit v einer Welle und ihrer Frequenz f ergibt ihre Wellenlänge L (in Formelsprache $L = v / f$) – die Distanz zwischen zwei Wellenpunkten, die die gleiche Auslenkung sowie Bewegungsrichtung haben. Hier einige ausgewählte Beispiele zu diesem Kapitel.



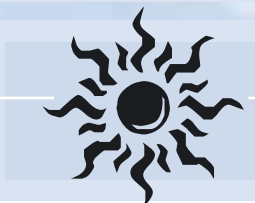
0,085 - 6 nm*

Arbeitsbereich des Röntgen-Lasers XFEL



310 nm*

Kurzwelligstes Licht, das eine Biene noch sehen kann



500 nm*

Hier liegt das Maximum der Strahlungsleistung der Sonne

* 1 Nanometer (nm) ist der millionste Teil eines Millimeters

bereits 1917 entdeckte. Ein Lichtteilchen kann dabei ein weiteres auslösen, das neben der Wellenlänge auch die Ausbreitungsrichtung mit dem ersten teilt und mit diesem im Takt schwingt. Unter geeigneten Umständen bringt jedes der beiden Lichtteilchen ein weiteres auf den Weg. Eine wahre Lichtlawine wird losgetreten. Ein Laser verstärkt also Licht, je nach verwendetem Material als Gas-, Halbleiter-, Farbstoff- oder Festkörperlaser. Das Lichtspektrum reicht dabei vom Mikrowellenbereich über sichtbares Laserlicht bis an die Grenze zur Röntgenstrahlung.

Bei dem Hamburger Röntgenlaser handelt es sich um eine völlig neue Strahlungsquelle. Hier sind keinerlei Atome oder Moleküle im Spiel, sondern einzig und allein Elektronen. Diese bewegen sich völlig ungebunden und laufen in kleinen Paketen

mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch die Anlage, die daher als Freie-Elektronen-Laser (FEL) bezeichnet wird. Da die Elektronen, die das Licht hervorbringen, keinen Beschränkungen durch atomare Energieniveaus unterliegen, ist die Wellenlänge des Lichts beim FEL frei einstellbar.

Die Idee zu einem solchen Laser ist langsam gewachsen. Am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) in Hamburg und in anderen Labors für Teilchenphysik hat man aus der Not eine Tugend gemacht. Sobald sich Elektronen in einem ringförmigen Teilchenbeschleuniger in die Kurve legen, gibt es Bremsverluste, ähnlich wie beim Kurvenabrieb eines Autoreifens. Die Elektronen strahlen Licht ab: die Synchrotronstrahlung. Und je schneller sie werden, umso größer wird der Energieverlust. Nähert sich ihr Tempo der Lichtge-

GUTARTIGER WELLENSALAT

Tagsüber kann man die Sterne nicht sehen, da ihr Funkeln im Sonnenlicht untergeht. Wenn Physiker schwache Signale angesichts eines derart hellen Vordergrunds aufspüren möchten, hilft ihnen die Mathematik. Als analytisches Werkzeug ist sie wie ein Sieb, das aus dem diffusen Licht einer fernen Galaxie einzelne Sterne hervorholt oder aus einem Röntgenbild die Struktur eines Virus herausliest.

Als besonders vielseitiges Hilfsmittel, um Muster in der Natur zu erkennen und regelmäßige Anteile aus veränderlichen Signalen herauszufiltern, hat sich die Fourier-Analyse erwiesen. Sie ist ein mathematisches Analogon zu unserem Innenohr, das den Schall in die verschiedenen Tonhöhen zerlegt. Oder zu einem Prisma, das weißes Licht in die Regenbogenfarben auffächert. Die Fourier-Analyse gestattet eine solche Frequenzaufspaltung für beliebige Schall-, Licht- oder Mikrowellen.

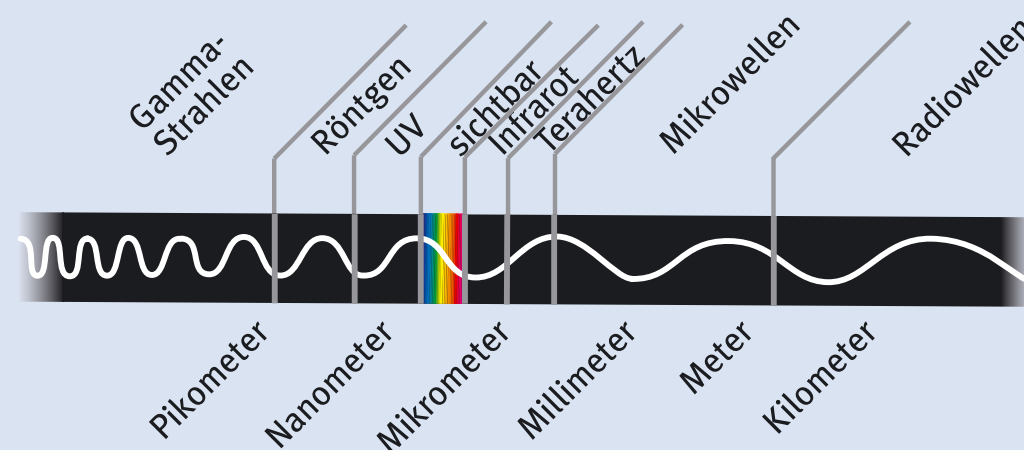
Der französische Mathematiker Joseph de Fourier postulierte zu Beginn des 19. Jahrhunderts, es sei möglich, jede periodische Funktion als Summe von einfachen Sinus- und Kosinusfunktionen aufzufassen. Die geschickte Wahl solcher Funktionen mit verschiedenen Frequenzen und Amplituden ersetzt demnach komplexe Graphen. Gerade so, wie auf der CD die Musik eines ganzen Orchesters durch die reinen (Sinus-)Töne von Stimmgabeln hervorgerufen werden kann.

Mathematiker protestierten zunächst heftig gegen die Vorstellung, man könne beliebige periodische Funktionen als Fourier-Reihe darstellen. Tatsächlich fanden sich Gegenbeispiele. Doch wie der schwedische Mathematiker Lennart Carleson nachgewiesen hat, braucht eine Funktion $f(x)$ nur „ein bisschen gutartig“ zu sein, und schon klappt es an fast allen Orten x mit der Darstellung. Ein beruhigendes Ergebnis. Denn ohne Fourier-Analyse wären viele medizinische Aufnahmen kaum interpretierbar.



☞ Infrarot-Aufnahme des Schichtvulkans Mount St. Helens, geschossen mit der ASTER-Kamera an Bord des NASA-Satelliten Terra. Gesunde Vegetation erscheint rot, Gestein grau und Wasser tief schwarz. (Bild: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, und U.S./Japan ASTER Science Team)

☞ Auch außerhalb des sichtbaren Spektrums bieten sich interessante Einblicke. So sind für Terahertz-Strahlen Papier und Kleidung vollkommen durchsichtig. Drogen, Haut oder, wie hier zu sehen, das Metall einer Pistole (rechte Brusthälfte) hingegen nicht. Unschädlich für die bestrahlten Materialien könnten T-Rays so in Zukunft beispielsweise Flugpassagiere durchleuchten. Supermans Röntgenblick jedenfalls war gestern. (Bilder: Jason C. Dickinson, Submillimeter-Wave Technology Laboratory, University of Massachusetts Lowell)



☞ Nur ein winziger Ausschnitt des gesamten elektromagnetischen Spektrums ist sichtbar. Weite Bereiche entziehen sich unserem Blick – auf der langwelligeren Seite zum Beispiel die Mikrowellen, auf der kurzwelligeren Seite das Röntgenlicht. (Grafik: ius)

INFO GRÜNZEUG IN INFRAROT

Pflanzen verwandeln Licht in chemische Energie – die berühmte Photosynthese. Aber sie verwerten nicht alle Wellenlängen des Sonnenlichts gleichermaßen. Möglicherweise würden sie sonst an Überhitzung zu Grunde gehen. Das Chlorophyll in den Blättern reflektiert einen Gutteil des grünen Lichts. Deshalb erscheint uns die Natur grün. Sehr viel stärker als grünes Licht reflektieren Pflanzen jedoch das energieärmere Infrarotlicht. So steigt ihr Reflexionsvermögen oberhalb einer Wellenlänge von etwa 700 Nanometern sprunghaft an. Beobachtet man die Erde vom Weltraum aus, wie Wissenschaftler dies etwa mit der Raumsonde „Galileo“ gemacht haben, kann man diese Signatur der Vegetation deutlich erkennen und darauf schließen, dass es auf unserem Planeten Photosynthese betreibende Lebewesen gibt. Astrobiologen hoffen, die infrarote Kante eines Tages auch im Lichtspektrum anderer Sonnensysteme zu entdecken – wenn es denn auf fernen Planeten tatsächlich so etwas wie Pflanzen geben sollte.

schwindigkeit, tritt in jeder Biegung Röntgenlicht aus.

Das von beschleunigten Elektronen emittierte Licht war am DESY über Jahrzehnte hinweg nicht gerne gesehen. Der für Hochenergieexperimente störende Bremsverlust hat sich jedoch als Segen für die Forschung erwiesen. Mittlerweile werden riesige Ringbeschleuniger umgebaut oder eigens zu dem Zweck errichtet, Synchrotronlicht zu liefern. Mit diesem Licht analysieren Materialforscher und Biologen am DESY oder am Berliner Speicherring BESSY inzwischen Werkstoffe und Biomoleküle. So deckten Forscher an DESYs kleinem Speicherring „Doris“ die komplexe Gestalt der Motorproteine auf, jener Eiweißmoleküle, die die Nähr- und Boten-



stoffe innerhalb der Zelle transportieren. Bei BESSY haben Archäologen mit Hilfe des Synchrotronlichts die 3600 Jahre alte „Himmelscheibe von Nebra“ durchleuchtet und rekonstruiert, in welchen Etappen dieses Kunstwerk seinerzeit angefertigt wurde.

Synchrotronstrahlungsquellen können zwar kurzwelliges Röntgenlicht erzeugen, allerdings handelt es sich dabei nicht um Laserlicht mit einer festen Wellenlänge. Eine Lichtverstärkung mit Hilfe von Spiegeln ist mit Röntgenlicht auch gar nicht ohne weiteres möglich. Es gibt keine geeigneten Spiegel für so hochenergetische Strahlung. Trotzdem lässt sich auch in einen Elektronenbeschleuniger ein Lichtverstärker einbauen.



Dazu bedarf es einer regelmäßigen Anordnung von Permanentmagneten, die auch als „sibirische Schlange“ oder „Undulator“ bezeichnet wird. Die Magnete sind in abwechselnder Nord-Süd-Ausrichtung aneinandergereiht. Laufen Elektronen im Pulk durch einen solchen Magnetstangenwald hindurch, müssen sie im Slalomkurs hin und her wedeln. Jeder Magnetpol zwingt sie „in die Kurve“, mal rechts und mal links. Bei jeder dieser Kursänderungen strahlen die Elektronen Synchrotronlicht aus, und zwar immer nach vorn in Richtung Ziel. Die streng periodische Abfolge der Magnete sorgt dabei für eine gute Bündelung der Lichtstrahlen. Wie erreicht man jedoch den für Laser typischen Verstärkungseffekt? Der Trick des FEL: die Überlagerung der wedelnden

☞ Retina Implantat der ersten Generation – nicht größer als eine Büroklammer. (Bild: Retina Stimulator Typ ELMA 1, BMBF Verbund RETINA IMPLANTAT AG 1 Ophthalmologie und Technik)



INFO LICHT INS DUNKEL

Unser Auge wandelt das Licht mit Hilfe von etwa 130 Millionen Fotorezeptoren in elektrische Signale um. Bei der unheilbaren Erbkrankheit Retinitis Pigmentosa sterben diese Zäpfchen und Stäbchen nach und nach ab. Die Signalübertragung zu den Nervenzellen bleibt jedoch intakt. Mediziner haben erste Versuche unternommen, die Sehzellen erblindeter Patienten durch winzige künstliche Fotodioden zu ersetzen. Das Implantat wird dazu unter der Netzhaut angebracht. Damit soll es eines Tages gelingen, die Nervenzellen wieder so zu stimulieren, dass im Gehirn ein Bild entsteht. Eine Schwierigkeit besteht darin, den erzeugten Strom ausreichend zu verstärken, sodass er die Nervenzellen tatsächlich reizt. Eine weitere Möglichkeit: die Fixierung von Elektroden direkt auf der Netzhaut. Bei diesem Retina-Implantat erhalten die Elektroden ihre Impulse von außen: Eine Kamera, die in eine Brille eingebaut ist, gibt die Bildinformationen an einen Datenwandler weiter. Dieser leitet sie dann per Funk ins Augenninnere.

SURFEN AUF DER GRÜNEN WELLE

Sich mit dem Auto durch den Stadtverkehr kämpfen, heißt dankbar sein für jeden Meter ohne Bremsmanöver. Voraussetzung dafür ist eine möglichst koordinierte Ampelschaltung. Die Grünphase muss mit derselben mathematischen Präzision durch die hintereinander gereihten Ampeln laufen wie der Kamm einer Wasserwelle durch einen Wellenkanal. Ist die Geschwindigkeit dieser „grünen Welle“ an die Verkehrssituation angepasst, können aus Autofahrern „Verkehrssurfer“ werden. Verbreitet sind grüne Wellen bei Tempo 50. Beträgt der Abstand zwischen den einzelnen Ampeln zum Beispiel 625 Meter, dann erwischt ein Fahrer immer wieder Grün, wenn alle Ampeln die Phasen Grün, Gelb, Rot, Rotgelb und wieder Grün in anderthalb Minuten einmal durchlaufen. Wer zu schnell fährt, den bestraft die nächste Kreuzung – und zwar mit einer nerven- und Kraftstoff zehrenden Rotphase.

Neben der Grundwelle gibt es auch bei grünen Wellen Sekundärwellen. Bei Tempo 50 ist die Geschwindigkeit der Sekundärwelle mit 17 Kilometern pro Stunde ziemlich klein. Radfahrer können sich in diese Welle einfädeln, für Busse oder Straßenbahnen ist sie zu langsam. Die erhalten aber ohnehin oft Vorrang vor den Pkw – und unterbrechen so den Verkehrsfluss durch den Ampelparcours, ebenso wie Zweite-Reihe-Parker oder abbremsende Abbieger.

Auch zu starkes Verkehrsaufkommen ist eher hinderlich, weil Pkw am Ende eines Pulks nicht mehr durch die Grünphase kommen. Im Berufsverkehr ist synchronisiertes Fahren daher immer noch die beste Methode, Staus zu vermeiden und möglichst lange mit der grünen Welle durch die Straßen zu gleiten.

↑ Von (1) nach (2) ist jede Ampel einmal umgesprungen – die „grüne Welle“ wandert weiter. Der Abstand zweier Ampeln gleicher Schaltung hat dabei den Charakter einer Wellenlänge. (Bild: ius)

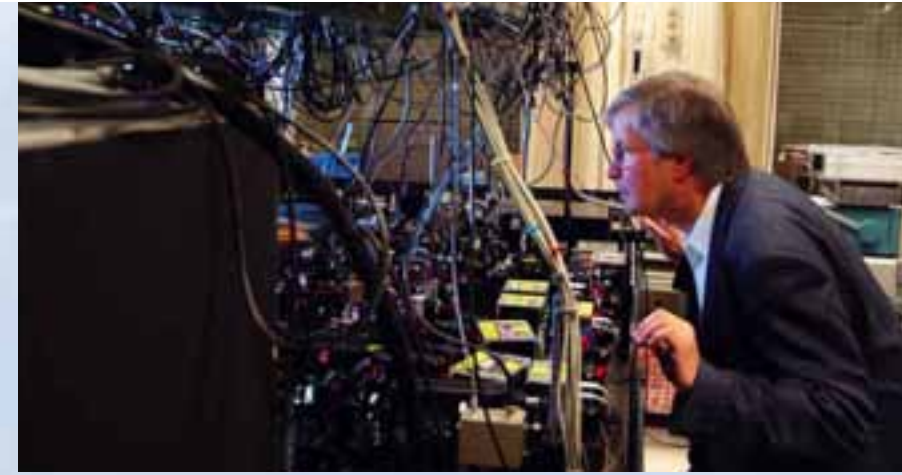
→ Diesen Laserstrahl schicken Forscher des „Starfire Optical Range“-Observatoriums im US-Bundesstaat New Mexico in den Nachthimmel, um Informationen über atmosphärische Turbulenzen zu gewinnen. Die Daten ermöglichen das Herausrechnen der Luftunruhe und damit unverzerrte Weltraum-Fotos mit der benachbarten Teleskopanlage. (Bild: USAF Research Laboratory)

brillanter Laserstrahlung – ganz ohne Spiegel.

Auf diese Weise einen Laserstrahl herzustellen, ist technisch aufwändig. Vor allem benötigt man dazu einen präzise justierten, gut gebündelten Elektronenstrahl. Milliarden Partikel müssen darin bei ein und derselben Energie in winzigen Paketen dicht beisammen bleiben. Am DESY will man dies mit supraleitenden Kammern erreichen: In den auf minus 271 Grad Celsius gekühlten **Resonatoren** kann die Beschleunigung der Elektronen nahezu ohne Stromverlust aufrechterhalten werden. Durch die linsenförmigen Hohlkörper surfen die Elektronen auf elektromagnetischen Wellen wie auf dem Kamm einer Meereswelle und werden auf der

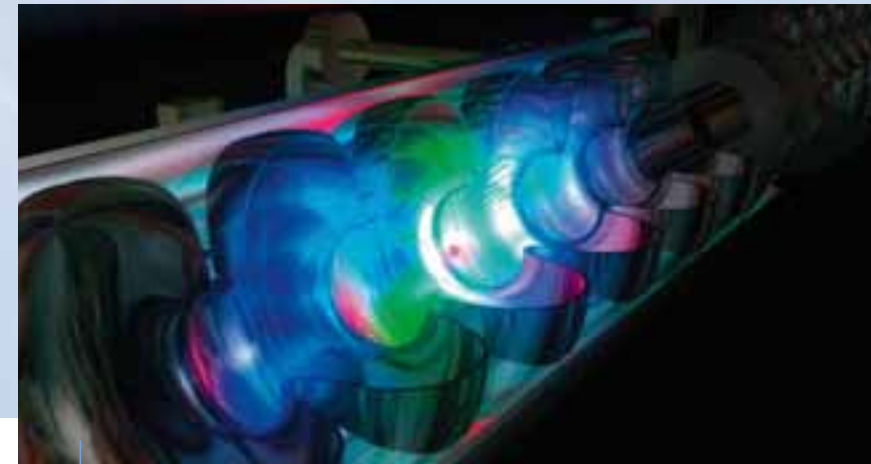
kilometerlangen Rennbahn schneller und schneller. Damit die Partikel anschließend auch im Undulator nicht von ihrer Bahn abkommen, müssen dessen Magnetblöcke auf wenige Mikrometer genau zusammengebaut werden.

Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker am DESY haben bereits viel versprechende Erfahrungen mit Pilotprojekten zum Freie-Elektronen-Laser gemacht. Eine 100 Meter lange Testanlage erzeugte im Jahr 2000 erstmals ultraviolettes Laserlicht. Sie wurde in den Jahren danach auf 260 Meter verlängert, um erste Messungen mit Röntgenlicht zu ermöglichen. Der endgültige Röntgenlaser XFEL wird dann Lichtblitze mit so kleiner Wellenlänge aussenden, dass man damit – ähnlich wie



↑ Nobelpreisträger Theodor Hänsch im Labor (Bild: LMU/MPQ)

↓ Elektromagnetische Felder beschleunigen die Elektronen in den supraleitenden Resonatoren. (Bild: DESY, Hamburg)



mit einer Hochgeschwindigkeitskamera – Veränderungen auf molekularer und atomarer Ebene zeitlich verfolgen kann.

Hohe Erwartungen an die Maschine haben insbesondere Biologen und Mediziner. Ihnen ist es bisher nur eingeschränkt möglich, die Struktur lebenswichtiger Moleküle zu entschlüsseln. Für die entsprechenden Röntgenaufnahmen müssen möglichst viele der normalerweise in Flüssigkeiten gelösten Moleküle zunächst verfestigt werden, damit sich die einzelnen Signale zu einem brauchbaren Bild verstärken. Diese zum Teil schwierige „Kristallisation“ könnte nun schon bald entfallen. Der neue Röntgenlaser soll Biomoleküle mit einem extrem kurzen Laserblitz abbilden. Seine Inten-

sität ermöglicht hochaufgelöste Bilder eines einzigen Molekülkomplexes, während die Blitzdauer von Bruchteilen einer Billionstel Sekunde eine Ablichtung der Probe garantiert, noch bevor diese von der Röntgenstrahlung zerstört werden kann. Selbst vergleichsweise große biologische Strukturen, etwa einzelne Viruspartikel, werden sich so im Detail auflösen lassen. Aber nicht nur isolierte Standbilder, auch ganze Filmsequenzen sind möglich. Viele aneinandergereihte Kurzzeitschnappschüsse könnten die Bewegung von Molekülen oder die molekularen Abläufe von Infektionen zeigen – so wie sie noch nie ein Mensch zuvor gesehen hat.

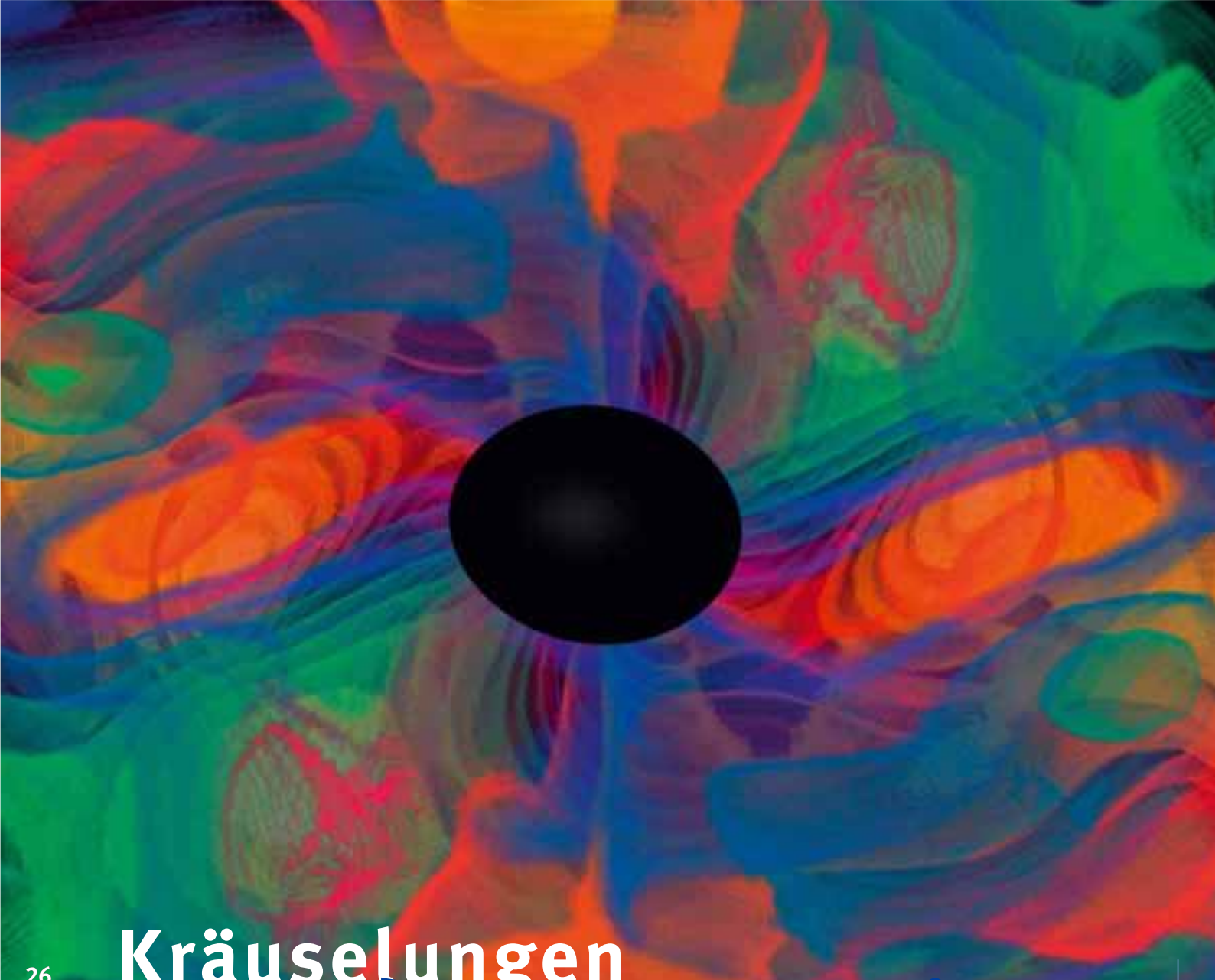
AM PULS DES LICHTS

Über die Beobachtung des Farbenspiels eines Prismas gelangte Isaac Newton zu einer neuen Theorie des Lichts. Das aufgefächerte Spektrum in all seinen Farben präzise zu vermessen, blieb späteren Forschern vorbehalten. So zum Beispiel dem deutschen Nobelpreisträger Theodor Hänsch.

In Heidelberg aufgewachsen, wandte sich Hänsch schon früh dem Laser und der Wechselwirkung zwischen Licht und Atomen zu. Er baute Farbstofflaser und fand heraus, wie sich Atome mit Laserlicht auf extrem tiefe Temperaturen abkühlen lassen. Sein Hauptinteresse aber galt der Frequenzbestimmung des Lichts. Dieses schwingt je nach Farbe unterschiedlich schnell, viele Billionen Mal pro Sekunde. Solch hohe Frequenzen misst Hänsch heute mit dem von ihm entwickelten Frequenzkammgenerator. Noch füllt das Gerät einen halben Labortisch. Die nächste Generation soll jedoch nicht größer als ein Schuhkarton sein.

Herzstück des Apparats ist ein Titan-Saphir-Laser. Er liefert Licht genau bekannter Frequenzen, das mit dem zu vermessenden Strahl zur Interferenz gebracht wird. Beide überlagern sich und erzeugen eine „Schwebung“ – eine deutlich langsamere Oszillation im Radiowellenbereich – deren Frequenz leicht bestimmt und mit der bekannten Frequenz des Titan-Saphir-Laserlichts abgeglichen werden kann. Ergebnis: die gesuchte Frequenz des dritten Strahls.

Beim Frequenzkamm wird nun ein sehr kurzer Laserpuls durch eine Quarzfaser geschickt, die das Licht wie ein Prisma in seine Regenbogenfarben zerlegt. Das entstandene Spektrum ist jedoch nicht kontinuierlich, sondern besteht aus Hunderttausenden feiner Linien, die nach Frequenzen angeordnet den Zinken eines Kamms ähneln. Die Frequenz jeder Lichtfarbe lässt sich so wie an einem Lineal ablesen. Solche Messungen ermöglichen u. a. synchronisierte Momentaufnahmen aus dem Inneren von Atomen.



Kräuselungen der Raumzeit

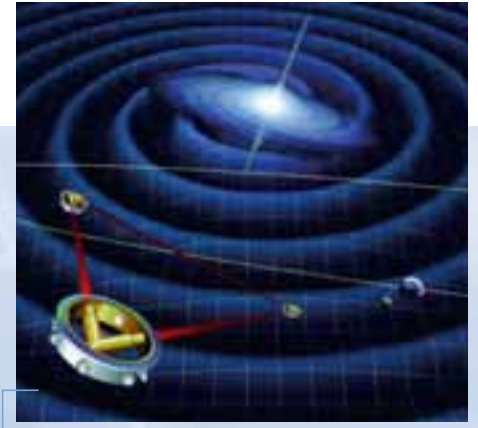
Wenn Raum und Zeit Falten schlagen, ist dies kaum wahrnehmbar. Mit gewaltigen Horchposten am Boden und im All wollen Forscher jetzt ganz genau hinhören.

Die beiden 600 Meter langen Gräben des „GEO 600“ liegen zwischen Weizenfeldern und Rübenäckern südlich von Hannover. Auf den ersten Blick weist nichts darauf hin, dass sich in den mit Wellblech abgedeckten Furchen eine der weltweit modernsten Forschungsanlagen verbirgt, entworfen, um die gewaltigsten Erschütterungen im Universum aufzuzeichnen: Explosionen von Sternen und Zusammenstöße von Schwarzen Löchern. Bei solchen Ereignissen breiten sich der Allgemeinen Relativitätstheorie zufolge Gravitationswellen im Kosmos aus wie

Wellen in einem Teich, in den man einen Stein geworfen hat. Sie verzerren Raum und Zeit.

Die Anlage hat im Mai 2006 in aller Stille den Dauermessbetrieb aufgenommen. Jetzt heißt es: Warten. Warten darauf, dass draußen im All etwas Welterschütterndes passiert. Dass zum Beispiel ein in die Jahre gekommener Stern in einer Supernova-Explosion seine äußeren Hüllen abwirft, wie dies 1987 in der Großen Magellanschen Wolke geschah. Sollte in naher Zukunft noch einmal eine so nahe Supernova aufblitzen, könnten Forscher mit dem Gravitationswellen-Detektor ein neues Fenster zum Universum aufstoßen. Nach vierjähriger Optimierungsphase steht die Apparatur kontinuierlich auf Empfang.

Gravitationswellen gehören zu den letzten noch nicht nachgewiesenen Erscheinungen, die die Allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt. Mit dieser Theorie entwarf Albert Einstein 1915 ein völlig neues Bild des Kosmos. Die Schwerkraft ist darin eine Eigenschaft von Raum und Zeit. Bersten massive Sterne oder kollidieren schwarze Löcher, so krümmen die beschleunigten Massen die sie umgebende Raumzeit. Diese Störungen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Wenn die Wellen schließlich auf der Erde eintreffen, dehnen oder stauchen sie auch hier den Raum. Allerdings nur um den Bruchteil des Durchmessers eines Atoms. Das macht Gravitationswellen so ungeheuer schwer messbar. Weltweit bemühen sich Wissenschaftler um einen direkten Nachweis der Wellen. Ein



Computer-Simulation zweier miteinander verschmelzender Schwarzer Löcher und der dabei abgestrahlten Gravitationswellen (Visualisierung: Ralf Kähler, Zuse-Institut-Berlin und Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik; Numerische Simulation: Ryoji Takahashi, Center for Computation & Technology at Louisiana State University)

Extraterrestrisches Wellenmeer: Die Ringe des Saturn werden von Kleinstmonden wie Janus und Pandora bzw. ihrer Anziehungskraft kräftig durchgeknetet. Die Folge: propellerförmige Dichtewellen, auf dieser Falschfarbenaufnahme der Raumsonde Cassini als Streifen erkennbar. (Bild: NASA/JPL/University of Colorado at Boulder)

Im Weltraum stationiert sollen die drei baugleichen Satelliten der „Laser Interferometer Space Antenna“ (LISA) nach Gravitationswellen horchen. (Bild: ESA)

Der Quotient aus der Geschwindigkeit v einer Welle und ihrer Frequenz f ergibt ihre Wellenlänge L (in Formelsprache $L = v / f$) – die Distanz zwischen zwei Wellenpunkten, die die gleiche Auslenkung sowie Bewegungsrichtung haben. Hier einige ausgewählte Beispiele zu diesem Kapitel.



13 km

Dichtewelle in der Cassini-Teilung der Saturnringe, ausgelöst durch den Mond Atlas



300 Mio. km*

Gravitationswelle, die zwei miteinander verschmelzende Schwarze Löcher aussenden

* dies entspricht in etwa dem Durchmesser der Erdbahn um die Sonne

Signal, das gleichzeitig an zwei oder drei Orten registriert würde, wäre ein starker Hinweis auf die feinen Kräuselungen des Raumes. Forscher der Universität Hannover und des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik in Golm lassen einen in zwei Teilstrahlen aufgespaltenen Laserstrahl durch senkrecht zueinander liegende Vakuumrohre laufen. Am Ende ihres Wegs werden die Strahlen von Spiegeln reflektiert. Die Laserstrahlen sind so genau justiert, dass sie auf den 600 Meter entfernten Spiegeln weniger als ein Zehntel des Durchmessers eines menschlichen Haars vom gewünschten Auftreffpunkt abweichen. In der Mitte der Anlage überlagern sie sich schließlich auf einem Photodetektor. Da die Lichtwellen im Gegentakt schwingen, löschen sie sich aus. Der Ausgang bleibt dunkel. Kommt dagegen eine Gravitationswelle daher, bringt sie die Strahlen aus dem Takt. Ein Signal wird sichtbar.

Die Apparatur muss außerordentlich empfindlich sein, um winzige Längenänderungen durch Gravitationswellen erkennen zu können. Das Laser-Interferometer reagiert dabei auf kleinste Erschütterungen. Der Strahlungsdruck des Lichts auf die Spiegel muss berücksichtigt werden, ebenso die Wärmebewegung der Atome im Spiegel. Heute können die Forscher mit ihrer Apparatur unter anderem verfolgen, wie stark die Brandung an der Nordsee ist – obwohl die Küste 300 Kilometer entfernt liegt.

Wie das erhoffte Gravitationswellensignal aussehen könnte, müssen die Wissenschaftler aus der Theorie ableiten. Auch das ist in Anbetracht der Komplexität der Einsteinschen Feldgleichungen kein leichtes Unterfangen. Während die Theoretiker versuchen, Kollisionen von schwarzen Löchern zu simulieren, lauschen die Experimentatoren den kosmischen Sphärenklängen. Und warten.

KOSMISCHER PAARTANZ

Albert Einstein war sich nicht sicher, ob es Gravitationswellen tatsächlich gibt. Heute zweifeln Kosmologen kaum noch daran. Für die Existenz der Wellen spricht unter anderem die Entdeckung und detaillierte Beobachtung des Doppel-Pulsars PSR1913+16, für die Russell Hulse und Joseph Taylor 1993 den Physik-Nobelpreis erhielten. Die beiden Neutronensterne von PSR 1913+16 umkreisen einander in einer mit der Zeit immer enger werdenden Spirale. Der Grund: Sie verlieren Energie. Und zwar gerade so viel, wie die Allgemeine Relativitätstheorie für ein Doppelsternsystem dieser Art erwarten lässt, das Gravitationswellen aussendet. Die Umlaufperiode der Neutronensterne stimmt bis auf weniger als ein Prozent genau mit den theoretischen Vorhersagen überein.

Auch darauf, dass bei der europäischen und der amerikanischen Weltraumbehörde irgendwann der gemeinsame Startschuss für ein noch präziseres Gravitationswellen-Experiment fällt: drei im Weltraum stationierte Satelliten, die zu dem noch größeren Laser-Interferometer LISA zusammengeschlossen werden sollen. Von 2015 an könnten die drei Satelliten hinter der Erde her fliegen und ein Dreieck mit fünf Millionen Kilometern Seitenlänge aufspannen – eine riesige Rennbahn für Laserlicht, gegen die alle denkbaren Messgeräte auf der Erde klein erscheinen. LISA würde damit mit einer bis dato unerreichten Empfindlichkeit auf vorbeiziehende Gravitationswellen reagieren.