

Didaktisches Material zu
diesem Beitrag:
www.wissenschaft-schulen.de

An der Schwelle zur Gravitationswellen- astronomie

VON PETER AUFMUTH

Ein weltweites Netz von Resonanzantennen und Laserinterferometern ist nun einsatzbereit und erwartet die Ankunft von Gravitationswellen, die erstmals direkt beobachtet werden sollen.

Der englische Physiker Isaac Newton (1643–1727) schloss aus der Beobachtung eines zu Boden fallenden Apfels, dass dafür eine Kraft verantwortlich sein müsse, die Gravitation. Sie stellt nach seiner Vorstellung eine Anziehungskraft zwischen allen Körpern dar und hängt von deren Massen und ihrem Abstand ab. Er erkannte, dass diese Kraft auch die Planeten auf ihrer Bahn um die Sonne hält. Kleine Differenzen zwischen Newtons Voraussagen und den immer genaueren astronomischen Beobachtungen (Stichworte: Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne; Periheldrehung des Merkur) führten Albert Einstein (1879–1955) zu einer radikal anderen

Sicht der Dinge. Mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie gab er vor 90 Jahren eine andere Erklärung der Gravitationswirkungen und schuf damit ein völlig neues Bild unserer Welt.

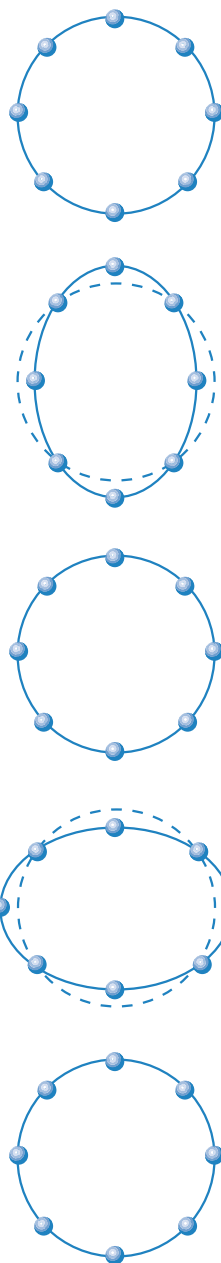
Massen krümmen den Raum

Während für Newton Raum und Zeit den starren Hintergrund aller physikalischen Vorgänge bildeten, erkannte Einstein, dass Raum und Zeit sich gegenseitig beeinflussen und am Geschehen teilnehmen. Insbesondere wird die Raumzeit durch die in ihr enthaltenen Massen verformt und erhält so eine Krümmung. Das kann man sich wie eine Bowlingkugel vorstellen, die eine Delle

in einem Trampolin erzeugt. Eine rollende Murmel zieht dann keine gerade Bahn über die Trampolinfläche, sondern läuft in die Delle hinein als würde sie von der Bowlingkugel angezogen. Die Gravitation ist demnach keine Kraft, sondern eine Eigenschaft des durch Massen veränderten Raums (Abb. 1). Der Grundgedanke der Allgemeinen Relativitätstheorie lässt sich in einem einfachen Satz ausdrücken: Die Verteilung der Materie bestimmt die Krümmung des Raums, und die Struktur des Raums bestimmt die Bewegung der Materie [1].

Da der Raum nur durch sehr große Massen merklich verformt wird, sind die aus dieser Vorstellung abgeleiteten Effekte im Alltagsleben sehr klein. Die Erde beispielsweise trägt nur ein Milliardstel zur ohnehin vorhandenen Krümmung bei. Nicht nur massive Körper, sondern auch Lichtstrahlen müssen

◀ Abb. 1: Massen krümmen den Raum, der hier der Anschaulichkeit halber als zweidimensionales Analogon dargestellt ist. Die Bahn anderer Massen (oder von Lichtstrahlen) wird durch die erzeugte Krümmung beeinflusst und abgelenkt. So entsteht der Eindruck einer anziehenden Kraft zwischen den Massen. (Bild: AEI/SuW)



▲ Abb. 2: Wirkung einer senkrecht einfallenden Gravitationswelle auf einen Kreis aus frei fallenden Testmassen; der zeitliche Verlauf ist von oben nach unten dargestellt. Der Kreis wird periodisch zu einer Ellipse verzerrt. Nach einer halben Periode wirkt die Welle senkrecht zur vorigen Richtung. (Bild: AEI)

de zwischen den darin enthaltenen Objekten. Man betrachte einen Kreis von frei fallenden Testmassen (Abb. 2), auf die also keine Kräfte wirken. Für einen entfernten Beobachter, auf den die Welle nicht wirkt, verformt sich dieser Kreis zu einer Ellipse; für einen nahen Beobachter verändert sich scheinbar nichts. Fixiert man die Testmassen oder betrachtet man einen ausgedehnten Festkörper, so wirkt sich der Durchgang der Wellen als Gezeitenkraft aus, die den Körper periodisch verzerrt.

Ein sanftes Plätschern

Leider ist diese Verzerrung winzig. Einstein berechnete 1918, dass die Amplitude von Gravitationswellen von der zeitlichen Änderung des Quadrupolmoments der Quelle abhängt. Darunter versteht man die Abweichung des Systems von der Kugelsymmetrie. Zur Erzeugung nennenswerter Amplituden sind deshalb massereiche Systeme mit großen Quadrupolmomenten nötig, die sich zeitlich sehr schnell ändern. Es erscheint daher völlig aussichtslos, im Labor erzeugte Gravitationswellen nachweisen zu wollen; die beteiligten Massen sind viel zu klein. Als Quellen von Gravitationswellen kommen nur die energiereichsten und heftigsten astrophysikalischen Ereignisse in Frage: der einer Supernovaexplosion vorangehende Kollaps eines ausgebrannten Sterns, die Verschmelzung von Neutronensternen oder Schwarzen Löchern, Schwingungen und Rotationen von Neutronensternen und Vorgänge während des Urknalls und unmittelbar danach [3].

Selbst im günstigsten Fall einer stark asymmetrischen Sternexplosion in unserer Milchstraße, verändert die Gravitationswelle den Abstand zwischen Erde und Sonne (150 Millionen Kilometer) nur um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms. Für kürzere Strecken ist die Änderung entsprechend kleiner: Eine einen Kilometer lange Messstrecke ändert sich nur um den Durchmesser eines Protons. Möchte man auch Quellen in unseren Nachbargalaxien (z.B. im Virgo-Haufen) beobachten, so muss man fähig sein, noch tausendmal kleinere Effekte nachzuweisen. Das verdeutlicht die Schwierigkeiten einer direkten Beobachtung von Gravitationswellen.

Die von kosmischen Quellen ausgehende Strahlungsleistung kann dabei durchaus sehr hoch sein. Bei einer typischen Supernova in der Nähe unserer Galaxis, wie der Supernova 1987A (siehe Abb. 4 auf S. 47 in diesem Heft) in der 160 000 Lichtjahre entfernten Großen Magellanschen Wolke, trifft auf der Erde ein Gravitationswellen-»Blitz« ein, dessen Strahlungsleistung hundertmal so

der Krümmung des Raums folgen. Als der britische Astronom Arthur S. Eddington (1882–1944) im Jahr 1919 bei einer totalen Sonnenfinsternis nachweisen konnte, dass Lichtstrahlen an der Sonne in dem von Einstein vorhergesagten Ausmaß abgelenkt werden, war dies die erste Bestätigung für Einsteins Theorie. Sie hat bis heute alle experimentellen Tests mit Glanz bestanden und ist die Basis für unser heutiges Modell des Universums.

Die Welt als Wackelpudding

Da sich alle Sterne und Galaxien bewegen, verändert sich mit ihnen ständig auch die geometrische Struktur des Raums. Die von bewegten Massen erzeugten Änderungen in der Krümmung des Raums beeinflussen nach und nach die nähere und die weitere Umgebung, wie ein in einen Teich geworfener Stein nach kurzer Zeit die gesamte Wasseroberfläche in Schwingung versetzt. So entsteht eine Störung in der Geometrie des Raums, die sich mit Lichtgeschwindigkeit wellenförmig nach allen Seiten ausbreitet: eine Gravitationswelle. Einstein sagte die Existenz von Gravitationswellen als Konsequenz der Allgemeinen Relativitätstheorie schon im Jahre 1916 voraus [2]. Er erkannte auch, dass der Effekt winzig ist, und befürchtete, dass man sie nie würde nachweisen können.

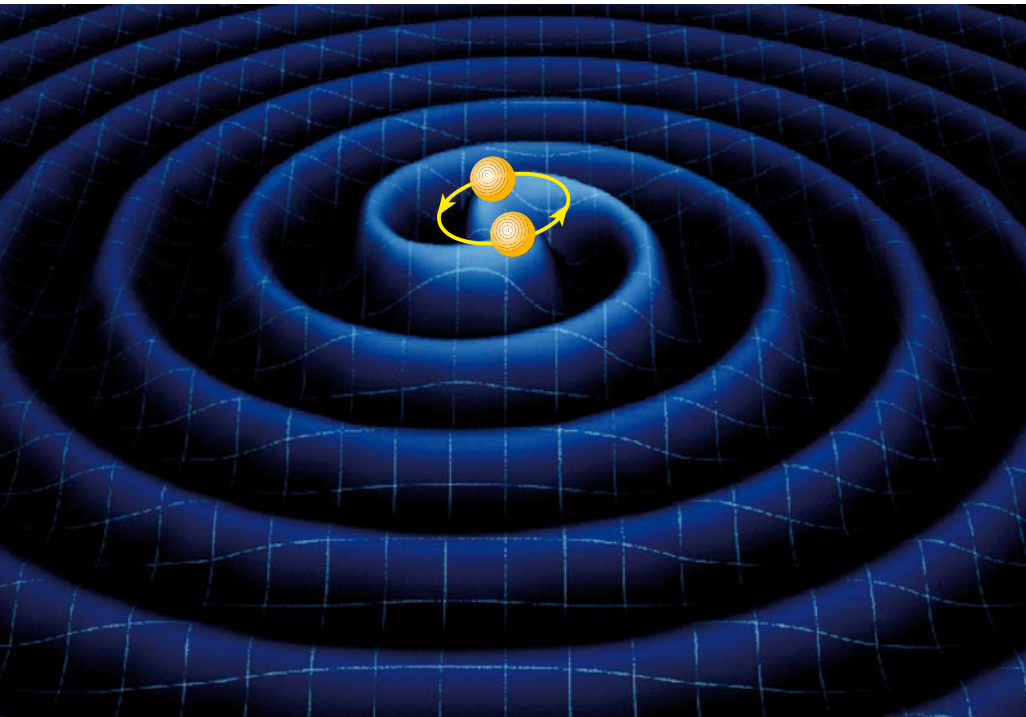
Wie wirkt sich der Durchgang einer solchen Welle aus? Eine Gravitationswelle erzeugt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung periodische Dehnungen und Stauchungen in der Struktur der Raumzeit und verändert so die Abstände

Wert deutlich ab: Diese Diskrepanz ist nur im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie zu erklären.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht **w i s**

Mit Hilfe der ausführlichen WiS!-Materialien zu diesem Beitrag (www.wissenschaft-schulen.de) lässt sich die Lichtablenkung von Hintergrundsternen im Schwerfeld der Sonne an Hand der Originalbeobachtungen Arthur Eddingtons im Unterricht ausmessen. Das Ergebnis weicht von dem nach den Formeln der klassischen Mechanik gewonnenen



▲ Abb. 3: Gravitationswellen sind Änderungen in der Struktur der Raumzeit (hier schematisch dargestellt). Typische Quellen sind Doppelsternsysteme aus kompakten Objekten. (Bild: AEI)

groß ist wie diejenige der Sonne am Erdboden. Dennoch bewirkt dieser Puls nur die oben erwähnte winzige Abstandsänderung. Das ist eine Folge der geringen Wechselwirkung zwischen Gravitonen und Materie.

Astronomie mit Gravitationswellen

Andererseits erweist sich gerade diese Tatsache als Vorteil gegenüber der klassischen Astronomie mit Licht und Radiowellen. Gravitationswellen sind ideale Informationsträger, da sie (bis auf die entfernungsabhängige Abschwächung) völlig unverändert beim Empfänger ankommen. Weite Teile des Universums werden von Dunkelwolken verdeckt und bleiben so der Beobachtung durch klassische astronomische Techniken verborgen. Gravitationswellen hingegen durchdringen solche Wolken ungehindert und werden uns daher Einblicke in bisher verschlossene Bereiche des Weltalls liefern. Das Ziel der Gravitationswellenforschung ist deshalb eine neue Art der beobachtenden Astronomie.

Mit Hilfe von Gravitationswellen erhält man ganz andere Informationen über astrophysikalische Prozesse als mit elektromagnetischen Wellen. Bei einer Supernova zum Beispiel beobachtet man mit herkömmlichen Methoden den Lichtblitz und kann aus der Abklingkur-

ve Informationen über die Beiträge der beteiligten Elemente zu diesem Lichtblitz entnehmen. Im Gravitationswellensignal spiegeln sich dagegen die Details des vorhergehenden Kollaps wider, beispielsweise dass der massive Kern des Sterns wegen der üblichen Abplattung in polarer Richtung schneller zusammenstürzt als in äquatorialer Richtung und dass dieser durch den anschließenden Rückstoß in abklingende Schwingungen versetzt wird.

Das gesamte Universum ist transparent für Gravitationswellen, sodass uns auch Gravitationsstrahlung erreicht, die beim Urknall entstanden ist. Das früheste Licht, das uns erreicht (das ist die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung), stammt aus einer Zeit als das Universum 380 000 Jahre alt war. Gravitationswellen dagegen können ein Bild des Universums liefern, wie es im Alter von gerade mal 10^{-24} Sekunden ausgesehen hat.

Je nach dem zeitlichen Verhalten der Quellen gibt es Gravitationswellen in einem außerordentlich breiten Frequenzbereich. In der Frühzeit des Universums könnten kosmische Strings oder topologische Defekte Gravitationswellen erzeugt haben. Das Spektrum dieser Strahlung reicht von 10^{-16} bis 10^4 Hertz; sie bildet einen isotropen stochastischen Hintergrund, wie man ihn auch im Radiobereich kennt. Im Millihertzbereich (10^{-3} bis 1 Hertz) liegen quasiperiodische Signale von Binärsystemen aus Schwarzen Löchern aller Größe und aus Weißen Zwergen. Ähnliche Signale von Systemen aus Neutronensternen liegen im Bereich von einigen hundert Hertz. Schnell rotierende Pulsare erzeugen periodische

Signale im Bereich von einigen 100 Hertz bis 1.5 Kilohertz. Schließlich erwartet man von Supernovae oder verschmelzenden Binärsystemen einen Impuls im Kilohertzbereich.

Ein Großteil der beobachtbaren Frequenzen liegt also im Hörbereich. Man kann die Signale verstärken, auf einen Lautsprecher geben und so den Lärm des Universums buchstäblich hörbar machen.

Kosmisches Ballett

Wenn sich zwei Sterne umkreisen, strahlen sie Energie in Form von Gravitationswellen ab (Abb. 3). Dies führt dazu, dass die beiden Sterne näher zusammenrücken und dann (wegen der Erhaltung des Drehimpulses) schneller um einander laufen. Die beiden amerikanischen Astronomen Russell Hulse und Joseph Taylor entdeckten 1974 ein PSR 1913+18 genanntes System, in dem sich zwei Neutronensterne umkreisen. Es handelt sich dabei um Sterne mit 1.4 Sonnenmassen, die jedoch nur 20 Kilometer Durchmesser haben und sich mit einer Periode von acht Stunden umkreisen. Einer der beiden Neutronensterne sendet regelmäßig Radioimpulse aus. Dies erlaubt es, die Umlaufzeit sehr genau zu bestimmen.

Hulse und Taylor studierten dieses Binärsystem über viele Jahre hinweg (bis heute!) und stellten fest, dass sich die Umlaufzeit fortwährend verringert – seit Beginn der Beobachtungen um mehr als 35 Sekunden. Dies lässt sich durch den Energieverlust erklären, den die Abstrahlung durch Gravitationswellen verursacht. Die Beobachtungen stimmen mit den Vorhersagen der Einsteinschen Theorie exakt überein [4]. Dies gilt als indirekter Nachweis von Gravitationswellen und bestätigt ein weiteres Mal die Richtigkeit der Einsteinschen Auffassung von Gravitation. Hulse und Taylor erhielten dafür 1993 den Nobelpreis für Physik. Damit könnte man sich zufrieden geben, aber für den Experimentator stellt sich die Frage: Wie kann man die durch Gravitationswellen verursachten unvorstellbar winzigen Effekte direkt messen?

Resonanzantennen

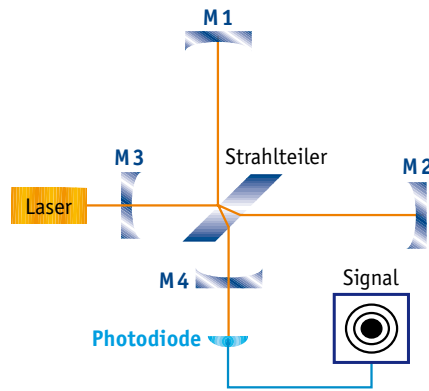
Die ersten Versuche unternahm Mitte der 1960er Jahre der US-amerikanische Physiker Joseph Weber (1919–2000) in Maryland. Der eigentliche Empfänger war ein anderthalb Tonnen schwerer Zylinder aus Aluminium. Ein solcher Körper hat eine Eigenfrequenz, die von seiner Masse abhängt; in diesem Fall beträgt sie ein Kilohertz. Im Resonanzfall, das heißt bei passender Frequenz, würde ein durchlaufender Gravitationswellenpuls doch ein wenig Energie abgeben und den Zylinder

kurzzeitig in Schwingung versetzen wie ein Hammer eine angeschlagene Glocke. Mit aufgeklebten Piezoelementen wollte Weber dann den Nachhall der Welle messen [5].

Heute weiß man, dass die damalige Technologie noch längst nicht so weit war, die benötigte Empfindlichkeit zu erreichen. Immerhin gaben Webers Versuche den Anstoß für weitere Forschergruppen, sich mit dem Bau von Gravitationswellenempfängern zu befassen und die Nachweisteknik zu verbessern. In den letzten Jahren konnte die Empfindlichkeit von Zylinderantennen durch Tiefkühlung und supraleitende Verstärker um das Hunderttausendfache gesteigert werden. Es gibt zur Zeit vier solcher Anlagen, die einen Gravitationswellenstoß aus der Milchstraße durchaus nachweisen könnten: ALLEGRO in den USA, AURIGA und NAUTILUS in Italien sowie EXPLOERER in der Schweiz.

Um die Richtungsabhängigkeit der Zylinderantennen zu umgehen, hat man seit einigen Jahren auch kugelförmige Empfänger aufgebaut: MiniGRAIL in den Niederlanden und MARIO SCHENBERG in Brasilien. Beide Anlagen setzen eine Kugel von 68 Zentimeter Durchmesser aus einer CuAl(6%)-Legierung und mit einer Masse von 1.4 Tonnen ein; die Eigenfrequenz liegt bei 2.9 Kilohertz.

Alle Resonanzantennen arbeiten unter dem Dach der »International Gravitational Event Collaboration« (IGEC) zusammen. Der Nachteil dieser Antennen ist ihre geringe Bandbreite. Mit Zylindern



erreicht man bestenfalls eine Bandbreite von 100 Hertz, mit Kugeln 230 Hertz. Da das Spektrum der Gravitationswellen aber einen sehr großen Wellenlängenbereich umfasst, machte man sich schon Anfang der 1970er Jahre um alternative Messverfahren Gedanken.

Laserinterferometer

Eigentlich handelt es sich beim Nachweis von Gravitationswellen »nur« um eine Längenmessung, nämlich um die Änderung zweier vorgegebener Messstrecken, die senkrecht zueinander stehen (siehe Abb. 2). Dafür ist ein Michelson-Interferometer das geeignete Instrument (Abb. 4): Ein halbdurchlässiger Spiegel teilt einen Lichtstrahl in zwei senkrecht zueinander verlaufende Teilstrahlen gleicher Intensität auf. Die beiden Teilstrahlen durchlaufen die Messstrecken (»Arme«), werden an den Enden reflektiert und wieder überlagert. Sind beide Strecken gleich lang, so schwingen die Lichtwellen im Gleichtakt

Abb. 4: Schema eines Michelson-Interferometers. Die Interferenzfigur auf dem Schirm hängt vom Winkel ab, unter dem die Lichtstrahlen auftreffen. Man sieht abwechselnd helle und dunkle Kreise, weil die Anordnung rotationssymmetrisch um die Achse des Laserstrahls ist. Die Anlage wird so eingestellt, dass das Signal am Ausgang dunkel ist (die dunkle Mitte). Alles Licht läuft dann zum Laser zurück und wird mit dem Spiegel M3 erneut ins Interferometer geschickt (»Photonen-Recycling«). Der Spiegel M4 dient der Signalüberhöhung. (Bild: AEI)

Abb. 5: Luftbild von GEO600. Rechts der Bildmitte das Zentralhaus (Pfeil) mit Laser, Strahlteiler und Signalaufnahme; die 600 Meter langen Messstrecken verlaufen nach rechts oben und nach links, es handelt sich dabei um evakuierte Rohre, die in einem Graben aufgehängt sind; an den Enden stehen Häuser für die Endspiegel. Die Anlage befindet sich in Ruthe, südlich von Hannover. GEO 600 ist ein deutsch-britisches Gemeinschaftsprojekt in Zusammenarbeit der Universitäten von Hannover, Glasgow und Cardiff. (Bild: Deutsche Luftbild, Hamburg)





und verstärken sich. Man stellt die Anlage aber so ein, dass die überlagerten Wellen im Gegentakt schwingen, also jeweils Wellenberg auf Wellental trifft. Die Wellen löschen sich dann aus, und der Ausgang des Interferometers bleibt dunkel. Verändert jetzt eine Gravitationswelle die Länge der beiden Messstrecken, so kommen die Teilstrahlen außer Takt, so dass sie sich nicht mehr vollständig auslöschen und am Ausgang ein schwaches Lichtsignal erscheint.

Überall an der Grenze des Machbaren

Die Empfindlichkeit eines solchen Detektors hängt von der Länge der Messstrecken und von der umlaufenden Lichtleistung ab. Der deutsch-britische Detektor GEO 600 beispielsweise hat 600 Meter lange Messstrecken und arbeitet mit einer umlaufenden Lichtleistung von 10 Kilowatt (Abb. 5). Nach mehr als dreißigjähriger Entwicklungszeit ist er heute imstande, Längenänderungen von 3×10^{-19} Metern nachzuweisen. Damit ist er milliardenmal besser als Michelsons Originalinterferometer, das übrigens im Jahr 2005 seinen 125. Geburtstag feierte.

Um derart winzige Längenänderungen nachweisen zu können, werden höchste Anforderungen an die benutzten optischen Komponenten gestellt. Vieles musste völlig neu entwickelt oder beträchtlich weiterentwickelt werden. Kein handelsüblicher Laser war stabil genug, um den Anforderungen eines Gravitationswellendetektors zu genügen. Die

Stabilitätsanforderungen beziehen sich dabei auf alle Laserparameter: Leistung (Helligkeit), Frequenz (Farbe), räumliches Strahlprofil (kreisförmige Leistungsverteilung), sowie Verlässlichkeit und Wartungsfreundlichkeit. Ein solcher Laser wurde gemeinsam von der Universität Hannover, dem Laserzentrum Hannover und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching entwickelt.

Die optischen Komponenten (Spiegel und Strahlteiler) müssen praktisch absorptionsfrei sein, weil sie sich sonst erwärmen und verziehen (»thermische Linse«). Speziell für GEO 600 entwickelte die Firma Heraeus ein Quarzglas, das hundertmal weniger absorbiert als alle bisherigen Gläser (der Absorptionsgrad ist kleiner als ein Millionstel pro cm Weg). Die Oberfläche der daraus gefertigten Komponenten muss perfekt eben sein, um Streulicht zu vermeiden. Heute gelingt es, die Rauigkeit der Oberfläche eines 25-cm-Spiegels auf atomares Niveau zu beschränken (mittlere Rauigkeit: 0,1 Nanometer).

Um die Streuung des Laserstrahls an den Luftmolekülen und die Einkopplung von akustischen Störungen zu vermeiden, müssen die optischen Aufbauten in Vakuumtanks untergebracht werden; die Messstrecke selbst verläuft in evakuierten Rohren (Abb. 6). Die Hauptstörquelle bilden aber Bodenerschütterungen aller Art: Vibrationen von technischen Geräten, Fahrzeuge, die sich an der Anlage vorbei bewegen, die Meeresdünung und Erdbeben aller Art. Das erzeugt Ausschläge,

▲ Abb. 6: Blick in das Zentralgebäude von GEO 600. Strahlteiler und Spiegel sind in Vakuumtanks untergebracht, um akustische Störungen auszuschließen. Das nach rechts verlaufende Rohr stellt den Beginn der 600 Meter langen Messstrecke dar. Alle Arbeiten an der Anlage müssen unter Reinraumbedingungen erfolgen. (Bild: AEI)

die Milliarden Mal so groß sind wie die zu messenden Signale. Man darf die Spiegel daher nicht fest montieren, sondern hängt sie als mehrstufige Pendel auf (Abb. 7). So werden alle Schwingungen oberhalb der Eigenfrequenz des Pendels stark gedämpft, und auf die Spiegel wirkt nur noch die Gravitationswelle.

Ein weltweites Netz

Weltweit gibt es fünf große Laserinterferometer zum Gravitationswellennachweis: Zwei Anlagen mit vier Kilometer langen Messstrecken in den USA (LIGO), eine Anlage mit drei Kilometer Armlänge in Italien (VIRGO), eine mit 600 Metern in Deutschland (GEO 600) und eine mit 300 Metern in Japan (TAMA 300) [6].

Sind so viele teure Anlagen überhaupt notwendig? Ja, denn die verschiedenen Projekte sind aufeinander angewiesen. Die Daten eines einzelnen Detektors haben für pulsartige Signale keine besondere Aussagekraft. Erst in Koinzidenz mit einem weit entfernten Detektor kann man sicher sein, keinen lokalen Stö-

rungen aufgefressen zu sein. Um auch Informationen über den Ort der Quelle zu erhalten, benötigt man eine dritte Anlage, sodass man aus den Ankunftszeiten der Welle die Richtung ermitteln kann. Schließlich ist ein vierter Detektor nötig, um Zeitstruktur und Schwingungsform der Welle besser bestimmen zu können. Die bestehenden Projekte haben deshalb eine enge Zusammenarbeit vereinbart: Im Rahmen der »LIGO Scientific Collaboration« (LSC) werden die Beobachtungszeiten abgestimmt, alle Messdaten ausgetauscht und ausgewertet sowie die Ergebnisse gemeinsam veröffentlicht.

Seit 2002 haben mehrere mehrwöchige Messperioden stattgefunden, die zur Zeit ausgewertet werden (Abb. 8). LIGO und GEO 600 haben Anfang 2006 die geplante Empfindlichkeit erreicht und sind zu Dauermessungen übergegangen; VIRGO will sich ab 2007 daran beteiligen. Jedermann kann sich übrigens von zuhause aus an der Auswertung der Messdaten beteiligen, indem er im Rahmen des Projekts »Einstein@Home« die nicht genutzte Kapazität des eigenen PCs dem LIGO-Rechenzentrum überlässt.

Status und Aussichten

Es wurden bisher noch keine Gravitationswellen mit Sicherheit nachgewiesen. Das liegt daran, dass beobachtbare Ereignisse in unserer Galaxis selten sind und die Empfindlichkeit für Signale aus Nachbargalaxien gerade so ausreicht. Die Reichweite der Detektoren für die Beobachtung von Neutronensternsystemen liegt derzeit bei etwa 40 Millionen Lichtjahren. Der so zugängliche Teil des Universums umfasst einige Dutzend Galaxien. Die Detektoren werden daher laufend verbessert; bis zum Jahr 2013 hofft man, die nächste Generation in Betrieb nehmen zu können. Sie soll die Empfindlichkeit um einen weiteren Faktor 10 verbessern. Das bedeutet, dass sich das Beobachtungsvolumen um einen Faktor 1000 vergrößert. (Hier zählt sich aus, dass man Amplituden misst und keine Intensitäten wie sonst.)

Der Fortschritt wird durch die Weiterentwicklung bestehender und durch den Einsatz neuer Konzepte ermöglicht. In Hannover ist es gelungen, einen Laser mit der 20-fachen Leistung der bisher genutzten zu entwickeln, der in den nächsten Generationen der deutschen und amerikanischen Gravitationswellendetektoren (GEO-HF, Advanced LIGO) eingesetzt wird. Ferner hat man erstmals gezeigt, dass sich mit »gequetschtem« Licht die Messempfindlichkeit von Interferometern weiter steigern lässt (bisher um einen Faktor 2). Dabei wird durch nichtlineare Kristalle das Quantenrauschen des Lichts

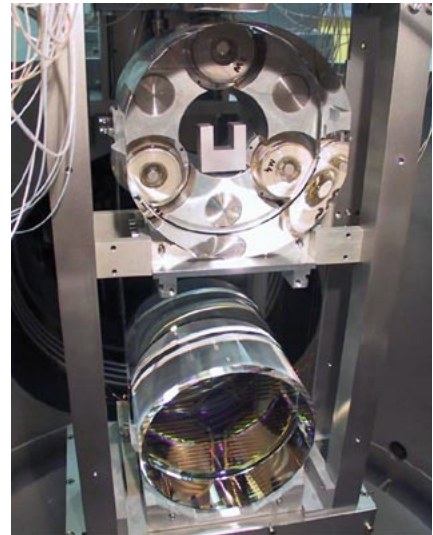
so umverteilt, dass sich einige Messgrößen genauer bestimmen lassen, auf Kosten weniger interessanter Größen.

Die Beobachtungsmöglichkeiten auf der Erde sind leider prinzipiell begrenzt: Niederfrequente Gravitationswellen (unterhalb von zehn Hertz) kann man wegen der in diesem Frequenzbereich nicht hinreichend unterdrückbaren seismischen Störungen mit irdischen Detektoren nicht nachweisen. Deshalb ist die »Laser Interferometer Space Antenna« (LISA) geplant.

Ein Horchposten im All

Es handelt sich um drei Satelliten, die im Abstand von fünf Millionen Kilometern als Dreieck angeordnet sind und Laserstrahlen austauschen (Abb. 9). Die Eckpunkte des Dreiecks werden durch hochpolierte Würfel (»Testmassen«) aus einer Au/Pt-Legierung definiert, die frei im Satelliteninnern fliegen. Das einfallende Laserlicht wird daran reflektiert, verstärkt und wieder zum Ausgangssatelliten zurückgeschickt. Das LISA-Dreieck folgt der Erde in 50 Millionen Kilometern Abstand auf ihrer Bahn um die Sonne. Das gemeinsame Projekt von NASA und ESA soll 2016 die Arbeit aufnehmen. LISA und die irdischen Detektoren ergänzen sich in ihren Beobachtungsbereichen.

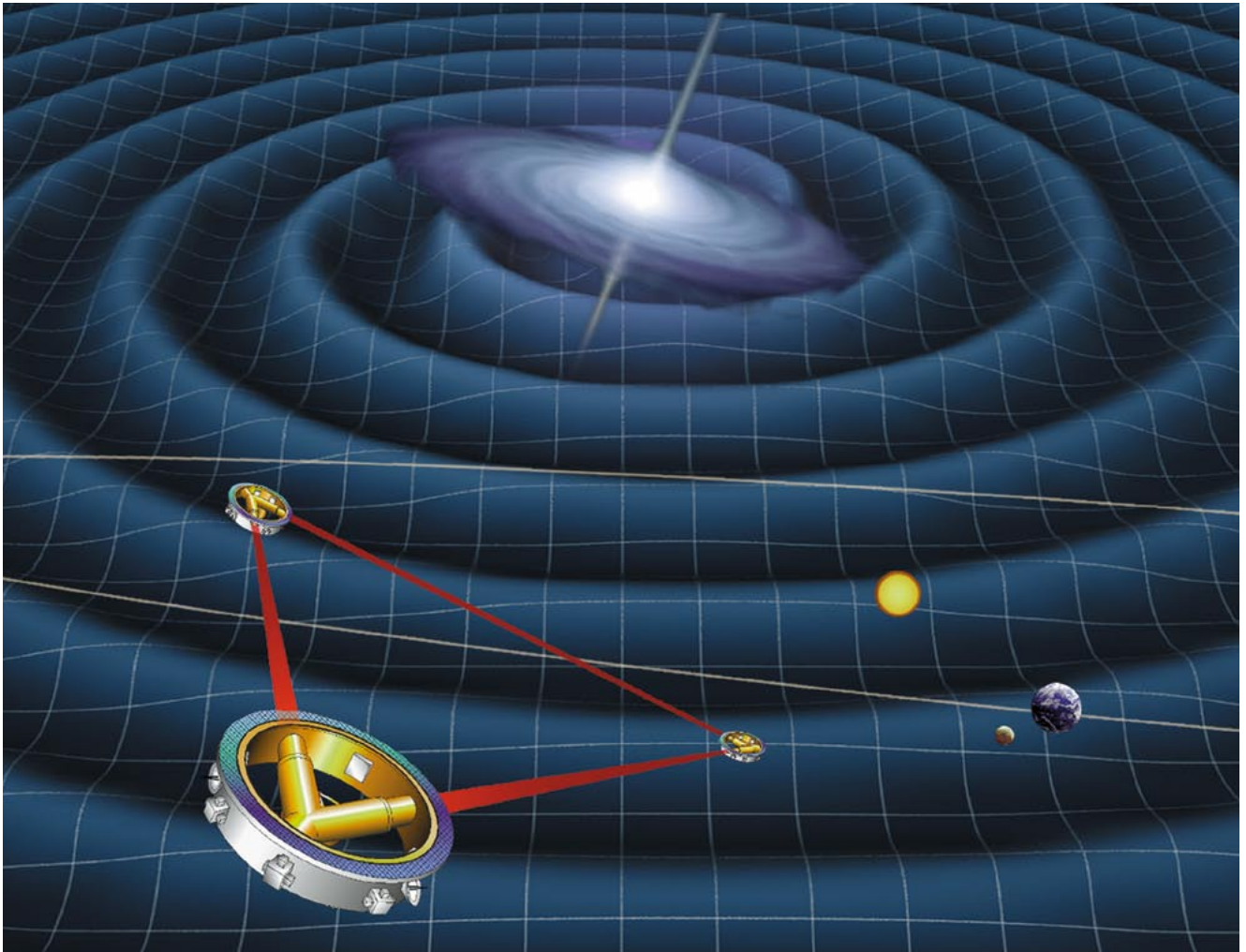
Zuvor werden jedoch mit der ESA-Mission »LISA Pathfinder« die Technologien der Mess- und Kontrollsysteme im Weltraum getestet. Hierzu dient ein Modell, bei dem die LISA-Arme auf 30 Zentimeter geschrumpft sind, sodass beide Testmassen in einen Satelliten passen. Die optische Bank mit den Interferome-



▲ Abb. 7: Die optischen Komponenten von GEO 600 sind in Form von Dreifachpendeln aufgehängt. Die Aufhängung besteht aus selbst gezogenen Quarzglasfasern, die seitlich an den Spiegeln befestigt sind. Durch die gläserne Zwischenmasse (oben) sieht man drei Aktuatoren (auf die Masse geklebte Magnete ragen in dahinter liegende Spulen), mit denen der Spiegel (unten) justiert werden kann. (Bild: AEI)

▼ Abb. 8: Blick in den Kontrollraum von GEO 600. Der mittlere Monitor in der oberen Reihe zeigt das Ausgangssignal des Interferometers. Einstein ist immer dabei... (Bild: AEI)





▲ Abb. 9: Die drei LISA-Satelliten folgen der Erde auf ihrem Lauf um die Sonne. Der Abstand der Satelliten voneinander wird durch frei fliegende Testmassen (Au/Pt-Würfel) in ihrem Inneren bestimmt. Die Satellitenhülle dient der Abschirmung der Testmassen von Sonnenwind und Strahlungsdruck; sie wird durch kleine Ionentriebwerke nachgeführt. (Bild: NASA/JPL/AEI)

terspiegeln, die den Abstand der beiden Testmassen voneinander messen, wurde in Hannover entwickelt. LISA Pathfinder wird 2009 starten und den Satelliten zum Lagrangepunkt L1 befördern; das ist der Punkt zwischen Sonne und Erde, an dem die Anziehungskraft beider etwa gleich groß ist. Dort werden ein halbes Jahr lang Testmessungen durchgeführt.

Hart an der Grenze

Bisher hängt die erfolgreiche Beobachtung von Gravitationswellen noch davon ab, ob sich während der Messzeit zufällig ein hinreichend starker Supernovakollaps ereignet oder ob zwei einander umkreisende Neutronensterne am Ende ihres gemeinsamen Weges angekommen

sind und ineinander stürzen. Das sind seltene Ereignisse innerhalb einer Galaxis. Auch nach einem Jahr Dauermessung hat man noch kein entsprechendes Signal gefunden. Vielleicht sind die Amplituden ja kleiner als von der Theorie vorhergesagt, und erst nach einer sorgfältigen Auswertung der Daten erkennbar. Erst die irdischen Detektoren der zweiten Generation und das Weltraumprojekt LISA werden weit genug in den Weltraum hören können, um täglich Signale zu empfangen. Spätestens dann wird sich das neue Gebiet der Gravitationswellenastronomie etablieren. □



Peter Aufmuth forscht am Institut für Gravitationsphysik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, das mit dem MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam und Hannover eng verflochten ist. Seit 1991 gehört er zum Team von Karsten Danzmann, das den Gravitationswellendetektor Geo 600 betreibt.

sind und ineinander stürzen. Das sind seltene Ereignisse innerhalb einer Galaxis. Auch nach einem Jahr Dauermessung hat man noch kein entsprechendes Signal gefunden. Vielleicht sind die Amplituden ja kleiner als von der Theorie vorhergesagt, und erst nach einer sorgfältigen Auswertung der Daten erkennbar. Erst die irdischen Detektoren der zweiten Generation und das Weltraumprojekt LISA werden weit genug in den Weltraum hören können, um täglich Signale zu empfangen. Spätestens dann wird sich das neue Gebiet der Gravitationswellenastronomie etablieren. □

Literaturhinweise

- [1] **John A. Wheeler:** Gravitation und Raumzeit. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1992
- [2] **Albert Einstein:** Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1916, S. 688–696
- [3] **Bernard F. Schutz:** Beben der Raumzeit. SuW Special 6 »Gravitation«, S. 16–24
- [4] **Michael Kramer:** Pulsare als kosmische Uhren. SuW 10/2006, S. 30–37
- [5] **Martha Bartusiak:** Einsteins Vermächtnis. Europäische Verlagsanstalt, Frankfurt am Main 2005
- [6] **Peter Aufmuth und Karsten Danzmann:** Mikrophone für das Konzert des Kosmos. SuW Special 6 »Gravitation«, S. 26–33

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.suw-online.de/artikel/858839