

Auftakt zum Konzert der Sterne

GEO 600 beginnt mit der Suche nach Gravitationswellen

Peter Aufmuth und Karsten Danzmann

Südlich von Hannover liegt eine astronomische Station der besonderen Art. Sie besteht nicht aus gewölbten Kuppeln oder riesigen Parabolantennen, sondern aus zwei 600 Meter langen rechtwinklig angeordneten Röhren: das Gravitationswellenobservatorium GEO 600 (Abb. 1). Das Instrument stellt einen Horchposten ins All dar. Dem Klang des Universums zu lauschen schien bis vor kurzem ein unerfüllbarer Traum, da sich Schallwellen im interstellaren Raum nicht ausbreiten können. Aber Einstein hat uns gelehrt, dass auch der Raum selbst erzittert, wenn der Knall nur heftig genug ist.

Man stelle sich zwei Schwarze Löcher vor, die einander irgendwo im Universum langsam umkreisen. Ein Schwarzes Loch besitzt ein so starkes Gravitationsfeld, dass ihm nicht einmal Licht entkommt. Die Schwarzen Löcher nähern sich allmählich einander in einem kosmischen Tanz, der hunderte von Millionen Jahren dauern kann und mit einem einminütigen Crescendo endet, in dem die beiden Löcher verschmelzen. Dieser gewaltige Zusammenstoß verformt selbst die Struktur des Raums, und diese Verformung breitet sich aus wie Wellen in einem Teich, in dem man einen Stein wirft.

Wenn diese Wellen die Erde erreichen, so äußern sie sich als abwechselnde Dehnung und dazu senkrechte Stauchung des Raums und von allem, was sich darin befindet. Wenn unsere Ohren nur empfindlich genug wären, so würden sie auf diese Längenänderungen reagieren, und man könnte Gravitationswellen buchstäblich hören. Tatsächlich sind solche Längenänderungen aber extrem klein. Eine Supernova-Explosion in einer benachbarten Galaxie ändert die Länge einer 1 km langen Teststrecke auf der Erde nur um ein Tausendstel eines Protonendurchmessers für einige Millisekunden. Einstein hat die Existenz von Gravitationswellen vor 85 Jahren als Konsequenz seiner Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt [1] (siehe Abb. 2 und Infokasten „Gravitationswellen“). Aber erst heute besitzen wir die notwendige empfindliche Lasermesstechnik zum Nachweis so kleiner Längenänderungen.

Erste Antennen für Gravitationswellen

Die ersten Vorschläge zur Detektion von Gravitationswellen wurden Anfang der 60er-Jahre von dem amerikanischen Physiker Joseph Weber (1919–2000)



Abb. 1: In Ruthe, südlich von Hannover, liegt der deutsch-britische Gravitationswellendetektor GEO 600. Die beiden 600 m langen Arme des Laserinterferometers erstrecken sich nach Norden und nach Osten. Rechts im Bild das Versuchsgelände des Instituts für Botanik der Universität Hannover (Foto: Deutsche Luftbild, Hamburg).

vorgelegt [3]. Ein Aluminiumzylinder mit einer Masse von anderthalb Tonnen diente ihm als Resonanzantenne. Eine durchlaufende Gravitationswelle würde die Länge dieses Zylinders ändern und ihn in Schwingung versetzen wie ein Hammer eine angeschlagene Glocke. Mit hochempfindlichen Verstärkern wollte Weber den Nachhall der Welle messen. Heute weiß man, dass die damalige Technologie noch längst nicht so weit war, die benötigte Empfindlichkeit zu erreichen. Immerhin gaben Webers Untersuchungen den Anstoß, sich ernsthaft mit dem Nachweis von Gravitationswellen zu befassen und auch nach alternativen Messmethoden zu suchen. Da es sich beim Nachweis ferner „nur“ um den Vergleich von Längenänderungen in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen handelt, besann man sich Anfang der 70er-Jahre darauf, dass dafür ein Michelson-Interferometer das geeignete Instrument ist.

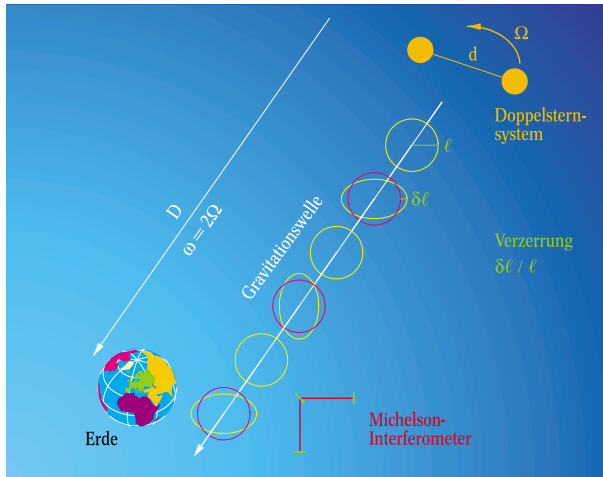
Das spätere deutsch-britische Projekt GEO begann ganz bescheiden mit Interferometern, die lediglich Armlängen von 3 m (ab 1975 am Max-Planck-Institut für Astrophysik in München) bzw. 1 m (ab 1977 an der Universität Glasgow) aufwiesen. Später wurden daraus Prototypen mit 10 m Armlänge (ab 1980 in Glasgow) bzw. 30 m Armlänge (ab 1983 am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching). An diesen Geräten studierte man, welche Prozesse die Empfindlichkeit bei den verschiedenen Frequenzen begrenzen und welche Anforderungen man an die Konstruktion stellen muss, um mögliche Störungen auszuschalten oder zu begrenzen [4]. Zum Nachweis von Gravitationswellen sind diese Prototypen allerdings zu klein.

Ende der 80er-Jahre erhielt die Gravitationswellenforschung neuen Aufschwung. Die amerikanischen Astrophysiker Hulse und Taylor hatten 1974 den Binär-

Dr. Peter Aufmuth,
Prof. Dr. Karsten
Danzmann,
Institut für Atom-
und Molekülphysik,
Callinstr. 38, Univer-
sität Hannover,
30167 Hannover

pulsar PSR 1913+16 entdeckt und dieses System aus zwei Neutronensternen über viele Jahre hinweg studiert. Die von ihnen gemessene Abnahme der Bahnperiode lässt sich als Energieverlust deuten, der durch die Abstrahlung von Gravitationswellen verursacht wird [5]. Die Beobachtungen stimmen mit der Vorhersage der Einsteinschen Theorie auf 0,3 % überein. Dies gilt allgemein als indirekter Nachweis von Gravitations-

Abb. 2: Zwei umeinander kreisende Neutronensterne senden Gravitationswellen aus, die zur Erde gelangen. Sie verzerren das Raumzeitgefüge und damit auch die Länge l der Arme eines Michelson-Interferometers. Als Stärke oder Amplitude der Gravitationswelle bezeichnet man die relative Längenänderung $2\delta l/l$.



wellen und brachte Hulse und Taylor 1993 den Nobelpreis für Physik ein.

1989 beschlossen die deutschen und britischen Forschergruppen zusammenzuarbeiten. Das gemeinsam erarbeitete Projekt GEO war ursprünglich als Drei-Kilometer-Anlage geplant, die in zwei rechtwinklig zueinander angelegten Tunneln im Harz gebaut werden sollte. Aus finanziellen Gründen musste es jedoch 1992

aufgegeben werden. Der Verzicht auf die vorgesehene Armlänge und der Einsatz kostensparender Maßnahmen ermöglichte 1994 den Vorschlag einer verkleinerten Version mit 600 m Armlänge: GEO 600 [6]. Im September 1995 konnte mit dem Bau von GEO 600 auf dem Gelände der Universität Hannover in Ruthe südlich von Hannover begonnen werden. Wissenschaftler aus Garching, Hannover, Glasgow, Cardiff und Golm (bei Potsdam) sind federführend an dem Projekt beteiligt.

Heute ist der Aufbau von GEO 600 abgeschlossen. Die automatischen Regelkreise sorgen für einen stabilen Betrieb; das erste Interferogramm liegt vor. Optik und Elektronik müssen „nur“ noch optimiert werden. Im Laufe dieses Jahres beginnt zusammen mit dem amerikanischen Detektor LIGO die Suche nach Gravitationswellen aus dem All.

Anforderungen und Störquellen

Die beiden Messstrecken des Interferometers (Abb. 3) werden durch die Positionen des Strahlteilers und der beiden Endspiegel definiert. Die Armlängen L werden so eingestellt, dass am Ausgang destruktive Interferenz eintritt (Dunkelheit). Eine passend einfallende Gravitationswelle verursacht dann entgegengesetzte Längenänderungen in den Armen, die zu einer relativen Phasenverschiebung der interferierenden Teilstrahlen führen:

$$\delta\varphi(t) \cong 2\omega_0 \frac{L}{c} h(t)$$

Dabei ist $2L/c$ die Lichtlaufzeit im Interferometer und ω_0 die Lichtfrequenz. Die optimale Länge der Interferometerarme entspricht gerade der halben Wellenlänge der Gravitationswelle, da sich der Effekt für größere Längen wieder kompensiert. Für eine Frequenz von 1000 Hz liegt L bei 150 km. Bei einer Lichtwellenlänge von $1 \mu\text{m}$ würde eine Gravitationswelle mit der Stärke $h = 10^{-21}$ eine Phasendifferenz von 10^{-9} hervorrufen. In der Praxis sind die Armlängen jedoch höchstens einige Kilometer lang, sodass man hundertmal empfindlicher sein muss.

Beim Einsatz von Laserinterferometern für den Gravitationswellennachweis treten viele Störungen auf, die zu Schwankungen in der Lichtwegdifferenz zwischen den beiden Armen führen und dadurch ein Signal vortäuschen. Naheliegende Störquellen sind Bodenerschütterungen aller Art, die Wärmebewegung der Luft und der optischen Komponenten, aber auch die durch das Messverfahren erzeugten Schwankungen wie elektronisches Schrotrauschen und sogar Rauschen durch den Druck der Photonen auf die Spiegel. Um die erforderliche Empfindlichkeit zu erreichen, müssen diese Störquellen hinreichend abgeschwächt oder in einen Frequenzbereich außerhalb des Messfensters verschoben wer-

Gravitationswellen

Die Allgemeine Relativitätstheorie geht davon aus, dass der physikalische Raum durch Massen verformt wird. Die dadurch erzeugte Krümmung des Raums bestimmt die Bewegung anderer Massen und wirkt so als Gravitations„kraft“. Die Einstein-Gleichung

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

setzt den Krümmungs-Tensor $G_{\mu\nu}$ in Beziehung zum Energie-Impuls-Tensor $T_{\mu\nu}$ (G ist die Newtonsche Gravitationskonstante, c die Lichtgeschwindigkeit). Es handelt sich dabei um ein System gekoppelter nichtlinearer Differentialgleichungen zweiter Ordnung.

Durch die Bewegung der Massen hervorgerufene Änderungen in der Raumkrümmung breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit wellenförmig nach allen Seiten aus; so entsteht eine Gravitationswelle [1]. In schwachen Gravitationsfeldern (z. B. im Sonnensystem) kann man die Einsteinschen Gleichungen linearisieren und erhält dann die übliche Wellengleichung

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

für die Gravitationswellenamplituden $h_{\mu\nu}$. Die Lösungen lassen sich (wie in der Elektrodynamik) durch retardierte Potentiale darstellen; sie haben im Vakuum ($T_{\mu\nu} = 0$) die Form ebener Wellen:

$$h_{\mu\nu} = h_{\mu\nu}^0 \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi_{\mu\nu}).$$

Es handelt sich um Transversalwellen, die in

zwei verschiedenen Schwingungsformen auftreten, die sich um 45° voneinander unterscheiden (+ und \times Polarisation). Die Frequenzen liegen im Bereich von 10^{-17} bis 10^4 Hz. Das Strahlungsfeld lässt sich nach Multipolmomenten entwickeln. Da es nur Massen eines Vorzeichens gibt, beginnt die Darstellung mit der Quadrupolstrahlung als dominantem Anteil. Das masselose Feldteilchen ist das Graviton mit dem Spin $S = 2$.

Gravitationswellen bewirken Abstandsänderungen in der Struktur der Raumzeit. Ein Kreis von Testmassen z. B. wird periodisch in eine Ellipse und wieder zum Kreis verformt (Abb. 2). Das Verhältnis der Abweichungen δl vom Kreis zu dessen Radius l ist die Amplitude oder Stärke h der Welle

$$h = 2\delta l/l.$$

Nach der Einsteinschen Quadrupolformel [2] erzeugt eine Masse mit einem veränderlichen Quadrupolmoment Q im Abstand r Gravitationswellen der Stärke

$$h = \frac{2G}{c^4} \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[Q \left(t - \frac{r}{c} \right) \right].$$

Der Faktor $2G/c^4 = 2 \cdot 10^{-44} \text{ Wm/s}$ hat zur Folge, dass nur Massen mit sehr großen Quadrupolmomenten und großen Beschleunigungen messbare Gravitationswellenamplituden erzeugen. Als mögliche Quellen kommen daher nur astrophysikalische Objekte oder Ereignisse in Frage (z. B. Schwarze Löcher, Neutronensterne oder Supernovae). Selbst dann erwartet man nur $h \approx 10^{-24} - 10^{-18}$.

den. Dazu haben wir eine Reihe technischer Verbesserungen und Neuentwicklungen vorgenommen, da die Anforderungen die vorhandenen Standardlösungen auf fast allen Gebieten überstiegen. Die Grenze des Quantenrauschens durch die Heisenbergsche Unschärferelation wird von den vorhandenen Detektoren bereits bis auf eine Größenordnung erreicht. Neuere Untersuchungen zeigen, dass es durch spezielle Auslesetechniken möglich sein wird, auch diese Grenze zu unterlaufen.

Schwingungsisolierung

Bodenschütterungen aller Art stellen die Hauptquelle für Störungen dar: Seismik, Verkehr, Pumpen, selbst die Dünung der Nordseewellen machen sich bemerkbar. Bei einem Spiegelabstand von einem Kilometer sollen Änderungen dieses Abstands um 10^{-18} m gemessen werden. Die von Seismometern gemessenen mittleren Schwingungsamplituden des Untergrunds liegen aber bei 1 Hz typischerweise in der Größenordnung von 10^{-7} m, bei 1 kHz noch um 10^{-13} m. Ohne eine wirkungsvolle seismische Isolierung der Interferometerspiegel wäre der Gravitationswellennachweis gar nicht möglich.

Die Schwingungsisolierung von GEO 600 besteht aus mehreren Stufen; sie enthält aktive und passive Elemente (Abb. 4). Im aktiven Teil werden die Schwingungsamplituden mit Geophonen gemessen und durch Piezoaktuatoren weitgehend kompensiert. Der passive Teil nutzt die Durchlasskurve eines getriebenen Pendels aus: Unterhalb der Eigenfrequenz f_0 des Pendels wird die Störung ungeschwächt durchgelassen, in der Nähe von f_0 wird sie sogar verstärkt, aber weit oberhalb davon wird sie um den Faktor $(f_0/f)^2$ gedämpft. Die Eigenfrequenz lässt sich durch die Wahl der Pendellänge beeinflussen. Man legt f_0 in den Bereich von 1 bis 2 Hz und erhält so eine hinreichende Rauschunterdrückung im Messfenster (oberhalb von etwa 40 Hz). Mehrere solcher Pendelstufen hintereinander sorgen für eine effektive Dämpfung seismischer Störungen.

Bei GEO 600 besteht die erste passive Stufe aus zweilagigen Dämpfern aus Edelstahl und Gummi. Jede Lage wirkt als dreidimensionales Pendel moderater Güte, wodurch mittlere und hohe Frequenzen vorgefiltert werden. Auf diesen Dämpfern sitzt ein drehbarer Rahmen, an dem die weiteren Stufen in Form gestaffelter Pendel befestigt sind. Für die Endspiegel z. B. ist dies ein Dreifachpendel (Abb. 4): An Blattfedern ist eine Aluminiummasse an dünnen Stahldrähten aufgehängt, daran in einer Schlaufe aus Stahldräht eine Zwischenmasse aus Quarzglas. Der Spiegel aus Quarzglas selbst hängt an angeschweißten dünnen Quarzfasern als letzter Pendelstufe. Durch eine solche monolithische Aufhängung werden Reibungsverluste vermieden. Auf diese Weise erreicht man eine Güte Q der Aufhängung von 10^8 für Frequenzen oberhalb von etwa 40 Hz.

Zu kleineren Frequenzen hin wird die Schwingungsisolierung immer aufwändiger. Die Zahl der Pendelstufen lässt sich nicht beliebig steigern. Es wird daher allgemein nicht möglich sein, mit erdbeundenen Detektoren Frequenzen zu beobachten, die unterhalb von einigen Hertz liegen.

Thermisches Rauschen

Die Wärmebewegung der Atome regt Eigenmoden in den optischen Komponenten an, beispielsweise

Dicken- oder Biegeschwingungen. Die Spiegeloberfläche bewegt sich dabei vor und zurück, sodass ein Gravitationswellensignal vorgetäuscht wird. Nach dem Äquipartitionstheorem erhält jede mechanische Mode eine kinetische Energie von $k_B T/2$ (k_B ist die Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur). Zu diesem intrinsischen Rauschen kommt die thermische Anregung von Schwingungen in den Stahl- oder Quarzfäden der Aufhängung nach Art einer Violine. Die naheliegende Lösung ist eine Abkühlung der Anlage. Da die thermische Amplitude aber proportional zur Wurzel aus T ist, wäre eine Temperaturniedrigung um den Faktor 10^6 erforderlich, um sie um einen Faktor 1000 zu unterdrücken, also auf $T < 1$ mK. Das ist derzeit mit einem vertretbaren Aufwand nicht zu machen, wird aber für künftige Detektoren in Erwägung gezogen.

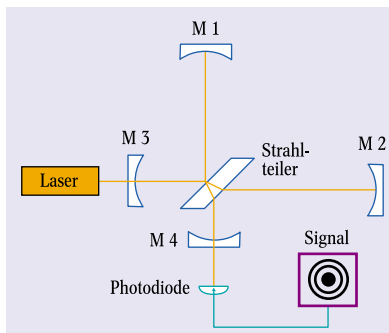


Abb. 3: Das optische Herz von GEO 600: ein Michelson-Interferometer mit dualen Recycling. Der Laserstrahl wird im Verhältnis 50 : 50 aufgeteilt. Die Teilstrahlen durchlaufen die beiden Arme und werden an den Spiegeln M1 und M2 reflektiert. Sie überlagern sich auf dem Weg zur Photodiode und interferieren. Die Armlängen werden so gewählt, dass der Ausgang ohne Signal dunkel ist. Die Spiegel M3 und M4 dienen der Leistungserhöhung bzw. der Signalverstärkung.

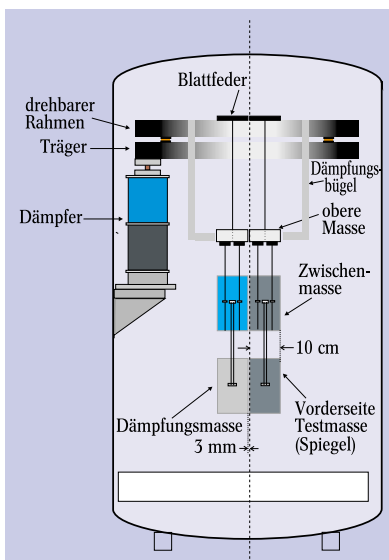


Abb. 4: Endspiegel und Strahlteiler von GEO 600 sind in Form eines Dreifachpendels in einem Vakuumtank aufgehängt. Auf aktiven und passiven Schwingungsdämpfern (im Längsschnitt ist nur einer von dreien links zu sehen) liegt ein drehbarer Rahmen, an dem über zwei Blattfedern eine Zwischenmasse hängt (1. Stufe). An dieser ist über vier kleinere Blattfedern ein Doppelpendel aufgehängt, das aus einer weiteren Zwischenmasse (2. Stufe) und dem Spiegel „Testmasse“ (3. Stufe) besteht.

Hier hilft nur, alle Spiegelresonanzen weit außerhalb des gewünschten Frequenzbereichs zu verlegen, etwa oberhalb von 5 kHz. Die niederfrequenten Ausläufer der Störungen nehmen mit der Wurzel aus der Spiegelmasse und ihrer mechanischen Güte Q ab. Durch Wahl eines geeigneten Materials und einer speziellen Form lässt sich die Amplitude der thermischen Bewegung hinreichend unterdrücken. Der Strahlteiler von GEO 600 hat z. B. eine Masse von 9 kg, einen Durchmesser von 26 cm und eine Dicke von 8 cm.

Um thermische Linsen zu vermeiden, muss die Absorption des Laserlichts in den durchstrahlten Komponenten möglichst klein gemacht werden. Für den Strahlteiler wurde in Zusammenarbeit von GEO 600 und dem französisch-italienischen Projekt VIRGO durch die Firma Heraeus ein besonders homogenes synthetisches Quarzglas entwickelt, das Absorptionsverluste von weniger als 10^{-6} pro Zentimeter aufweist;

seine Güte Q beträgt etwa 10^7 . Ähnliche Anforderungen werden auch an die Qualität der hochreflektierenden dielektrischen Schichten gestellt, mit denen die Spiegel vergütet sind. Die mittlere Mikrorauigkeit der Spiegelsubstrate muss unterhalb von 1 \AA liegen, um Störsignale durch Streuung zu vermeiden.

Eine wesentliche Quelle von Störungen stellen auch die thermischen Fluktuationen der Luftdichte dar. Alle optischen Aufbauten werden daher in großen Vakuumtanks untergebracht. Die Messstrecke selbst verläuft in evakuierten Edelstahlrohren mit einem Durchmesser von 60 cm (Abb. 5). Das Vakuum muss besser als 10^{-11} bar sein (Ultrahochvakuum). Dafür sorgen Turbomolekularpumpen mit einer Leistung von 2000 l/s an den Enden der Interferometerarme.



Abb. 5: Die Vakuummrohre von GEO 600 bestehen aus dünnwandigem ($0,9 \text{ mm}$) gewellten Edelstahl. Sie sind in einem Graben drehbar aufgehängt.

Lichtquelle und Recycling-Verfahren

Eine besondere Herausforderung lag auch in der Entwicklung eines geeigneten Lasers für GEO 600. Laser für Gravitationswellendetektoren müssen nicht nur besonders leistungsstark sein, sondern auch extrem stabil bezüglich Frequenz, Amplitude und geometrischer Verteilung des Lichts und monatelang stabil im Dauerbetrieb arbeiten. Zusammen mit dem Laser Zentrum Hannover wurde in den letzten Jahren ein Laser mit einer Ausgangsleistung von 14 W Dauerleistung auf der Basis eines diodengepumpten Nd:YAG-Lasersystems in „Master-Slave“-Anordnung entwickelt [7] (Abb. 6).

Als Master-Laser eignet sich wegen seiner hohen Effizienz und Ausgangsleistung sowie großer Lebensdauer und Wartungsfreiheit ein Miniatur-Nd:YAG-Laser. Als

aplanarer Ringlaser, der Resonator und Verstärkungsmedium in einem kleinen Einkristall vereint, erzeugt er Licht bei einer Wellenlänge von 1064 nm mit 800 mW Ausgangsleistung in nur einer einzigen longitudinalen und transversalen Mode mit höchster passiver Frequenzstabilität. In dieser Form ist er unempfindlich gegen akustische Störungen und lässt sich durch Aufbringen kleiner Piezokristalle und Peltier-Elemente hervorragend aktiv frequenzstabilisieren. Zur Erhöhung der Ausgangsleistung auf 14 W wird das Licht in einen weiteren planaren Ringlaser eingekoppelt („Injection-Locking“). Dieser Slave-Laser übernimmt dabei weitgehend die Eigenschaften des Master-Lasers, aber bei höherer Leistung.

Anschließend wird das Laserlicht noch durch zwei Modenfilter geschickt. Das sind zwei Resonatoren,

die nur den reinen TEM_{00} -Grundmode durchlassen. Licht höherer Schwingungsmoden nimmt einen anderen Weg durch das Interferometer und würde am Ausgang ein Signal vortäuschen. Beim Prozess der Modenreinigung geht ein Teil der Lichtleistung verloren, sodass mit etwa 10 W Dauerleistung gearbeitet wird.

Die für GEO 600 benötigte Lichtleistung ergibt sich aus der Optimierung der beteiligten Rauschprozesse, dem Schrotrauschen und dem Strahlungsdruckrauschen. Das Schrotrauschen entsteht durch die statistischen Schwankungen \sqrt{n} der Photonenzahl n auf der Photodiode am Ausgang des Interferometers, was entsprechende Schwankungen der optischen Wegdifferenz vortäuscht. Dieser Effekt nimmt mit $1/\sqrt{P}$ ab. Hiernach lässt sich die Genauigkeit der Registrierung beliebig verbessern, je größer die zur Verfügung stehende Licht-

LISA: ein Gravitationswellendetektor im Weltall

LISA („Laser Interferometer Space Antenna“) ist ein Gravitationswellendetektor im Weltall. Sein Ziel ist es, Gravitationswellen mit niederen Frequenzen von 10^{-4} Hz bis 1 Hz zu beobachten. Dieser Frequenzbereich ist wegen des nicht abschirmbaren Untergrundes seismischer Einflüsse und von Gravitationsfeldern bewegter Objekte auf der Erde nicht beobachtbar. In diesem Frequenzbereich erwartet man aber Signale von ebenso verlässlichen wie spektakulären Quellen wie superschweren Schwarzen Löchern und aktiven Galaxienkernen [9].

LISA besteht aus drei Satelliten, die an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks mit 5 Millionen km Armlänge angeordnet sind (Abb. 8). Das Dreieck ist um 60° gegen die Ekliptik geneigt, und sein

Mittelpunkt folgt um 20° versetzt der Erde in ihrer Bahn um die Sonne. Mit dieser Neigung und geeigneten Anfangsbedingungen liefert die Himmelsmechanik hinreichend stabile Bahnen für die Eckpunkte des Dreiecks. Die Positionen der Satelliten werden durch kleine Ionenstrahl-Triebwerke gegen den Strahlungsdruck der Sonne korrigiert. Die Satelliten enthalten Laser und abgeschirmte frei fliegende Testmassen und bilden so das Äquivalent eines Michelson-Interferometers von $5 \text{ Millionen Kilometern}$ Armlänge mit einem unabhängigen dritten Arm [10].

Die relative Orientierung des LISA-Interferometers bezüglich der Sonne und einer möglichen Quelle von Gravitationswellen unterliegt einer stetigen Änderung im Laufe

des Jahres. Dies stellt sicher, dass die Empfangscharakteristik von LISA für eine kontinuierliche Quelle keine blinden Stellen enthält. Aus der jährlichen Veränderung von Amplitude und Phase des empfangenen Signals kann man sowohl die Richtung als auch die Polarisierung der Gravitationswelle bestimmen. Außerdem bietet die charakteristische Signatur des Signals über ein Jahr ein gutes Mittel, um systematische Fehler zu erkennen.

Wegen seiner extrem großen Armlänge ist das Interferometer im niederfrequenten Bereich empfindlich, und die Anforderungen an die eigentliche interferometrische Messgenauigkeit sind moderat. Während die Prototypen auf der Erde bereits heute routinemäßig Empfindlichkeiten im Subattometer-

bereich erreichen, ist für LISA nur eine Auflösung von 10 Picometern erforderlich. Damit wird LISA die Verschmelzung von zwei superschweren Schwarzen Löchern mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von einigen 1000 „hören“, auch wenn sich das Ereignis am Ende des bekannten Universums abspielt.

LISA ist eine *Cornerstone*-Mission der europäischen Weltraumagentur ESA. Das Projekt wird gegenwärtig von ESA und der NASA als gemeinsame Mission vorbereitet. Dazu gehört eine Vorläufermission („SMART 2“), welche die Weltraumtauglichkeit der benötigten Komponenten im Jahre 2006 demonstrieren soll. LISA selbst soll 2011 gestartet werden.

leistung P ist. Dem steht allerdings der Strahlungsdruck entgegen, den das Laserlicht auf die Endspiegel ausübt. Die dadurch hervorgerufene Schwankung in der Position der Spiegel wächst mit \sqrt{P} an. Die optimale Leistung, die beide Rauschprozesse gleichzeitig minimiert, beträgt 1 MW – weit mehr als jeder verwendbare Laser liefert.

Es gibt jedoch eine Möglichkeit, die umlaufende Lichtleistung im Detektor zu erhöhen. Das Interferometer arbeitet mit einer Nullmethode: Durch Regelkreise wird der Ausgang dunkel gehalten. Bei destruktiver Interferenz wird aber kein Licht vernichtet, sondern nur umverteilt. Das bedeutet, dass das Laserlicht nach dem Durchlaufen der Arme zurück zum Eingang gelenkt wird; das gesamte Interferometer wirkt also wie ein Spiegel. Durch einen zusätzlichen Spiegel, der mit dem Interferometer einen Resonator bildet, kann dieses Licht in die Arme zurückgeschickt und phasenrichtig mit dem neu einfallenden Laserlicht überlagert werden. Auf diese Weise wird das im Interferometer umlaufende Licht bei jedem Zyklus verstärkt. Der Verstärkungsfaktor V ist gleich dem Inversen der Verluste im Interferometer. Diese Methode des „Power-Recycling“ wurde 1987 zuerst am damaligen Garching Prototypen vorgeführt und wird heute von allen Gravitationswellendetektoren verwendet. Bei GEO 600 beträgt $V \approx 1000$, sodass auf diese Weise effektiv mit einer Lichtleistung von 10 kW gearbeitet wird.

Das „Signal-Recycling“ sorgt mit einer ähnlichen Methode für die Überhöhung des Signals. Wenn eine Gravitationswelle mit der Frequenz f_{GW} die Entfernung der Spiegel verändert, so führt dies zu einer Phasenmodulation des reflektierten Laserlichts. Die dadurch erzeugten Seitenbänder $f_L \pm f_{GW}$ der Laserfrequenz f_L enthalten die Information. Während der Träger (das Laserlicht) zum Eingang zurückläuft (s. o.), verlassen die Seitenbänder das Interferometer am Ausgang. Stellt man dort einen weiteren Spiegel auf, so bildet dieser wieder mit dem gesamten Interferometer als zweitem Spiegel einen Resonator zur Verstärkung der Seitenbänder. Durch Wahl der Reflektivität des Spiegels ergibt sich die Bandbreite des Detektors. Durch Änderung der Spiegelposition kann der Detektor schmalbandig auf eine bestimmte Gravitationswellenfrequenz abgestimmt werden und ist dort dann wesentlich empfindlicher als im üblichen Breitbandbetrieb.

Werden beide Recycling-Verfahren gleichzeitig verwendet, so spricht man von dualem Recycling. Die Leistungsfähigkeit dieser bislang einzig von GEO 600 eingesetzten Methode wurde am Garching Prototypen demonstriert [8]. Für GEO 600 ergibt sich damit bei einer Gravitationswellenfrequenz von 1 kHz und einer Bandbreite von 500 Hz eine Empfindlichkeit für Gravitationswellenpulse von $h_{DL} \approx 6 \cdot 10^{-22}$ (Abb. 7)

Internationale Zusammenarbeit

Seit 1995 hat man weltweit mit dem Bau von großen Laserinterferometern zum Gravitationswellennachweis begonnen. Im Rahmen des US-amerikanischen Projekts LIGO wurden Detektoren mit 4 km langen Armen gleich an zwei Standorten errichtet, einer im Nordwesten der USA (Washington) und einer im Südosten (Louisiana). LIGO hat ebenfalls den vorläufigen Betrieb aufgenommen. In der Nähe von Pisa entsteht das französisch-italienische Projekt VIRGO mit 3 km Armlänge; mit der Fertigstellung ist für 2003 zu rechnen. Der in Tokio gebaute 300-m-Detektor TAMA 300 lie-

fert seit einem Jahr Daten, ist aber auf keine allzu hohe Empfindlichkeit ausgelegt. Alle Detektoren benutzen Nd:YAG-Laser bei einer Wellenlänge von 1064 nm mit Power-Recycling.

Trotz seiner kürzeren Armlänge erreicht GEO 600 etwa die gleiche Empfindlichkeit wie die großen Detektoren, da es im Unterschied zu ihnen bereits in der ersten Ausbaustufe die in den letzten Jahren entwickelten fortschrittlichen Technologien benutzt. Signal-

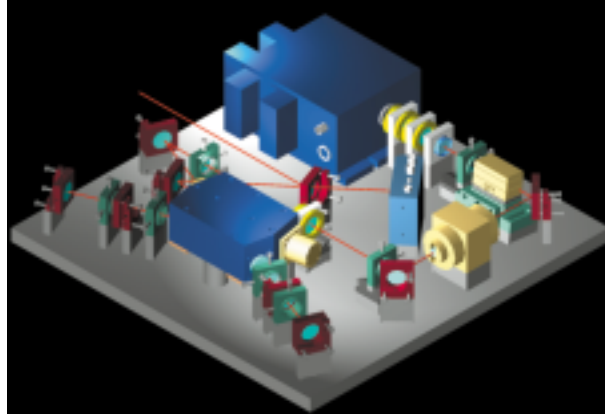
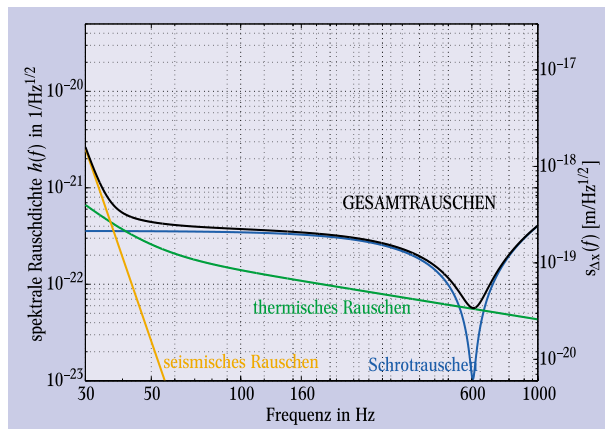


Abb. 6: Das Lasersystem von GEO 600: Ein von Laserdioden beleuchteter Nd:YAG-Kristall (im hinteren Kasten) erzeugt Laserstrahlung bei einer Wellenlänge von 1064 nm. Diese wird in einem weiteren Laserresonator (vorderer Kasten) verstärkt (Grafik: Martina Brendel, LZH).



Recycling, monolithische Spiegelaufhängung und die Möglichkeit, den Detektor abzustimmen, werden bisher einzig bei GEO 600 eingesetzt. Erst in ihrer zweiten Ausbaustufe werden LIGO und VIRGO diese in Garching, Glasgow und Hannover entwickelten Methoden übernehmen. Die Gravitationswellendetektoren der zweiten Generation werden dann Amplituden bis zu 10^{-24} nachweisen können. Zu diesen Detektoren wird auch das Weltraumprojekt LISA (Abb. 8 und Infokasten) gehören, das ab 2011 auch den Millihertzbereich für die Gravitationswellenforschung zugänglich machen soll.

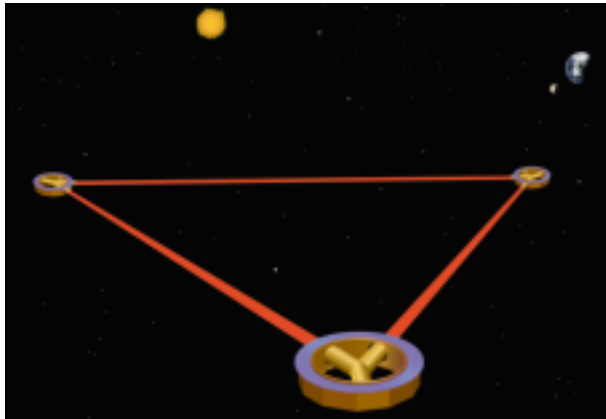
Die verschiedenen Projekte stehen nicht etwa in Konkurrenz miteinander, sie sind auf Zusammenarbeit angewiesen. Die Daten eines einzelnen Detektors haben für pulsartige Signale oder für den Nachweis der Gravitationswellen-Hintergrundstrahlung keine besondere Aussagekraft. Erst in Koinkidenz mit einem weit entfernten Detektor kann man sicher sein, keinen lokalen Störungen aufgefressen zu sein. Um aber auch Informationen über die Richtung der Quelle sowie über

Abb. 7: Das Messfenster von GEO 600 beim schmalbandigen Einsatz der Signal-Recycling-Methode. Die farbigen Kurven geben die Stärke der verschiedenen Störeinflüsse an (rot: seismisches Rauschen, grün: thermisches Rauschen, blau: Schrotrauschen); ihre Summe (schwarz) stellt die Empfindlichkeitskurve von GEO 600 dar.

die Polarisierung der Signale zu erhalten, benötigt man ein weltweites Netz von wenigstens vier Detektoren. Daher haben die verschiedenen Stationen den Austausch und die gemeinsame Auswertung der Daten vereinbart. Ohnehin gibt es zwischen allen Gruppen seit vielen Jahren den Austausch von Mitarbeitern und von technischem Know-how.

Besonders eng ist die Zusammenarbeit zwischen GEO 600 und LIGO. Beide Gruppen haben nicht nur

Abb. 8: LISA ist ein satellitengestütztes Laserinterferometer im All. Drei Satelliten in 5 Mio. km Abstand bewegen sich um 20° hinter der Erde her um die Sonne. LISA wird den niederfrequenten Gravitationswellenbereich erschließen, der wegen der seismischen Störungen mit erdgebundenen Detektoren nicht untersucht werden kann (vgl. Infokasten).



eine gemeinsame Datenanalyse vereinbart, sondern auch die gemeinsame Veröffentlichung der Ergebnisse. Von Ende Dezember 2001 bis Mitte Januar 2002 findet ein paralleler Probelauf beider Detektoren statt, um die Programme zur Datenaufnahme zu testen. Während der daran anschließenden Phase der Detektor-Optimierung werden diese Parallelläufe fortgesetzt. An der Planung zum Ausbau von LIGO zu einem Instrument erhöhter Empfindlichkeit (LIGO II) sind ebenfalls GEO-Mitarbeiter beteiligt. Auch in Europa denkt man an die Zukunft: Die an GEO 600 und VIRGO beteiligten Gruppen erarbeiten gemeinsam den europäischen Gravitationswellendetektor der zweiten Generation (EURO), dessen Bau ab 2008 geplant ist.

Astronomie mit Gravitationswellen

Mit der Beobachtung von Gravitationswellen wird sich ein neues Gebiet der Astronomie eröffnen. Wir werden Informationen über das Universum erhalten, die völlig anderer Art sind als die aus der klassischen Astronomie mit Licht, Radiowellen oder Röntgenstrahlung. Elektromagnetische Wellen bewegen sich durch die Raumzeit, während Gravitationswellen Schwingungen in der Struktur der Raumzeit selbst sind. Die elektromagnetische Strahlung entsteht durch die inkohärente Überlagerung der Emission einzelner Atome und Moleküle, während Gravitationsstrahlung durch die kohärente Bewegung großen Massen- oder Energiedichten hervorgerufen wird. Beim Durchgang durch Materie werden elektromagnetische Wellen leicht absorbiert, gestreut und in der Frequenz verändert, wohingegen Gravitationswellen keinerlei Wechselwirkung mit Materie zeigen.

Die für uns beobachtbaren Quellen von Gravitationswellen sind die heftigsten und energiereichsten Vorgänge im Universum wie Supernovae oder kollidierende superschwere Schwarze Löcher, wie sie in den Zentren der Galaxien auftreten. Aber auch kompakte Binärsysteme aus Neutronensternen oder leichten Schwarzen Löchern in unserer Milchstraße gehören zu den Objekten, die mit hinreichend langen Integrationszeiten studiert werden können. Schließlich sollte auch

ein Gravitationswellenhintergrund aus der Zeit des Urknalls vorhanden sein, der spektakulärsten Quelle überhaupt. Seine Beobachtung wird erstmals experimentelle Daten z. B. für die Stringtheorie liefern, die ein bestimmtes Spektrum der Hintergrundstrahlung vorhersagt. Für Theorien über die fundamentale Physik im frühen Universum sind diese Daten von grundlegender Bedeutung.

Die meisten Quellen von Gravitationswellen senden keine elektromagnetische Strahlung aus und umgekehrt. Die Informationen über das All, die man mit diesen beiden Zweigen der Astronomie erhält, sind in gewisser Weise komplementär. Mit Überraschungen ist also zu rechnen. In den letzten Jahren haben neue Beobachtungen die grundsätzliche Diskussion über Aufbau und Entwicklung des Universums wieder angefacht: Neue Messungen der Hubble-Konstante deuten auf eine beschleunigte Expansion des Alls hin; das Studium der entferntesten Quasare stellt die bisherigen Theorien der Galaxienbildung in Frage; das Problem der dunklen Materie ist nach wie vor ungelöst. Die Gravitationswellenastronomie wird mit Sicherheit entscheidende Beiträge zum Verständnis dieser Fragen liefern.

Literatur

- [1] A. Einstein, Preuss. Akad. Wiss. Berlin, Sitzungsber., 688 (1916)
- [2] K. Danzmann, H. Ruder, Phys. Bl., Februar 1993, S. 103
- [3] J. Weber, Phys. Rev. **117**, 307 (1960)
- [4] W. Winkler, Physik in unserer Zeit **16**, 138 (1985)
- [5] J. H. Taylor, J. M. Weisberg, Astrophys. J. **345**, 434 (1989)
- [6] K. Danzmann et al. in: E. Cocchia, G. Pizzella, F. Ronga (Hrsg.) Gravitational Wave Experiments, World Scientific, Singapore (1995), S. 100
- [7] I. Zawischa et al., Class. Quantum Grav. (2002), zur Veröffentlichung akzeptiert.
- [8] G. Heinzel et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 5493 (1998)
- [9] B. Schutz, Class. Quantum Grav. **13**, A219 (1996)
- [10] K. Danzmann, Adv. Space Res. **25**, 1129 (2000)

Die Autoren

Peter Aufmuth promovierte 1977 in Hannover. Er hatte sich bereits damals auf die Messung und Berechnung sehr kleiner Längen spezialisiert, nämlich der Änderung der Kernradien von Isotop zu Isotop. Nebenher befasste er sich mit dem Einsatz von Lasern zur Erkennung und Therapie von Tumoren sowie mit der Berechnung und Herstellung von Interferenzfiltern. Seit 1991 gehört er als Gründungsmitglied zum deutschen GEO-Team. Dass ihn Herausforderungen anziehen, bewies er schon durch die Lektüre von Arno Schmidts Riesenroman „Zettels Traum“.



Karsten Danzmann promovierte 1980 in Hannover und lehrte fünf Jahre als Assistenzprofessor an der Stanford University. Seit 1990 befasst er sich mit der Jagd nach Gravitationswellen, ab 1993 als Leiter des Instituts für Atom- und Molekülphysik in Hannover mit dem Aufbau von GEO 600 und der Planung des Weltraumprojekts LISA. Die Neugründung des von ihm geleiteten Teilinstituts Hannover des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik macht Hannover zu einem Zentrum der experimentellen Gravitationsforschung.



GEO 600 im Internet:
www.geo600.uni-hannover.de