

Von der Schwerkraft haben wir noch immer die Vorstellung im Kopf, die der englische Physiker Isaac Newton vor dreihundert Jahren geprägt hat: Er beschrieb sie als eine zwischen allen Massen wirkende Anziehungskraft. Wer aber Massen im freien Fall betrachtet, stellt fest, dass es sich dabei um eine kräftefreie Bewegung handelt, die an der selben Stelle des Raums immer unabhängig von der Größe und Zusammensetzung der beteiligten Massen ist. Albert Einstein zog daraus den Schluss, dass es sich bei der Gravitation um einen Effekt handelt, der von der geometrischen Struktur des Raums abhängt. Die Ausarbeitung dieser Idee führte 1915 zur Allgemeinen Relativitätstheorie.

Nach Einsteins Ansicht ist der physikalische Raum kein starres Gerüst oder lediglich die Arena für die in der Natur ablaufenden Vorgänge, sondern er nimmt selbst am Geschehen teil: Der Raum wird durch die Anwesenheit von Massen verformt. Die dadurch erzeugte Krümmung des Raums bestimmt die Bewegung anderer Massen und wirkt so scheinbar als ablenkende Kraft. Bewegen sich Massen beschleunigt, so breiten sich die dadurch hervorgerufenen Änderungen in der Raumkrümmung mit Lichtgeschwindigkeit wellenförmig nach allen Seiten aus; so entstehen Gravitationswellen. Allerdings erkannte schon Einstein, dass nur sehr große Massen mit sehr großen Beschleunigungen messbare Gravitationswellenausschläge, Amplituden genannt, erzeugen. Als mögliche Quellen kommen daher nur astrophysikalische Objekte oder Ereignisse in Frage wie etwa Systeme aus Schwarzen Löchern und Neutronensternen oder Supernovae.

Die Wirkung dieser Wellen äußert sich als eine Verzerrung des Raums, als Dehnung und Stauchung seiner geometrischen Struktur. Bei zwei senkrecht aufeinander stehenden Messstrecken führt dies zu einer unterschiedlichen Längenänderung dieser beiden Richtungen. Ein Gerät, das den Längenunterschied sichtbar macht, ist das so genannte Michelson-Interferometer. Man vergleicht damit die



# Ein Horchposten ins Universum

Laufzeitunterschiede von Lichtstrahlen in den beiden Messstrecken. Das Problem für den Experimentalphysiker besteht darin, dass die zu erwartenden Längenänderungen extrem klein sind. Eine Supernova-Explosion in einer benachbarten Galaxie ändert beispielsweise die Länge einer ein Kilometer langen Teststrecke auf der Erde nur um ein Tausendstel eines Protonendurchmessers – und auch das nur für einige Millisekunden.

Seit 40 Jahren wird versucht, Gravitationswellen nachzuweisen,

aber erst heute besitzen wir die dazu notwendige empfindliche Lasertechnik. Der Gravitationswellendetektor GEO600 ist ein Gemeinschaftsprojekt deutscher und britischer Forschergruppen. Es handelt sich dabei um ein Michelson-Interferometer mit 600 Meter langen Messstrecken, das auf dem Gelände der Universität Hannover in Ruthe südlich von Hannover errichtet wurde. Federführend sind Wissenschaftler aus Hannover, Gollm, Glasgow, Garching und Cardiff. Man erwartet Gravitationswellen-





*Erst seit wenigen Jahren ist es möglich, Gravitationswellen nachzuweisen. Ein neu entwickelter Gravitationswellendetektor zeichnet sich durch besondere Empfindlichkeit aus. Mit seiner Hilfe lassen sich wichtige Informationen über Schwarze Löcher, dunkle Materie und den Ursprung des Alls gewinnen*

frequenzen im hörbaren Bereich – GEO600 ist also buchstäblich ein Horchposten ins All.

Die Beobachtung von Gravitationswellen wird durch viele Effekte erschwert. Sie führen zu Änderungen in der Lichtwegdifferenz zwischen den beiden Armen und täuschen dadurch ein Signal vor. Dies sind zum Beispiel akustische Störungen (Luftdruckschwankungen); daher sind alle optischen Aufbauten in großen Vakuumtanks untergebracht. Die Messstrecken selbst verlaufen in evakuierten Edelstahl-

rohren mit einem Durchmesser von 60 Zentimetern. Hier wird ein Vakuum wie im erdnahen Weltraum benötigt.

Nahe liegende Störquellen sind ferner Bodenerschütterungen aller Art, die Wärmebewegung in den optischen Komponenten, aber auch technische Schwankungen in der Lichtintensität, die zu Rauscheffekten führen. Um die erforderliche Empfindlichkeit zu erreichen, müssen diese Störquellen hinreichend abgeschwächt oder in einen Frequenzbereich außerhalb des Mess-

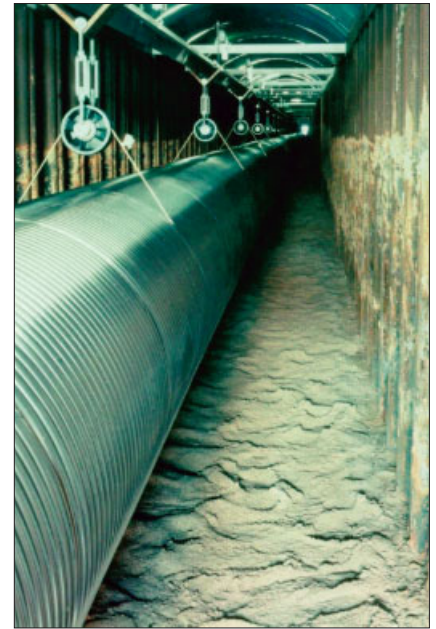
fensters verschoben werden. Eine besondere Herausforderung stellte die Entwicklung eines geeigneten Lasers für GEO600 dar. Laser für Gravitationswellendetektoren müssen nicht nur besonders leistungsstark sein, sondern auch extrem stabil bezüglich Frequenz, Amplitude und geometrischer Verteilung des Lichts. Außerdem müssen sie monatelang im Dauerbetrieb arbeiten können. Zusammen mit dem Laser Zentrum Hannover wurde in den letzten Jahren ein Laser mit einer Ausgangsleistung von 17 Watt Dauerleistung auf der Basis eines

Um Gravitationswellen nachzuweisen, bedarf es einer hoch empfindlichen Lasermesstechnik, die erst in den letzten Jahren entwickelt werden konnte. Im Zentralhaus des neuen Gravitationswellendetektors GEO600 werden alle optischen Komponenten in evakuierbaren Edelstahltanks untergebracht.





GEO600 aus der Vogelperspektive: Vom kastenförmigen Hauptgebäude des Gravitationswellendetektors gehen zwei jeweils 600 Meter lange Messstrecken ab, die durch Endhäuser abgeschlossen werden. Die Messstrecken selbst (rechts) verlaufen in Edelstahlrohren, die in einem Graben aufgehängt sind.



speziellen Lasersystems entwickelt. Da die optimale Lichtleistung für GEO600 aber im Kilowatt-Bereich liegt, musste eine Möglichkeit gefunden werden, die umlaufende Lichtleistung im Detektor zu erhöhen: Das Interferometer arbeitet mit einer so genannten Nullmethode; durch Regelkreise wird der Ausgang dunkel gehalten (erst bei Eintreffen einer Gravitationswelle gelangt ein wenig Licht zum Ausgang). Das bedeutet, dass das Laserlicht nach dem Durchlaufen der Arme zurück zum Eingang gelenkt wird. Durch einen zusätzlichen Spiegel kann dieses Licht erneut in die Arme eingespeist und mit dem einfallenden Licht überlagert werden („Power-Recycling“). GEO600 kann auf diese Weise effektiv mit zehn Kilowatt arbeiten. Das „Signal-Recycling“ sorgt mit einer ähnlichen Methode für die Überhöhung des Signals.

Seit 1995 wird weltweit der Bau von großen Laserinterferometern

zum Gravitationswellennachweis vorangetrieben. Im Rahmen des US-amerikanischen Projekts LIGO wurden Detektoren mit vier Kilometer langen Armen gleich an zwei Standorten errichtet, einer im Nordwesten der USA (Washington) und einer im Südosten (Louisiana). In der Nähe von Pisa ist das französisch-italienische Projekt VIRGO mit drei Kilometer Armlänge gerade fertiggestellt worden. Trotz seiner kürzeren Armlänge hat GEO600 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 nutzt. Das Signal-Recycling, die Aufhängung der optischen Komponenten an Quarzglasfasern und die Möglichkeit, den Detektor auf eine gewünschte Frequenz optimal abzustimmen, werden bisher einzig bei GEO600 eingesetzt.

Die verschiedenen Projekte sind auf Kooperation angewiesen. Erst im Zusammenwirken mit einem weit entfernten Detektor kann sichergestellt werden, keinen lokalen Störungen aufzusitzen. Um

aber Informationen über die Richtung der Quelle sowie über die Schwingungsform der Signale zu erhalten, ist ein weltweites Netz von wenigstens vier Detektoren erforderlich. Daher haben die verschiedenen Stationen den Austausch und die gemeinsame Auswertung der Daten vereinbart. Besonders eng ist die Zusammenarbeit zwischen GEO600 und LIGO. Von Ende Dezember 2001 bis Mitte Januar 2002 fand ein paralleler

Probelauf beider Detektoren statt, in dem erfolgreich die Systemstabilität und Programme zur Datenaufnahme und Datenauswertung getestet wurden. Erste Ergebnisse werden

gerade veröffentlicht. Da keine der Anlagen bisher die geplante Empfindlichkeit erreicht hat, sind allerdings nur Abschätzungen möglich. Die Detektoren werden laufend verbessert. Ende 2003 und Anfang 2004 gab es wieder eine gemeinsame Datenaufnahme von GEO600 und LIGO. Ab 2004 soll der reguläre Messbetrieb aufgenommen werden.

Mit der Beobachtung von Gravitationswellen wird sich ein neues Gebiet der Astronomie eröffnen. In

---

### Eine herausfordernde Forschungsaufgabe war das Entwickeln eines leistungsstarken Lasers für GEO600

---

Damit GEO600 nicht auch Bodenschüttungen überträgt, werden Spiegel und Strahlteiler als mehrstufige Pendel aufgehängt. Unten: Zwei einander umkreisende Neutronensterne erzeugen Gravitationswellen, die mit Lichtgeschwindigkeit zur Erde gelangen.

der Struktur der Wellen bildet sich der astrophysikalische Vorgang, der sie erzeugt hat, genau ab. Wir werden so Informationen über das Universum erhalten, die völlig anderer Art sind als die aus der klassischen Astronomie mit Licht, Radiowellen oder Röntgenstrahlung. Die meisten Quellen von Gravitationswellen senden keine elektromagnetische Strahlung aus und umgekehrt. Die Informationen über das All, die mit diesen Zweigen der Astronomie gewonnen werden, ergänzen sich also. Zudem besteht der größte Teil des Universums aus dunkler Materie, die nur über eine mögliche Gravitationsstrahlung erfasst werden kann.

Gravitationswellen besitzen praktisch keine Wechselwirkung mit Materie. Das erschwert einerseits ihren Nachweis, macht sie aber andererseits zu idealen Informationsträgern. Das gesamte Universum ist transparent für Gravitationswellen. Deshalb erwarten Forscher Gravitationswellen auch aus den bisher verschlossenen, durch Wolken verdeckten Bereichen des Universums sowie aus seiner Entstehungszeit. Die beim Urknall entstandenen Gravitationswellen sollten heute noch als Hintergrundstrahlung zu beobachten sein. Die Aufnahme dieser Signale gibt Auskunft über das Universum unmittelbar nach seiner Geburt – man lauscht gewissermaßen dem ersten Schrei unserer Welt.

*Dr. Peter Aufmuth  
Universität Hannover*

Physikalische Grundlagenuntersuchungen für das Projekt wurden von der DFG im Rahmen der Sonderforschungsbereiche „Quantenlimitierte Messprozesse mit Atomen, Molekülen und Photonen“ und „Gravitationswellenastronomie: Methoden – Quellen – Beobachtungen“ unterstützt. Weiterführende Informationen unter [www.geo600.uni-hannover.de](http://www.geo600.uni-hannover.de).

