

# Wellen aus dem Rauschen fischen

Modernste Physik in der Anwendung: zukünftige Teleskope für die Gravitationswellenastronomie

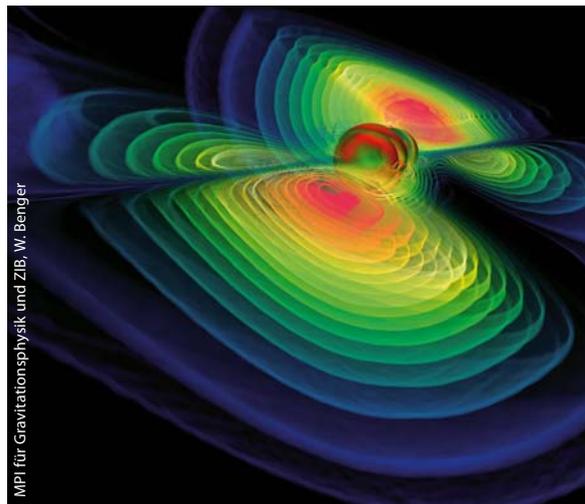
Roman Schnabel, Gerhard Heinzl, Harald Lück, Benno Willke und Karsten Danzmann

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie können beschleunigte Massen Wellen der Raumzeit hervorrufen. Diese Gravitationswellen bewirken aber so kleine Längenänderungen, dass es bis heute nicht gelungen ist, sie direkt zu beobachten. Die dafür erforderlichen Teleskope werden Laserinterferometer mit viele Kilometer langen Armen sein. Trotz dieser makroskopischen Ausmaße ist dabei die Quantenphysik zu berücksichtigen. Nur mit modernster Physik lässt sich daher die Gravitationswellenastronomie realisieren.

Als Galileo Galilei vor 400 Jahren sein Teleskop in den Himmel richtete, entdeckte er Dinge, von denen die Menschheit zuvor nicht einmal etwas geahnt hatte. Teleskope der unterschiedlichsten Art haben anschließend die instrumentelle Astronomie begründet und enorme Erkenntnisse über den Aufbau und die Entstehung des Universums geliefert. Künftig soll eine weitere Klasse von Teleskopen ein neues Fenster zum Universum öffnen [1–3]. Wenn diese Instrumente eine ausreichende Empfindlichkeit erreichen, werden wir höchstwahrscheinlich wie Galilei unvermutete neue Welten entdecken.

Während das Licht astronomischer Objekte schon immer zu sehen war, ließen sich Gravitationswellen noch nicht nachweisen. Sie beruhen darauf, dass die Krümmung der Raumzeit – und damit die räumliche und zeitliche Entfernung von Objekten im Universum – nicht unveränderlich ist. Dies ist integraler Bestandteil der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein. Besonders stark ändert sich die Raumzeit z. B., wenn zwei Schwarze Löcher sich umkreisen, Sterne explodieren oder Neutronensterne vibrieren. Das erste Ereignis, das Gravitationswellen produzierte, war der Urknall selbst. Seine Gravitationswellen existieren noch heute, ähnlich wie der Mikrowellenhintergrund. Man könnte sagen, das ganze Universum vibriert aufgrund seines Urknalls.

Aus der Allgemeinen Relativitätstheorie lässt sich ableiten, dass sich Gravitationswellen mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  ausbreiten (Infokasten). Die zu erwartenden Schwingungsfrequenzen sind eher gering: Damit zwei Schwarze Löcher eine Gravitationswelle bei einer Frequenz von 100 Hz erzeugen, müssen sie einander 50-mal pro Sekunde umkreisen. Die Relativitätstheorie erlaubt es auch, die geradezu winzige Amplitude der Gravitationswellen vorherzusagen. Albert



Verschmelzen zwei Schwarze Löcher miteinander (hier in der Computersimulation zu sehen), senden sie dabei Gravitationswellen aus.

Einstein hatte vermutet, dass man sie wohl nie würde detektieren können. Nachdem ihr indirekter Nachweis durch die Entdeckung eines neuen Pulsartyps durch die Astronomen Taylor und Hulse (Nobelpreis für Physik 1993) erbracht wurde [1], stehen wir heute kurz vor der ersten direkten Beobachtung.

Wenn Gravitationswellen den Raum durchlaufen, stauchen sie senkrecht zu ihrer Ausbreitung eine Richtung des Raumes, während die dazu senkrechte Richtung sich ausdehnt. Sie sind daher in erster Näherung transversale Quadrupolwellen. Wir können diesen Effekt beobachten, wenn wir die Laufzeiten von zwei Laserstrahlen miteinander vergleichen, die den Raum in unterschiedlichen Richtungen durchlaufen haben. Dafür bietet sich ein Laserinterferometer nach Michelson an (Abb. 1). Der Strahl eines monochromatischen Dauerstrichlasers teilt sich an einem halbdurchlässigen

## KOMPAKT

- Wellen der Raumzeit, sog. Gravitationswellen, bieten die Möglichkeit, Informationen über verschmelzende Schwarze Löcher oder das frühe Universum zu erlangen. Sie öffnen damit ein neues Fenster zum Universum.
- Beim Nachweis von Gravitationswellen geraten bisherige Detektionsmethoden an ihre Grenzen. Daher verlangen künftige Gravitationswellenteleskope modernste Technologien und intensive Grundlagenforschung in einem weiten Bereich der Physik.
- Hohe Laserleistung, gequetschtes Licht, schwere Spiegel an Mehrfachpendeln und tiefe Temperaturen helfen dabei, die Rauschquellen zu reduzieren.

Prof. Dr. Roman Schnabel, Dr. Gerhard Heinzl, Dr. Harald Lück, Dr. Benno Willke und Prof. Dr. Karsten Danzmann, Albert-Einstein-Institut Hannover, MPI für Gravitationsphysik, Leibniz Universität Hannover, Callinstr. 38, 30167 Hannover

- 1) <http://geo600.aei.mpg.de>, [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu), [www.virgo.infn.it](http://www.virgo.infn.it), <http://tamago.mtk.nao.ac.jp>
- 2) [www.lisa.aei-hannover.de](http://www.lisa.aei-hannover.de), <http://lisa.nasa.gov>

Strahlteiler auf. Nach Durchlaufen der beiden Interferometerarme vergleicht man die Phasen der beiden Lichtstrahlen, indem man sie präzise auf einen gemeinsamen Punkt am Strahlteiler zurückführt und sie dort über ihren kompletten Querschnitt interferieren lässt. Bei richtig eingestellter Armlängendifferenz liegt am Signalausgang des Strahlteilers eine nahezu perfekte destruktive Interferenz vor, sodass sich selbst eine sehr kleine Längenänderung in einem der Arme als Helligkeitsänderung bemerkbar macht. Da das Messsignal in einer Änderung der Leistung besteht, darf der Eingangslaserstrahl selbst nicht fluktuieren. Die Arme des Interferometers müssen möglichst lang sein, um den winzigen Effekt der Gravitationswelle sichtbar zu machen, idealerweise ein Viertel so lang wie die zu messende Wellenlänge.

Zurzeit arbeiten weltweit fünf Gravitationswellendetektoren nach diesem Prinzip: GEO600, LIGO (zwei Detektoren), TAMA300 und VIRGO.<sup>1)</sup> Die Detektoren befinden sich an der Erdoberfläche, und ihre Arme sind zwischen 300 m und 4 km lang. Bereits länger als die interferometrischen Detektoren werden resonante Zylinderantennen betrieben, die jedoch nur in einem schmalen Frequenzfenster empfindlich sind. Ein Überblick über alle Gravitationswellendetektoren findet sich in [4].

## Die Chancen steigen

Die heutigen laserinterferometrischen Detektoren arbeiten als Netzwerk und haben eine, wenn auch kleine, Chance, das erste Gravitationswellensignal direkt zu beobachten. Sie erreichen bei der Messung der relativen Dehnung des Raumes eine lineare spektrale Rauschdichte von weniger als  $10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$  für Frequenzen von 50 bis 500 Hz. Diese Angabe besagt, dass bei einer Dehnung der Raumzeit um den Bruchteil von nur  $10^{-22}$  das Teleskop noch ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 1 liefert, wenn die Ursache ein quasi-

monochromatisches Signal ist, das man über eine Sekunde lang beobachtet.

In den nächsten zwei Jahren werden die beiden amerikanischen LIGO-Detektoren, der deutsch-britische GEO600 (Abb. 2) sowie der französisch-italienische VIRGO-Detektor Daten mit einer um den Faktor zwei verbesserten Empfindlichkeit aufzeichnen, was die erste Beobachtung von Gravitationswellen in greifbare Nähe rückt. Im Anschluss werden mehrere zentrale Bestandteile der Detektoren durch leistungsfähigere Komponenten ersetzt, um die Rauschdichte der Teleskope um den Faktor fünf zu senken. Die neuen Teleskope, in den USA handelt es sich um Advanced-LIGO, sollen 2014 ihren Betrieb aufnehmen. Aller Wahrscheinlichkeit nach werden sie mehrere Gravitationswellensignale pro Woche registrieren können.

Das eigentliche Ziel ist es jedoch, die Empfindlichkeit so weit zu steigern, dass mit hohen Ereignisraten ein neuer Zweig der Astronomie für die dunkle Seite des Universums entsteht. Erdgebundene Teleskope benötigen dazu eine zehnfach höhere Empfindlichkeit. Dies ist nur durch modernste Physik zu erreichen. Die Europäische Gemeinschaft finanziert in ihrem 7. Rahmenprogramm eine Designstudie, um die entsprechende Grundlagenforschung zu unterstützen und zu koordinieren. Zusammen mit etwa 20 europäischen Forschungsstätten liefern wir dabei einen Entwurf für ein Teleskop der dritten Generation: das Einstein-Teleskop.

Für die Gravitationswellenastronomie reichen erdgebundene Teleskope allerdings nicht aus. Denn der astronomisch besonders interessante Spektralbereich unter einem Hertz lässt sich nur mit einem satellitengestützten Detektor, losgelöst von allen irdischen Störquellen, erschließen. Seit über 15 Jahren laufen die Planungen und Vorbereitungen für das satellitengestützte Gravitationswellenteleskop LISA.<sup>2)</sup> Sein Ziel ist der Frequenzbereich von  $10^{-4}$  bis 1 Hz. Die zugehörigen Wellenlängen sind riesig ( $3 \cdot 10^9$  bis  $3 \cdot 10^5$  km), sodass

## GRAVITATIONSWELLEN

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie verformen Massen den physikalischen Raum. Die dadurch erzeugte Raumkrümmung bestimmt die Bewegung anderer Massen und wirkt so als Gravitations„kraft“. **Gravitationswellen** sind zeitliche Änderungen in der Struktur der Raumzeit, die z. B. einen Kreis von Testmassen periodisch in eine Ellipse und wieder zurück verformen (Abb.). Das Verhältnis der Abweichungen  $d/l$  vom Kreis zu dessen Radius  $l$  ist die Amplitude bzw. Stärke  $h$  der Welle

$$h = 2d/l.$$

Die zu messende Amplitude liegt im Bereich von  $10^{-24}$  bis  $10^{-18}$ .

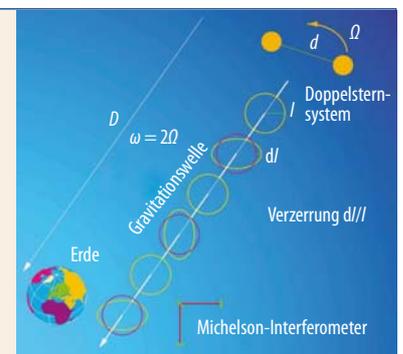
Gravitationswellen können in zwei verschiedenen Schwingungsebenen polarisiert sein, die sich um  $45^\circ$  vonein-

ander unterscheiden. Signifikante Amplituden erwartet man bei Frequenzen von  $10^{-17}$  bis  $10^4$  Hz. Das Strahlungsfeld lässt sich nach Multipolmomenten entwickeln. Da die Massen nur ein Vorzeichen haben, beginnt die Darstellung mit der Quadrupolstrahlung als dominantem Anteil. Das masselose Feldteilchen ist das Graviton mit dem Spin 2.

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

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

Aus dem Faktor  $2G/c^4 = 2 \cdot 10^{-44} \text{ Wm/s}$  folgt, dass nur Massen mit sehr großen Quadrupolmomenten und Beschleunigungen messbare Amplituden liefern.



Als mögliche Quellen kommen daher nur astrophysikalische Objekte oder Ereignisse infrage, z. B. ein Binärsystem von Schwarzen Löchern oder Neutronensternen.

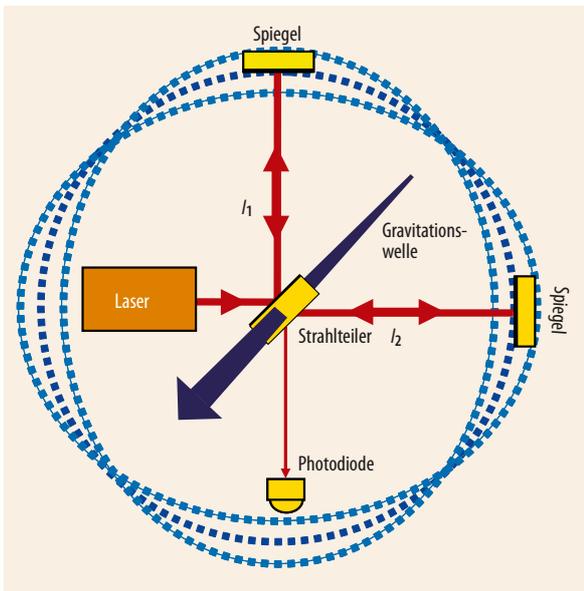


Abb. 1 Das Michelson-Interferometer verfügt über einen Mess- und einen Referenzarm. An ihren Enden reflektieren Spiegel das Laserlicht und dienen als Testmassen der Raumzeit. Sie sollen den geometrischen Änderungen der Raumzeit-Krümmung ungestört folgen. Am Strahlteiler interferieren die reflektierten Strahlen, wobei die über den gesamten Strahlquerschnitt integrierte Leistung photoelektrisch detektiert wird.

Teleskope sehr lange Arme haben sollten – ein weiterer Grund, in den Weltraum zu gehen. LISA wird fünf Millionen Kilometer lange Interferometerarme haben und z. B. beobachten können, wie superschwere Schwarze Löcher verschmelzen, wenn Galaxien kollidieren. Zudem wird LISA in der Lage sein, die Phase der Wellenform kohärent über viele tausend Zyklen zeitlich zu verfolgen. Damit lassen sich Verschmelzungsereignisse besonders frühzeitig entdecken, denn der Knall am Ende kündigt sich vorher über eine veränderte Wellenform an. So kann man rechtzeitig andere Teleskope auf den richtigen Punkt ausrichten. Wenn man die dadurch bestimmte Rotverschiebung mit der aus den Gravitationswellensignalen ableitbaren Luminositätsentfernung verknüpft, lässt sich die Ausdehnungsgeschichte des Universums rekonstruieren und vielleicht Licht ins Dunkel der Dunklen Energie bringen. Mittlerweile ist LISA als Gemeinschaftsprojekt der ESA und der NASA fest im Programm der beiden Agenturen verankert. Geplanter Start ist 2020.

Sowohl für LISA als auch für erdgebundene Teleskope der zukünftigen Detektorgeneration wird zurzeit intensive Grundlagenforschung in den Bereichen der Festkörper-, Tieftemperatur- und Laserphysik, Quantenoptik und satellitengestützten Laserinterferometrie betrieben.

### Eiskalte Superspiegel

Um die Dehnungen der Raumzeit anhand von Laserlaufzeiten zu vermessen, sind Spiegel nötig, die die Laserstrahlen reflektieren. Sie fungieren als Testkörper in der Raumzeit, d. h. einzig und allein die Raumzeit und

ihre Gravitationswellen dürfen die Position der Spiegel in Richtung der Laserstrahlen beeinflussen. Dann sind die Spiegel „frei fallend“. Alle anderen Mechanismen, die die Position oder Form der Spiegeloberflächen verändern können, sind stark zu unterdrücken – zumindest auf den Zeitskalen, die den Frequenzen der Gravitationswellen entsprechen, die wir detektieren wollen.

Auch auf der Erde lassen sich quasi frei fallende Testmassen realisieren, denn wichtig ist nur der freie Fall in Richtung der Laserstrahlen. Um die Schwerpunktsbewegung von der Bodenbewegung zu entkoppeln, sind die Testmassenspiegel im Ultrahochvakuum an mehrstufigen Pendeln aufgehängt. Die Resonanzfrequenzen der Pendel müssen möglichst weit unterhalb der Beobachtungsfrequenzen liegen, bei heutigen Detektoren ungefähr bei 1 Hz. Das Messfenster beginnt dann bei einigen 10 Hz. Die Qualität der Konstruktion und des Materials der Pendelaufhängung ist äußerst wichtig. Jede Komponente der Aufhängung muss möglichst ungedämpft schwingen können, sonst wandelt sich mechanische Energie irreversibel in Wärme um. Die gleiche Kopplung an das Wärmebad führt zu einer thermisch angeregten Bewegung der Pendelkonstruktion, zum thermischen Rauschen, das leider auch bei Frequenzen weit oberhalb der Pendelresonanzfrequenz auftritt. Um diese Rauschquellen zu reduzieren, hat sich eine Pendelaufhängung mit Glasfasern als sehr erfolgreich erwiesen (Abb. 3).

Ein anderes Problem, das sich auch durch noch so gute Pendelaufhängungen nicht lösen lässt, sind lokale Schwankungen des Gravitationsfeldes. Massen, welche die Spiegel umgeben, ziehen diese an. Falls sich die umgebende Masse bewegt, sei es durch Oberflächenwellen der Erdkruste, Luftbewegungen der Atmosphäre oder durch menschliche Aktivitäten, so bewegen sich auch die Spiegel ein wenig. Diese Gravitationseffekte lassen sich nicht abschirmen, sondern bestenfalls reduzieren, indem man Gravitationswellenteleskope in seismisch ruhigen Gegenden oder idealerweise unter Tage baut.



Abb. 2 Das Zentralgebäude von GEO600 – 20 km südlich von Hannover. Im Reinraum stehen die Vakuumtanks, in denen die optischen Komponenten des Detektors aufgehängt sind.

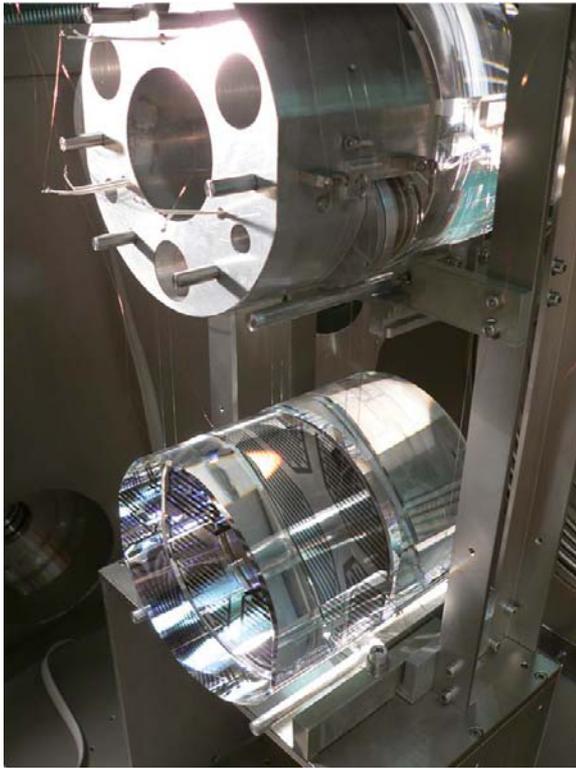


Abb. 3 Bei GEO600 sind die Spiegel in Mehrfachpendeln aufgehängt. Die Testmasse aus Quarzglas befindet sich im unteren Bildbereich hinten. Sie hängt an dünnen Quarzglasfasern an einem weiteren Glaskörper (oben), der seinerseits als Pendel aufgehängt ist. Vorne ist ein Referenzsystem zu sehen, an dem eine Reaktionsmasse hängt. Der Abstand der beiden unteren Massen und damit die mikroskopische Position der Testmasse sind über elektrostatische Felder kontrollierbar.

Allerdings reicht es nicht, den freien Fall der Spiegelschwerpunkte zu realisieren, da die Spiegeloberflächen die Laserstrahlen reflektieren. Daher ist es erforderlich, interne Spiegelbewegungen, also Vibrationen und Brownsche Bewegung der Spiegelmoleküle, zu minimieren. Eine Lösung ist es, die Testmasse möglichst nah an den absoluten Nullpunkt abzukühlen. Doch das ist leichter gesagt als getan: Da die Testmassen an dünnen Fasern im Vakuum hängen, lassen sie sich nur schwerlich vibrationsfrei abkühlen. Zudem absorbieren die Spiegel einen winzigen Bruchteil des Lichts und erwärmen sich dadurch, bis sich ein stationäres Gleichgewicht mit der Kühlung einstellt. Aus heutiger Sicht erscheint eine Spiegeltemperatur von etwa 20 K realistisch. Generell stellt sich allerdings die Frage, ob Testmassenspiegel bei so niedrigen Temperaturen ihre hohe optische und mechanische Qualität beibehalten. Zurzeit wird das Potenzial von Spiegeltestmassen aus einkristallinem Silizium mit hochreflektierenden nanostrukturierten Oberflächen diskutiert [5].

Doch damit nicht genug: Selbst wenn man den absoluten Nullpunkt der Temperatur erreichen könnte, wäre die Position der Spiegeloberflächen nicht beliebig genau definiert. Nach der Heisenbergschen Unschärferelation lassen sich Position und Impuls eines Objekts nicht gleichzeitig beliebig genau messen. Die quantenmechanische Ortsunschärfe der Spiegeltestmassen wird in künftigen Gravitationswellenteleskopen eine

wichtige Rauschquelle darstellen. Das Gleiche gilt jedoch auch für die Impulsunschärfe, denn ein Teleskop soll kontinuierlich beobachten. Doch schon nach kurzer Zeit münzen sich unscharfe Impulse in unscharfe Orte um. Das Laserfeld im Interferometer beeinflusst durch seinen Strahlungsdruck gleich beide Unschärfen. Wenn Störeinflüsse der Umgebung vernachlässigbar sind, führt der Strahlungsdruck zur quantenmechanischen Verschränkung von Spiegelbewegung und Lichtfeld, was man prinzipiell sogar ausnutzen kann. Naheliegender ist es jedoch, die quantenmechanische Unschärfe des Spiegels durch möglichst große Spiegelmassen zu reduzieren. Bereits die für 2014 geplanten Teleskope werden Spiegel mit Massen von ca. 40 kg beinhalten. Für nachfolgende Teleskope dürften sich wohl selbst diese Massen als zu klein erweisen. Zur Diskussion stehen hochreflektierende Superspiegel mit mehr als 100 kg Masse, gekühlt auf 20 Kelvin.

### Hohe Leistung und gequetschte Zustände

Neben dem thermischen Rauschen und dem Quantenrauschen der Spiegeltestmassen begrenzt auch das Quantenrauschen des Lichts die Empfindlichkeit der Gravitationswellenteleskope. Dieses zeigt sich als Photonenzählrauschen, das sog. Schrotrauschen. Aber wie macht sich dieses in den Instrumenten bemerkbar? Betrachten wir noch einmal Abb. 1. Der Arbeitspunkt des Interferometers ist so eingestellt, dass am Signalausgang eine konstante, geringe Laserleistung ausgekoppelt wird. Die Leistung liegt unter 100 mW, damit sie sich effizient mit einer Photodiode detektieren lässt. Zeigt sich im Photostrom eine zeitliche Veränderung, z. B. eine Modulation, so ist das ein Hinweis auf eine Gravitationswelle bei eben dieser Modulationsfrequenz. Das Problem ist aber: Aufgrund des Photonenzählrauschens bzw. aufgrund der quantisierten Wechselwirkung zwischen Lichtfeld und Photodetektor fluktuiert der Photostrom immer und bei jeder Frequenz (Abb. 4). Durch das zufällige Auftreten der Photonen entsteht eine Modulation, wo eigentlich

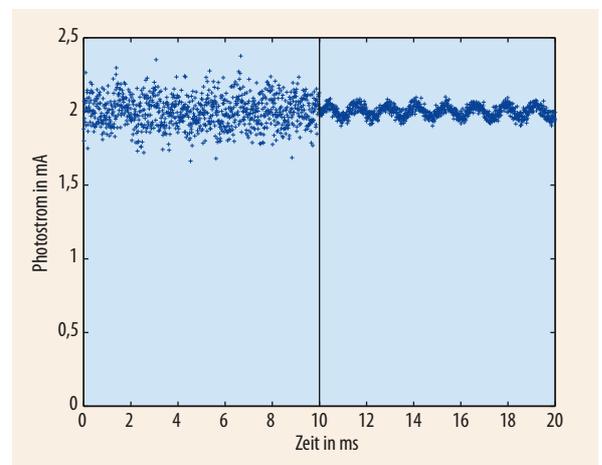


Abb. 4 Der Photostrom ist in beiden Bildteilen moduliert. Zu sehen ist dies aber erst, wenn das Rauschen (z. B. durch gequetschtes Licht) drastisch reduziert wird (rechts).

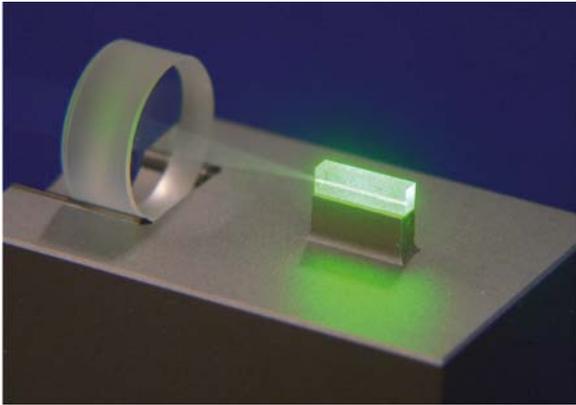


Abb. 5 Der Koppelspiegel (links) und die hochreflektierende Rückseite eines optisch nichtlinearen Kristalls bilden einen Resonator für Laserlicht der Wellenlänge 1064 nm. Seine Moden befinden sich zunächst im Grundzustand (ihre mittlere Photonenzahl ist also null), werden aber durch Pumplicht der halben Wellenlänge parametrisch verstärkt. Das Ergebnis sind gequetschte Zustände des Lichts.

keine sein sollte. Um nun das Gravitationswellensignal relativ zum Schrotrauschen zu erhöhen, ist eine größere umlaufende Laserleistung im Gravitationswellendetektor erforderlich. In Advanced LIGO wird die Laserleistung im Interferometer den beeindruckenden Wert von 800 kW erreichen – möglich durch einen Hochleistungslaser kombiniert mit optischen Resonatoren. Das Lasersystem, welches das Albert-Einstein-Institut (AEI) und Laserzentrum Hannover zusammen entwickeln und bauen, soll eine Leistung von 200 W haben. Darüber hinaus ist eine extrem hohe Stabilität des Lasers gefordert, und zwar bezüglich all seiner Parameter – also Leistung, Frequenz, Polarisation und räumlicher Feldverteilung. Der erfolgreiche Betrieb von Advanced LIGO erfordert eine relative Leistungsschwankung von weniger als  $2 \cdot 10^{-9} \text{ Hz}^{-1/2}$ . Diesen extrem kleinen Wert hat ein Demonstrationsexperiment in Hannover bereits erreicht.

Der technische Aufwand für ein solches Lasersystem ist bereits heute enorm. Er wird sogar weiter steigen, denn die Gravitationswellenastronomie benötigt Lasersysteme mit einem Kilowatt Ausgangsleistung. Tatsächlich gibt es aber dank der Quantenoptik noch eine andere Möglichkeit, Gravitationswellenteleskope zu verbessern: Mithilfe nichtlinearer optischer Kristalle lassen sich Photonen erzeugen, die zeitlich miteinander korreliert sind und dadurch ein reduziertes Photonenschrotrauschen zeigen (Abb. 5). Der Vorschlag zu diesem sog. gequetschten Licht stammt bereits aus dem Jahr 1980. Um das differentielle Quantenrauschen in den beiden Interferometerarmen ebenfalls zu quetschen, muss das gequetschte Licht in den Signalausgang des Interferometers eingespeist werden und sich am Strahlteiler mit dem Hauptstrahl überlagern [6]. Auf diese Weise reduziert sich das Quantenrauschen, ohne das Gravitationswellensignal zu beeinträchtigen.

Bis vor wenigen Jahren galt es als zu aufwändig, gequetschtes Licht für eine echte Anwendung herzustellen. In den letzten Jahren konnten wir aber entscheidende Fortschritte bei der Kontrolle von gequetschtem

Licht erzielen [7]. Auch haben wir die Stärke des Quetschgrades erhöhen können und halten derzeit den Weltrekord [8]. Wir wollen daher noch in diesem Jahr gequetschtes Licht bei GEO600 einsetzen. Wir erwarten eine Empfindlichkeitssteigerung, die einer Vervielfachung der Laserleistung entspricht. Dieser Fortschritt ist umso entscheidender, da GEO600 schon nach der kommenden Ausbaustufe aufgrund thermischer Effekte keine höhere Laserleistung mehr verträgt. Es ist durchaus wahrscheinlich, dass gequetschte Zustände des Lichts in Gravitationswellenteleskopen eine echte Anwendung finden [9]. Insbesondere in zukünftigen Teleskopen mit gekühlten Testmassen wird es wichtig sein, die umlaufende Laserleistung und damit die thermische Last auf die Spiegel nicht zu hoch anzusetzen. Gequetschtes Licht könnte somit eine Schlüsselkomponente für die Gravitationswellenastronomie sein.

### Laserinterferometer im All

Gravitationswellenteleskope im Weltraum werden – allen irdischen Rauschquellen entrückt – nach dem gleichen Grundprinzip wie erdgebundene Teleskope funktionieren. Da ihre Interferometerarme aber um viele Größenordnungen länger sein werden, können sie Gravitationswellen im Frequenzbereich unter einem Hertz messen, und zwar ohne kryogene Testmassen oder ultrastabile Hochleistungslaser. Zum Glück, denn beides wäre im Weltraum kaum zu realisieren. Doch stellt sich die Frage, wie man die Satelliten eines Weltraumteleskops stabil zueinander ausrichten kann, wenn ihr Abstand Millionen von Kilometern beträgt und die Signalübertragung viele Sekunden dauert.

LISA soll aus drei Satelliten bestehen, die ein Dreieck mit fünf Millionen Kilometern Armlänge bilden (Abb. 6). Jeweils zwei Arme definieren ein Michelson-Interferometer, sodass die Signale von drei Interferometern aufzuzeichnen sind. Im Inneren jedes Satelliten befinden sich frei schwebende Spiegeltestmassen – polierte Würfel aus einer Gold-Platin-Legierung

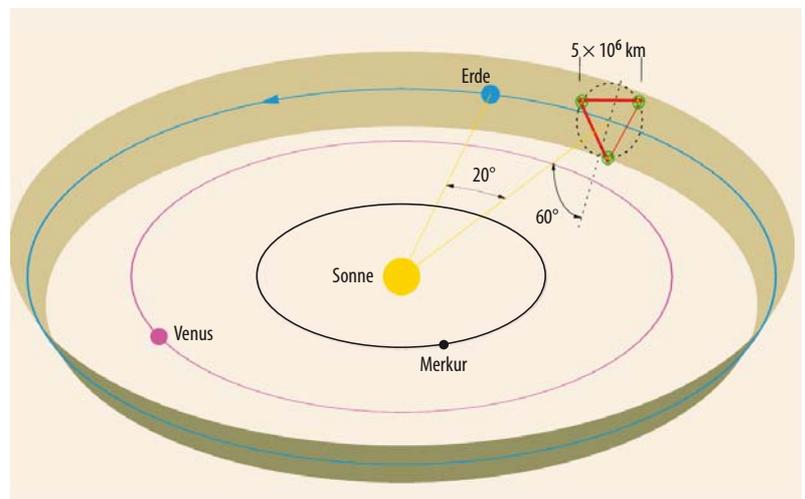
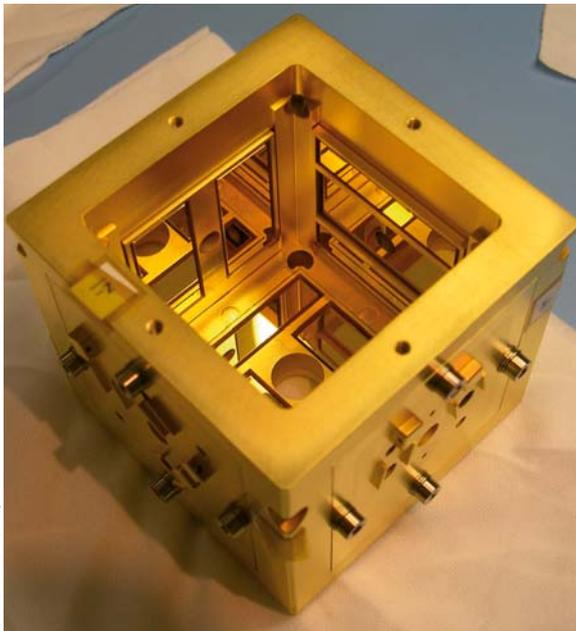


Abb. 6 Die Umlaufbahnen der drei LISA-Satelliten liegen nahe der Erdbahn um die Sonne, und zwar so, dass das Dreieck ca. 20° hinter der Erde nahezu starr bleibt, während es sich als Ganzes um die Sonne und sich selbst dreht.

Universität Trento/INFN



**Abb. 7** Der Käfig ist gerade so groß, dass die 43 mm kleinen Testmassen für LISA Pathfinder und LISA darin Platz finden. Zwischen Testmasse und Elektrodenkäfig bleibt eine Lücke von 2 bis 4 mm.

mit 43 mm Kantenlänge –, die als Referenz für die Längenmessung und zur Bahnregelung des Satelliten dienen (**Abb. 7**). Auch bei LISA nutzt man Laserlicht, um zu messen, wie sich die Entfernung zwischen den Testmassen ändert. Jedoch lassen sich von 2 W Laserleistung nur ca. 100 pW auffangen. Das wird aber ausreichen, Gravitationswellen zu detektieren. Ziel ist es, bei Abständen von fünf Millionen Kilometern Veränderungen mit einer Genauigkeit von  $20 \text{ pm Hz}^{-1/2}$  im Frequenzbereich von  $10^{-4}$  bis 0,1 Hz zu messen. Die kleinen Frequenzen zu detektieren, ist auch im Welt- raum noch problematisch. So betreffen thermische Ausdehnungen, z. B. durch veränderliche Sonneneinstrahlung, genau diesen Frequenzbereich. Außerdem ist das Dreieck nicht perfekt steif, sondern wird durch Erde, Mond und Planeten periodisch im Prozentbereich verzerrt. Diese Schwankungen der Armlängen können bis zu 50 000 km betragen, aber sie liegen außerhalb der Messfrequenz und lassen sich somit in der Datenverarbeitung ausgleichen.

Viele der neuen Technologien wurden in Labor- experimenten bereits erfolgreich getestet, nicht zuletzt am AEI in Hannover. Letztendlich reichen Tests auf der Erde jedoch nicht aus. Das gilt insbesondere für die gemeinsame Kontrolle der Testmassen und ihrer Satelliten in allen Freiheitsgraden mit ihren rausch- armen Sensoren und Aktuatoren und für die Stabilität der Längenmessung mit dem Laserinterferometer. Ein- ige Aspekte werden daher in der Technologiemi- sion LISA Pathfinder erprobt, welche die ESA Ende 2011 starten will, und deren Flughardware die europäische Industrie gerade baut. Das AEI in Hannover hat die wesentlichen Teile der Laserinterferometrie für LISA Pathfinder entwickelt und ist nun dabei, fehlende Teile des Interferometers für LISA in enger Zusammen- arbeit mit der Industrie sowie Forschungsgruppen in Europa

und den USA zu konzipieren. Dabei haben sich schon einige Überraschungen ergeben, so scheint z. B. die Frequenzstabilisierung des Lasers auf  $10^{-6} \text{ Hz/Hz}^{1/2}$  gleich auf mehreren Wegen erreichbar zu sein, wäh- rend es sich als überraschend knifflig erwiesen hat, den Einfluss winziger Kippbewegungen der Testmasse und des Satelliten bei der Längenmessung zu mini- mieren. Auch dieses Problem hat sich aber inzwischen als lösbar erwiesen. Obwohl noch einige Aufgaben zu erledigen sind, ist es nur eine Frage der Zeit, bis die Gravitationswellenastronomie ein neues Fenster ins Universum öffnet.

\*

Wir danken der DFG (SFBs 407 und TR7), dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR Förderkennzeichen 50 OQ 0501 und 50 OQ 0601) und dem Exzellenzcluster QUEST der Leibniz Universität Hannover für die finanzielle Unterstützung.

### Literatur

- [1] B. Schutz: Gravity from the Ground Up, Cambridge (2004)
- [2] K. Danzmann und H. Ruder, Phys. Blätter, Februar 1993, S. 103
- [3] P. Aufmuth und K. Danzmann, Physik Journal, Januar 2002, S. 33; [www.youtube.com/watch?v=RzZgFKoIfQI](http://www.youtube.com/watch?v=RzZgFKoIfQI)
- [4] P. Aufmuth und K. Danzmann, New J. Phys. 7, 202 (2005)
- [5] F. Brückner et al., Opt. Lett. 33, 264 (2008)
- [6] C. M. Caves, Phys. Rev. D 23, 1693 (1981)
- [7] H. Vahlbruch et al., Phys. Rev. Lett. 97, 011101 (2006)
- [8] H. Vahlbruch et al., Phys. Rev. Lett. 100, 033602 (2008)
- [9] R. Schnabel, Nature Physics 4, 440 (2008)

### DIE AUTOREN



Die Autoren (alle im FV Quantenoptik und Photonik sowie Gravitation und Relativitätstheorie) von links nach rechts: **Roman Schnabel** ging nach seiner Promotion für zwei Jahre an die Universität in Canberra. Seit 2008 ist er Professor am Albert-Einstein-Institut und an der Uni Hannover. Er verfolgt u. a. das Ziel, gequetschtes und verschränktes Licht konkreten Anwendungen zuzuführen. **Gerhard Heinzl** arbeitete nach seiner Promotion zwei Jahre in Japan bei TAMA300. Am AEI in Hannover entwickelt er mit seiner Gruppe wichtige Teile der Interferometrie für LISA Pathfinder und LISA. **Harald Lück** beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung von GEO600 und der Planung eines Gravitationswellendetektors der 3. Generation. **Benno Willke** war einer der ersten Mitarbeiter in der Gravitationswellengruppe und verantwortet heute die Laserentwicklung und -stabilisierung. **Karsten Danzmann** ist seit 1993 Professor an der Uni Hannover und seit 2001 Direktor am MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Hannover. Er ist Principal Investigator von GEO600, Co-Principal Investigator von LISA Pathfinder und europäischer Sprecher des LISA International Science Teams.