

Der genaue Weg des Lichts

Franziska Konitzer

■ Die präzise Vermessung von Abstandsänderungen spielt nicht nur in der Geodäsie eine große Rolle, sondern ermöglichte vor Kurzem auch den lang ersehnten direkten Nachweis von Gravitationswellen. Der Kern der Messmethode ist Laserinterferometrie.

Die astrophysikalische Geräteküche hatte bereits zu brodeln begonnen, als im Februar 2016 die LIGO-Kollaboration, der mehr als tausend Wissenschaftler angehören, weltweit in mehreren Pressekonferenzen an die Öffentlichkeit trat. Zeitgleich erschien eine Studie mit den Einzelheiten jener Messungen, über welchen Wissenschaftler monatelang gebrütet hatten. Sie wollten ganz sichergehen, dass ihre Entdeckung kein Störsignal war – sondern der krönende Abschluss einer jahrzehntelangen Suche nach Gravitationswellen.

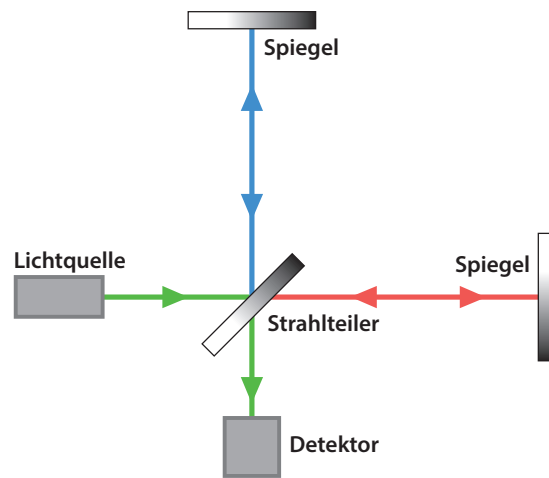
Diese winzigen Kräuselungen in der Raumzeit hatte zwar Albert Einstein im Zuge seiner Allgemeinen Relativitätstheorie 1916 selbst vorausgesagt, hielt deren Messung aber für unmöglich. Kein Wunder, dass Physiker Jahrzehnte benötigten, bis ihre Instrumente empfindlich genug waren, sodass am 14. September 2015 die LIGO-Detektoren in den USA jene Gravitationswellen aufspüren konnten, die vom Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher kündeten.

Ihr Nachweis beruht dabei auf der wohl genauesten Messung einer Abstandsänderung der Welt – dank Laserinterferometrie. Doch wird diese nicht nur in Gravitationswellenobservatorien mit ihren kilometerlangen Tunneln eingesetzt, sondern auch in der Industrievermessung und der Geodäsie: in Laser Trackern etwa, die eine dreidimensionale Ortung von Punkten im Raum ermöglichen, oder in Absolutgravimetern, die das Schwerfeld der Erde erfassen. Ab nächstem Jahr wollen Wissenschaftler sogar ihren Einsatz im Weltraum erproben, um auch kleinste Variationen der Erdgravitation aufzuspüren.

Interferenz von Laserlicht

Bei der Laserinterferometrie wird in der typischen Anordnung eines sogenannten Michelson-Interferometers ein Laserstrahl zunächst durch einen Strahlteiler aufgeteilt. Die beiden daraus resultierenden Strahlen gehen zwar anschließend in einem rechten Winkel getrennte Wege, werden aber schließlich zurückreflektiert und überlagern sich im Detektor. Ergebnis: Es treten Interferenzeffekte auf.

Das kann man sich leicht veranschaulichen, wenn man sich die beiden Laserstrahlen als Wellen vorstellt. Schwingen sie im Gleichtakt, treffen also immer Wellenberg und Wellenberg oder Wellental und Wellental genau aufeinander, spricht man von konstruktiver Interferenz und die



Copyright: Franziska Konitzer

Das Prinzip eines Michelson-Interferometers

Lichtintensität ist erhöht. Trifft hingegen Wellenberg auf Wellental, löschen sich die Strahlen gegenseitig aus. Bei dieser destruktiven Interferenz sinkt die Lichtintensität auf null, der Detektor empfängt überhaupt kein Signal.

Verändert sich nun der zurückgelegte Weg einer der beiden Laserstrahlen, wirkt sich das auf die Interferenz aus. Deshalb kann die Laserinterferometrie so gut Abstandsvariationen vermessen. Sie reagiert auf Längenänderungen von der Wellenlänge des Lichts, die im Bereich von Nanometern, also milliardstel Metern, liegt. Ist beispielsweise ein Interferometer so eingestellt, dass sich seine beiden Strahlen destruktiv überlagern und der Detektor kein Signal registriert, genügt eine Wegänderung um lediglich eine halbe Wellenlänge, um ein Signal zu erzeugen.

Genau das war im September letzten Jahres bei den LIGO-Detektoren geschehen. Laut der Allgemeinen Relativitätstheorie werden Gravitationswellen durch beschleunigte Massen erzeugt und breiten sich in der Raumzeit senkrecht zu ihrer Schwingungsrichtung aus. Sie stauchen und dehnen den Raum selbst, was dazu führt, dass sich die relative Länge der zwei Arme der LIGO-Detektoren mit Längen von zwei oder vier Kilometern zueinander ändert. Resultat: Der Detektor, der normalerweise auf destruktive Interferenz eingestellt ist, empfängt auf einmal ein Signal.

Die Gravitationswellen änderten die Armlänge lediglich um 10^{-19} Meter – das ist weit weniger als die Größe eines Atomkerns! Und das, obwohl das Ereignis, das diese Wellen erzeugt hatte, gewaltig war. In etwa 1,3 Milliarden Lichtjahren Entfernung waren zwei Schwarze Löcher von 29 und 36 Sonnenmassen miteinander verschmolzen und erzeugten dabei Gravitationswellen mit einer Energie, die die gesamte Leuchtkraft aller Sterne im Universum übersteigt.

Laser Tracker für die Industrievermessung

Ganz so genau nehmen es Laser Tracker nicht. Aber sie beruhen auf dem gleichen Prinzip und können so Abstandsänderungen mit Mikrometergenauigkeit erfassen, um Punkte im dreidimensionalen Raum zu vermessen. Auch hier wird zunächst ein Laserstrahl geteilt. Während ein Strahl als Referenz dient, verlässt der zweite Strahl den Tracker und wird von einem Reflektor zurück ins Gerät geschickt, wo die beiden Strahlen interferieren.

Ein solcher Laser Tracker kann nicht automatisch absolute Distanzen erfassen. Stattdessen startet der Reflektor von einem Referenzpunkt aus, dessen Entfernung bekannt ist. Wird der Reflektor anschließend auf den Tracker zu- oder wegbewegt, befinden sich die beiden Laserstrahlen in einem Wechselspiel aus konstruktiver und destruktiver Interferenz, dessen Durchgänge gezählt werden können und so die Abstandsmessung ermöglicht.

Prinzipiell ist die Genauigkeit eines Laser Trackers zwar hauptsächlich durch die Wellenlänge des Laserlichts begrenzt. Praktisch spielen aber auch Faktoren wie Luftunruhen oder Luftfeuchtigkeit eine Rolle, welche die Präzision von Laser Trackern einschränken und dazu führen, dass sie meistens in einer gut kontrollierbaren Umgebung eingesetzt werden: in Maschinenhallen etwa, um einzelne Komponenten, wie bewegliche Roboterarme und Maschinen, einzumessen, oder im Schiffs- und Flugzeugbau.

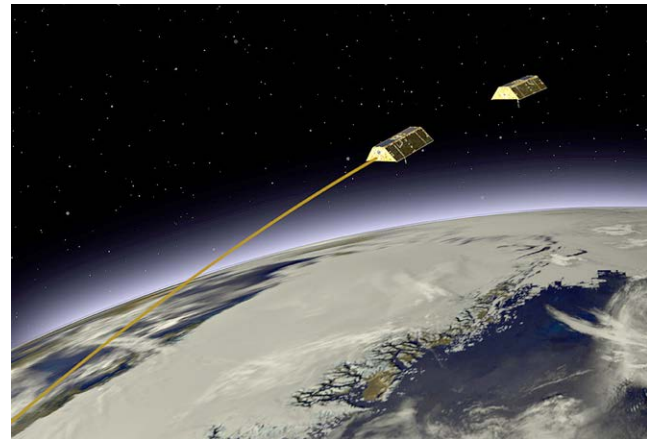
Nanometer-Genauigkeit für das Erdschwerefeld

Auch Absolutgravimeter sind im Grunde genommen Michelson-Interferometer. Sie liefern Abstandsmessungen mit Nanometergenauigkeit und können so die Erdbeschleunigung, die in Deutschland etwa $9,81 \text{ m/s}^2$ beträgt, bis auf die achte Nachkommastelle bestimmen.

Dafür nutzen sie den freien Fall einer Testmasse, die über eine kurze Distanz von 20 bis 30 Zentimetern in einem Vakuum nach unten fällt. Diese Testmasse ist der Reflektor, an dem ein Laserstrahl zurückgeworfen wird und sich anschließend mit dem Referenzstrahl überlagert. Über den Interferenzeffekt vermisst der Laserstrahl den Weg des Reflektors. Da der freie Fall von der Erdbeschleunigung abhängt, kann ein Absolutgravimeter somit zusammen mit einer präzisen Zeitmessung durch eine Atomuhr die Schwerebeschleunigung am Aufstellungsort direkt ermitteln.

Laserinterferometrie im Weltraum

In einem nächsten Schritt wollen Wissenschaftler demnächst den Einsatz von Laserinterferometrie im Weltall erproben, um das Schwerefeld der Erde und seine weltweiten Variationen noch genauer zu kartieren. Zu diesem Zweck waren bereits ab 2002 die GRACE-Satelliten der US-Weltraumagentur NASA und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt DLR unterwegs – mit großem



Abstandsänderungen zwischen den zwei Satelliten der GRACE Follow-On Mission, die 2017 starten soll, werden mittels Laserinterferometrie mit Nanometergenauigkeit vermessen werden.

Erfolg. GRACE konnte etwa die deutliche Abnahme der Grönland-Eismassen und Änderungen im Grundwasserstand in Indien erfassen und sogar die Spuren in der Erdkruste aufgrund des Erdbebens, das 2004 den Tsunami im Indischen Ozean auslöste, nachweisen.

Die Nachfolgemission GRACE Follow-On soll ab nächstem Jahr in die Fußstapfen von GRACE treten und verfolgt den gleichen Ansatz: Zwei Satelliten fliegen in rund 220 Kilometern Abstand rund 490 Kilometer über der Erde hintereinander her. Gelangt der erste Satellit an eine Stelle höherer Gravitationskraft, wird er schneller, sein Vorsprung gegenüber dem dahinterliegenden Satelliten vergrößert sich ein wenig. Nach der Gravitationsanomalie verlangsamt sich der Satellit wieder, das Gleiche wiederholt sich für den nachfolgenden Satelliten. Somit ist es möglich, aus der Abstandsänderung zwischen den beiden Zwillingssatelliten auf das Schwerefeld zu schließen – wie genau, hängt direkt von der Qualität der Abstandsmessung ab.

GRACE nutzte Mikrowellen, um die Distanzen zwischen den beiden Satelliten bis auf einige tausendstel Millimeter genau zu bestimmen. GRACE Follow-On wird zwar ebenso ein solches System nutzen. Zeitgleich kommt aber auch erstmals ein sogenanntes Laser Ranging Interferometer zum Einsatz. Die Messung per Laserinterferometrie soll noch einmal 50-mal genauer sein und die Entfernungsänderung bis auf den Nanometer genau erfassen.

Teilweise wird diese hohe Präzision auch der Jagd nach den Gravitationswellen zu verdanken sein. Denn für das Laser Ranging Interferometer kommen Technologien zum Einsatz, die ursprünglich für die LISA Pathfinder Mission der europäischen Weltraumagentur ESA entwickelt worden waren: ein Satellit, der derzeit den Einsatz eines künftigen Gravitationswellenobservatoriums im Weltall erprobt, das künftig weitere winzige Krümmungen der Raumzeit einfangen soll.

Kontakt: f.konitzer@gmail.com

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.