

Quelle: T. Pyle/Cattech/MIT/LIGO Lab

MIT VAKUUM AUF EINSTEINS SPUREN

Interview mit Prof. Dr. Rainer Weiss, Gründungsmitglied von LIGO

Im September 2015 fing das Spezialobservatorium LIGO im amerikanischen Louisiana erstmals Gravitationswellen direkt auf der Erde auf und bewies somit Einsteins Relativitätstheorie zu starken Gravitationsfeldern – ein Durchbruch für die Astrophysik. Für die spektakulären Messungen am LIGO war Vakuumtechnik enorm wichtig. Lösungen von Pfeiffer Vacuum waren sowohl an den Messungen der LIGO-Observatorien als auch an zahlreichen Grundlagenexperimenten beteiligt. LIGO-Gründer Prof. Dr. Rainer Weiss spricht im Interview über die Erkenntnisse von LIGO und erzählt, welche Rolle dabei die Lösungen von Pfeiffer Vacuum spielen.

$E = mc^2$: Die 1905 von Albert Einstein im Rahmen der Relativitätstheorie entwickelte Formel zur Beschreibung

der Äquivalenz von Masse und Energie ist wohl die berühmteste physikalische Formel überhaupt. Einige Jahre später weitete der weltbekannte Physiker seine Überlegungen auf die Gravitation aus und beschrieb im Rahmen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie 1915 mathematisch die Existenz von Gravitationswellen. Seit 100 Jahren ist diese Theorie in der Physik anerkannt.

Mithilfe des LIGO (Laser-Interferometer-Gravitations-Observatorium) in den amerikanischen Bundesstaaten Washington und Louisiana konnten Wissenschaftler zum ersten Mal die von einem Paar kollidierender Schwarzer Löcher ausgehende Strahlung messen. Damit wurde die Existenz von binären Schwarzen Löchern nachgewiesen. Außerdem konnte belegt werden, dass ihre Dynamik den Gleichungen Einsteins folgt.

Gravitationswellen – Deformationen der Raumzeit

Gravitationswellen entstehen, wenn Objekte mit großer Masse wie zum Beispiel Neutronensterne oder schwarze Löcher beschleunigt werden und eng umeinander kreisen. Wenn sie miteinander kollidieren, erreichen sie nahezu Lichtgeschwindigkeit. Während sie kreisen, erzeugen sie Gravitationswellen, die den Raum stauchen beziehungsweise strecken – sie verformen also die Raumzeit. Diese Deformationen sind extrem klein und reversibel, vergleichbar mit einem ins Wasser geworfenen Stein, der sich ausbreitende Wellen auf der Oberfläche erzeugt.

Spektakulärer Nachweis der Theorie von Albert Einstein

Das Spezialobservatorium LIGO fing im September 2015 erstmals die Gravitationswellen zweier miteinander verschmelzender Schwarzer Löcher in einer wahrscheinlich 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie auf und bewies damit nicht nur die Einsteinsche Theorie. Mit den Erkenntnissen wurde zudem auch erstmals die Existenz eines Paares schwarzer Löcher nachgewiesen. Für die Forscher bedeutet diese Entdeckung den Start in eine neue Ära der Astronomie – vergleichbar mit

dem Moment, als Galileo Galilei im 17. Jahrhundert seine astronomischen Untersuchungen begann.

Möglich wurde dieser Schritt in ein neues astronomisches Zeitalter mithilfe zweier Detektoren des LIGO in den USA, die 3.000 Kilometer voneinander entfernt in Hanford (Washington) und Livingston (Louisiana) stehen. Das Observatorium wurde 1992 gegründet, um Untersuchungen und Experimente zur Registrierung von Gravitationswellen durchzuführen. Heute arbeiten dort mehrere Tausend Wissenschaftler aus 16 Nationen.

Die Detektoren basieren auf einem interferometrischen Verfahren nach Michelson, bei dem ein durch einen Strahlteiler aufgespaltener Laserstrahl zwei möglichst lange Wegstrecken durch ein optisches Spiegelsystem durchläuft. Die Laserstrahlen werden anschließend in dem Detektor zusammengeführt. Auf diese Weise werden kleinste Laufzeitunterschiede der Laserstrahlen gemessen, die durch Gravitationswellen erzeugt werden. Die durch Gravitationswellen erzeugten Abstandsänderungen der Laserstrahlen sind nur etwa so groß wie 1/1.000 des Kerns eines Atoms mit der Größe von 10^{-18} Metern, selbst bei einer Entfernung der Spiegel von 4 Kilometern.



Quelle: Caltech/MIT/LIGO Lab

Abb. 1: Blick auf einen der beiden 4 Kilometer langen Vakuumröhren-Arme des LIGO-Detektors in Louisiana

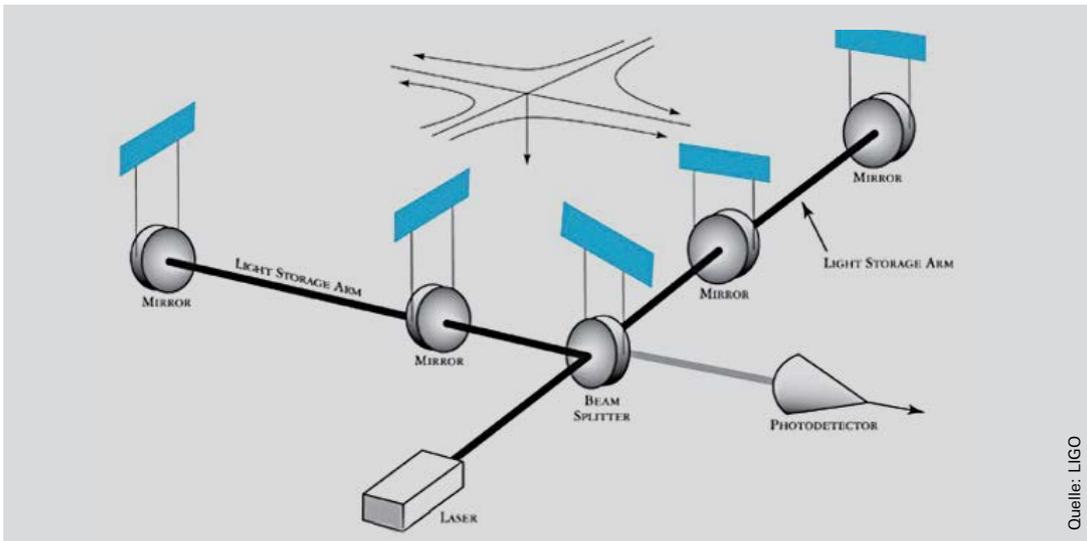


Abb. 2: Schema des LIGO Interferometers zur Detektion von Gravitationswellen

Vakuumtechnik von Pfeiffer Vacuum am LIGO im Einsatz

Für dieses Experiment und somit auch für den Nachweis der Gravitationswellen auf der Erde war Vakuumtechnik notwendig. Um ihre einwandfreie Funktion sicherzustellen, müssen die beiden Wegstrecken des Lasers von sämtlichen störenden Einflüssen frei gehalten werden. Aus diesem Grund befinden sich die Laserstrahlen und optischen Spiegel in einem Ultrahochvakuumsystem. Um die Qualität und Zuverlässigkeit dieses Systems zu gewährleisten und damit die erfolgreiche Durchführung des Experiments garantieren zu können, war eine jahrzehntelange Vorbereitung notwendig. In deren Rahmen wurde an unterschiedlichsten physikalischen Instituten

weltweit intensive Grundlagenforschung zur Vorbereitung der Gravitationswellen-Experimente betrieben.

Pfeiffer Vacuum lieferte das Vakuumequipment für viele dieser Experimente. Und auch die LIGO-Detektoren werden von Restgasanalysensystemen von Pfeiffer Vacuum überwacht. Zudem sind beim Ausheizen der riesigen Röhrensystemen HiPace Turbopumpen sowie zahlreiche Massenspektrometer zur Qualitätssicherung und Lecksuche im Einsatz. Sie stellen sicher, dass die notwendigen Vakuumbedingungen in den Röhrensystemen ununterbrochen aufrechterhalten bleiben und die Umgebungsbedingungen für die erfolgreiche Durchführung der Experimente gegeben sind.



Abb. 3: Die Vakuumlösungen von Pfeiffer Vacuum im Einsatz beim LIGO-Experiment – Turbopumpe HiPace und PrismaPlus Massenspektrometer

INTERVIEW MIT RAINER WEISS, GRÜNDUNGSMITGLIED UND WISSENSCHAFTLICHER KOPF DES LIGO-EXPERIMENTS



Quelle: MIT News / Bryce Vickmark

Prof. Dr. Rainer Weiss, Gründungsmitglied von LIGO

Herr Dr. Weiss, Sie sind einer der Gründer und wissenschaftlichen Leiter des LIGO-Projektes und arbeiten seit mehr als 25 Jahren mit den Detektoren. Erzählen Sie uns bitte etwas zu den Anfängen: Wie ist das Projekt entstanden und was war Ihre Motivation?

Das ist eine lange Geschichte. Sie nahm ihren Anfang, als ich meine Arbeit als Fakultätsmitglied am MIT aufnahm und gebeten wurde, einen Kurs über die allgemeine Relativitätstheorie zu halten. Das war 1968 und ich hatte soeben eine neue Forschungsgruppe in der Abteilung für Physik ins Leben gerufen, die sich mit experimenteller Gravitation und empirischer Kosmologie beschäftigte. Ich kannte mich mit der allgemeinen Relativitätstheorie kaum aus und war den Studenten meistens lediglich einen Tag voraus. Um ehrlich zu sein, waren die Studenten bei der Tensorrechnung vielleicht sogar mir voraus. Die

Studenten wollten mehr über die Weber-Experimente erfahren. Dabei handelt es sich um die Messungen, die Joseph Weber, Pionier bei der Erforschung von Gravitationswellen, in den 1960er Jahren bei der Erregung von Aluminiumzylindern durchgeführt hat. Für mich war es sehr schwierig, die Interaktion eines Zylinders mit einer Gravitationswelle zu verstehen. Ich dachte, ich könnte verstehen und berechnen, wie zwei Objekte, die sich entlang benachbarter Geodäten bewegen, ihren Abstand zueinander ändern, wenn eine Gravitationswelle sie durchquert. Der nächste Gedanke war, diesen Abstand mithilfe der Zeit, die das Licht von einem Objekt zum anderen benötigt, zu messen. Die Berechnung war ziemlich einfach. Ich gab sie den Studenten als Aufgabe. Später dachte ich mehr darüber nach und stellte fest, dass man somit eigentlich einen empfindlichen Gravitationswellendetektor herstellen könnte. Das war für mich gedanklich der Beginn von LIGO.

Nun wurden Gravitationswellen tatsächlich physisch detektiert. Was dachten Sie, als Sie das erste Mal von diesem Nachweis hörten?

Ich war mit meiner Familie im Urlaub in Maine. Wir hatten mit Peter Saulson von der LIGO-Arbeitsgruppe der Syracuse University und mit seiner Frau eine Verabredung zum Kajakfahren entlang der Küste von Maine. Zufällig nahm auch Richard Isaacson an der Fahrt teil. Richard war ein Student von Charles Misner; er hatte eine wichtige Forschungsarbeit geschrieben, in welcher er bewies, dass Gravitationswellen Energie transportieren und wirkliche physische Dinge sind. Er war der Fachbereichsleiter für Gravitationsphysik der National Science Foundation zu der Zeit, als die interferometrische Detektion von Gravitationswellen beantragt wurde. Er war immens wichtig für die NSF, um sich auf das Wagnis einzulassen, LIGO erst zu entwickeln und dann zu fördern. Nachdem wir die Erlaubnis von der LIGO-Leitung erhalten haben, erzählten Peter und ich Richard von diesem „Ereignis“. Er war recht skeptisch und stellte uns zahlreiche berechnete Fragen: „Woher wisst ihr, dass es nicht daran liegt, dass ...?“, aber nachdem er die Daten gesehen hatte und wir all unsere Überredungskünste spielen ließen, gingen wir gemeinsam Abendessen, stießen auf das „Ereignis“ an und redeten über die guten alten Zeiten.

Welche Rolle spielt Vakuumtechnologie im Allgemeinen für die Forschungsarbeit bei LIGO?

Vakuum wird bei Drücken unter 10^{-9} Torr in den 4 Kilometer langen Armen benötigt, um eine Vorwärtsstreuung von restlichen Gasmolekülen zu verhindern, was zu Phasenrauschen am Interferometerausgang führen würde. Das größte Phasenrauschen käme von großen Molekülen, welche über eine größere Polarisierbarkeit verfügen und sich langsamer bewegen.

Vakuum wird außerdem auch bei Drücken unter 10^{-8} Torr in den Probenmassenkammern benötigt, um Bewegungsschwankungen der Probenmassen aufgrund von Kollision mit Restgasatomen zu verhindern. Auch hier sind schwerere Moleküle größere Quellen für Rauschen als leichtere Moleküle.

Welche besonderen Anforderungen muss das Vakuumsystem erfüllen?

Abgesehen von den oben angegebenen Druckanforderungen muss das Vakuumsystem für mehrere Monate ununterbrochen und zuverlässig funktionieren. Außerdem sollten Vibrationen der Vakuumpumpen die Probenmassen nicht beeinflussen.

Welche Produkte von Pfeiffer Vacuum werden bei LIGO verwendet und warum haben Sie sich für diese entschieden?

Generell sind am LIGO Komponenten von vielen verschiedenen Herstellern im Einsatz. Wir entschieden uns für die Massenspektrometer von Pfeiffer Vacuum aufgrund der kompetenten Beratung und exzellenten Unterstützung der Pfeiffer Vacuum Experten in den USA bei zwei sehr speziellen Herausforderungen, denen wir bei LIGO begegneten: Die erste Aufgabe

bestand darin, vor Abnahme vom Hersteller festzustellen, ob die Vakuum-Röhrensysteme von LIGO die vorgegebenen Restgaswerte erfüllen. Das zweite Problem trat später auf, als wir die Schweißnähte der 4 Kilometer langen Vakuumröhren auf Leckagen untersuchen mussten. Diese Leckagen wurden von Salzsäure verursacht, die aus Mäuseurin stammte. Für beide dieser Herausforderungen benötigten wir zuverlässige, genaue und sensible Restgasanalytoren.

Wie bewerten Sie die Zusammenarbeit mit Pfeiffer Vacuum?

Die jahrzehntelange und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit Pfeiffer Vacuum war immer sehr effektiv und nützlich. Unser Ansprechpartner stand für alle Fragen hinsichtlich der Restgasanalytoren oder Turbopumpen sowie den angeschlossenen Prozesse jederzeit zur Verfügung.

Gravitationswellen konnten nun nachgewiesen und somit Einsteins Relativitätstheorie bestätigt werden. Was bedeutet das für die Forschungsarbeit von LIGO? Wie wird es nun weitergehen?

Das große Ziel wurde noch nicht erreicht. Es wurde lediglich der erste Schritt getan. Mit der Weiterentwicklung der Empfindlichkeit der Geräte wird LIGO erstmals das Gebiet der Gravitationswellenastronomie untersuchen. Dabei handelt es sich um ein neues Gebiet der Astrophysik, welches das dunkle Universum mithilfe von Gravitationswellen erforscht, die durch im Universum beschleunigte Masse ausgesendet werden. Wir wissen, dass es binäre Schwarze Löcher und Neutronensterne gibt. Und es gibt noch viel über sie zu erforschen. Die Massenspektroskopie von Schwarzen Löchern wird uns Informationen über ihre Entstehung und ihre Bedeutung in der Astronomie liefern. Neutronensterne werden Informationen liefern über die Zustandsgleichung von Kernmaterie und möglicherweise über den Entstehungsprozess von Schwerelementen im Universum. Sollte es uns möglich sein, eine Supernova zu beobachten, werden Gravitationswellen die inneren Prozesse des stellaren Kollapses deutlich machen. Es könnte durchaus auch neue Quellen von Gravitationswellen geben, an die wir bisher nicht gedacht haben.

Vielen Dank für das Interview!



VAKUÜMLÖSUNGEN AUS EINER HAND

Pfeiffer Vacuum steht weltweit für innovative und individuelle Vakuümlösungen, für technologische Perfektion, kompetente Beratung und zuverlässigen Service.

KOMPLETTES PRODUKTSORTIMENT

Vom einzelnen Bauteil bis hin zum komplexen System:

Wir verfügen als einziger Anbieter von Vakuumtechnik über ein komplettes Produktsortiment.

KOMPETENZ IN THEORIE UND PRAXIS

Nutzen Sie unser Know-how und unsere Schulungsangebote!

Wir unterstützen Sie bei der Anlagenplanung und bieten erstklassigen Vor-Ort-Service weltweit.

Sie suchen eine perfekte
Vakuümlösung?
Sprechen Sie uns an:

Pfeiffer Vacuum GmbH
Headquarters/Germany
T +49 6441 802-0
info@pfeiffer-vacuum.de

www.pfeiffer-vacuum.com