

# Auf der Jagd nach der Welle

Gravitationswellenforschung  
mit dSPACE-Equipment



*Der Krebsnebel im Sternbild Stier, ein Trümmerrest einer Sternexplosion (Supernova) vor ca. 900 Jahren – eine typische Quelle für Gravitationswellen.*

Die Messung von Gravitationswellen gehört zu den ungelösten Herausforderungen der Physik. Als Albert Einstein sie im Jahr 1915 voraussagte, zweifelte er daran, dass man sie jemals wird messen können. Dank moderner Messtechnik rückt dieses Ziel nun aber in greifbare Nähe. Am LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) in den USA haben Forscher mit Hilfe von dSPACE-Equipment eine Messstation errichtet, mit der nun der Nachweis von Gravitationswellen gelingen soll.



Am Laser-Interferometer LIGO (hier die Station in Hanford, Washington, USA) sollen zum ersten Mal Gravitationswellen gemessen werden. Jeder der beiden Interferometerarme hat eine Länge von 4 km. Bilder mit freundlicher Genehmigung des LIGO-Projekts.

### Gravitationswellen – Dellen im Raum

Jedes System beschleunigter und asymmetrisch angeordneter Massen erzeugt Gravitationswellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und auf ihrem Weg kurz-

also reine Science-Fiction. Daher ist ihr Nachweis auch so außerordentlich schwierig. Obwohl sie so schwach sind, würden Gravitationswellen aber wertvolle Informationen über das Universum liefern – daher das große Interesse der Forscher.

„Die dSPACE Hard- und Software erfüllte alle unsere Anforderungen und erlaubte es uns, das Projekt innerhalb des veranschlagten Zeit- und Kostenrahmens erfolgreich abzuschließen.“

*Dr. Mark Barton, California Institute of Technology*

zeitig den Raum mit allen Objekten darin verzerren. Diese Verzerrungen sind allerdings winzig. Selbst eine bei der Explosion eines Sterns (Supernova) in unserer Milchstraße entstehende Gravitationswelle würde die 150 Millionen Kilometer lange Strecke zwischen Sonne und Erde gerade einmal um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms verzerren, und das auch nur für eine tausendstel Sekunde. Die Vorstellung, von einer Gravitationswelle gleichsam wie von einem Erdbeben durchgeschüttelt zu werden, ist

### Wie man Gravitationswellen misst

Weil Gravitationswellen alles auf ihrem Weg kurzzeitig verzerren, liegt eine Methode für ihren Nachweis auf der Hand: Man überwache sehr genau die Länge einer definierten Messstrecke; beobachtet man eine plötzliche Längenschwankung, kann die Ursache eine durchgelauene Gravitationswelle gewesen sein. Die Messstrecke sollte dabei möglichst lang sein, denn je größer ihre Länge, desto größer auch die Verzerrung. Diese Idee für ein Gravi-

tationswellenobservatorium haben wir mit Hilfe eines Laser-Interferometers in die Praxis umgesetzt. Laser-Interferometer nutzen die Wellennatur des Lichts, um Längen präzise zu vermessen und haben sich bereits in vielen Bereichen als optische „Präzisionslineale“ bewährt. Im Gegensatz zu einer klassischen Sternwarte benötigt ein Gravitationswellenobservatorium keine freie Sicht auf den Sternenhimmel, denn Gravitationswellen durchdringen völlig ungehindert jegliche Materie, auch die Erde. Daher spielen Ausrichtung und Standort des Observatoriums keine Rolle – ein Vorteil gegenüber herkömmlichen Sternwarten.

### LIGO – das Gravitationswellenobservatorium

Beim LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) teilt ein halbdurchlässiger Spiegel einen Laserstrahl. Die beiden Teilstrahlen durchlaufen dann zwei senkrecht zueinander angeordnete 4 km lange Messstrecken. Da jeder Teilstrahl im Interferometerarm ca. 50-mal zwischen einem Spiegelpaar hin- und herläuft, steigert sich die Empfindlichkeit ebenfalls um den Faktor 50, d. h., der 4-km-Arm ist so empfindlich, als wäre er 200 km



Herausforderung besteht also vor allem in der Isolation der gesamten Anlage gegen solche Störungen. Da die Abstände zwischen den Spiegel-paaren (den „Probenmassen“) in den Interferometerarmen sehr empfindlich reagieren, musste besonders ihre Aufhängung gut durchdacht sein. Die aktive Dämpfung der Aufhängung haben wir mit Hilfe eines dSPACE-Prototyping-Systems realisiert.

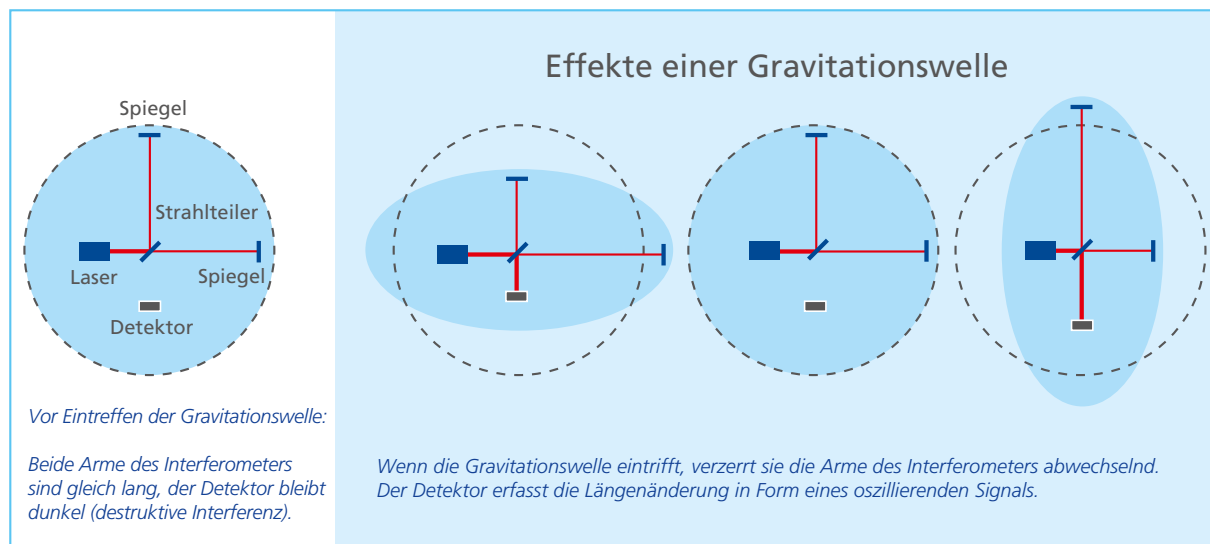
### dSPACE-Equipment sorgt für Ruhe

Alle Spiegel des LIGO sind in Form gestaffelter Pendel an dünnen Drähten aufgehängt. Allein hierdurch reduzieren sich die Schwingungen oberhalb der Pendel-Eigenfrequenzen schon ohne aktives Zutun. Beim ersten LIGO hingen alle Massen an einfachen Drahtschlaufen. Beim Advanced LIGO sind ausgefeiltere Aufhängungen geplant. Die ausgeklügeltste besteht aus zwei Vierfachpendeln, jedes mit einem Glas- und zwei Metallausgleichsgewichten. 20 an der Aufhängung verteilte Sensoren und Aktoren sorgen für die schnellstmögliche Dämpfung jeglicher störenden Erschütterungen

lang. Anschließend werden die Teilstrahlen in einem Detektor so überlagert, dass sie sich genau auslöschen (destruktive Interferenz), d. h., das Bild am Detektor bleibt dunkel. Trifft eine Gravitationswelle ein, so verzerrt sie die beiden Armlängen in entgegengesetzter Richtung, sodass die Teilstrahlen aus dem Takt geraten und sich nicht mehr komplett auslöschen – im Detektor erscheint ein Signal. Für den Nachweis von Gravitationswellen

muss das LIGO fähig sein, Längenänderungen des 4 km langen Interferometerarms zu messen, die lediglich einen milliardstel Teil eines Atomdurchmessers betragen. Wegen seiner extremen Empfindlichkeit registriert das LIGO daher schon viele andere Einflüsse als störende Erschütterungen, beispielsweise die Meeresbrandung an einer viele Kilometer entfernten Küste oder auch einen auf einem entlegenen Feld arbeitenden Traktor. Die

*Schematische Darstellung der Effekte beim Eintreffen einer Gravitationswelle (zur Verdeutlichung stark übertrieben).*



des hochkomplexen Systems. Bei den Sensoren handelt es sich um die Kombination aus einer LED und einer Photodiode, bei der jede Spiegelauslenkung mit Hilfe eines Lichtzeigers registriert wird. Die Aktoren bestehen aus Schwingspulen, die auf Basis der Sensorsignale die Spiegel magnetisch wieder zur Ruhe bringen. Die Sensorsignale werden über ein dSPACE DS2003 Multi-Channel A/D Board aufgenommen, danach berechnet ein dSPACE DS1005 PPC Board die passenden Stellgrößen und gibt sie über mehrere DS2102 High-Resolution D/A Boards an die Aktoren. Das Modell für die Steuerung haben wir mit

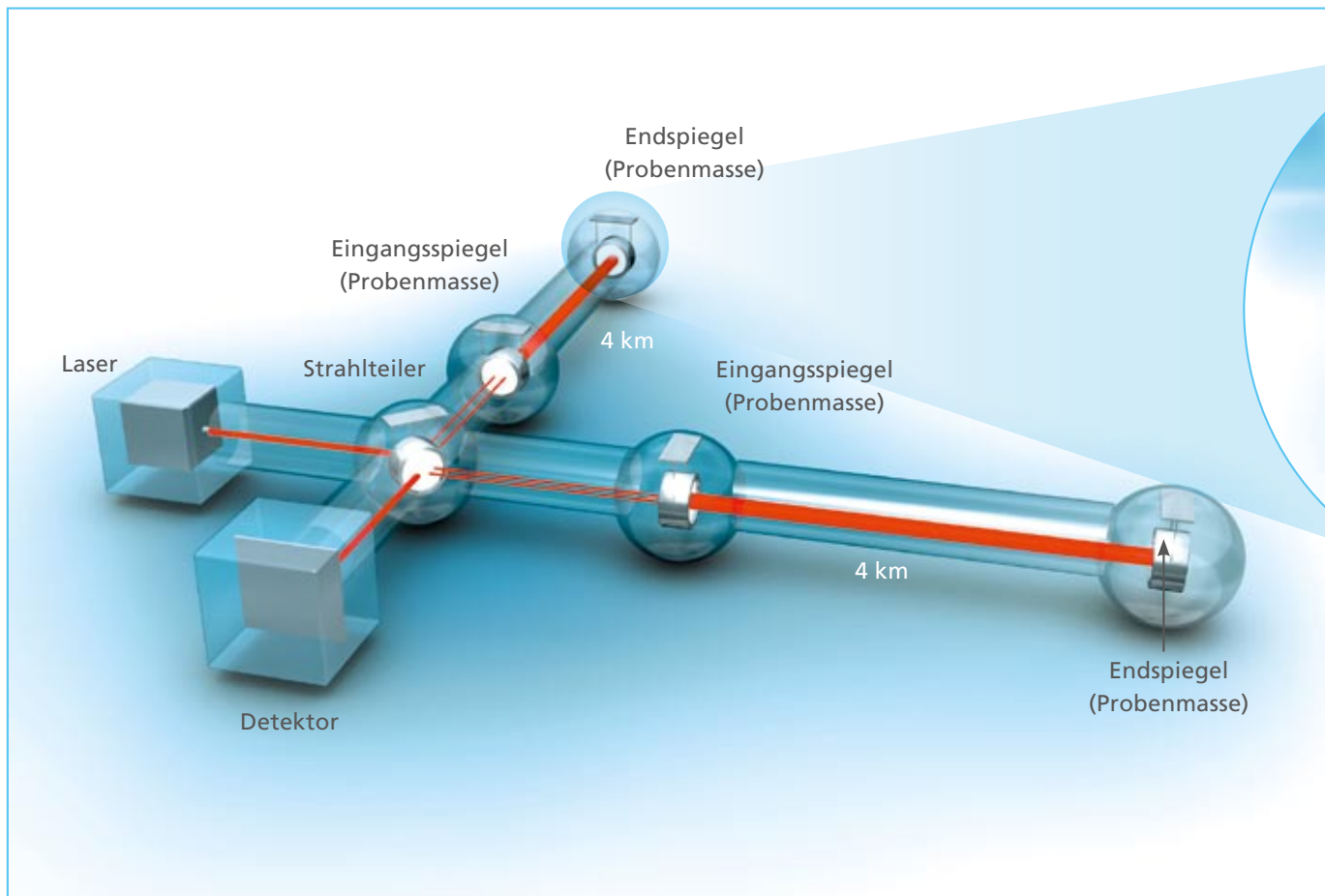
MATLAB®/Simulink® entwickelt; das gesamte Experiment wird mit dSPACE ControlDesk überwacht. Durch die leicht bedienbare Kombination aus MATLAB/Simulink und der dSPACE Hard- und -Software konnten wir uns ganz auf das eigentliche Experiment konzentrieren und unseren Zeitplan problemlos einhalten. Mehrere Testläufe mit künstlich generierten Störsignalen bewiesen die Leistungsfähigkeit der Steuerung.

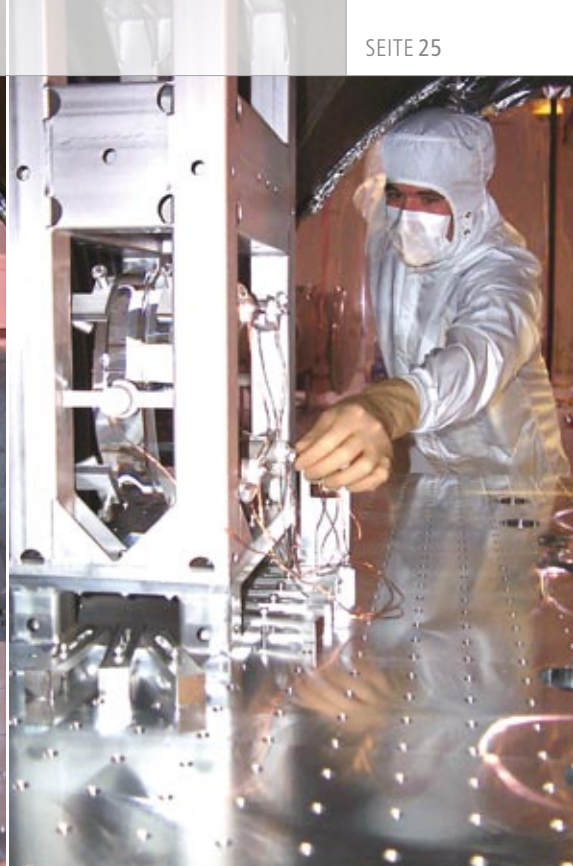
#### Eine zweites Observatorium – zur Sicherheit

Zu LIGO gehören zwei baugleiche Messstationen an verschiedenen Orten der USA (Hanford, Washing-

ton, und Livingston, Louisiana). Zwei Observatorien sind notwendig, um auszuschließen, dass es sich bei einer vermeintlichen Gravitationswelle um eine lokale Störung handelt. Denn eine Gravitationswelle würde an beiden Standorten das gleiche Signal erzeugen, eine lokale Störung dagegen tritt nur an einer der Messstationen auf. Ein vermutetes Gravitationswellensignal würde auf jeden Fall zusätzlich aber noch mit weiteren Observatorien (unter anderem in Europa und Japan) verglichen. Würde überall das gleiche Signal gemessen, wäre der Nachweis von Gravitationswellen erbracht.

*Vereinfachter Aufbau des Gravitationswellenobservatoriums LIGO. Beim Nachfolger Advanced LIGO besteht die Endspiegelaufhängung aus einem vierfachen Pendel mit einer oberen Ausgleichsmasse aus Glas und Metall plus einem ähnlich aufgebauten Pendelsystem, das als ruhende Referenz dient, um Regelkräfte gezielt anlegen zu können. Mit dem dSPACE-Equipment konnte ein Regelsystem für den Prototyp entworfen und implementiert werden. Diagramm der Aufhängung mit freundlicher Genehmigung der Universität Glasgow.*





Justage der Spiegel am LIGO. © California Institute of Technology.



**Ein neues Fenster ins All**

Bisher haben Astronomen das All mit Licht- und Radioteleskopen untersucht. Mit der Gravitationswellenastronomie öffnet LIGO nun ein weiteres Fenster ins All. Denn weite Teile des Universums liegen hinter Dunkelwolken verborgen, die für Licht- und Radiowellen undurchlässig sind. Gravitationswellen jedoch durchdringen diese Wolken ungestört und übermitteln daher neue Informationen über unbekannte Bereiche des Alls. Außer-

dem wird die Gravitationswellenastronomie ganz andere, zusätzliche Daten liefern, die mit Hilfe von Licht- und Radiowellenastronomie gar nicht messbar sind, und wird so auf viele offene Fragen im Zusammenhang mit schwarzen Löchern, Neutronensternen, kollidierenden Galaxien und anderen Erscheinungen eine Antwort liefern. ■

*Dr. Mark Barton  
LIGO-Projekt  
California Institute of Technology  
Pasadena, CA, USA*

*Für die aktive Dämpfung der Spiegel kommt eine Kombination aus dSPACE Hard- und Software zum Einsatz.*

