

# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen



## Inhalt

- Teil 1:** Übersicht ..... 1
- Teil 2:** Beispiele typischer Aktivitäten ..... 4
- Teil 3:** Einige der Exponate ..... 9

## Kontakt:

Sonderforschungsbereich/  
Transregio 7  
Sprecher: Prof. Dr. Bernd Brügmann  
Theoretisch-Physikalisches Institut  
Friedrich-Schiller-Universität Jena  
<http://www.sfb.tpi.uni-jena.de>

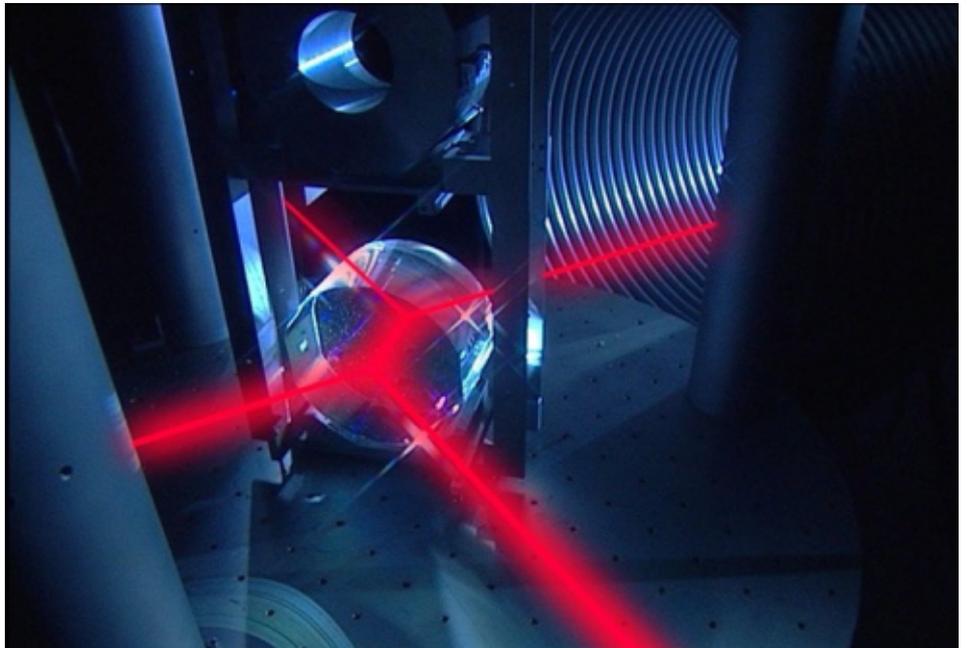
Universität Tübingen  
Theoretische Astrophysik  
Prof. Dr. Kostas Kokkotas  
<http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~kokkotas>

Max-Planck-Institut für  
Gravitationsphysik Golm, Hannover  
Albert-Einstein-Institut  
Dr. Elke Müller  
<http://www.aei.mpg.de/>

Universität Hannover  
Institut für Gravitationsphysik  
Dr. Felicitas Mokler  
<http://www.aei.uni-hannover.de/>

Max-Planck-Institut für Astrophysik,  
Garching  
Dr. Hannelore Hämmerle  
<http://www.mpa-garching.mpg.de/>

Information über das "Einstein-Wellen-Mobil" erhalten Sie bei:  
Dr. Hans-Peter Nollert  
Theoretische Astrophysik  
Universität Tübingen  
<http://www.einsteinwelle.de>



## Projekt „Öffentlichkeitsarbeit“ für den Sonderforschungsbereich/Transregio 7 „Gravitationswellenastronomie“

Dieses Projekt für Öffentlichkeitsarbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) kontinuierlich gefördert, um die Forschung über Gravitationswellen und die Arbeit der am SFB/TR7 beteiligten Institutionen bekannt zu machen: Die Universitäten in Jena, Tübingen und Hannover und die Max-Planck-Institute in Golm, Hannover, und Garching. Wir verfolgen dieses Ziel durch öffentliche Veranstaltungen an den beteiligten Standorten, durch den Einsatz einer mobilen Ausstellung, dem „Einstein-Wellen-Mobil“, über die Relativitätstheorie und die Forschung zu Gravitationswellen, sowie durch eine begleitende Webseite. Das „Einstein-Wellen-Mobil“ ermöglicht durch interaktive Experimente, Filmstationen und andere Exponate einen aktiven Zugang zu der phantastischen Welt der Gravitationswellen.

Nach dem Start im Jahr 2009 mussten das „Einstein-Wellen-Mobil“ und die begleitende Webseite auf die Beine gestellt werden. Bei-

de werden ständig weiter entwickelt. Sobald die Ausstellung einen präsentierbaren Zustand erreicht hatte, wurde sie an Schulen, Planetarien, Astronomiemessen und Universitäten eingesetzt. Der Einsteintag in Jena und eine Begegnung von Wissenschaft und Theater in Tübingen bildeten weitere Attraktionen.

Das „Einstein-Wellen-Mobil“ erlaubt es den Besuchern, nicht nur passiv Informationen zu erhalten, sondern selbst aktiv zu werden. Detaillierte Beschreibungen aller Exponate finden Sie auf der Webseite [www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) oder in der Pressemappe dazu.

Alle Aktivitäten in diesem Projekt wollen unterhalten und gleichzeitig wissenschaftliche Substanz bieten. Besucher können sich dem Thema auf spielerische Weise nähern. Sie finden immer auch ein Angebot an tiefer gehenden Erklärungen, das sie wahrnehmen können, wenn ihr Interesse geweckt ist.

Dieses Dokument dient nur Ihrer Information, es ist weder im Ganzen noch in Teilen zur Veröffentlichung freigegeben. Material zur Veröffentlichung erhalten Sie von: Dr. H.-P. Nollert (07071 - 25 32 96), [nollert@uni-tuebingen.de](mailto:nollert@uni-tuebingen.de)



# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)



SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen

## Teil 1: Übersicht

### Alle öffentlichen Aktivitäten

**2009**

Das „Einstein-Wellen-Mobil“ im Planetarium Mannheim	26.03.-18.06.	
	21.06.-12.07.	Einweihung und Vorstellung des „Einstein-Wellen-Mobils“ in Tübingen
Das „Einstein-Wellen-Mobil“ am Mönchsee-Gymnasium in Heilbronn	16.07.	
	18.07.	Das „Einstein-Wellen-Mobil“ beim Tag der Offenen Tür am Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität Tübingen
Das „Einstein-Wellen-Mobil“ an der Friedrich-Schiller-Universität, Jena	25.08.-17.09.	
	16.09.	Einsteintag für Schüler und Lehrer an der Friedrich-Schiller-Universität, Jena
Das „Einstein-Wellen-Mobil“ bei der öffentlichen Sternwarte und Planetarium in Rodewisch	18.09.-08.10.	
	26.09.	Das „Einstein-Wellen-Mobil“ auf der Internationalen Astronomiemesse AME2009 in Villingen-Schwenningen
Das „Einstein-Wellen-Mobil“ am Edith-Stein-Gymnasium, Bretten	09.10.-23.10.	
	13.11.	Das „Einstein-Wellen-Mobil“ bei der „Langen Nacht der Wissenschaft“, Friedrich-Schiller-Universität Jena
Das „Einstein-Wellen-Mobil“ am Schiller-Gymnasium, Heidenheim	16.11.-27.11.	
	30.11.-11.12.	Das „Einstein-Wellen-Mobil“ bei der öffentlichen Sternwarte und Planetarium in Suhl



# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)



SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen

## Alle öffentlichen Aktivitäten

### 2010

„Wissenschaft trifft Theater -- Kepler und die Folgen“ Tübingen

12.02.

15.03.-29.03. Das „Einstein-Wellen-Mobil“ am Evangelischen Gymnasium Neuruppin

Das „Einstein-Wellen-Mobil“ am Kepler-Gymnasium Reutlingen

26.04.-08.05.

17.05.-21.05. Das „Einstein-Wellen-Mobil“ am Dietrich-Bonhoeffer-Gymnasium Filderstadt

Das „Einstein-Wellen-Mobil“ auf der Internationalen Astronomiemesse AME2010 in Villingen-Schwenningen

18.09.

### 2010 (geplant)

Das „Einstein-Wellen-Mobil“ bei der öffentlichen Sternwarte und Planetarium in Herzberg

15.10. -- 12.11.

Nov. -- Dec. Das „Einstein-Wellen-Mobil“ im Planetarium Mannheim

### 2011 (geplant)

Das „Einstein-Wellen-Mobil“ am Käthe-Kollwitz-Gymnasium Lengenfeld

17.01. -- 28.01.

14.02. -- 11.03. Das „Einstein-Wellen-Mobil“ in der "Urania", Berlin

17.05. -- 17.06. Das „Einstein-Wellen-Mobil“ im Planetarium Stuttgart



# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen



## Teil 2: Beispiele typischer Aktivitäten

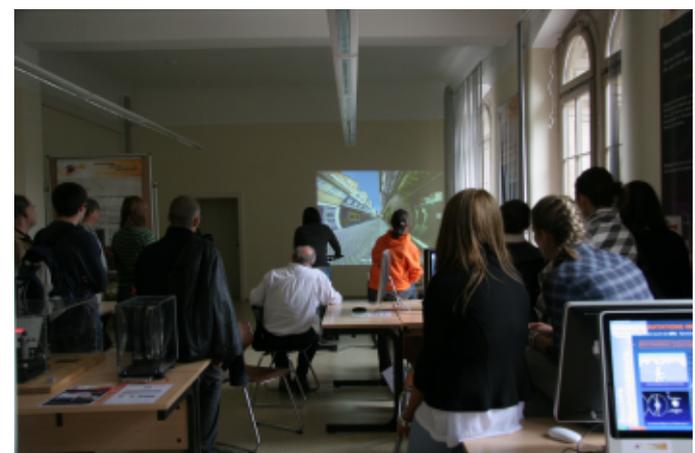
### Einsteintag für Schüler und Lehrer an der Friedrich-Schiller-Universität Jena



Schüler und Lehrer konnten an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena einen Tag mit Vorlesungen und Workshops erleben. Ungefähr 300 Teilnehmer erfuhren, dass die Gesetze der Himmelsmechanik nicht nur in der klassischen Astronomie von Bedeutung sind, sondern auch beim Studium von schwarzen Löchern und Gravitationswellen eine wichtige Grundlage bilden. Vormittags präsentierten Wissenschaftler Vorlesungen über schwarze Löcher, Neutronensterne und Gravitationswellen. Nachmittags bot sich den Schülern in Workshops die Gele-

genheit, sich selbst an aktuelle Forschungsthemen heranzuwagen, wie die Messung der Geschwindigkeit von Neutronensternen auf ihrem Weg durch unsere Galaxie oder die Analyse der Orbits von Sternen, die sich in der Nähe des massiven schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße befinden.

Schüler und Lehrer konnten mit dem „Einstein-Wellen-Mobil“ die überraschenden Effekte der Relativitätstheorie erleben, die faszinierende Welt



der Gravitationswellen erkunden und die Techniken zu ihrer Messung kennenlernen.

Über den Einsteintag berichtete unter Anderem der Fernsehsender MDR Thüringen.



# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen



## Das „Einstein-Wellen-Mobil“ an der öffentlichen Sternwarte und Planetarium in Rodewisch



Die öffentliche Sternwarte und das Planetarium in Rodewisch sind für Alle offen, die sich für Astronomie interessieren. Schwerpunkt ist die Arbeit mit Schulen in der Region. Schüler haben Gelegenheit, Grundlagen der Astronomie zu lernen und Beobachtungstechniken zu erlernen und anzuwenden. Während des dreiwöchigen Aufenthalts des „Einstein-Wellen-Mobils“ konnten fast 30 Schulklassen die Welt der Relativitätstheorie und der Gravitationswellen erleben. Die Ausstellung wurde durch eine Planetariumsvorführung über Relativitätstheorie ergänzt.

Mehrere lokale Zeitungen berichteten über den Besuch des „Einstein-Wellen-Mobils“.





# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen



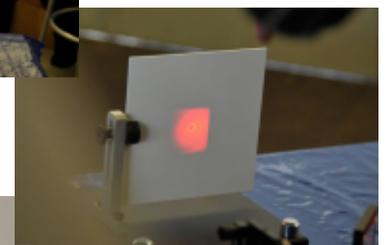
## Das „Einstein-Wellen-Mobil“ auf der Internationalen Astronomiemesse AME2009 in Villingen-Schwenningen

Jedes Jahr bringt die Internationale Astronomiemesse in Villingen-Schwenningen eine große Zahl von Herstellern und Verkäufern optischer Instrumente und Amateurastronomen zusammen. Im Jahr 2009 zählte die Messe mehr als 3000 Besucher. Ein attraktives wissenschaftliches Rahmenprogramm von Vorträgen bekannter Astronomen und Astrophysiker ergänzt die Ausstellung. Sie stellt daher eine ideale Umgebung dar, um mit Hilfe des „Einstein-Wellen-Mobils“ das Potential der Gravitationswellenforschung als innovativem



Zweig der Astronomie zu präsentieren.

Die Besucher konnten an einem Quiz zur Gravitationswellenastronomie teilnehmen. Alle Antworten liessen sich in der Ausstellung finden. Attraktive Preise, wie DVDs oder wissenschaftliche Publikationen, winkten für die richtigen Antworten.





# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen

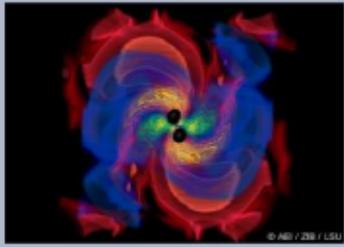


## „Wissenschaft trifft Theater -- Kepler und die Folgen“ Tübingen

Wissenschaft trifft Theater, außerirdische Wissenschaftler treffen menschliche Experten für Astrophysik, Keplers Pionierarbeit trifft Gravitationswellenastronomie. Drei wissenschaftliche Vorträge über moderne Astronomie und Gravitationswellenastronomie von Hanns Ruder, Harald Lesch und Karsten Danzmann, waren eingebettet in ein Theaterstück des Ensembles „KeplerKonferenz“. Diese innovative Veranstaltung bot Wissenschaft in unterhaltsamer Form, ohne Kompromisse bei der wissenschaftlichen Substanz zu machen.



Wissenschaft trifft Theater:  
**Interstellare Begegnung  
Kepler und die Folgen**



SFB/Transregio 7  
Gravitationswellenastronomie

12. Februar 2010, 19 Uhr  
Mensa Morgenstelle  
Ab 18 Uhr: Einstein-Wellen-Mobil  
Eintritt frei



Das „Einstein-Wellen-Mobil“ in unmittelbarer Nähe zum Zuschauerraum ermöglichte es den Besuchern, eine relativistische Fahrradfahrt zu unternehmen oder Jagd auf schwarze Löcher zu machen und sich so auf den wissenschaftlichen Teil der Veranstaltung einzustimmen.

Mehrere Radiosender und Zeitungen berichteten vorher und nachher über dieses Ereignis. Die Aufführung wurde in professioneller Qualität aufgezeichnet. Eine Video-DVD wird im KomplettMedia Verlag, der sich auf populärwissenschaftliche Medien spezialisiert hat, erscheinen.





# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

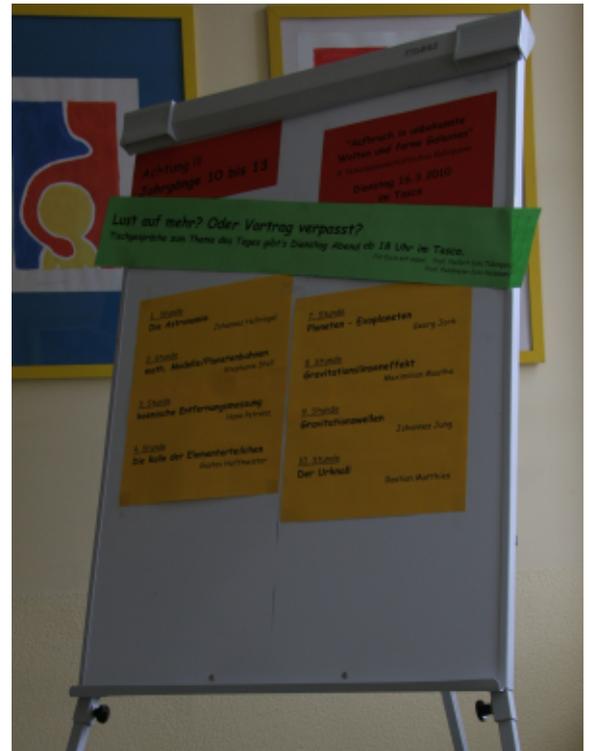
gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen



## Das „Einstein-Wellen-Mobil“ am Evangelischen Gymnasium, Neuruppin

Das Naturwissenschaftliche Kolloquium hat schon Tradition am Evangelischen Gymnasium in Neuruppin: Oberstufenschüler präsentieren ausgewählte wissenschaftliche Themen für ihre Mitschüler. Diesmal hieß das Thema: „Aufbruch in unbekannte Welten und ferne Galaxien“. Etliche interessante Vorträge über den Urknall, extrasolare Planeten, Gravitationswellen und andere Themen aus Astrophysik und Kosmologie wurden angeboten.

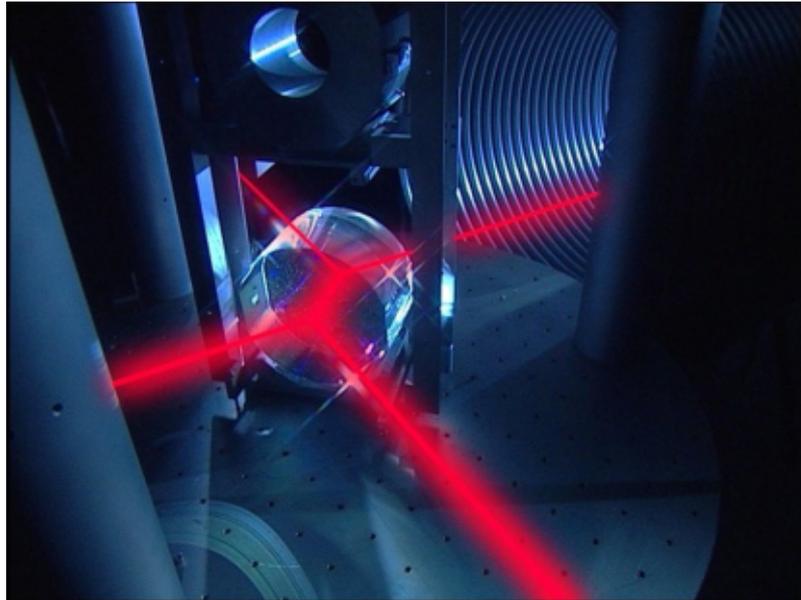


Das „Einstein-Wellen-Mobil“ bot eine zusätzliche Attraktion und eine willkommene Gelegenheit, mehr über Gravitationswellenastronomie zu erfahren. Schüler der Physikkurse erhielten eine Einführung, so dass sie ihrerseits ihre Mitschüler, Eltern und andere Interessierte durch die Ausstellung führen konnten. Insgesamt sahen ca. 500 Besucher die Ausstellung.





## Das „Einstein-Wellen-Mobil“ -- eine mobile Ausstellung über Relativitätstheorie, Gravitationswellen und deren Messung



Das „**Einstein-Wellen-Mobil**“ ist zentraler Bestandteil des Projekts „Öffentlichkeitsarbeit“ im Sonderforschungsbereich/Transregio 7 „Gravitationswellenastronomie“. Sie steht Schulen und anderen Institutionen für den individuellen Einsatz im Unterricht oder bei Veranstaltungen zur Verfügung. Sie vermittelt Grundlagen von Relativitätstheorie, Astronomie, Lasertechnik, Raumfahrt und Computeralgorithmen zur Datenauswertung ohne mathematischen Ballast. Computersimulationen, Filme und viele Mitmach-Exponate machen die Welt komplexer Wissenschaft und hochgezüchteter Technologie zugänglich und erlebbar.

Auf den folgenden Seiten finden Sie Beschreibungen einiger Exponate als Beispiele. Auf der Webseite [www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) erhalten Sie weitere Informationen zur Ausstellung und zu allen Exponaten.

**Gravitationswellenastronomie** macht da weiter, wo die Astronomie mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung an ihre Grenzen stößt. So können

spektakuläre Ereignisse wie Supernovae bis ins Innerste beobachtet und untersucht werden. Sogar das Echo des Urknalls soll unmittelbar zugänglich werden und uns so ein tieferes Verständnis von der Geburt unseres Universums ermöglichen. Relativitätstheorie, Astronomie und hochgezüchtete experimentelle Technik müssen gemeinsam an einem Strang ziehen, um dies möglich zu machen.

Im **Sonderforschungsbereich/Transregio „Gravitationswellenastronomie“** arbeiten Universitäten und Max-Planck-Institute aus Jena, Tübingen, Hannover, Garching und Potsdam gemeinsam daran, die Herausforderungen, die dieser innovative Zweig der Astronomie stellt -- von den mathematischen Grundlagen über physikalische Modellbildung, numerische Simulation, hochgezüchtete experimentelle Technik bis hin zu ausgefeilten Computeralgorithmen zur Datenanalyse -- zu meistern. Dieser Sonderforschungsbereich wird seit Januar 2003 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.



# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen



## Relativistische Fahrradfahrt: Interaktive Simulation



Wie sähe die Welt aus, wenn wir uns fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen könnten? Niemand hat das je gesehen, und niemand wird es je sehen können. In dieser virtuellen Welt wird die Lichtgeschwindigkeit auf gerade mal 30 Kilometer pro Stunde herabgesetzt. Nun kann man sogar mit einem Fahrrad beinahe die Lichtgeschwindigkeit er-

reichen. Man muss schon kräftig in die Pedale treten, aber die Anstrengung wird belohnt: Häuser neigen sich, Objekte scheinen vor einem zurückzuweichen, Spotlight-Effekt und Dopplereffekt führen zu ungewohnten und unerwarteten Ansichten.

## Filmstationen über spezielle Relativitätstheorie, allgemeine Relativitätstheorie und Gravitationswellen



Muss man ein Genie sein, um Relativitätstheorie oder Gravitationswellen zu verstehen? Keine Angst - eine Folge animierter Filmsequenzen führt Sie Schritt für Schritt zu den Grundprinzipien, die auch ohne die umfangreichen mathematischen Formeln, die die Theorie beschreiben, verstanden werden können. Die Natur konfrontiert uns mit einigen Überraschungen, gegen die sich unsere Intuition zunächst sträubt. Hat man diese aber einmal akzeptiert, dann ergibt sich der Rest fast von alleine. Mit Hilfe der Filmsequenzen können Sie die Welt

der Relativitätstheorie und der Gravitationswellen in Ihrem eigenen Tempo erforschen, so weit und so tief, wie Sie dies möchten.

Diese Filme orientieren sich an dem Motto, das Einstein formulierte: „Alles sollte so weit vereinfacht werden wie möglich -- aber nicht weiter!“ In den Filmen werden also keine Schritte ausgelassen oder verfälscht, die für ein grundlegendes Verständnis nötig sind.



# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen



## Lase interferometer: Funktionstüchtiges Modell



Ein Michelson-Interferometer mit Laserlicht ist hervorragend geeignet, eine Veränderung der Geometrie des Raumes durch eine Gravitationswelle nachzuweisen. Der Laserstrahl wird in zwei Teilstrahlen aufgeteilt und in zwei senkrecht zueinander stehende Arme geführt. An deren Ende werden die Strahlen reflektiert und dann wieder überlagert. Dies erlaubt eine sehr empfindliche Messung einer Längendifferenz zwischen den Armen.



Die Arme bei diesem Modell sind viel kürzer als die der Interferometer, die tatsächlich für den Nachweis von Gravitationswellen geeignet sind. Gravitationswellen können mit diesem Modell daher nicht nachgewiesen werden. Um den Effekt dennoch demonstrieren zu können, kann einer der Spiegel mit Hilfe eines Piezoelements um bis zu 1,5 Mikrometer verschoben werden.

## Konfiguration der LISA-Satelliten im Orbit



Ein Laserinterferometer ist umso empfindlicher, je größer es ist. Auf der Erde erreicht man höchstens einige Kilometer Armlänge. Es ist deshalb geplant, einen Gravitationswellendetektor im All zu stationieren. LISA (Laser Interferometric Space Antenna) wird aus drei Satelliten bestehen, die 5 Millionen Kilometer Abstand voneinander haben, und die auf ihrer Bahn um die Sonne 50 Millionen Kilometer von der Erde entfernt sind. LISA wird auch keine Probleme mit seismischen Störungen haben. Der Start ist für 2021 vorgesehen.



Infolge der enormen Größe kann LISA extrem niederfrequente Gravitationswellen messen. Damit können Gravitationswellen empfangen werden, die beim Urknall, der Geburt des Universums, entstanden sind.

Es ist eine besondere Herausforderung, drei Satelliten in eine solche Bahn zu bringen, dass sie stets ein gleichseitiges Dreieck bilden, das seine Form während des Umlaufs um die Sonne nicht ändert. Das Modell zeigt, wie dieses Ziel erreicht werden kann.



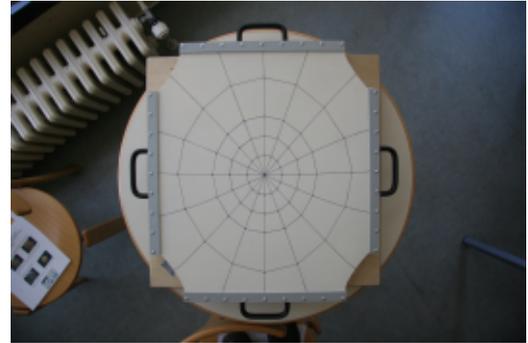
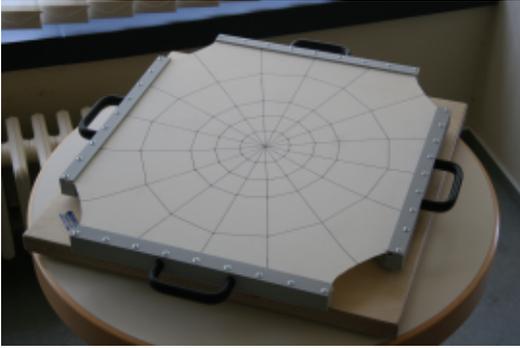
# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

gefördert durch die **DFG** · Sprecher: B. Brügmann · [www.sfb.tpi.uni-jena.de](http://www.sfb.tpi.uni-jena.de)

SFB/TRANSREGIO 7 · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen



## Die Wirkung von Gravitationswellen: Ein interaktives mechanisches Modell

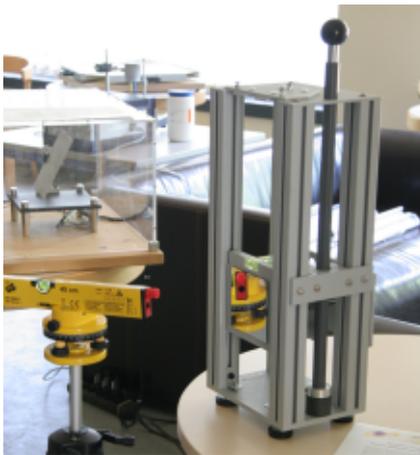


Eine Gravitationswelle verzerrt die Geometrie des Raumes. Dadurch kann sich die Entfernung zweier Objekte voneinander verändern, obwohl diese sich relativ zu ihrer lokalen Umgebung nicht bewegen. Diese scheinbar paradoxe Situation wird in dieser mechanischen Simulation demonstriert: Ein Gumm Tuch kann in zwei senkrechten Richtungen verzerrt werden. Auf dem Tuch sind Punkte aufgemalt. Diese können sich offenkundig nicht relativ zu ihrer lokalen Umgebung bewegen. Dennoch verändern

sie ihren Abstand, wenn man die Geometrie des Tuchs selbst verzerrt.

Stellt man sich vor, dass das Tuch den uns umgebenden Raum repräsentiert, so wird das Konzept einer Veränderung der inneren Geometrie des Raumes intuitiv verständlich. Es entsteht ein mentales Bild von der Wirkung einer Gravitationswelle auf den Raum, den sie durchquert. Die Technik zur Messung dieser Wirkung wird verständlich.

## Spiegelaufhängung mit Wirbelstromdämpfung: Ein interaktives Modell



Spiegel in terrestrischen Gravitationswellendetektoren müssen vor seismischen Störungen geschützt werden. Sie werden daher wie Pendel aufgehängt, die eine sehr scharf definierte Resonanzfrequenz haben, die weit vom Messbereich des Detektors entfernt liegt. Dabei können die Spiegel aber zu sehr großen Schwingungen mit dieser Resonanzfrequenz angeregt werden, wodurch der Detektor insgesamt instabil werden kann. Um dies zu verhindern, können die Spiegel mit einer Wirbelstromdämpfung versehen werden.

In diesem funktionstüchtigen Modell kann eine Wirbelstromdämpfung durch einen mechanischen Hebel aktiviert oder deaktiviert werden. Ein Laserstrahl wird von dem Spiegel reflektiert und macht so die Bewegungen des Spiegels besser sichtbar. Der Spiegel kann auf verschiedene Arten bewegt werden, so dass der Einfluss der Wirbelstromdämpfung auf unterschiedliche Formen der Bewegung untersucht werden kann.