

# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen 

## Relativistische Fahrradfahrt

Hier können Sie eine simulierte Fahrradfahrt durch die Altstadt von Tübingen erleben. Mit ein wenig Anstrengung (und Schweiß) können Sie dabei beinahe mit Lichtgeschwindigkeit fahren. Wie das? Hat die Lichtgeschwindigkeit nicht den gewaltigen Wert von mehr als einer Milliarde Kilometer pro Stunde? In der Realität schon — für diese Simulation wurde die Lichtgeschwindigkeit aber auf einen hypothetischen Wert von 30 km/h herabgesetzt, um die Effekte, die im Alltag völlig unsichtbar bleiben, erfahrbar zu machen.

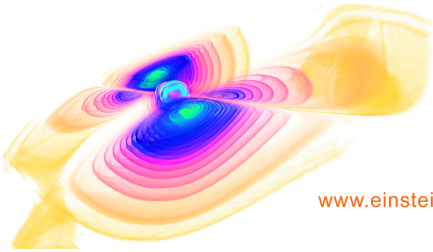
**Wo ist die Längenkontraktion geblieben?** Vielleicht wissen Sie, dass infolge der relativistischen Längenkontraktion bewegte Objekte in Bewegungsrichtung verkürzt werden. Können Sie das in der Simulation beobachten?

**Hier ist doch nicht Pisa?** Trotzdem neigen sich die Giebel der Häuser von Ihnen weg, sobald Sie eine ausreichend hohe Geschwindigkeit erreicht haben. Was es damit auf sich hat, erfahren Sie in den Filmen der Station „Relativistisches Sehen“.

**Je schneller, desto weiter weg vom Ziel?** Wenn Sie beschleunigen, scheint sich die Szenerie vor Ihnen von Ihnen zu entfernen, statt sich zu nähern. Wenn Sie auf das Straßenpflaster vor dem Fahrrad schauen, sehen Sie jedoch, dass Sie sich tatsächlich vorwärts bewegen. Der Grund für diesen scheinbaren Widerspruch: Als Folge der zwar hohen, aber doch begrenzten Lichtgeschwindigkeit erscheinen Objekte in Bewegungsrichtung in die Länge gezogen, Entfernungen in Vorwärtsrichtung werden scheinbar größer. Eine genaue Erklärung finden Sie in den Filmen der Station „Relativistisches Sehen“.

**Doch schneller als das Licht?** Befahren Sie den Parcours mit nicht mehr als 50% der Lichtgeschwindigkeit, um ein Gefühl für die Weglänge zu bekommen. Beschleunigen Sie nun auf mindestens 90% der Lichtgeschwindigkeit und drehen Sie eine weitere Runde. Schätzen Sie, um wie viel kürzer die Fahrzeit beim zweiten Mal war. Es müsste viel weniger als die Hälfte gewesen sein — haben Sie die Strecke beim zweiten Mal also doch schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewältigt? Nein — hier haben Sie die Wirkung der relativistischen Längenkontraktion zu spüren bekommen: Die Weglänge beträgt bei 90% der Lichtgeschwindigkeit weniger als die Hälfte des Werts, den Sie bei langsamer Bewegung aufweist; bei 95% der Lichtgeschwindigkeit weniger als ein Drittel, bei 99% sogar nur noch ein Siebtel.





# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen **DFG**

## Relativistische Fahrradfahrt

Durch Drücken der folgenden Tasten können Sie Details der Simulation verändern:

**R** Umschalten Relativistische / Nichtrelativistische Simulation

**1** Längenkontraktion ausschalten (einschalten: s. **2**)

**2** Geometriemodus: Längenkontraktion einschalten, „Tunneleffekt“ und Dopplereffekt ausschalten

**3** „Tunneleffekt“ einschalten (ausschalten: s. **2**)

**4** Dopplereffekt einschalten (ausschalten: s. **2**)

**5** „Tunneleffekt“ und Dopplereffekt einschalten (ausschalten: s. **2**)

Bei eingeschaltetem „Tunneleffekt“ können Sie eine virtuelle Sonnenbrille aufsetzen:

**S** Sonnenbrille eine Stufe dunkler (mehrfach möglich)

**A** Sonnenbrille eine Stufe heller (mehrfach möglich)

**L** Springt zu einer von mehreren vorgegebenen Positionen des Rundkurses

**P** Pause einschalten / ausschalten

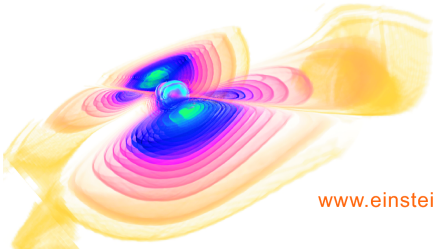
Bei eingeschaltetem Pausemodus:

**B** Bild bei höherer Geschwindigkeit (mehrfach möglich)

**N** Bild bei niedrigerer Geschwindigkeit (mehrfach möglich)

**Esc** Simulation verlassen



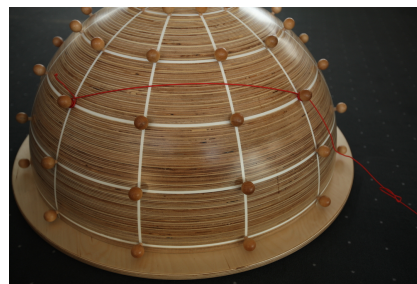
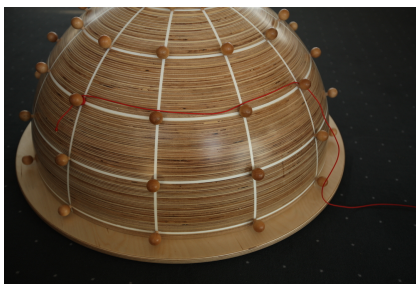


# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen **DFG**

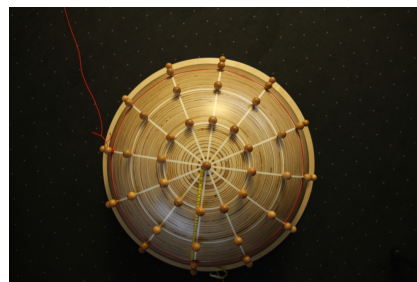
## Nicht-Euklidische Geometrie: Experimente auf der Oberfläche einer Kugel

### Kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten



Stellt ein Breitenkreis die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf dem gleichen Breitengrad dar? Spannen Sie die Schnur, um das herauszufinden.

### Umfang eines Kreises



Konstruieren Sie verschieden große Kreise. Messen Sie Radius und Umfang. Was fällt Ihnen auf?

**DFG**

EBERHARD KARLS  
UNIVERSITÄT  
TÜBINGEN



Max-Planck-Institut  
für Gravitationsphysik  
(Albert-Einstein-Institut)



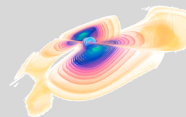
seit 1558

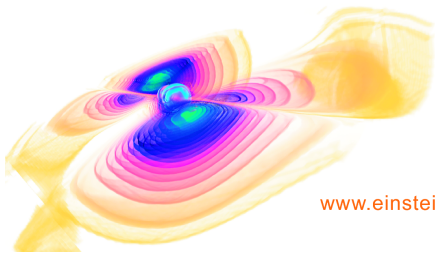
Max-Planck-Institut  
für Astrophysik



Leibniz  
Universität  
Hannover

Friedrich-Schiller-Universität Jena

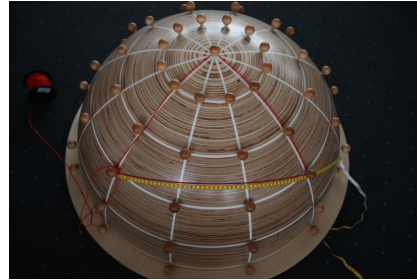
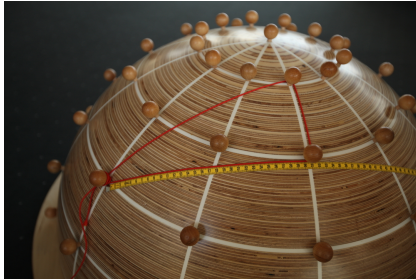




# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen DFG

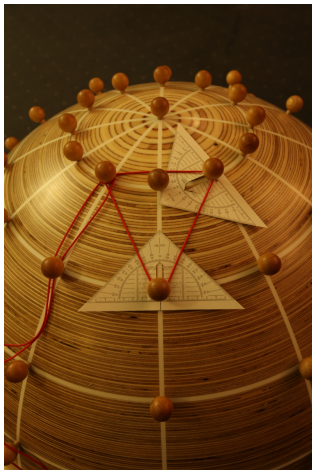
## Satz des Pythagoras



Konstruieren Sie ein rechtwinkliges Dreieck und messen Sie die Längen der Seiten nach. Gilt hier der Satz des Pythagoras, dass  $a^2 + b^2 = c^2$ ? Vergleichen Sie die Ergebnisse für ein kleines und ein großes Dreieck. Bemerken Sie einen Unterschied?

**Tip:** Konstruieren Sie gleichschenklige Dreiecke. Sie brauchen dann nur zwei verschiedene Seiten zu messen.

## Winkelsumme im Dreieck

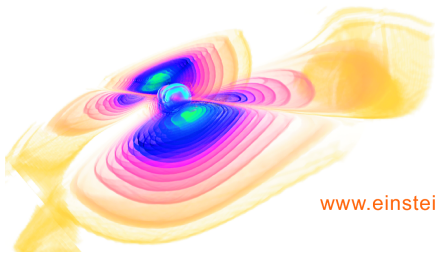


Messen Sie die Winkelsumme im Dreieck. Konstruieren Sie ein kleines und ein großes Dreieck. Was fällt Ihnen auf?

**Tip:** Konstruieren Sie gleichschenklige Dreiecke. Sie brauchen dann nur zwei verschiedene Winkel zu messen.

**Tip:** Bei spitzen Winkeln treffen sich die Seiten des Dreiecks ziemlich weit hinter der Kugel. Legen Sie den Winkelmesser entsprechend an.





# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen **DFG**

## Mechanische Simulation: Wirkung einer Gravitationswelle

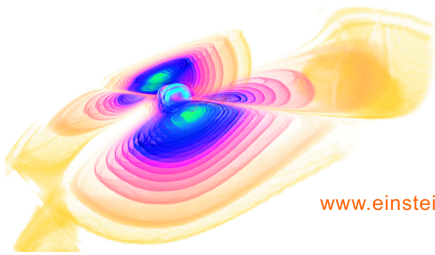
Eine Gravitationswelle bewirkt eine Verzerrung des Raumes, und zwar in allen Richtungen senkrecht zur Bewegungsrichtung der Welle. Diese Verzerrung besteht wiederum in einer Verlängerung in einer Richtung und einer gleichzeitigen Verkürzung in der Richtung senkrecht dazu.

An diesem Modell können Sie diese Wirkung selbst ausprobieren: Das Tuch steht für einen Ausschnitt des Raumes, den eine Gravitationswelle durchwandert. Die Welle bewegt sich dabei in vertikaler Richtung, ihre Wirkung findet also in der Ebene des Tuchs statt. Sie können diese Wirkung simulieren, indem Sie an den Griffen ziehen: Das Tuch wird dabei in einer Richtung gedehnt und gleichzeitig in der Richtung senkrecht dazu gestaucht.

Sie verzerren dadurch die Geometrie des Tuchs. Die Punkte auf dem Tuch verändern Ihren Abstand voneinander, obwohl Sie sich relativ zu ihrer lokalen Umgebung auf dem Tuch nicht bewegen.

Eine Gravitationswelle verzerrt die Abstände im Raum, den sie durchquert, in ganz ähnlicher Weise. Dabei können Objekte ihren Abstand zueinander verändern, obwohl sie sich im Verhältnis zu ihrer lokalen Umgebung nicht bewegen.





# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

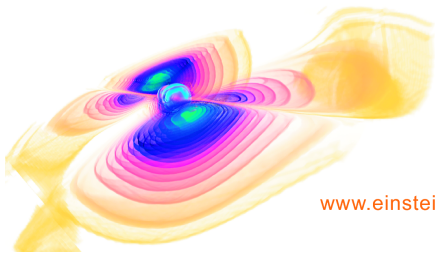
[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen **DFG**

## Tischmodell eines Michelson-Interferometers

Gravitationswellen erzeugen winzige Längenänderungen. Zu ihrer Messung ist ein Michelson-Interferometer das ideale Instrument. Es besteht aus einem Laser, einem Strahlteiler und zwei Spiegeln. Der Strahlteiler lässt den Laserstrahl zur Hälfte durch, die andere Hälfte wird reflektiert. Die beiden Teilstrahlen durchlaufen die senkrecht zueinander stehenden Messstrecken, werden von den Endspiegeln zurückgeschickt und am Strahlteiler wieder überlagert. Auf dem Schirm sieht man das Resultat dieser Überlagerung: Sind die beiden Strecken gleich lang, so schwingen die beiden Lichtwellen im Gleichtakt und verstärken sich. Unterscheiden die Strecken sich um eine halbe Wellenlänge, so schwingen die Wellen im Gegenteil und löschen sich aus. Je nach Neigung der Strahlen entstehen so helle und dunkle Ringe. Verändert eine Gravitationswelle die Länge der Messstrecken, so äußert sich dies als Helligkeitsschwankung.

Bei diesem funktionstüchtigen Tischmodell kann die Länge der einen Messstrecke künstlich verändert werden. Dazu ist einer der Endspiegel auf einen Piezokristall geklebt, der sich beim Anlegen einer Spannung ausdehnt. Mit dem Schieberegler kann die Spannung kontinuierlich verändert und die Strecke so um bis zu 1,5 Mikrometer verlängert werden. Auf dem Schirm beobachtet man, dass selbst derart kleine Änderungen zu einer deutlichen Helligkeitsschwankung in der Mitte des Ringsystems führen.





# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

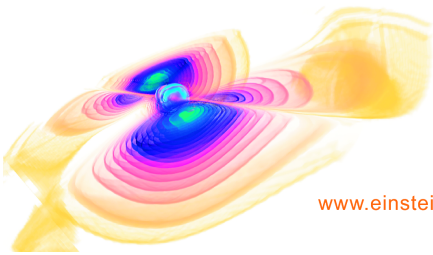
[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen **DFG**

## Modell eines GEO600-Strahlteilers in Originalgröße

GEO600 ist ein Michelson-Interferometer mit 600 Meter langen Messstrecken. In seinem Innern baut sich eine Lichtleistung von einigen Kilowatt auf, dabei wächst der Durchmesser des Laserstrahls auf ca. 15 cm an. Entsprechend groß müssen die optischen Elemente sein. Durchstrahlte Elemente erwärmen sich, da sie einen Teil der Lichtleistung absorbieren. Dadurch verformen sie sich, und es entstehen unerwünschte Bündelungen der Strahlen. Der Original-Strahlteiler von GEO600 besteht daher aus einem extra angefertigten, besonders absorptionsarmen Quarzglas (Absorption kleiner als ein Millionstel der Intensität pro Zentimeter Weglänge). Um Streulicht zu minimieren, ist die Oberfläche bis auf atomares Niveau plan geschliffen (die mittlere Rauigkeit beträgt ein Zehntel Nanometer).

Leihgabe des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), Potsdam und Hannover, und des Instituts für Gravitationsphysik, Leibniz-Universität Hannover.





# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen **DFG**

## Interaktive Demonstration:

### Spiegelaufhängung mit Wirbelstrombremse

Die Spiegel in terrestrischen Gravitationswellendetektoren müssen möglichst gut vor Bodenerschütterungen geschützt werden. Sie werden deshalb wie Pendel aufgehängt, und zwar so, dass sie eine sehr scharf abgegrenzte Resonanzfrequenz besitzen, die außerhalb des eigentlichen Messbereichs des Detektors liegt. Damit wird erreicht, dass Erschütterungen mit Frequenzen, die die Messungen stören können, kaum auf die Spiegel übertragen werden.

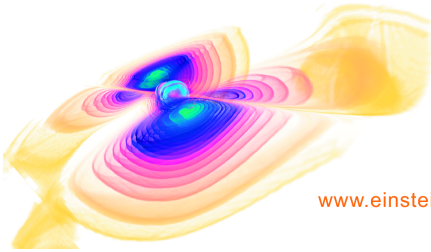
Die Sache hat einen Haken: Störungen, die in der Nähe der Resonanzfrequenz liegen, regen den Spiegel zu vergleichsweise starken Pendelbewegungen an, die den Detektor insgesamt instabil machen können. Um dies zu verhindern, müssen diese Bewegungen unterdrückt werden. Hierfür eignet sich eine Wirbelstromdämpfung, wie sie mit diesem Exponat demonstriert wird. Dazu braucht man lediglich ein paar Permanentmagnete in einem Metallrohr. Die Herausforderung besteht darin, die Dämpfung nicht zu schwach, aber auch nicht zu stark auszulegen.

Versetzen Sie den Spiegel in Bewegung, entweder durch den eingebauten „Stößel“ oder durch direktes, vorsichtiges Antippen. Die Bewegung wird durch den reflektierten Laserstrahl besonders deutlich sichtbar. Welche Bewegungen kann der Spiegel ausführen? Welche können Sie mit Hilfe des reflektierten Laserstrahls leicht erkennen, welche nicht?

Die Wirbelstromdämpfung wird durch Permanentmagnete, die sich innerhalb von Metallrohren bewegen, realisiert. Durch Umlegen des Hebels können Sie die Dämpfung aktivieren oder deaktivieren. Welche Bewegungen des Spiegels werden durch die Wirbelstrombremse gedämpft, welche nicht? Weshalb halten sich bei aktivierter Dämpfung Schwingungen, die durch den „Stößel“ erzeugt werden, viel länger als diejenigen, die man durch direktes Anstoßen des Spiegels anregt?







# GRAVITATIONS WELLEN ASTRONOMIE

[www.einsteinwelle.de](http://www.einsteinwelle.de) · Garching · Hannover · Jena · Potsdam · Tübingen **DFG**

## Modell: Anordnung der Satelliten für LISA

Die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors wächst mit seiner Größe. Auf der Erde kann man bestenfalls Messstrecken von einigen Kilometern Länge realisieren. Deshalb ist ein Detektor im Weltall geplant (LISA steht für „Laser Interferometer Space Antenna“). LISA besteht aus drei Satelliten, die über eine Strecke von fünf Millionen Kilometern Laserstrahlen austauschen und so Gravitationswellen aufspüren können, die eine sehr niedrige Frequenz — bis hinunter zu einer Schwingung in Tausend Sekunden — haben. Die drei Satelliten bilden ein gleichseitiges Dreieck, das der Erde in 50 Millionen km Abstand auf ihrer Bahn um die Sonne folgt. LISA ist ein Gemeinschaftsprojekt von NASA und ESA; der Start ist für das Jahr 2021 vorgesehen.

