



Isaac Newton wandelte nicht im Paradies, sondern in einem englischen Park. Dennoch kam ihm ein Apfel in die Quere, genauer: Er knallte Newton auf den Kopf. Oder kullerte er ihm vor die Füße? Schwer zu sagen. Ob die Geschichte vom Fall des Apfels überhaupt einen wahren Kern besitzt, darf bezweifelt werden. Aber wie die meisten Legenden ist auch sie zumindest gut erfunden. Henry Pemberton erzählt sie erstmals 1728 in seiner Biografie über den berühmten Physiker. Tatsache ist, dass die Universität Cambridge von 1665 bis 1666 wegen

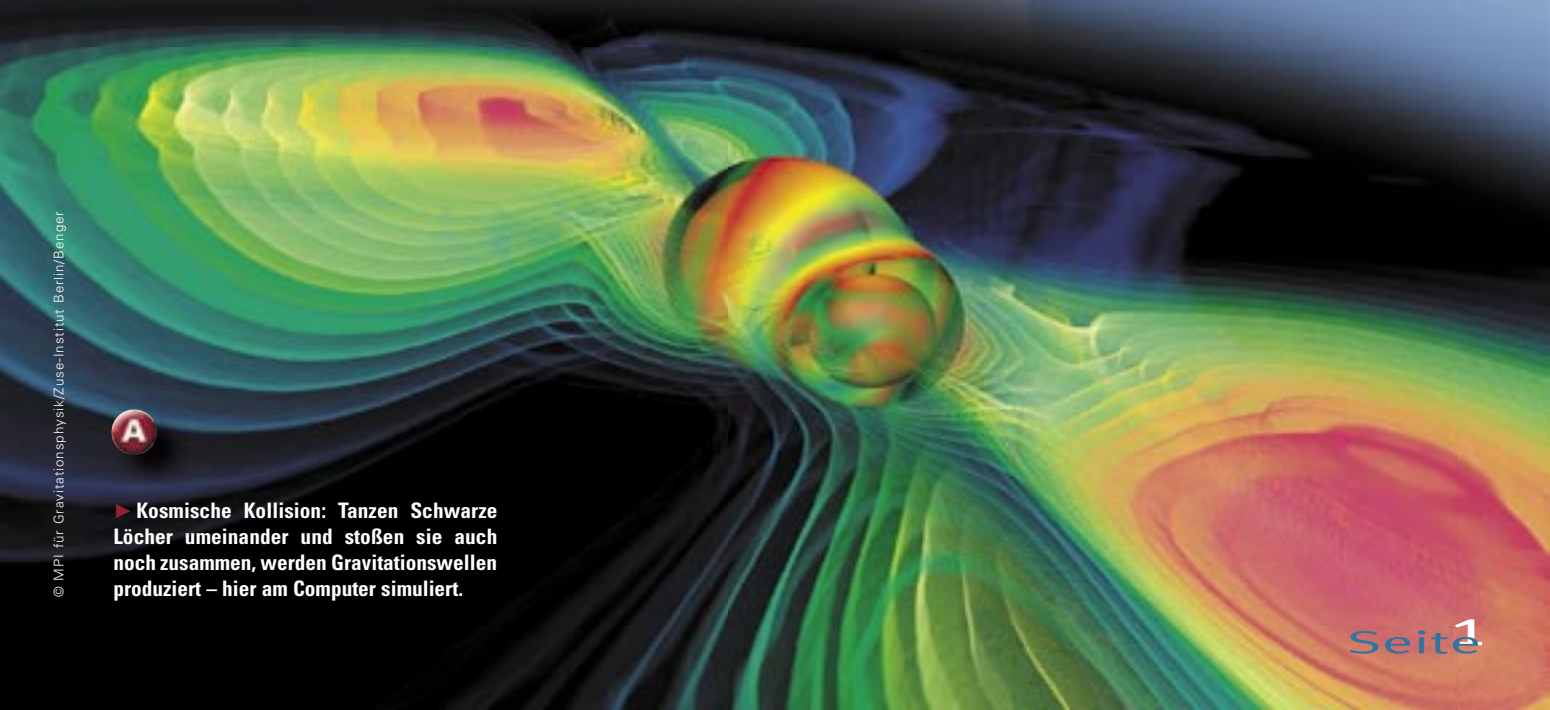
Präziser formuliert: „Zwei Punktmassen ziehen sich an mit einer Kraft, die in die Richtung ihrer Verbindungslinie zeigt, dem Produkt ihrer Massen direkt und dem Quadrat ihres Abstands indirekt proportional ist.“ Das **Newtonsche Gravitationsgesetz** verträgt sich wunderbar mit unserem Alltag. Es erklärt in gleicher Weise, warum die Erde um die Sonne läuft und Handys (natürlich immer die teuersten!) zu Boden fallen und kaputt gehen. Soweit wäre alles gut, gäbe es nicht einen Makel: Das Gravitationsgesetz gilt nicht uneingeschränkt.

Der Kosmos bebt – wie Forscher nach Gravitationswellen lauschen

der Pest geschlossen war und der Professor viel Zeit zum Nachdenken hatte. Der Obsttag jedenfalls hatte Newton befruchtet. Er soll ihn auf die Idee gebracht haben, dass hinter der Bewegung eines in die Höhe geworfenen Steins, der Bahn des Mondes um die Erde oder eben eines zu Boden fallenden Apfels ein und dasselbe physikalische Phänomen steckt: die Schwerkraft.

So beginnt Mitte des 17. Jahrhunderts die Geschichte der Gravitation – der Kraft, die bis in die letzten Winkel des Universums reicht und die Welt zusammenhält.

Als die Astronomen im 19. Jahrhundert mit zunehmend besseren Instrumenten den Lauf der Gestirne beobachteten, bemerkten sie, dass sich der sonnennächste Punkt der Merkurbahn (Perihel) im Raum verschiebt. Dieser Effekt tritt zwar bei allen Planeten auf, weil sie aneinander zerren – die **Drehung des Merkurperihels** erwies sich jedoch als besonders deutlich und obendrein stärker, als man gemäß der Newtonschen Physik erwarten würde: Pro Jahrhundert beträgt sie etwa $\frac{1}{80}$ Grad. →



► **Kosmische Kollision: Tanzen Schwarze Löcher umeinander und stoßen sie auch noch zusammen, werden Gravitationswellen produziert – hier am Computer simuliert.**

→ Wirkte im Verborgenen ein unbekannter Himmelskörper? Oder hatte gar das Gebäude der klassischen Gravitationstheorie einen Konstruktionsfehler? Im Jahr 1907 denkt ein „Experte II. Klasse“ am Berner Patentamt intensiv über die Schwerkraft nach. Zwei Jahre zuvor hat er bei der Zeitschrift *Annalen der Physik* fünf Arbeiten eingereicht, eine davon mit dem Titel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. In dem Aufsatz rüttelt der Freizeitforscher ebenso an den Grundfesten der Physik wie in dem dreiseitigen Nachtrag „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ Die beiden Arbeiten werden später **Spezielle Relativitätstheorie** genannt. Der geniale Autor heißt Albert Einstein, 1905 gilt als sein *annus mirabilis* (Wunderjahr). Am 20. Juli feiert er die Arbeiten mit seiner Frau Mileva. In einer Postkarte an den Freund Conrad Habicht beschreibt er das Ende des ausgelassenen Festes: „Total besoffen leider beide unterm Tisch.“

Die Spezielle Relativitätstheorie bricht unter anderem mit Newtons Dogma von der absoluten Zeit und widerlegt die Behauptung, Geschwindigkeiten würden sich stets direkt addieren. Außerdem soll nach der Newtonschen Theorie die Änderung in der Gravitationswirkung eines Körpers unverzüglich im gesamten Universum spürbar sein. Das heißt: Die Schwerkraft wirkt überall sofort. Das vertrug sich nicht so recht mit Einsteins Aussage, wonach es für die Ausbreitung von Krafteinflüssen jeglicher Art ein natürliches Tempolimit gibt – die Lichtgeschwindigkeit ($c = 300\,000\text{ km/s}$). So ging der Physiker

daran, die Gesetze der Gravitation auf eine neue Grundlage zu stellen. Später erinnert er sich: „Es war 1907, als mir der glücklichste Gedanke meines Lebens kam ... Das Gravitationsfeld hat nur eine relative Existenz, weil für einen Beobachter, der frei vom Dach eines Hauses fällt – zumindest in seiner Umgebung – kein Gravitationsfeld existiert. Tatsächlich bleiben alle von diesem Beobachter fallen gelassenen Gegenstände im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, unabhängig von ihrer chemischen oder physikalischen Natur.“

EINSTEINS GEDANKEN

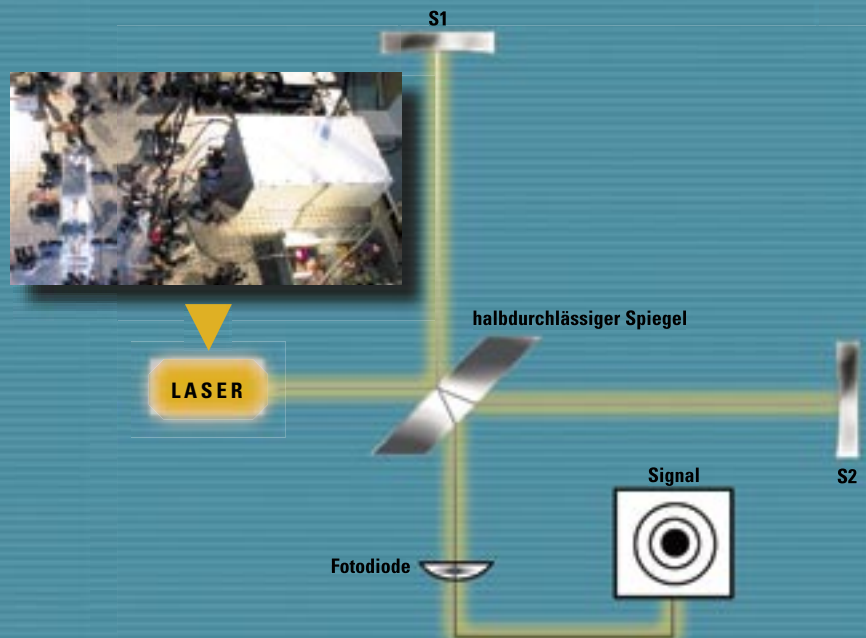
Einsteins Trick lässt sich auf einen einfachen Nenner bringen: Er simuliert Schwerkraft mit Beschleunigung. Denn auch die Beschleunigung erzeugt Kräfte, wie sie zum Beispiel in einem schnell anfahrenen Aufzug auftreten. Wäre dessen Kabine schall- und lichtdicht, könnten die Menschen glauben, die Anziehungskraft der Erde habe plötzlich zugenommen. Aber ist die Gravitation überhaupt eine Kraft, wie es Newton formulierte? Die Erkenntnis, dass Gravitation zumindest teilweise eine Frage des Bezugssystems ist, führt Albert Einstein zu revolutionären Ideen, die er nach achtjähriger Arbeit 1915 in seiner **Allgemeinen Relativitätstheorie** vorstellt. Für die Planetenbewegungen ergeben sich aus der Allgemeinen Relativitätstheorie winzige Abweichungen vom Newtonschen Modell. Am deutlichsten treten sie beim sonnennahen, schnell umlaufenden Merkur auf. So lässt sich die Periheldrehung exakt erklären und berechnen: „Für einige Tage

war ich außer mir vor freudiger Erregung“, schrieb Einstein, nachdem er dieses Rätsel gelöst hatte.

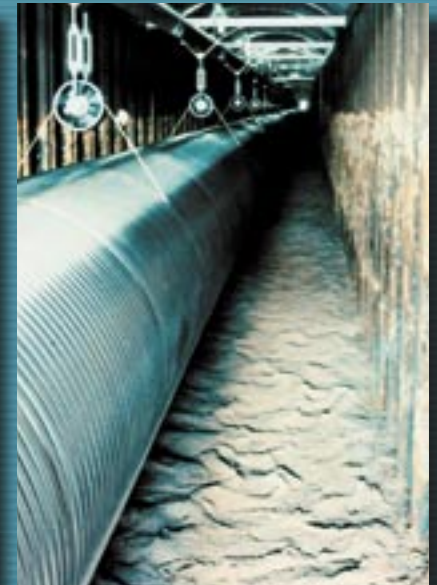
Die Allgemeine Relativitätstheorie ist letztlich eine Feldtheorie – wie die **Maxwellsche Elektrodynamik** auch. In seinen Gleichungen verknüpft der schottische Physiker und Mathematiker James Clerk Maxwell elektrisches und magnetisches Feld mit Ladungen und Strömen. Die Konsequenzen der Elektrodynamik erleben wir heute wie selbstverständlich: Rundfunk und Fernsehen bringen sie uns ins Haus – als elektromagnetische Wellen. Sie entstehen durch die Beschleunigung von elektrischen Ladungen. Obwohl in vielen Punkten unterschiedlich, haben Allgemeine Relativitätstheorie und Elektrodynamik einige formale Gemeinsamkeiten. So ergeben sich in der Elektrodynamik aus der Ladungsverteilung die Felder, die ihrerseits die Ladungsteilchen beeinflussen, die wiederum auf die Felder wirken. In der Allgemeinen Relativitätstheorie bestimmt die Materieverteilung die Geometrie der Raumzeit, die sich auf die Materieverteilung auswirkt, was schließlich die Geometrie verändert. In den beiden Theorien steckt noch eine weitere Gemeinsamkeit: Bei Maxwell entfernen sich Störungen in elektromagnetischen Feldern mit Lichtgeschwindigkeit von ihrem Entstehungsort, zum Beispiel einer elektrischen Ladung. Bei Einstein führt die beschleunigte Bewegung von Massen im Gravitationsfeld zu Störungen, die sich lichtschnell durch den Raum bewegen. In beiden Fällen kann man das Wort *Störungen* durch ein anderes ersetzen: *Wellen*.

B LASERLICHT AUF DER RENNBahn

► Die Grundidee stammt aus dem 19., die Hardware aus dem 21. Jahrhundert: Bei GEO600 erzeugt ein Lasersystem (kleines Bild) Licht mit einer Wellenlänge von 1064 Nanometern. Ein halbdurchlässiger Spiegel spaltet den Laserstrahl in zwei Strahlen auf, die im rechten Winkel weiterlaufen. Am Ende einer jeden 600 Meter langen Laufstrecke hängt ein Spiegel (S 1 und S 2), der das Licht zurückreflektiert. Dadurch gelangen die beiden Strahlen erneut zu dem halbdurchlässigen Spiegel. Dieser lenkt die Strahlen nun so um, dass sie sich überlagern, also interferieren. Die auf einer Fotodiode ankommenden Lichtwellen schwingen jedoch nicht im Gleich-, sondern im Gegentakt: Wellenberg trifft auf Wellental, die Lichtwellen löschen sich also gegenseitig aus. Stört eine Gravitationswelle das System und verändert somit die Messstrecken, geraten die Lichtwellen aus dem Takt. Der Empfänger bleibt nicht länger dunkel – ein Signal erscheint.



C



► **Feldforschung:** In Ruthe bei Hannover streckt GEO600 seine beiden jeweils 600 Meter langen Arme aus. Herzstück ist das Zentralhaus mit dem Lasersystem (auf dem linken Foto im Vordergrund). Die Lichtstrahlen laufen durch gewellte Edeltstahlröhren mit 0,9 Millimeter Wandstärke und 60 Zentimeter Durchmesser (rechts). Die Anlage ist schwingungsgedämpft und komplett evakuiert.

© MPI für Gravitationsphysik/Uni Hannover

Wer auf dem Trampolin auf und ab hüpft, verliert Energie (nicht nur in Form von Kalorien) und schlägt in der Raumzeit Wellen. Nun besitzt ein Mensch eine geringe Masse und hüpft vergleichsweise langsam. Daher sind die von ihm ausgesandten Gravitationswellen unmessbar klein. Im All dagegen findet man große Massen – und sogar ein Trampolin: die Raumzeit. Darin ist alles in Bewegung, weil kein einziger Himmelskörper in Ruhe an einem Ort verharrt. So beult die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne den Raum aus und strahlt dabei Gravitationswellen mit einer Leistung von 200 Watt ab. Aber auch diese Gravitationswellen sind noch zu schwach, um sie mit einem Detektor aufzufspüren.

UNIVERSUM IN UNRUHE

Glücklicherweise gibt es im Universum viel heftigere Erschütterungen der Raumzeit: Wenn zwei **Neutronensterne** oder **Schwarze Löcher** extrem schnell umeinander laufen oder gar miteinander kollidieren (**Abb. A**). Oder wenn ein massereicher Stern als **Supernova** explodiert. Solche kosmischen Ereignisse erzeugen Gravitationswellen mit einer Leistung von rund 10^{45} Watt. Tatsächlich haben die beiden amerikanischen Astronomen Russell Hulse und Joseph Taylor gezeigt, dass die Umlaufzeit der beiden Neutronensterne PSR 1913+16 abnimmt, weil das Doppelsystem Energie verliert – und sie als Gravitationswellen aussendet. Dafür erhielten die Forscher 1993 den Nobelpreis für Physik.

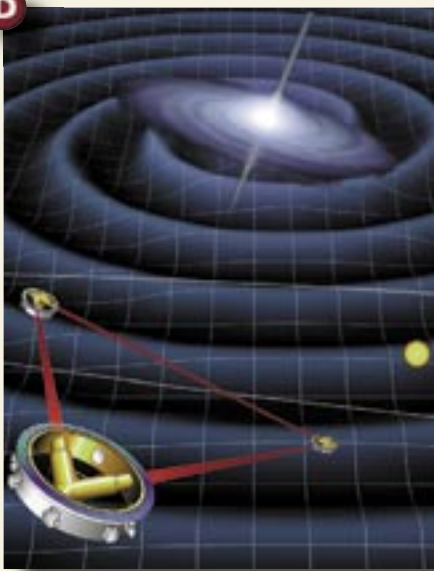
Womit aber lassen sich diese Wellen in der Raumzeit auffangen? Wie machen sie sich bemerkbar? Dazu schneiden wir in Gedanken ein Gummituch, das zwei Experimentatoren – nennen wir sie Albert und Isaac – jeweils an den gegenüber liegenden beiden Ecken festhalten. Jetzt ziehen Albert und Isaac gleichzeitig an dem Tuch, indem sie zwei oder drei Schritte zurücktreten. Während sie sich voneinander entfernen, bleiben die Arme am Körper angelegt. Das Gummituch wird länger und gleichzeitig schmaler. Als nächstes gehen Albert und Isaac wieder aufeinander zu, wobei sie die Arme vom Körper wegstrecken: Das Gummituch wird kürzer und gleichzeitig breiter. Zum Schluss kehren die beiden Experimentatoren in die Ausgangsposition zurück. Während des Versuchs würde sich ein auf das Gummituch aufgemaltes Porträt von Albert Einstein genau so dehnen und stauchen, als hätte eine von unten nach oben durch die Ebene des Gummituchs laufende Gravitationswelle den Raum verzerrt.

In einem zweiten Versuch malen wir auf das Gummituch zwei möglichst weit voneinander entfernte Kreise. Den einen nennen wir *Start/Ziel*, den anderen *Wendepunkt*. Dann organisieren wir einen Trupp gut dressierter Ameisen. Wir setzen alle in den Kreis *Start/Ziel* und lassen eine nach der anderen in regelmäßigem zeitlichen Abstand zum *Wendepunkt* und wieder zurück laufen. Weil die Ameisen mit konstanter Geschwindigkeit

unterwegs sind, erreichen sie den Zielkreis alle im selben Takt und Abstand wie sie ihn beim Start verlassen haben. Nun dehnen Albert und Isaac das Gummituch um das Doppelte. Dadurch wird auch die Marschformation des Ameisentrupps auseinandergezogen, die Abstände der Ameisen zueinander wachsen: Die Ameisen kommen in doppelt so großem zeitlichen Abstand wieder im Ziel an. Diese Zeitverzögerung tritt allerdings nur vorübergehend auf, denn es betrifft ja nur jene Ameisen, die gerade auf der Strecke sind. Bleibt das Tuch um den Faktor zwei gespannt, kehren die startenden Ameisen auch wieder im Takt zurück. Das rhythmische Dehnen und Stauchen – die simulierte Gravitationswelle – bewirkt, dass die Ameisen mal etwas schneller, mal etwas langsamer aufeinander folgen als erwartet.

GEO600 BREITET DIE ARME AUS

Wie oben beschrieben, verändert eine Gravitationswelle den Abstand zwischen den im Raum enthaltenen Objekten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Das zu messen, ist äußerst schwierig. Stellen wir uns den GAU in einer benachbarten **Galaxie** vor: die Explosion eines massereichen Sterns. Die von diesem kosmischen Kollaps ausgesandten Gravitationswellen würden während weniger tausendstel Sekunden die Distanz zwischen Sonne und Erde ($1,5 \times 10^{11}$ Meter) nur um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms (10^{-10} Meter) ändern. Albert Einstein →



▲ Die Zukunft liegt im All: Erschütterungen lassen sich in erdgebundenen Detektoren nie ganz vermeiden und stören die Messung von Gravitationswellen unterhalb von zehn Hertz. Daher planen europäische und amerikanische Wissenschaftler gemeinsam das Projekt LISA. Vom Jahr 2013 an sollen drei identische Satelliten 50 Millionen Kilometer hinter der Erde her fliegen und dabei ein Dreieck mit fünf Millionen Kilometern Seitenlänge aufspannen. Dieses Weltraum-Laserinterferometer wird im Vergleich zu erdgebundenen Detektoren eine millionenfache Empfindlichkeit besitzen.

→ hielt den Nachweis von Gravitationswellen daher für unmöglich. Und doch haben die Wissenschaftler Instrumente erdacht, denen das Gelingen soll. Die Geräte der ersten Generation bestanden aus tonnenschweren, mit sensiblen Sensoren bestückten Aluminiumzylindern. Gravitationswellenpulse müssten sie zum Schwingen bringen wie der Klöppel eine Kirchenglocke. Aber trotz hoch gezüchteter Verstärker brachten solche Resonanzdetektoren keinerlei Ergebnisse. Daher konstruierten die Forscher noch weit empfindlichere Empfänger. Deren Prinzip beruht auf dem Gedankenexperiment mit dem Gummiband. Dazu ersetzen wir den Kreis *Start/Ziel* durch einen Laser, den *Wendepunkt* durch einen Spiegel und denken uns die Ameisen als die Wellenberge eines Lichtsignals. Um die winzigen Verzögerungen der Ankunftszeit nachzuweisen, muss senkrecht zum ersten noch ein zweiter Strahlengang angelegt werden, damit sich die Lichtwellen dieser beiden Arme überlagern. Ein solches **Michelson-Interferometer** gibt es schon seit 1882; gebaut wurde es ursprünglich, um die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu prüfen. Ausgerüstet mit modernster Technik eignet es sich ideal zum Nachweis von

DIE KERNAUSSAGEN DER

Speziellen Relativitätstheorie

- Es gibt keinen Äther, der Licht- und Radiowellen trägt.
- Alle physikalischen Gesetze haben in allen gleichförmig zueinander bewegten Systemen die gleiche Form.
- Raum und Zeit sind untrennbar miteinander verknüpft.
- Es gibt keine absolute Gleichzeitigkeit.
- Die Lichtgeschwindigkeit ist eine universelle Konstante und unabhängig von der Relativbewegung zur Lichtquelle.
- Energie und Materie sind äquivalent, die Masse ist direkt ein Maß für die in einem Körper enthaltene Energie. Licht überträgt Masse.

Allgemeinen Relativitätstheorie

- Die Gravitation ist keine Kraft im herkömmlichen Sinne, sondern eine Eigenschaft der Geometrie von Raum und Zeit.
- Materie krümmt die Raumzeit, wobei die Stärke der Krümmung mit der Masse eines Körpers zu- und mit wachsendem Abstand von ihm abnimmt. Raum und Zeit sind dynamisch und bestimmen ihrerseits die Bewegung der Materie.
- Die Zeit spielt in der Allgemeinen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle. So tickt eine Uhr nahe einem massereichen Himmelskörper langsamer als fern von ihm in Regionen, die von seiner Gravitation weniger stark beeinflusst werden.

Gravitationswellen. Die Anlage **GEO600**, die auf einem Feld in Ruthe bei Hannover steht, funktioniert nach dem Prinzip des Michelson-Interferometers (**Abb. B**). Das Licht produzieren mehrere Diodenlaser, die jenen in einem CD-Player gleichen. Ein kleiner Kristall verwandelt das Licht in einen infraroten Laserstrahl, dessen Leistung nach der Filterung allerdings nur zehn Watt beträgt – viel zu schwach für sinnvolle Messungen. Daher arbeiten die Forscher mit „Licht-Recycling“: Das Interferometer schickt alles nicht benutzte Licht wieder in Richtung Laser, ein Spiegel bringt es erneut auf den Weg zurück. Dieser Kreislauf wiederholt sich mehrfach und verstärkt nicht nur die umlaufende Lichtleistung auf mehrere 1000 Watt, sondern erhöht auch die Empfindlichkeit des Detektors. Der Laser ist darüber hinaus extrem stabil: Über Monate hinweg produziert er Licht von immer gleicher Amplitude und Frequenz.

Die beiden Arme des Interferometers bilden jeweils 600 Meter lange, in Gräben verlegte Röhren (**Abb. C**). Die Laserstrahlen sollten darin ungestört von äußeren Einflüssen laufen. In der Praxis gilt es, Vibrationen durch Verkehr, Seismik oder Nordseewellen auszuschalten. Seismometer messen die Schwingungen, die dann von Piezoaktuatoren kompensiert werden. Neben diesem aktiven sind alle optischen Teile mit einem passiven System versehen: zweilagige Dämpfer aus Gummi und Edelstahl. Ebenso vibrationsdämpfend wirken Blattfedern und mehrstufige Pendel. Um die thermischen Fluktuationen der Luftdichte innerhalb der Anlage möglichst klein zu halten, wurde das Interferometer in evakuierten Edelstahlröhren untergebracht; Turbomolekularpumpen schaffen ein Ultrahochvakuum besser als 10^{-11} bar.

GEO600 ist ein bilaterales Projekt, federführend daran beteiligt sind das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik und die Universität Hannover auf deutscher sowie die Universitäten Glasgow und Cardiff auf britischer Seite. Die Anlage ist einer von mehreren irdischen Horchposten, die das Konzert der Sterne abhören sollen. Die USA betreiben an zwei 3000 Kilometer entfernten Standorten LIGO – interferometrische Detektoren mit jeweils vier Kilometern Armlänge. Nahe der italienischen Stadt Pisa steht VIRGO, und die Japaner arbeiten mit TAMA 300. Während diese Detektoren den Betrieb aufgenommen haben, denken die Astronomen schon ans Jahr 2013, wenn das Interferometer LISA (**Abb. D**) vom Weltraum aus nach Gravitationswellen lauschen soll. Mal sehen, wer die Botschaft zuerst auffängt.

Schlagwörter: Allgemeine Relativitätstheorie, Drehung des Merkurperihels, Galaxie, Geo600, Maxwellsche Elektrodynamik, Michelson-Interferometer, Neutronenstern, Newtonsches Gravitationsgesetz, Schwarzes Loch, Spezielle Relativitätstheorie, Supernova

Lesetipps: Markus Pössel, *Das Einstein-Fenster, Eine Reise in die Raumzeit*, Verlag Hoffmann und Campe, Hamburg 2005; Helmut Hornung, *Massemonster im All – Forscher bringen Licht in Schwarze Löcher*, GEOMAX 7, Winter 2003

DVD-Tipp: *Einsteins Welt – eine Wissensgeschichte* (Bestell-Nr.: 46 32 392; FWU-Bestell-Hotline: 089-6497-444; Fax: 089-6497-240; e-mail: vertrieb@fwu.de)

Internet: <http://www.einstein-online.info/>

DIE „MAX“-REIHE

auch unter www.max-reihe.mpg.de

BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX erscheinen jeweils zweimal im Jahr und berichten über aktuelle Forschungsergebnisse aus den Max-Planck-Instituten vor allem für Lehrer und Schüler. Weitere Exemplare können unter folgender Adresse kostenlos bestellt werden: