



DER KOSMOS BEBT
WIE FORSCHER ERFOLGREICH NACH GRAVITATIONSWELLEN FAHNEN



Wenn Massen Wellen Schlagen

»Es war eine wissenschaftliche Sensation, was eine internationale Forschergruppe am 11. Februar 2016 verkündete. Die beiden amerikanischen Ligo-Observatorien in Hanford (Washington) und Livingston (Louisiana) hätten am 14. September 2015 erstmals winzige periodische Längenänderungen registriert, die von sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden Gravitationswellen ausgelöst worden seien. Damit waren den Ligo-Forschern endlich jene periodischen Verzerrungen der Raumzeit ins Netz gegangen, deren Existenz Albert Einstein aus seiner Allgemeinen Relativitätstheorie 1916 gefolgert hatte.« (FAZ, 3.10.2017)

Die oben beschriebene Entdeckung der Gravitationswellen ist ein Meilenstein in der neuzeitlichen Physik und wurde daher auch 2017 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Sie dienen als experimentelle Bestätigung der von Einstein postulierten Allgemeinen Relativitätstheorie, welche die Erkenntnisse der speziellen Relativitätstheorie um die Betrachtung von Gravitationseffekten erweitert.

- a) Eine Folgerung der speziellen Relativitätstheorie ist die relativistische Massenzunahme. Berechnen Sie die prozentuale Massenzunahme eines Körpers im Vergleich zu seiner Ruhemasse, wenn dieser sich mit $0,02c$ bewegt.
- b) Erklären Sie anhand von Teilaufgabe a), warum die Aussagen der newtonschen Mechanik in allen schulphysikalischen Mechanikexperimenten bestätigt werden und nennen Sie die Grenze, ab welcher dies nicht mehr der Fall wäre.
- c) Nennen Sie zwei weitere Aussagen der speziellen Relativitätstheorie und erklären Sie, inwieweit diese im Widerspruch zur Newtonschen Mechanik stehen.

Unter Gravitationswellen versteht man Störungen im Gravitationsfeld durch beschleunigte Massen, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum bewegen. Sie verändern den Abstand zwischen den im Raum enthaltenen Objekten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

- d) Erklären Sie, warum nach der Newtonschen Mechanik Gravitationswellen nicht existieren dürften und nennen Sie zwei mögliche Ursachen für die oben beschriebenen Störungen.
- e) Beschreiben Sie die technischen Schwierigkeiten beim Nachweis von Gravitationswellen.

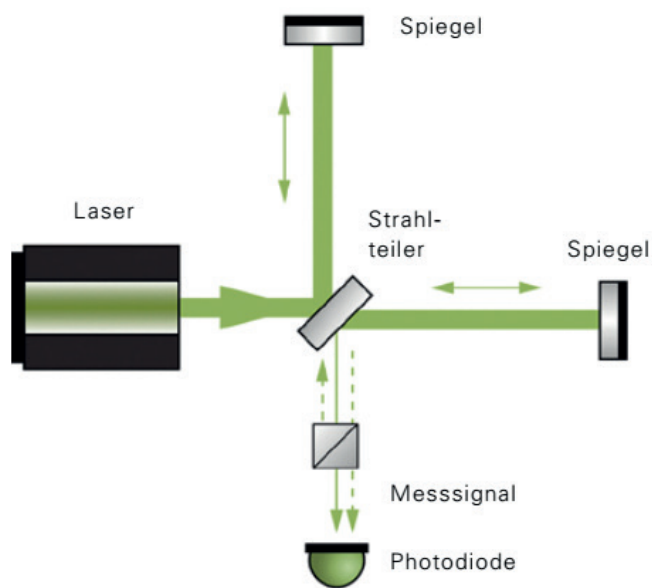


Abb. A: Interferometer © MPI für Gravitationsphysik / CC BY-NC-SA 4.0

Der Nachweis gelang schlussendlich durch die Anlage Advanced LIGO, welche auf der Funktionsweise eines Michelson-Interferometers beruht. Der grundsätzliche Aufbau eines solchen ist in der Skizze (Abb. A) dargestellt.

- f) Beschreiben Sie stichpunktartig die Funktionsweise eines solchen Interferometers zum Nachweis von Gravitationswellen.
- g) Der Nachweis von Gravitationswellen ist mit der darin enthaltenen Forschung und Instandhaltung oder Bau der Nachweisgeräte mit immensen Kosten verbunden. Nehmen Sie begründet dazu Stellung, ob und warum es sinnvoll ist, dieses Geld als Gemeinschaft zu investieren.

LÖSUNGEN DER AUFGABEN:

$$\text{a) } m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{0,02c}{c}\right)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-(0,02)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-0,0004}} = \frac{m_0}{\sqrt{0,9996}} \rightarrow \frac{m(v)}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{0,9996}} \approx 1,0002$$

→ Die Masse nimmt um 0,02% zu.

- b) Trotz einer sehr hohen Geschwindigkeit von $0,02 \cdot 300000000 \frac{m}{s} = 6,0 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$ nimmt die Masse nur um 0,02% zu. In schulphysikalischen Mechanikexperimenten werden bei weitem nicht solche Geschwindigkeiten erreicht, daher kommen in diesem Fall die relativistischen Effekte nicht messbar zum Tragen. Erst ab **0,1c** sind relativistische Effekte in einer nicht mehr vernachlässigbaren Größenordnung vorhanden.
- c) Viele Aussagen möglich, zum Beispiel:
- Zeitdilatation und Gleichzeitigkeit: In der newtonschen Mechanik ist die Zeit absolut und nicht von der relativen Bewegung von Bezugssystemen abhängig.
 - Oberste Geschwindigkeitsgrenze: In der newtonschen Mechanik können sich Geschwindigkeiten zu unendlich großen Geschwindigkeiten addieren.
 - ...
- d) In der newtonschen Mechanik ist die Änderung der Gravitationswirkung unverzüglich im ganzen All spürbar. Laut der Relativitätstheorie breiten sich Gravitationswellen mit der Lichtgeschwindigkeit c aus.
- Verschmelzung von schwarzen Löchern
 - Supernova
 - Doppelsternsystem, die sich umkreisen und dabei Energie verlieren
 - ...
- e) Je massereicher die Ursache, desto niederfrequenter die Gravitationswelle. Grundsätzlich erzeugen alle beschleunigte Massen Gravitationswellen, allerdings sind sehr große Massen nötig, um zu einer nachweisbaren Störung beizutragen (Vgl. **TECHMAX Ausgabe 4: Der Kosmos bebt, S. 3, Mitte**). Dieser Nachweis ist technisch auch dann noch sehr anspruchsvoll.
- f) Bei einem Gravitationswellendetektor erzeugt ein Lasersystem Licht, das ein halbdurchlässiger Spiegel (Strahlteiler) in zwei Strahlen aufspaltet, die im rechten Winkel weiterlaufen. Am Ende einer jeden Laufstrecke – bei Advanced LIGO beträgt sie vier Kilometer – hängt jeweils ein Spiegel, der das Licht zurückreflektiert. Dadurch gelangen die beiden Strahlen erneut zum Strahlteiler. Dieser lenkt die Strahlen nun so um, dass sie sich überlagern, also interferieren. Die auf einer Photodiode 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.
- g) Individuelle Lösung möglich. Kann auch in einer Podiumsdiskussion im Unterricht behandelt werden.

QUELLEN- UND ABBILDUNGSHINWEISE:

Einleitender Text: FAZ, Die Jagd nach Einsteins Gravitationswellen; Manfred Lindinger, 03.10.2017;

online: <https://www.faz.net/aktuell/wissen/nobelpreise/physik-nobelpreis-2017-die-jagd-nach-einsteins-gravitationswellen-15229047.html>; abgerufen im November 2020

Abb. A: Interferometer © MPI für Gravitationsphysik / CC BY-NC-SA 4.0; in: **TECHMAX Ausgabe 4**

Der Text wird unter **CC BY-NC-SA 4.0** veröffentlicht.

Stand 11/2020; Text: T. Frank; Layout und Redaktion: max-wissen-Team