Seminarfacharbeit

Gravitationswellen

als weiterer Beweis der Relativitätstheorie

Timon Cwik

3. März 2022

Astronomie 12

Herr Riemer

Abgabetermin: 07.03.2022, Bramsche



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung							
2	Theorie							
	2.1	Gravit	tation			4		
		2.1.1	Zwei Theorien			4		
		2.1.2	Geltendes			4		
	2.2	Transv	versale Wellen			5		
	2.3	Gravit	tationswellen			6		
		2.3.1	Gedankenexperiment			8		
3	Beweis							
	3.1	Natürl	liche Beweise			9		
		3.1.1	Pulsar Timing Arrays			10		
	3.2	Künstl	liche Beweise			11		
		3.2.1	Wissenswertes			11		
		3.2.2	Versuche zur Messung			13		
		3.2.3	Laserinterferometrie			14		
4	Aus	blick				18		
5	Rés	umé				20		
6	Anh	nang 21						
	Literaturverzeichnis							
	Abbildungsverzeichnis							
	6.1	Danks	sagungen			24		
	6.2	Erklär	ungen			25		
		6.2.1	Selbstständigkeit			25		
		6.2.2	Veröffentlichung			25		

1 Einführung

Nachdem Albert Einstein 1915 die allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte, folgerte er daraus kurze Zeit später Schwingungen in der Raumzeit-Geometrie, die Gravitationswellen. Allerdings war er der Ansicht, ihre Interaktion mit Materie wäre zu gering, um sie jemals praktisch¹ nachzuweisen ([15] S.48). Trotz seiner negativen Prognose wurden einige Versuche unternommen, bis 2015 einem Team aus Wissenschaftlern tatsächlich die erfolgreiche Messung gelang ([8] S.13).

Gravitationswellen als weiterer Beweis der Relativitätstheorie ist das Überthema meiner Facharbeit. Dies legt eine genaue Betrachtung der Relativitätstheorie nahe. Allerdings habe ich mich bewusst dagegen entschieden. Aufgrund des immensen Umfangs und der beträchtlichen Komplexität, wäre es ansonsten unmöglich den begrenzten Rahmen dieser Arbeit einzuhalten. Auch wäre die genauere Ergründung dieser Theorie für ein Seminarfach der zwölften Klasse ohnehin unangebracht.

Um einen besseren Einblick in den Hauptteil des Überthemas, die Gravitationswellen, zu gewährleisten, beschäftige ich mich stattdessen im weiteren Verlauf hauptsächlich mit deren Natur und gehe in diesem Zuge auch kurz auf die Gravitation, sowie transversale Wellen ein. Für ein besseres Verständnis schließe ich hier ein kleines Gedankenexperiment an. Nachfolgend widme ich mich den Beweismethoden für Gravitationswellen. Diesen Bereich teile ich in die natürlichen Beweise (siehe Unterabschnitt 3.1) und die künstlichen Beweise (siehe Unterabschnitt 3.2), welche jeweils eigene Erläuterungen mit sich ziehen. Hierbei bringe ich auch einzelne historische Daten ein.

Zu den im Text enthaltenen Informationen sei gesagt: Der Großteil besteht aus der Zusammenfassung und Wiedergabe von Quellen. Im Wesentlichen basiert die Grundstruktur der Facharbeit auf den ausgeliehenen Zeitschriften und Büchern (siehe Unterabschnitt 6.1). Diese wurde dann durch Internetrecherche im Zuge weiterer und spezieller Darlegungen ergänzt. Eigene Experimente und Erfahrungen im Bereich der Gravitationswellen sind nahezu unmöglich und Umfragen zu diesem Thema sind aufgrund des hohen Komplexitätsgrades und dem gegenüberstehenden geringen Wissen des Durchschnittsbürgers frei von jeglichem Sinn. Einzig und allein kleinere individuelle Schlussfolgerungen und Verbindungen sind möglich.

¹Gemeint ist hier das Gegenteil von theoretisch.

Quellen- und Literaturverweise gebe ich immer auf den entsprechenden Abschnitt folgend im Text in Form einer Zahl an. Zur kurzen Erklärung von Fachbegriffen oder Klarstellung von möglicherweise mehrdeutigen Aussagen nutze ich Fußnoten. Alle verwendeten Quellen und Abbildungen sind im jeweiligen Verzeichnis zu finden.

Größere Schwierigkeiten traten bei der Bearbeitung nicht auf. Lediglich die Einarbeitung in IATEX war etwas zeitintensiv. Zusätzlich stellte die außerordentliche Fülle an Quellen eine geringfügige Herausforderung dar.

2 Theorie

2.1 Gravitation

2.1.1 Zwei Theorien

Zum Phänomen der Gravitation gibt es zwei allgemein anerkannte Erklärungen: Auf der einen Seite das Newtonsche Gravitationsgesetz, laut dem die Gravitation eine Fernwirkungskraft² ist.

Auf der anderen Seite die allgemeine Relativitätstheorie Albert Einsteins, die besagt, dass die Gravitation nicht als Kraft auf die beeinflussten Körper wirkt, sondern eine Krümmung in der vierdimensionalen Raumzeit-Geometrie ist, in der sich alle unbeeinflussten³ Körper auf sogenannten Geodäten⁴ bewegen. Wenn diese Bahnen durch einen, von der Gravitation gekrümmten, Raum verlaufen, sind folglich auch die Geodäten gekrümmt [28].

Obwohl das Newtonsche Gravitationsgesetz theoretisch durch die allgemeine Relativitätstheorie abgelöst wurde, wird es aufgrund seiner geringeren Komplexität heutzutage immer noch vorzugsweise verwendet, wenn es um die Betrachtung von Systemen mit vernachlässigbaren relativen Größen, z.B. im Physikunterricht an der weiterführenden Schule geht.

2.1.2 Geltendes

Die Gravitation, welche auch als Massenanziehung bezeichnet wird, ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen der Physik [28] neben der elektromagnetischen, der schwachen⁵ und der starken⁶ [27]. Von diesen Vieren ist die Gravitation mit Abstand die schwächste Wechselwirkung. Beispielsweise ist bereits die Kraft eines kleinen Magneten in der Lage, die Gravitation der Erde zu überwinden, obwohl diese beträchtlich größer ist ([2] S.20). Trotz der Abnahme ihrer Stärke auf Distanz, wird ihre Auswirkung nie gleich null. Somit besitzt die Gravitation eine unbegrenzte Reichweite. Tatsächliche Ursachen für sie sind Massen und/oder jede Form von Energie [28]. Theoretisch verursacht also auch jeder einzelne Mensch Gravitation. Aufgrund der bedeutend zu kleinen Masse eines Menschen, ist jene allerdings zu vernachlässigen.

²Die Fernwirkung ist eine physikalische Wirkung, die sich über unendliche Entfernungen ohne Verzögerung und Ausbreitungsmedium auswirkt [32].

³frei von Kräften

⁴Eine Geodäte entspricht der kürzesten Verbindung zweier Punkte im Raum.

⁵auch bezeichnet als schwache Kernkraft

⁶auch bezeichnet als starke Kernkraft

Analog zu den Photonen der elektromagnetischen Wechselwirkung wird vermutet, dass ein Eichboson, das Graviton, Träger der Gravitation ist. Wenn das Vorhandensein dieses Bosons bestätigt werden sollte, wäre womöglich auch die Möglichkeit geschaffen, eine Theorie der Quantengravitation aufzustellen und somit eine Verbindung der allgemeinen Relativitätstheorie mit der Quantentheorie zu schaffen [30].

2.2 Transversale Wellen

Transversale Wellen sind Wellen, deren Oszillatoren⁷ normal⁸ zur Ausbreitungsrichtung um eine Ruhelage (siehe Abbildung 1: Equilibrium) oszillieren⁹. Den Abstand zweier Oszillatoren, die sich in der gleichen Phase¹⁰ befinden bezeichnet man als Wellenlänge λ^{11} . Mithilfe dieser Wellenkennziffer und dem Kehrwert der Periodendauer T lässt sich in das Weg-Zeit-Gesetz

$$v_p = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} \tag{1}$$

einsetzen, wobei v_p die Phasengeschwindigkeit 12 der Welle darstellt. Weil der Kehrwert der Periodendauer T auch die Frequez f ist, lässt sich

$$v_p = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \tag{2}$$

herleiten [1].

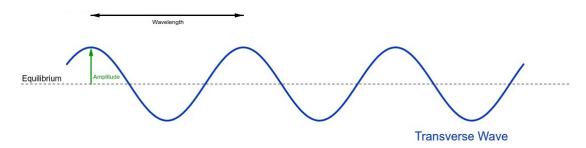


Abbildung 1: transversale Wellen [1]

⁷Ein Oszillator ist ein schwingungsfähiges System.

⁸senkrecht

⁹schwingen

¹⁰z.B. Distanz zwischen zwei Wellenbergen; siehe Abbildung 1

¹¹λ heißt Lambda.

¹²Die Phasengeschwindigkeit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleicher Phasen [25].

2.3 Gravitationswellen

Gravitationswellen sind eine Folge der allgemeinen Relativitätstheorie nach Albert Einstein ([13] S.48). Erstmalig nachgewiesen hatte sie Einstein persönlich 1916 durch ein theoretisches Näherungsverfahren ([15] S.48).

Die Ausbreitung von Änderungen des Gravitationsfeldes erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit $c=2,99\cdot 10^8\frac{m}{s}$. Dies wurde bereits durch das Verschmelzen zweier Neutronensterne in der Galaxie NGC 4 993 bewiesen. Der erzeugte Gammablitz, traf nahezu zeitgleich mit den gemessenen Gravitationswellen auf der Erde ein. Da bereits bekannt ist, dass elektromagnetische Wellen sich mit Lichtgeschwindigkeit c bewegen, ist somit auch die ebensoschnelle Ausbreitung eins Gravitationsfeldes bestätigt ([18] S.64).

Dadurch, dass sich neue Geometrien der Raumzeit eben nicht instantan ausbreiten und omnipräsent sind, entstehen demnach Gravitationswellen (siehe Abbildung 2). Durch sie strahlen die Änderungen der Raumzeit-Geometrie

wellenförmig ab. Jedes System beschleunigter¹³ Massen verursacht diese Schwingungen in der Raumzeit ([8] S. 12).

Weil Massen die Ladungen der Gravitation sind und bislang keine negativen Massen anerkannt sind, kann es keine Dipole von Gravitation geben. Folglich kann auch keine Dipolstrahlung der Gravitation existieren. Der nächstgrößere Multipol ist somit der Quadrupol. Daher besitzen Massenverteilungen ein Quadrupol-

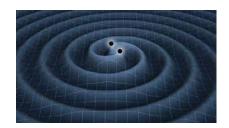


Abbildung 2: Gravitationswellen [16]

Zweidimensionale Abbildung von

Gravitationswellen, die von zwei einander

umkreisenden Massen ausgesandt werden

[16]

moment,welches bei Beschleunigung zur Quadrupolstrahlung¹⁴ führt [17]. Daraus folgend strahlen auch rotierende Massen, die nicht rotationssymmetrisch sind, Gravitationswellen aus [29]. Beispiele für strahlende Systeme sind: Doppelsternsysteme, Supernovae mit asymmetrischer Explosion, Schwingungen rotierender Neutronensterne und die Inflation des frühen Universums¹⁵ ([2] S.20).

¹³ Auch eine Kreisbewegung ist eine beschleunigte Bewegung ([10] S.69).

¹⁴Die Quadrupolstrahlung ist die niedrigste Ordnung von Gravitationswellen [17].

¹⁵Die Forschung erhofft sich hierdurch weitere und genauere Messungen, um in der Zukunft bessere Kenntnisse über die Vorgänge im frühen Universum zu erlangen ([2] S.20).

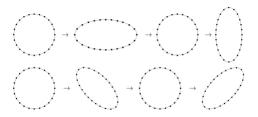


Abbildung 3: Polarisationsrichtung [6]

Wenn eine Gravitationswelle mit einem Wellenvektor normal zur Fläche auf einen Kreis aus Massepunkten trifft, verformt sich dieser in den zwei Polarisationsrichtungen entsprechend der jeweiligen Reihe [6].

Jene beschriebenen Schwingungen der Raumzeit breiten sich in Form transversaler Wellen (siehe Unterabschnitt 2.2) aus ([15] S.49). Hierbei liegen zwei Polarisationsrichtungen vor, die zueinander um 45° verschieden sind (siehe Abbildung 3). Bei einem Winkel von 90° würde z.B. nur eine Phasenverschiebung um eine halbe Periodendauer stattfinden. Mit diesem speziellen Winkel ist es möglich, alle erdenkbaren Schwingungsformen einer Gravitationswelle aufzubauen ([10] S.69). Laut Definition sorgt also die hervorgerufene Krümmung der Raumzeit-Geometrie für eine Änderung des Abstandes zwischen Objekten ([13] S. 48).

Auch besitzen Gravitationswellen eine Energie ([8] S.12), die mithilfe der Quadrupolformel näherungsweise zu bestimmen ist und einem Energieverlust des Quellsystems entspricht ([15] S. 48), welcher wiederum zu 99,9986% durch jene Formel zu erklären ist ([15] S.53). Da auch Energie Gravitation erzeugt, haben Gravitationswellen folglich ein eigenes Gravitationsfeld. Dieses wird im Folgenden nicht weiter behandelt.

Die Intensität von Gravitationswellen nimmt mit zunehmender Entfernung ab, wird aber nie gleich null, woraus sich eine unendlliche Reichweite folgert ([7] S.52). Zusätzlich hängt jene von der Masse, der Dichte und der Geschwindigkeit des Quellobjekts ab. Je größer jeder einzelne dieser Faktoren, desto größer ist die Intensität ([8] S.12). Die relative Abstandsänderung kann durch die Amplitude h

$$h = 2 \cdot \frac{\Delta L}{L} \tag{3}$$

angegeben werden. Hierbei ist ΔL die Abstandsänderung und L der Grundabstand [6].

Außerdem ist die Interaktion von Gravitationswellen mit Materie sehr moderat, weshalb ihre Auswirkungen auf diese noch schwerer zu messen sind ([7] S.46).

2.3.1 Gedankenexperiment

Nehmen wir an, wir sind in der Lage, die Auswirkungen von Gravitationswellen mit dem bloßen Auge zu sehen. Wir betrachten eine Masse, die sich frei von Kräften¹⁶ im Raum bewegt. Sie bewegt sich unter normalen Umständen immer auf einer Geodäte. Nun läuft eine Gravitationswelle durch die Raumzeit, von der wir als Beobachter allerdings nicht betroffen sind. Folglich verändert sich die lokale Geometrie der Raumzeit, eine Krümmung tritt auf. Dadurch wird auch die Geodäte, die vorher im ungekrümmten Raum einer Geraden entsprach, gekrümmt. Von uns aus gesehen wird die freie Masse nun beschleunigt und ändert ihren Abstand zu uns. Die freie Masse erfährt jedoch gar keine Kraft und somit keine Beschleunigung, da sie sich immer noch auf der Geodäte befindet. Der Abstand zwischen uns und der freien Masse ändert sich also ohne eine Kraft, allein wegen der Krümmung der Raumzeit-Geometrie.

Nun betrachten wir eine andere Masse, die an einem Punkt fixiert ist. Sie hat in einer ungekrümmten Raumzeit eine feste Position. Wieder läuft eine Gravitationswelle durch die Raumzeit und wir sind als Beobachter nicht betroffen. Durch die Krümmung der Raumzeit wird auch die theoretische Position, an der sich die fixierte Masse befinden sollte, verändert. Weil diese Masse allerdings fixiert ist, nimmt sie diese neue Position nicht von alleine ein. Folglich erfährt die Masse diesmal eine Kraft, die sie zu der neuen Position bewegen will. In diesem Fall wirkt Gravitation im Endeffekt als Kraft. Je nach Kraft der Fixierung und der Stärke der Krümmung der Raumzeit bewegt sich nun die Masse an die geforderte Position oder nicht. Dementsprechend ändert sich auch der Abstand oder eben nicht ([10] S.69).

8

¹⁶auch freie Masse genannt

3 Beweis

3.1 Natürliche Beweise

Unter natürlichen Beweisen verstehe ich Beweise für Gravitationswellen, deren Messumgebungen nicht durch menschliche Hand geschaffen wurden, die also natürlichen Ursprungs sind.

Der erste praktische Beweis für Gravitationswellen, wenn auch nur ein indirekter, wurde durch die US-Astrophysiker Russell Alan Hulse und Joseph Hooton Taylor erbracht. Die beiden Experten entdeckten 1974 ein

Doppelsternensystem¹⁷, in dem der Pulsar¹⁸ PSR 1913+16 einen unsichtbaren Begleitstern, der nach späterer Feststellung ein normaler Neutronenstern ist, umkreist. Durch häufige Messungen über einen langen Zeitraum (siehe Abbildung 4: rote Punkte) konnten die Astrophysiker und ihr Team feststellen, dass der Bahnradius des Pulsars stetig kleiner wird. Man suchte nach einer Ursache hierfür und wurde schließlich bei den Gravitationswellen fündig. Denn mit der Verkleinerung des Bahnradius geht auch ein Energieverlust einher, welcher sich nahezu hundertprozentig mit den Voraussagen der Quadrupolformel deckt (siehe Abbildung 4: schwarze Kurve) ([15] S.51,52).

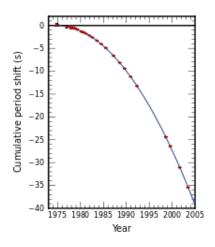


Abbildung 4: Verringerung der Umlaufzeit [34]

Die roten Punkte zeigen die gemessene Verringerung der Umlaufzeit. Die schwarze Kurve zeigt die, durch die allgemeine Relativitätstheorie vorhergesagte, Abstrahlung an Gravitationsenergie [34]

¹⁷Doppelsternsysteme sind Sternensysteme, in denen die beiden Sterne gravitativ aneinander gebunden sind und die einen gemeinsamen Schwerpunkt haben, welcher von den Sternen periodisch umkreist wird [26].

¹⁸Ein Pulsar ist ein Neutronenstern, der sich extrem schnell dreht und Radiowellen aussendet, die dann auf der Erde mit, durch die Drehung bestimmter, Frequenz ankommen [12].

Laut der Drehimpulserhaltung bleibt der Drehimpuls \vec{L} eines isolierten Systems immer erhalten. Weil dieses Doppelsternensystem näherungsweise einem isolierten System gleicht, muss also hier

$$\vec{L} = m \cdot r_B \cdot v_B \tag{4}$$

gelten [23], wobei r_B der Bahnradius und v_B die Bahngeschwindigkeit sind. Daraus lässt sich folgern, dass ein verringerter Bahnradius eine erhöhte Bahngeschwindigkeit zur Folge haben muss, wodurch sich eine geringere Umlaufzeit (siehe Abbildung 4: rote Punkte) ergibt, die wiederum einfacher zu messen ist, als der Bahnradius.

Nachdem Russell Alan Hulse, Joseph Hooton Taylor und ihr Team von der University of Massachusetts ihre Messungen veröffentlicht hatten, erhielten Hulse und Taylor 1993 einen Nobelpreis für den ersten indirekten Nachweis von Gravitationswellen ([19] S.169).

3.1.1 Pulsar Timing Arrays

Sogennante Pulsar Timing Arrays, sind eine weitere Methode, Gravitationswellen mit Hilfe astronomischer Gegebenheiten nachzuweisen. Wie das Wort Pulsar im Namen schon vermuten lässt, werden hierzu auch Pulsare verwendet. Im Unterschied zum indirekten Nachweis durch die Periodenverkürzung, werden die Gravitationswellen hierbei konkret, also wirklich gemessen.

Das zugrundeliegende Prinzip ähnelt der Laserinterferometrie, auf die ich in Unterunterabschnitt 3.2.3 im Zuge künstlicher Beweise genauer eingehen werde. Den Interferometerarmen entsprechen dabei vereinfacht die großen Entfernungen zwischen den jeweiligen Pulsaren und der Erde. Rechnet man alle störenden Effekte, wie z.B. die Eigenbewegung der Pulsare relativ zur Erde, heraus, sind die Ankunftszeiten der periodischen Radiopulse immer¹⁹ identisch. Nun folgt eine Beeinflussung der Ankunftszeit nur noch durch Gravitationswellen, die durch den Raum zwischen dem jeweiligen Pulsar und der Erde schwingen. Wenn wir nun zwei Pulsare betrachten, deren Verbindungslinien zur Erde normal (siehe Abbildung 5) zueinander stehen und deren beider Strecke von der gleichen Gravitationswelle durchlaufen wird, variieren ihre Ankunftszeiten gegenläufig. So kann man die Genauigkeit erhöhen. Ein Pul-

10

¹⁹Diese Annahme ist etwas idealisiert, da unvorhersehbare Effekte auftreten können, die die Periode schleichend verlangsamen; Diese Abweichungen sind allerdings zu vernachlässigen, da sie zumeist sehr gering sind.

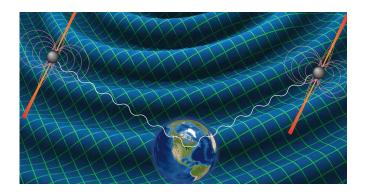


Abbildung 5: Pulsar Timing Array [11] Zu sehen sind zwei Pulsare, deren Verbindungslinien zur Erde orthogonal aufeinander stehen. Das ist die kleinste Ausbaustufe eines Pulsar Timing Arrays.

sar Timing²⁰ Array ist dann im Endeffekt eine Ansammlung dieser Pulsarenpaare. Es gilt: Je mehr, desto besser und genauer.

Die Empfindlichkeit jener Arrays ist abhängig vom Beobachtungszentrum, aber aufgrund der extremen Distanz von teilweise mehreren tausend Lichtjahren generell recht hoch.

Die messbare Frequenz liegt im Nanohertz-Bereich²¹ ([15] S.56).

Zu einer der größten Herausforderungen, nicht nur bei dieser Methode, zählt die Trennung der zu messenden Gravitationswellen von dem sogenannten Hintergrundrauschen ([9] S.30). Dies werde ich in Unterabschnitt 3.2 genauer erläutern.

3.2 Künstliche Beweise

Unter künstlichen Beweisen verstehe ich Beweise für Gravitationswellen, deren Messumgebungen durch menschliche Hand geschaffen wurden.

3.2.1 Wissenswertes

Wenn Gravitationswellen gemessen werden, müssen die entsprechenden Signale immer aus einem Hintergrundrauschen extrahiert werden ([9] S.30). Dabei ist es sehr kompliziert und nicht immer möglich, überhaupt festzustellen, was denn nun das Hintergrundrauschen und was eine vermeintliche Messung ist. Aufgrund der sehr geringen Interaktion der Gravitation bzw. der Gravitationswellen mit Materie sind ihre tatsächlichen Auswirkungen fast

2

²⁰Timing steht einfach nur für die Bestimmung durch eine Zeitmessung.

 $^{^{21}}$ Nanohertz $= 10^{-9}$ Hz

nicht messbar. Bei Messungen auf der Erde beträgt die relative Verschiebung durch Gravitationswellen nämlich normalerweise nur weniger als ein Tausendstel des Protonendurchmessers²² ([8] S.13). Diese extrem geringen Messwerte werden leicht durch Störungen überdeckt. Auf der Erde spielen zum Beispiel mechanische Schwingungen eine Rolle, die unter anderem durch Bewegungen der tektonischen Platten hervorgerufen werden. Auch beeinflussend sind Temperatureffekte, die sich durch Schwingungen der Atome äußern. Zusätzlich werden die meisten Messungen in Räumen mit künstlichem Vakuum vorgenommen, die normalerweise immer Restgase enthalten, welche durch Ablenken des Lichts zu Störungen führen können.

Im All entfallen die vorgenannten Probleme. Allerdings existieren hier neue: Da Laserinterferometermessungen im Weltall laut aktuellem²³ Stand auf Satelliten basieren sollen, tritt das Problem der Stabilitätsschwankungen auf. Eine weitere Ursache für Störungen ist das Photonenrauschen²⁴, welches bei den extremen Entfernungen der Satelliten und unter anderem der daraus folgend sehr aufwendigen Bündelung der Laserstrahlen, eine merklich größere Rolle spielt, als auf der Erde.

Schließlich gibt es noch eine große Störungsquelle, die sowohl auf der Erde als auch im All eine Rolle spielt: Der Gravitationswellenhintergrund. Dieser rührt daher, dass nahezu unendlich viele Objekte in unserem Universum existieren, die Gravitationswellen aussenden ([9] S.30). Dadurch entsteht quasi ein Rauschen, vergleichbar mit dem, welches auftritt, wenn man viele Sender, also Frequenzen, im Radio gleichzeitig hört. Hier kommt es nun darauf an, durch geschickte Kombination mehrerer Messapparaturen die Möglichkeit zu schaffen, diese Trennung vorzunehmen, um einzelne Signale herauszufiltern und genauer betrachten zu können.

Aus bereits erfolgreichen Messungen von Gravitationswellen ging

$$m_Q \approx \propto \frac{1}{f_G}$$
 (5)

hervor. Hierbei ist m_Q die Masse des Quelle der Gravitationswellen und f_G die Frequenz dieser ([9] S.31).

²²Protonendurchmesser $= 1.7 \cdot 10^{-15}$ m [33]

²³3. März 2022

²⁴Photonenrauschen, eigentlich Schrotrauschen, ist auf die Zufallsverteilung der Photonen sowie Schwankungen der Lichtempfindlichkeit der Pixel zurückzuführen [22].

3.2.2 Versuche zur Messung

1969 begann Joseph Weber an der University of Maryland mit Versuchen zum Messen von Gravitationswellen. Dazu benutze er zwei Aluminiumzylinder mit einer Zylindermasse m_Z $\approx 10^6 g$ und einer Eigenfrequenz $f_E = 1660 Hz$. Um lokale Störungen zu vermeiden stellte er jeweils einen der mit piezoelektrischen Sensoren²⁵ bestückten Zylinder nach Maryland und Chicago. Diese sollten durch Gravitationswellen der Frequenz $f_G = 1660Hz$ in Schwingungen versetzt werden ([19] S.167). Seine angeblich erfolgreichen Versuche konnten allerdings nie positiv reproduziert und somit bestätigt werden, sodass sie nicht anerkannt wurden. Das Problem bei dieser Zylindermethode ist die zu geringe Empfindlichkeit und die gewissermaßen nicht existente Bandbreite. Allerdings sitzen Wissenschaftler aus aller Welt laufend daran, zumindest die Empfindlichkeit durch beispielsweise Kühlung zu erhöhen, um derartige Zylinder aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Komplexität doch noch einzusetzen. Allerdings tritt hierbei noch ein weiteres Problem auf: bei Messungen dieser Art wäre eine Auslenkung der Größe $s_A = 10^{-17} cm$ erforderlich, die eine quantenmechanische Betrachtung notwendig macht. Infolge dessen gilt die Heisenbergsche Unschärferelation, laut der die zeitgleiche genaue Messung von zwei komplementären Eigenschaften eines Teilchens begrenzt ist. Hierfür stehen aktuell sogenannte Quantum Nondemolition Measurements zur Debatte ([19] S.168). Eine solche Messung würde die Möglichkeit eröffnen, das exakt gleiche System noch einmal zu messen. Allerdings ist sie experimentell äußerst schwierig durchzuführen, sodass aktuell noch keine Möglichkeit hierzu besteht [21].

Zur Zeit werden auch andere Detektortypen für Gravitationswellen untersucht. Eine Möglichkeit hierfür wäre die von den Gravitationswellen beeinflusste Raumzeit-Geometrie mithilfe der Dopplerverschiebung²⁶ nachzuweisen. Hierfür würden sich zum Beispiel Radarsignale eignen, die von Raumschiffen oder Satelliten reflektiert werden könnten. Des Weiteren werden elektromagnetische Resonatoren in Betracht gezogen ([19] S.168). Positiv und hilfreich ist, dass schon eine Alternative zu den Zylinderversuchen von Joseph Weber existiert, die bereits mit korrekten Ergebnissen punkten konnte und sich auf dem Weg in die zweite Evolutionsstufe befindet: Die Laserinter-

²⁵Piezoelektrische Sensoren sind ein weit verbreiteter Sensortyp; Unter anderem werden sie zur Messung von Beschleunigungen verwendet, was bei Schwingungen der Fall ist.

²⁶Der Abstand zwischen Empfänger und Sender ändert sich während der Dauer des Signals. Dadurch wird das Signal zeitlich gedehnt oder gestreckt. Bei Schall wäre dies äquivalent einer Frequenzverringerung oder -erhöhung [14].

ferometrie, welche im folgenden Unterunterabschnitt 3.2.3 behandelt wird.

3.2.3 Laserinterferometrie

Michelson Interferometer oder auch Laserinterferometer sind die weltweit genauesten Systeme zur Längenmessung. In der Industrie sind sie schon lange Standard für die Vermessung von Werkzeugen. Aber auch eine Verwendung in der Gravitationswellenforschung liegt nahe. Der Weg des Lichts lässt sich wie folgt beschreiben:

Zuerst wird durch den Laser (siehe Abbildung 6: S) ein Lichtstrahl (siehe Abbildung 6: C) ausgesendet, welcher darauf von einem Strahlenteiler²⁷ (siehe Abbildung 6: M) geteilt wird. Die beiden neuen Lichstrahlen (siehe Abbildung 6: A, B) stehen nun normal zueinander und laufen die Inteferometerarme entlang. An den Spiegeln, die an den Enden angebracht sind (siehe Abbildung 6: M1, M2), werden jene reflektiert und laufen wieder die Inter-

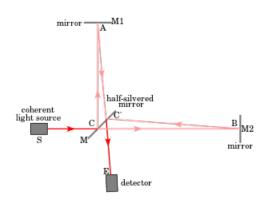


Abbildung 6: Laserinterferometer [31]
Lichtwege in einem Laser- oder auch
Michelson Interferometer

ferometerarme entlang. Am Strahlenteiler (siehe Abbildung 6: M) werden beide Lichtstrahlen wieder zu einem neuen gebündelt (siehe Abbildung 6: C') und in den Detektor (siehe Abbildung 6: E) geleitet. Dort wird die Phase der resultierenden Lichtwellen gemessen. Für den Ruhezustand wird das Interferometer so konfiguriert, dass die Phasen der einzelnen Lichtstrahlen A und B gegenläufig sind und sich somit gegenseitig auslöschen²⁸. Folglich detektiert der Detektor im Ruhezustand nichts. Wenn allerdings durch eine Gravitationswelle die Länge der Interferometerarme relativ zueinander geändert wird, interferieren die Lichtstrahlen anders miteinander und das resultierende Summensignal²⁹ ergibt einen Wert, der ungleich null ist. Dies bedeutet, dass der Detektor einen Wert misst. Um die Effizienz einer solchen Anlage noch zu steigern können die Lichtstrahlen durch weitere Spiegelsysteme für mehrere Umläufe im Interferometer gehalten werden. Dadurch lässt sich zum einen

²⁷Ein halbdurchlässiger Spiegel, um einen Lichtstrahl in zwei aufzuteilen, wird Strahlenteiler genannt.

²⁸Dies nennt man destruktive Interferenz ([7] S. 48,49,52).

²⁹Interferenzmuster; Muster, in dem die Lichtwellen interferieren

die Lichtleistung erhöhen³⁰ und zum anderen das Rauschen reduzieren³¹ ([7] S.48,49,52).

Generell ist die Frequenz der messbaren Gravitationswellen von der Länge der Interferometerarme abhängig: je länger die Arme, desto niedriger die maximal mögliche messbare Frequenz ([7] S.53).

Zur Zeit werden Laserinterferometer nur auf der Erde eingesetzt. Die beiden größten stehen in den USA. Dies sind die LIGO-Detektoren, welche mit einer Interferometerarmlänge von jeweils vier Kilometern an der Westund an der Ostküste errichtet wurden. Des Weiteren wurde im Rahmen einer französisch-italienischen Kooperation das Interferometer Virgo in Cascina³² aufgebaut, welches eine Interferometerarmlänge von drei Kilometern hat. Das kleinste Interferometer mit einer Messstrecke von 600 Metern ist das GEO600 in Hannover³³. Weil es im Vergleich zu den anderen recht schwache Leistungen erbringt, dient es hauptsächlich als Testlabor für neue Technologien. Diese können dort besser erprobt werden, ohne den normalen Messbetrieb der großen Inerferometer zu stören. Wenn die Technologien ausgereift sind, muss der Messbetrieb nur kurzzeitig unterbrochen werden, um die frischen Änderungen vorzunehmen ([7] S.53).

Der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen gelang am 14. September 2015 durch die LIGO-Detektoren ([8] S.13). Die Veröffentlichung dieser lang ersehnten Bestätigung fand jedoch erst am 11. Februar 2016 statt. Hierdurch wurde sowohl der direkte Beweis erbracht, dass die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins auch in starken Gravitationsfeldern gültig ist, als auch ein Hinweis auf die obere Grenze der Masse der möglichen Gravitonen (siehe Unterunterabschnitt 2.1.2) gegeben ([8] S.16).

In Zukunft soll auch ein Laserinterferometer mit dem Namen LISA³⁴ im Weltall errichtet werden ([7] S.52). Einen ersten Projektentwurf hierfür gab es bereits in den 1990ern, der damals allerdings aufgrund mangelnder Umsetzbarkeit auf Eis gelegt wurde. Darin wird erklärt, dass die Laserinterferometrie im Weltall insgesamt weniger Störungen ausgesetzt ist, als auf der Erde (siehe Unterunterabschnitt 3.2.1) und der mögliche Frequenzbereich ei-

³³Deutschland

³⁰Das bezeichnet man als Power Recycling.

³¹Das bezeichnet man als Signal Recycling.

³²Pisa, Italien

³⁴Laser Interferometer Space Antenna

ner solchen Anlage mit 10^{-5} Hz bis 10^{0} Hz angegeben, was einer Bandbreite $\Delta f = 10^5 \, Hz$ entspricht ([9] S.26). Inzwischen wurde dieser Entwurf gemeinsam durch die ESA³⁵ und die NASA³⁶ wieder aufgenommen. Der Plan ist nun ein gleichseitiges Dreieck aus drei Satelliten mit einer Kantenlänge, welche den Messarmen eines Interferometers auf der Erde entspreche, von 2,5 Millionen Kilometern aufzubauen. Nachdem der Transfer in den Weltraum reibungslos verlaufen ist, soll es 50 Millionen Kilometer hinter dem Erde-Mond-System fliegen ([9] S.27). Der Aufbau jedes Satelliten wird exakt derselbe sein, was die Entwicklung und Konfiguration vereinfacht. Alle werden jeweils zwei, im Vakuum des Alls frei schwebende, Testmassen aus einer bestimmten Legierung beinhalten, die gleichsam den Spiegeln auf der Erde, welche ihrerseits wiederum auch zumeist nur der Modellvorstellung dienen und auch keine klassischen Spiegel sind, fungieren ([9] S.29). Sie sind durch ein kapazitiv arbeitendes Inertialsensorsystem³⁷ auf einen Freiheitsgrad entlang der optischen Achse³⁸ eingeschränkt ([9] S.33). Die einzelnen Satelliten senden Laserstrahlen zu den jeweils anderen, die diese mit ebendiesen Testmassen reflektieren. Wie auf der Erde ändert sich die Entfernung zwischen den Satelliten durch Einfluss von Gravitationswellen. Dies kann entweder durch Interferenzmuster der beiden reflektierten Laserstrahlen der anderen Satelliten oder durch die Dopplerverschiebung der Lichtwellen gemessen werden, wobei ersteres der Hauptaufgabe entspricht. Mithilfe zusätzlicher Messung der lokalen Bewegung der Legierungen innerhalb der Satelliten kann diese in den Rechnungen kompensiert werden ([9] S.29).

Da das komplette Unterfangen viele gänzlich neue Technologien beinhaltet, die aber kritisch für das Gelingen der Mission sind, mussten diese vorher getestet werden ([9] S.27). Hierzu wurde die LISA Pathfinder 2016 zum Lagrange-Punkt L_1^{39} geschickt [4], welche diese existentiellen Komponenten im kleinen Maßstab erfolgreich überprüfte ([9] S.27). Hierzu zählten die elektrische Aufladung der Testmassen durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht,

³⁵European Space Agency; Europäische Weltraumorganisation

³⁶National Aeronautics and Space Administration; Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde

³⁷Die Verbindung mehrerer Inertialsensoren, beispielsweise Beschleunigungssensoren oder Drehratensensoren bezeichnet man als Inertialsensorsystem [24].

³⁸Eine optische Achse ist in einem rotationssymmetrischen optischen System die Symmetrieachse [20].

³⁹Der Lagrange-Punkt L_1 liegt zwischen zwei Himmelskörpern, hier Erde und Sonne. An ihm wirken die beiden unterschiedlichen Gravitationen entgegengesetzt und betraglich gleich [4].

sowie recht schwache Triebwerke, die Mikronewtontriebwerke⁴⁰ ([9]S.29) und die Freigabe der Testmassen mit möglichst geringen Kräften innerhalb des Satelliten nach erfolgreichem Erreichen der Zielposition, um Bewegungen zu vermeiden ([9] S.28). Neben diesen kritischen Technologien ist eine weitere technische Hürde von LISA die Atmung, die jeweils über mehrere Monate hinweg stattfindet ([9] S.34). Diese bedeutet eine Schwankung der Armlänge um beträchtliche 70000 Kilometer, welche wahrscheinlich durch eine Nachführung der einzelnen Teleskope innerhalb des Satelliten und mathematische Operationen kompensiert wird ([9] S.33).

Mit der Entwicklung wurde zwar 2018 begonnen, der Start der Mission ist allerdings erst für 2034 angedacht. Als Trägerrakete soll die Ariane 6.4 benutzt werden, deren Aufgabe es sein wird, die 2000 Kilogramm schweren Sonden inklusive derem eigenen Treibstoff grob an ihre Zielorte zu bringen. Die gesamte Mission soll für eine Dauer von vier Jahren aktiv bleiben. Eine Verlängerung auf bis zu zehn Jahre ist möglich ([9] S.28).

⁴⁰Mikronewtontriebwerke sind Kaltgastriebwerke äußerst geringer Schubkraft ([9]S.29).

Gravitationswellen 4 AUSBLICK

4 Ausblick

Durch die weitere Erforschung der Gravitationswellen in Zukunft wird uns eine enorme Möglichkeit geboten, den mit Abstand größten Teil des Universums zu erschließen und zu verstehen. Denn nur 1% des unsbekannten Universums sind im elektromagnetischen Spektrum sichtbar. Auf diese aber vor allem auch auf die restlichen 99% wirkt hingegen die Gravitation. Durch die Ergründung der Quellen von Gravitationswellen, beispielsweise deren Standort oder Masse, können wir viel über diesen unsichtbaren Teil unseres Universums erfahren ([8] S.14). Es ist auch denkbar, mehr bzw. überhaupt Informationen über die Vorgänge während der Inflation nach dem Urknall zu ermitteln, da man sich noch erhofft, Gravitationswellen aus dieser Zeit im Gravitationswellenhintergrund zu finden ([13] S.48). Wenn dies gelingen sollte, könnte es auch Hinweise auf mögliche Abweichungen vom Standardmodell der Teilchenphysik geben. Das könnte wiederum ein neues Zeitalter der Physik einläuten, ähnlich dem durch die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins ausgelösten ([9] S.32).

Weiterhin soll eine eigenständige Bestimmung der Hubble-Konstanten⁴¹ durch weitere Messungen von Gravitationswellen vorgenommen werden ([9] S.32), was, aufgrund momentaner Streitigkeiten um diese, durchaus hilfreich sein könnte [5].

Zusätzlich besteht die Option, neue Phänomene der allgemeinen Relativität in starken Gravitaionsfeldern zu entdecken, die zwar durch die allgemeine Relativitätstheorie theoretisch existieren, aber bis dato noch nicht nachgewiesen sind ([9] S.32). Ein Beispiel hierfür wären die Einsteinringe⁴², die erstmals 1998 durch das neuartige Hubble-Teleskop entdeckt wurden [3].

Des Weiteren steht auch eine Bestätigung der Voraussagen zur Natur und Ausbreitung von Gravitationswellen auf der Agenda, wodurch weitere Beweise für die Korrektheit der Relativitätstheorie vorliegen würden ([9] S.32). Eine Vereinfachung dieser Ziele wird in der Zukunft die Multimessenger Astronomie sein. Sie besagt eine Zusammenarbeit der Laserinterferometer auf der Erde, sowie im All, mit Beobachtungen im elektrischen Spektrum. Dies wird die Möglichkeit eröffnen, bestimmte astronomische Ereignisse zeitgleich aus mehreren Perspektiven zu betrachten und somit Zusammenhänge schneller

⁴¹Die Hubble-Konstante gibt die aktuelle Expansionsrate des Universums an [5].

⁴²Ein perfekter Einsteinring ist das Licht einer entfernten Quelle, welches durch den Gravitationslinseneffekt⁴³ von einer dazwischenliegenden Masse zu einem Kreis gekrümmt wird [3].

Gravitationswellen 4 AUSBLICK

und simpler zu erkennen ([9] S.32).

Gravitationswellen 5 RÉSUMÉ

5 Résumé

Nach eingehender und dennoch bei weitem nicht vollständiger Betrachtung der Gravitationswellenforschung lässt sich ihr mit Leichtigkeit ein hoher Komplexitätsgrad attestieren. Der Umfang dieses immensen Themenkomplexes liegt weit über dem einer Facharbeit im Rahmen eines Seminarfachs der zwölften Jahrgangsstufe und wäre bei einer Beleuchtung und Erklärung von äußerster Genauigkeit wohl auch mitnichten in einer einzigen Doktorarbeit unterzubringen. Einzig und allein die Schwerpunktsetzung und Festlegung einer maximalen Eintauchtiefe in das Thema machen eine Bearbeitung in gegebenem Rahmen möglich.

Mithilfe der vorliegenden Erklärungen ist es ausreichend vernünftig möglich, das Überthema der Arbeit⁴⁴ folgend mit einer recht banalen Antwort abzuschließen:

Da Gravitationswellen eine der zahlreichen Folgen der allgemeinen Relativitätstheorie nach Albert Einstein sind, ist allein ihre fundiert begründete Existenz schon Beweis genug für die allgemeine Korrektheit jener. Durch weitere Erforschung der tatsächlichen Eigenschaften von Gravitationswellen (siehe Abschnitt 4) wird sich allerdings in Zukunft noch herausstellen, ob auch alle speziellen Vorhersagen Einsteins im Bezug auf Gravitationswellen der Wirklichkeit entsprechen. Sollte dies nicht der Fall sein, wäre ein Anhaltspunkt für eine neue Theorie der Wechselwirkung zwischen Materie, sowie Raum und Zeit gegeben. Da jedoch bis dato eine enorme Fülle an unterschiedlichen Beweisen für die Relativitätstheorie existiert, ist dieser negativ skizzierte Fall sehr unwahrscheinlich.

⁴⁴Gravitationswellen als weiterer Beweis der Relativitätstheorie

6 Anhang

Literaturverzeichnis

- [1] ABANKL; TOM WALSH. Longitudinale und transversale Wellen.
- [2] Andreas Bauswein. Pulsare als Detektoren für Gravitationswellen. *Sterne und Weltraum Februar*, 2007.
- [3] CLARISSA WRIGHT. Seltener Einsteinring vom Hubble-Weltraumteleskop entdeckt, 2020.
- [4] DEUTSCHE RAUMFAHRTAGENTUR. LISA Pathfinder.
- [5] DIRK LORENZEN. Hubble-Konstante, 2021.
- [6] DOMENICO GIULINI. *Gravitationswellen*, 2018.
- [7] FELICITAS MOKLER. Warten auf die Welle. Spektrum der Wissenschaft Dezember, 2015.
- [8] FELICITAS MOKLER. Gravitationswellen nachgewiesen. *Spektrum der Wissenschaft April*, 2016.
- [9] HANS-GEORG GROTHUES; JENS REICHE. LISA: Das größte Obeservatorium der Welt. *Sterne und Weltraum April*, 2019.
- [10] HANS-PETER NOLLERT; MATHIAS KUNLE; HANNS RUDER. Physik der Gravitationswellen. Sterne und Weltraum Dossier Februar Einstein Kosmos, 2015.
- [11] KAI SCHMITZ. Hintergrundsignale mit Pulsaren entdeckt?, 2021.
- [12] LAURENT SACCO. Was ist ein Pulsar?, 2021.
- [13] LAWRENCE M. KRAUSS. Wellenschlag des Urknalls. *Spektrum Kompakt April*, 2017.
- [14] LEXIKON DER PHYSIK. Doppler-Verschiebung.
- [15] MICHAEL KRAMER; NORBERT WEX. Mit Pulsaren auf der Jagd nach Gravitationswellen. Spektrum der Wissenschaft Juli, 2011.
- [16] NORA KUSCHE. Wie entstehen Gravitationswellen, 2016.

- [17] PHYSIK COSMOS. Quadrupol.
- [18] ROBERT GAST. Das Raumzeitbeben von NGC 4993. Spektrum der Wissenschaft Januar, 2018.
- [19] ROMAN ULRICH SEXL; HELMUTH KURT URBANTKE. *Gravitation und Kosmologie*. Spektrum Akademischer Verlag, 2002.
- [20] WIKIPEDIA. Optische Achse, 2019.
- [21] WIKIPEDIA. Quantum Nondemolition Measurement, 2019.
- [22] WIKIPEDIA. *Bildrauschen*, 2021.
- [23] WIKIPEDIA. *Drehimpuls*, 2021.
- [24] WIKIPEDIA. *Inertiale Messeinheit*, 2021.
- [25] WIKIPEDIA. *Phasengeschwindigkeit*, 2021.
- [26] WIKIPEDIA. *Doppelsternsystem*, 2022.
- [27] WIKIPEDIA. Fundamentale Wechselwirkung, 2022.
- [28] WIKIPEDIA. Gravitation, 2022.
- [29] WIKIPEDIA. *Gravitationswelle*, 2022.
- [30] WIKIPEDIA. *Graviton*, 2022.
- [31] WIKIPEDIA. Michelson Interferometer, 2022.
- [32] WIKIPEDIA. Nahwirkung und Fernwirkung, 2022.
- [33] WIKIPEDIA. *Proton*, 2022.
- [34] WIKIPEDIA. *PSR J1915+1606*, 2022.

Abbildungsverzeichnis

1	transversale Wellen [1]	5
2	Gravitationswellen [16]	6
3	Polarisationsrichtung [6]	7
4	Verringerung der Umlaufzeit [34]	9
5	Pulsar Timing Array [11]	11
6	Laserinterferometer [31]	14

6.1 Danksagungen

Für das Gelingen dieser Facharbeit danke ich besonders unserem Kursleiter, Florian Riemer. Wenn er nicht solch ein spannendes Seminarfach anbieten würde, hätte ich mich nie mit diesem Thema auseinandergesetzt. Auch war es nur durch ihn und seine umfassende Sammlung möglich, solch eine Menge an Fachliteratur zu erlangen.

Des Weiteren danke ich ich meinem Sitznachbarn und Freund, Steffen Steinmeyer. Ohne sein enormes fachliches Interesse und seine durchweg wissenschaftliche Denkweise, wäre der Astronomieunterricht nicht das, was er ist. Mit seinem Thema der Zeit hat er mich inspiriert tiefer in die Welt der Astronomie vorzudringen und mein schlussendliches Thema zu wählen.

6.2 Erklärungen

6.2.1 Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den 3. März 2022

Unterschrift des Schülers

6.2.2 Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den 3. März 2022

Unterschrift des Schülers