

GRAVITATIONSWELLEN

The image features a central, abstract visualization of gravitational waves. It consists of several overlapping, semi-transparent, green and orange-red wave-like structures that spiral and ripple, set against a black background speckled with small white stars. The waves appear to be moving towards the viewer, creating a sense of depth and motion. The overall aesthetic is scientific and futuristic.

TIM BRAUN

Heinrich-Heine-Gymnasium
Max-Reinhardt-Weg 27
81739 München

Schuljahr 2018/19

Seminararbeit
Im W-Seminar „Astrophysik“

Gravitationswellen

Von
Tim Braun

Betreuende Lehrkraft: StD M. Lausmann

Abgabetermin: 06.11.2018

Punktzahl für die abgelieferte Arbeit:

Punktzahl für Präsentation mit Prüfungsgespräch:

Gesamtleistung in der Seminararbeit:

(Unterschrift des Kursleiters)

Inhaltsangabe

1 Von der Berechnung Einsteins zu den ersten Messungen	3
2 Ursprung und Eigenschaften von Gravitationswellen	4
3 Berechnungen zu Gravitationswellen	6
4 Gravitationswellenobservatorien	9
4.1 Laserinterferometer auf der Erde	9
4.2 Laserinterferometer im Weltall	12
4.3 Pulsar Timing Arrays.....	14
5 Erste Messung einer Gravitationswelle	16
6 Zusammenfassung	19
7 Literaturverzeichnis	21
8 Abbildungsverzeichnis	23

1 Von der Berechnung Einsteins zu den ersten Messungen

Einstein führte als erster Berechnungen zu Gravitationswellen durch. Am 31. Januar 1918, also vor über 100 Jahren, reichte er einen Artikel mit dem Titel „Über Gravitationswellen“ ein. Darin formulierte er die berühmte Quadrupol-Formel, mit der die Energie von Gravitationswellen berechnet werden kann. Zu diesem Zeitpunkt wies sie noch kleine Fehler auf, die später verbessert wurden.¹ In den darauffolgenden Jahren kamen andere Physiker auf weitere Formeln, um Gravitationswellen genauer zu betrachten. Einstein änderte jedoch seine Meinung zu den Gravitationswellen und versuchte zu beweisen, dass es sie doch nicht gäbe. Er bemerkte jedoch im Jahr 1937, dass seine Berechnungen nicht stimmten. „Ob Einstein bis zu seinem Tod 1955 wirklich an die Existenz der Gravitationswellen glaubte, ist ungewiss.“² Im Jahr 1957 gab es erstmals einen eindeutigen mathematischen Beweis. Bis es jedoch zu einem praktischen Nachweis kommen sollte, dauerte es noch 58 Jahre. Bis dahin gab es zwei größere Versuche, die beide fehlschlugen. Der erste davon wurde von Joseph Weber durchgeführt, der einen mehrere Tonnen schweren Zylinder in einem Vakuum aufhängte. Er wollte dabei die Eigenschwingung des Zylinders, die durch Gravitationswellen erzeugt wird, messen. Das einzige, das er aber tatsächlich gemessen hat, waren Störsignale.³ Die zweite Fehlmeldung wurde Anfang 2014 veröffentlicht, als angeblich Gravitationswellen von *Nachbeben des Urknalls* mit einem Teleskop zur Messung von Hintergrundstrahlung entdeckt wurden. Wie sich herausstellte, war diese Messung lediglich eine Fehlinterpretation von Messungen Stellaren Staubs.⁴ Mit Hilfe von Laserinterferometern war es am 14. September 2015 möglich, eine Gravitationswelle zu messen. Diese wurde durch das Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher erzeugt.⁵ Um nicht den gleichen Fehler wie andere zuvor zu machen, wurde das Signal für ganze fünf Monate genau analysiert. Die grundlegende Fragestellung für die folgenden Seiten zu diesem Thema ist: Was sind Gravitationswellen und wie kann man sie messen?

¹ vgl. Signale der Schwerkraft (Vaas 2017, S. 16ff).

² ebd., S.21

³ vgl. Das Geheimnis der Gravitationswellen (Spanner 2017, S. 73 ff.).

⁴ vgl. ebd. S. 80 ff.

⁵ vgl. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger (Abbott 2016).

2 Ursprung und Eigenschaften von Gravitationswellen

Um Berechnungen und Versuche zu Gravitationswellen nachvollziehen zu können, sollte man im Grundlegenden verstehen, was diese Wellen überhaupt sind. Wenn man von einer Gravitationswelle hört, denkt man sofort an andere Wellen wie Schall- oder Lichtwellen. Diese Wellenarten haben große Unterschiede, aber auch ein paar Gemeinsamkeiten. Im Gegensatz zu Schallwellen ist es den Gravitationswellen möglich, sich durch ein Vakuum auszubreiten. Zusätzlich bewegen sie sich, anders als Lichtwellen, fast ungehindert durch Planeten, Sterne und Galaxien hindurch. Eine Lichtwelle, also eine elektromagnetische Welle, entsteht durch die Beschleunigung von Ladungen, dabei entsteht ein Photon. Auf einer ähnlichen Grundlage basiert die Gravitationswelle, sie wird durch die Beschleunigung von Masse erzeugt, dabei entsteht ein Graviton. Beide Wellen bewegen sich mit der höchstmöglichen Geschwindigkeit, also die Lichtgeschwindigkeit von ca. 300.000 km/s, zudem sind sie Transversalwellen. Laut Einstein ist die Gravitation eine Krümmung in der Raumzeit. Dies kann man sich veranschaulichen, indem man auf ein gespanntes Tuch eine



Abb. 1 Krümmung der Raumzeit

Kugel legt, diese *verbeult* dabei das Tuch. Das Gleiche passiert durch jede Masse mit der Raumzeit, wobei dadurch alle drei Dimensionen des Raums und nicht nur die zwei des Tuches gekrümmt werden. Gravitationswellen wären dann bei dem Tuch eine Welle, die von der beschleunigenden Masse entsteht. Solche Wellen sehen bei dieser vereinfachten Darstellung aus wie Wellen auf dem Wasser, nachdem man einen Stein hineingeworfen hat.

Die Gravitationswelle, als eine Welle in der Raumzeit, führt dazu, dass Abstände von Objekten im Raum verändert werden. Eine Kugel im Weltraum, zum Beispiel die Erde, wird dabei in die eine Richtung gestaucht und in die andere auseinandergezogen. Dies liegt am Quadrupolcharakter von Gravitationswellen. Eine elektromagnetische Welle ist eine Dipolstrahlung, sie schwingt also dem Namen nach in zwei Richtungen, Gravitationswellen hingegen schwingen in vier Richtungen und sind somit eine Quadrupolstrahlung. Man

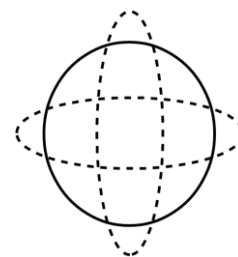


Abb. 2:
Quadrupolstrahlung

kann anhand der Frequenz und Amplitude einer Gravitationswelle, genauso wie bei elektromagnetische Wellen, Aussagen über ihren Ursprung treffen. Dies ist sehr nützlich in Verbindung mit der Eigenschaft, Materie ungehindert zu passieren. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, Informationen über das Universum zu erhalten, die allein durch elektromagnetische Wellen nicht sichtbar sind. Dazu gehören unter anderem Schwarze Löcher, die sich in einem Doppelsystem mit einem anderen massereichen Körper, wie einem weiteren Schwarzen Loch oder einem Neutronenstern befinden. Bei einem Doppelsystem kreisen beide Objekte umeinander und beschleunigen dabei, wodurch Gravitationswellen ausgesendet werden. Die Wellenfrequenz einer Gravitationswelle befindet sich zwischen ein paar Schwingungen im Jahr bis mehrere Tausend in der Sekunde. Somit ist es möglich, eine gemessene Welle in Form einer Schallwelle hörbar zu machen.⁶

⁶ vgl. Das Geheimnis der Gravitationswellen (Spanner 2017, S. 42 ff.).

3 Berechnungen zu Gravitationswellen

Der folgende Abschnitt geht nicht auf die Quadrupolformel von Albert Einstein ein, da diese zu komplex ist. Stattdessen wird am Beispiel der Messungen zu GW150914 die Energie, die Amplitude und die Frequenz der erzeugten Gravitationswelle berechnet. Als Letztes wird die Krümmung des Raums und die damit zusammenhängende Genauigkeit der Messgeräte berechnet.

GW150914 steht für *Gravitationswelle 14.09.2015*, also das Datum, an dem die erste Gravitationswelle gemessen wurde. Sie entstand durch die Fusion zweier Schwarzer Löcher in einem Doppelsystem. Es konnte berechnet werden, dass dieses Ereignis in einer Entfernung von 410 Megaparsec stattfand, was 1,3 Milliarden Lichtjahren entspricht. Da Gravitationswellen sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, wurde die Welle vor 1,3 Milliarden Jahren erzeugt. Die zwei Schwarzen Löcher hatten eine Masse von 36 und 29 M_{\odot} (eine Sonnenmasse = $2 \cdot 10^{30}$ kg), also die 36- bzw. 29-fache Masse der Sonne. Nachdem aus ihnen ein einzelnes Schwarzes Loch entstand, hatte dieses eine Masse von 62 M_{\odot} . Somit ist eine Differenz von 3 M_{\odot} gegeben, die in Form von Gravitationswellen ausgestrahlt wurden. Mit Hilfe der bekannten Formel $E = m \cdot c^2$ kann also die Energie der Welle berechnet werden:

$$E = m \cdot c^2 = 3M_{\odot} \cdot c^2 = 1,8 \cdot 10^{47} \text{ W}$$

Unter dieser gigantisch hohen Zahl kann man sich aber nichts vorstellen, daher wurde zur Veranschaulichung geschätzt, dass im Moment der Verschmelzung mehr Energie ausgestrahlt wurde als im ganzen restlichen sichtbaren Universum.⁷ Da sich die Schwarzen Löcher auf einer spiralförmigen Bahn aufeinander zubewegt haben, ist es nicht möglich, eine gleichbleibende Amplitude oder Frequenz der Gravitationswelle zu berechnen, was an der Abhängigkeit der Werte von der Distanz zwischen den Schwarzen Löchern liegt. Bei den folgenden Rechenbeispielen wird von einer Distanz D von einer Astronomischen Einheit (1 AE = $1,5 \cdot 10^{10}$ m) und einem Zehntel der AE ausgegangen. Die Astronomische Einheit ist die durchschnittliche Distanz zwischen der Erde und der Sonne. Um diese Werte

⁷ vgl. Das Geheimnis der Gravitationswellen (Spanner 2017, S. 152ff.).

auszurechnen, muss man zuvor den Schwarzschildradius R_i der Schwarzen Löcher berechnen. Dieser gibt den Radius an, an dem die Austrittsgeschwindigkeit, um der Gravitation des Schwarzen Loches zu entkommen, gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Somit ist diese Kugel um das Schwarze Loch jene, die für den Betrachter als Schwarz erscheint. Der Schwarzschildradius ist mit der Formel $R_i = \frac{2 G \cdot M_i}{c^2}$ zu berechnen. M_i ist dabei die Masse des Schwarzen Loches, also in diesem Fall wieder 36 und 29 M_\odot und G die Gravitationskonstante. Um die Amplitude h zu berechnen, benötigt man zusätzlich den Abstand des Messgeräts zum Entstehungsort der Gravitationswelle, also den Abstand zur Erde von 410 Megaparsec. Die verwendete Formel $h = \frac{R_1 \cdot R_2}{D \cdot r}$ kann jedoch nur für ein nichtrelativistisches System genutzt werden, beide Objekte müssen also eine Geschwindigkeit geringer einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit haben. Des Weiteren dürfen sich die beiden Schwarzen Löcher nicht um ihre eigene Achse drehen. Beide Einschränkungen sollten die Ergebnisse nicht allzu stark verändern, wodurch immer noch eine generelle Tendenz gezogen werden kann. Wenn man die Formel des Schwarzschildradius‘ in der Amplitude einsetzt erhält man folgende Formel:

$$h = \frac{R_1 \cdot R_2}{D \cdot r} = \frac{\frac{2 G \cdot M_1}{c^2} \cdot \frac{2 G \cdot M_2}{c^2}}{D \cdot r}$$

Für $D = 1$ AE ergibt sich eine Amplitude von $4,85 \cdot 10^{-26}$ m und für $D = 0,1$ AE $4,85 \cdot 10^{-25}$ m. Im Vergleich dazu haben Protonen einen Durchmesser von $1,7 \cdot 10^{-15}$ m, also das 170 Milliardenfache (bzw. 17 Milliardenfache) der Amplitude der Gravitationswelle. Somit ist klar erkennbar, dass mit Hilfe eines Gravitationswellendetektors eine so schwache Welle nicht messbar ist und man erst warten musste, bis sich die Schwarzen Löcher getroffen haben, um die Welle zu messen.

Die Frequenz f_{GW} einer Gravitationswelle ist das Doppelte der Frequenz f , mit der sich beide Objekte umeinanderdrehen. Um die Rotationsfrequenz auszurechnen, muss man zuerst die Winkelgeschwindigkeit ω ausrechnen, woraufhin man mit $f = \frac{\omega}{2\pi}$ die Frequenz bekommt. Daher lautet die Formel:

$$f = \frac{c}{D} \cdot \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{2D}}, \quad f_{GW} = 2f \quad ^8$$

Bei $D = 1$ AE kommt man auf eine Frequenz von $6,09 \cdot 10^{-6}$ Hz, was in etwa einer Schwingungsdauer von zwei Tagen entspricht. Wenn die Entfernung jedoch nur noch einem Zehntel AE entspricht, liegt eine Frequenz von $1,93 \cdot 10^{-4}$ Hz, also 16,7 Schwingungen pro Tag, vor. Somit ist auch die Frequenz der Wellen zu gering, um ein Signal registrieren zu können, da derzeitige Gravitationswellendetektoren nur Frequenzen von mehreren Hertz bis einem Kilohertz messen können.

Obwohl dieses Ereignis eine Energie von $1,8 \cdot 10^{47}$ W aussendet, ist es immer noch sehr schwer, ein Signal zu messen. Im Allgemeinen liegt eine relative Längenänderung mit dem Faktor 10^{-21} der Messstrecke vor. Wenn die Messstrecke 1 m beträgt, wird diese durch eine Gravitationswelle in dieser Größenordnung um 10^{-21} m gestreckt beziehungsweise gestaucht. Das LIGO-Observatorium, der größte Gravitationswellendetektor der Welt, hat beispielsweise eine Messstrecke von vier Kilometern. Diese wird um $4 \text{ km} \cdot 10^{-21} = 4 \cdot 10^{-18}$ m verändert. Wenn man diese Strecke wieder mit dem Durchmesser eines Protons von $1,7 \cdot 10^{-15}$ m vergleicht, kommt man gerundet auf ein Tausendstel des Durchmessers eines Protons. Bei einer Messstrecke von der Erde bis zur Sonne, also einer Astronomischen Einheit, liegt eine Längenänderung von 0,1 nm vor, was dem Durchmesser eines Atoms entspricht. Für die Distanz zwischen der Sonne und Alpha Centauri, dem nächst gelegenen Stern zur Erde, welche 4,3 Lichtjahre beträgt, ist schon eine Längenänderung von 0,1 nm messbar. Ein zehntel Millimeter entspricht dem Durchmesser eines menschlichen Haares.⁹

Wie man es im LIGO-Observatorium geschafft hat, eine Veränderung von einem Tausendstel des Durchmessers eines Protons zu messen und wie man diese Genauigkeit noch verbessern will, wird im nächsten Kapitel erklärt.

⁸ vgl. An Overview of Gravitational Waves (Auger, Plagnol 2017, S. 222).

⁹ vgl. Das Geheimnis der Gravitationswellen (Spanner 2017, S. 70ff.).

4 Gravitationswellenobservatorien

4.1 Laserinterferometer auf der Erde

Die bekanntesten Gravitationswellenobservatorien sind die LIGO Detektoren in der USA. Sie ermöglichten die Messung von GW150914. LIGO steht für Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory und besteht aus zwei baugleichen Observatorien in Hanford, Washington und Livingston, Louisiana, die etwa 3000 Kilometer voneinander entfernt liegen. Ihrem Namen nach basieren sie auf dem Prinzip der Laser-Interferometrie. Die Detektoren besitzen zwei vier Kilometer lange Arme, die im rechten Winkel zueinander liegen. Mit Hilfe eines halbdurchlässigen Spiegels ist es möglich, Laserlicht auf beide Arme gleichmäßig zu verteilen. Am Ende der Arme trifft das Licht auf Spiegel, die sogenannten Testmassen, die es wieder zurückleiten. Wenn nun die Lichtwellen beider Arme aufeinandertreffen, kombinieren sie sich wieder zu einem Strahl, der auf einen Lichtdetektor

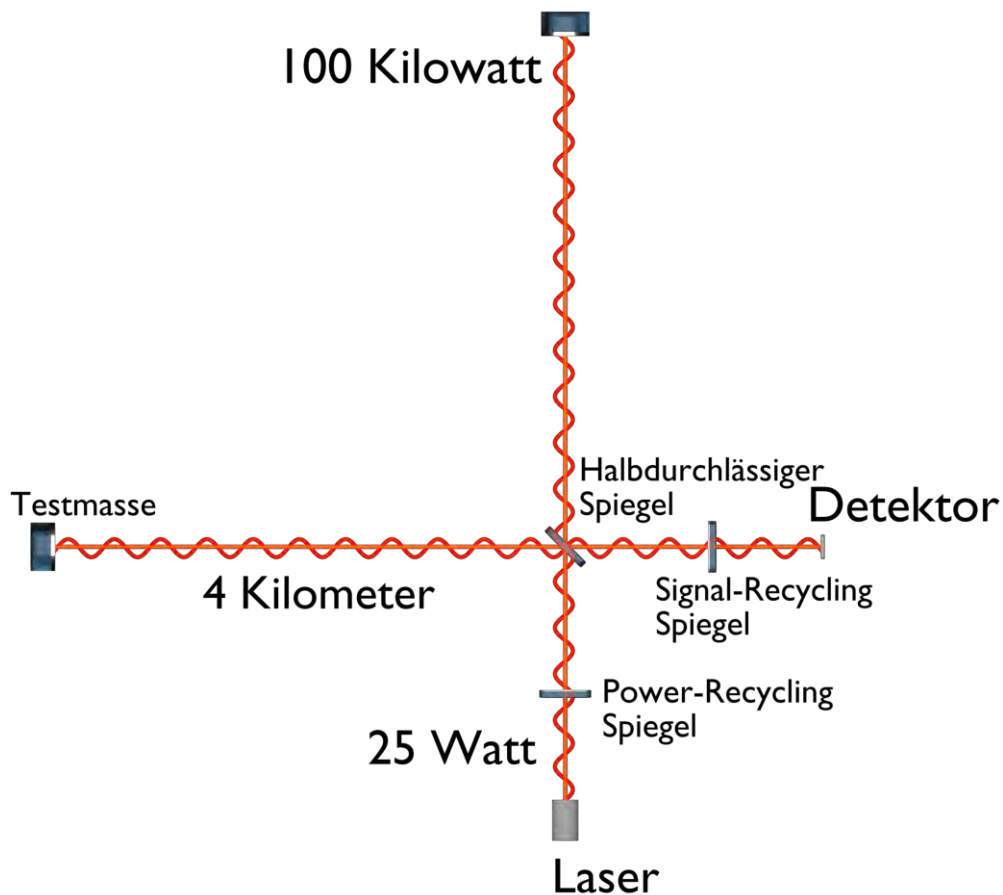


Abb.3 Aufbau des LIGO Detektors

trifft. Im Ruhezustand kommt es jedoch zu einer destruktiven Interferenz der Strahlen. Dies bedeutet, dass die Lichtwellen sich gegenseitig auslöschen und kein Signal vom Detektor aufgenommen wird. Sollte jedoch eine Gravitationswelle das Observatorium durchlaufen, verändert sich die Länge beider Arme und durch die Verschiebung der Wellen entsteht ein Signal.¹⁰

Dieses Verschieben wird natürlich nicht ausschließlich durch Gravitationswellen hervorgerufen. Auch andere Wellen reichen aus, um ein Signal zu erzeugen. Um die Störung zu verringern, sind beide Arme Vakuumkammern. Dadurch wird die Auswirkung von Schallwellen, da sie sich nicht in einem Vakuum ausbreiten können, und die Schwächung des Laserlichts durch die geringen Mengen an Luft verringert. Der Luftdruck in der Vakuumkammer beträgt weniger als ein Mikropascal, etwa ein Hundertmilliardstel des durchschnittlichen Luftdrucks auf der Erde. Ähnliche Werte erreicht nur der Teilchenbeschleuniger im CERN bei Genf.¹¹

Um die seismischen Auswirkungen zu reduzieren, steht der ganze Versuchsapparat auf seismischen Isolatoren. Dadurch wurde auch die Auswirkung von einigen anderen Störquellen reduziert. Darunter sind unter anderem Schwingungen des Bodens durch die Autos, des dort arbeitenden Personals, aber auch die Brandung des hunderte Kilometer entfernten Ozeans. All diese Einflüsse tragen zu dem seismischen Hintergrund bei. Dieser kann zusätzlich durch die Aufhängung der Testmassen an Stahlseilen reduziert werden, da sie weniger Schwingungen übertragen als eine feste Aufhängung an der Decke der Vakuumkammer.

Die Genauigkeit der Messungen hängt unter anderem von der Lichtleistung des Lasers ab. Wenn nun aber ein sehr starker Laser verwendet wird, hat dieser durch seine Stärke eine niedrigere Qualität, und ist deswegen ungeeignet. Daher benutzt man Quellen mit einer Leistung von gerade mal 25 W. Um diese geringe Leistung so gut wie möglich auszunutzen, bedient man sich einiger Techniken. Die Endspiegel der Arme sind mit einer besonderen Oberflächenbeschichtung versehen, um ihre Reflexionsfähigkeit zu erhöhen. Dazu sind sogenannte Recycling-Spiegel verbaut, unter anderem ein Power-Recycling-Spiegel, der vor dem Laser positioniert ist. Er reflektiert alles Licht, das zum Laser zurückkommen würde, wieder zum Interferometer. Ein zweiter Spiegel befindet sich vor dem Lichtsensor. Mit

¹⁰ vgl. Das Geheimnis der Gravitationswellen (Spanner 2017, S. 85ff.).

¹¹ vgl. ebd. S. 98 ff.

Hilfe dieses Signal-Recycling-Spiegels ist es möglich, das erzeugte Signal bei einer Gravitationswelle zu verstärken, worunter allerdings die Bandbreite etwas leidet und somit nur ein etwas geringeres Spektrum gemessen werden kann. Diese Technologien führen zu einem Anstieg der Leistung von 25 W auf 100.000 W. Der starke Anstieg ist dadurch zu erklären, dass der Laser nur noch die Lichtverluste im System ausgleichen muss. Das gleiche Prinzip herrscht bei einem schaukelnden Kind vor, das nur wenig Energie aufbringen muss, um zu schaukeln, da sich die Energie jedes Schwungholens addiert.¹²

Das war der Stand des von 1998 bis 2002 gebauten LIGO. In den darauffolgenden Jahren erkannte man jedoch, dass der derzeitige Aufbau nicht ausreichend war, um Gravitationswellen zu messen. Daher wurden beide Observatorien zum Advanced LIGO (aLIGO) ausgebaut. Es wurden einige neue Technologien verbaut, die unter anderem in Deutschland am GEO600 entwickelt wurden, dem deutsch-schottischen Detektor. Seit September 2015, nach der Fertigstellung von aLIGO, besitzen beide Detektoren eine Messgenauigkeit von $7 \cdot 10^{-23}$. Dabei wurde vor allem der niedrigere Frequenzbereich um das Zehnfache im Vergleich zum ursprünglichen LIGO verbessert.¹³

Die größten Veränderungen wurden an den Testmassen durchgeführt. Ihre Aufhängung wurde verbessert und sie wurden vergrößert und schwerer gemacht. Um die Auswirkung des seismischen Hintergrunds zu verringern, wurden sie an einem vierstufigen Pendel aufgehängt. Dieses kann aktiv mit Hilfe von Servomotoren die Schwingungen von außerhalb durch eine Gegenbewegung verringern. Dazu wurde das neue Pendel an Quarzglasfasern aufgehängt, da sie eine geringere thermische Eigenschwingung besitzen. Da Wärme bedeutet, dass sich Atome und vor allem dabei Elektronen stärker bewegen, führen diese thermischen Bewegungen zu minimalen Schwingungen im Material. Diese ist bei Stahl höher als bei Quarzglasfasern. Hier liegt ein Grund für die Vergrößerung der Testmassen. Zusätzlich führt der auftreffende Laser zu einer Erhöhung der Temperatur des Spiegels, da ein Teil des Lichts absorbiert wird und somit in Wärme umgewandelt wird. Die Wärme dehnt das Spiegelmaterial aus, was die Entfernung der Teststrecke verändert. Durch die Vergrößerung kann sich die Wärme nun besser verteilen und hat

¹² vgl. ebd. S. 95ff.

¹³ vgl. ebd. S. 88ff.

somit eine geringere Auswirkung. Die Spiegel wurden von einem Durchmesser von 25 cm auf 34 cm und einer Dicke von 10 cm auf 20 cm vergrößert. Dabei erhöhte sich die Masse von 11 kg auf 40 kg, also auf das 3,5-fache der ursprünglichen Testmasse. Die höhere Masse bietet einen weiteren Vorteil bezüglich der Eigenschaft des Lasers, die Spiegel zu bewegen. Der Impuls der Photonen wird auf die Spiegel übertragen, was zu einem Rückstoß und somit zu einer ungewollten Bewegung des Spiegels führt. Die Auswirkung davon ist bei einer größeren Testmasse natürlich geringer.

Neben den Testmassen wurden auch die seismischen Isolatoren verbessert. Bei der ersten Version der LIGO Detektoren wurden nur passive Isolatoren verwendet, diese wurden um aktive bei aLIGO erweitert. Die passiven Isolationssysteme kann man mit Stoßdämpfern von Fahrzeugen vergleichen. Aktive Systeme ähneln der Aufhängung der Testmassen, bei denen aktiv eine Gegenbewegung zu den seismischen Wellen erzeugt wird.

Durch all diese Verbesserungen ist das vom Detektor erfassbare Volumen im Universum enorm angestiegen. Insgesamt ist es aLIGO möglich, einen 25- bis 100-mal größeren Teil des Universums zu beobachten, da das erfassbare Volumen mit der dritten Potenz der Empfindlichkeit ansteigt. Dies alles hat dazu geführt, dass innerhalb weniger Tage nach der Wiederinbetriebnahme der Detektoren die erste Gravitationswelle gemessen wurde.¹⁴

4.2 Laserinterferometer im Weltall

Das erste Weltrauminterferometer, das derzeit in Planung ist, ist das Projekt LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Es wird von der NASA und ESA zusammen entwickelt und soll voraussichtlich 2034 starten. Der größte Unterschied zwischen Laserinterferometern im Weltall und auf der Erde ist die Frequenz der Gravitationswellen, die gemessen werden können. Bei LISA soll diese im Bereich von wenigen Hertz bis Millihertz sein, also einer Schwingung in der Sekunde bis

¹⁴ vgl. ebd. S. 100ff.

einer in knapp 17 Minuten. Im Gegensatz dazu hat aLIGO seine höchste Genauigkeit bei einigen Hertz bis Kilohertz. Dies liegt daran, dass im Weltall kein seismischer Hintergrund vorhanden ist, der es unmöglich macht, sehr niedrige Frequenzen zu messen. Dazu kann die Armlänge um ein Vielfaches vergrößert werden, was ein weiterer Grund ist, um niedrige Frequenzen messen zu können. Bei einer Frequenz von einem Millihertz beträgt die Wellenlänge schon ganze $3 \cdot 10^{11}$ m. Die Wellenlänge kann wieder nur bei einer längeren Armlänge gemessen werden. Bei LISA soll sie $1 \cdot 10^9$ m betragen.

Da andere Frequenzen gemessen werden, kommen neue Quellen ins Blickfeld: Doppelsysteme von Pulsaren, Sternen oder supermassiven Schwarzen Löchern mit mehreren Millionen Sonnenmassen, die höchstwahrscheinlich im Zentrum von Galaxien zu finden sind. Man kann also sagen, dass schwerere Objekte gemessen werden können. Vor allem ist die Messung von supermassiven Schwarzen Löchern sehr interessant, da es möglich ist, ihre Signale von einer Zeit bis 300 Millionen Jahren nach dem Urknall zu messen.

Das LISA Projekt besteht aus drei baugleichen Sonden, die in einem gleichseitigen Dreieck, mit einem Abstand von einer Million Kilometer zueinander, angeordnet sind. Sie befinden sich in einem Abstand von $7 \cdot 10^{10}$ m zur Erde, was die maximale Entfernung für eine zuverlässige Kommunikationsverbindung ist. LISA wird ununterbrochen die Streckung und Stauchung der Raumzeit messen, wodurch die Eigenschaften

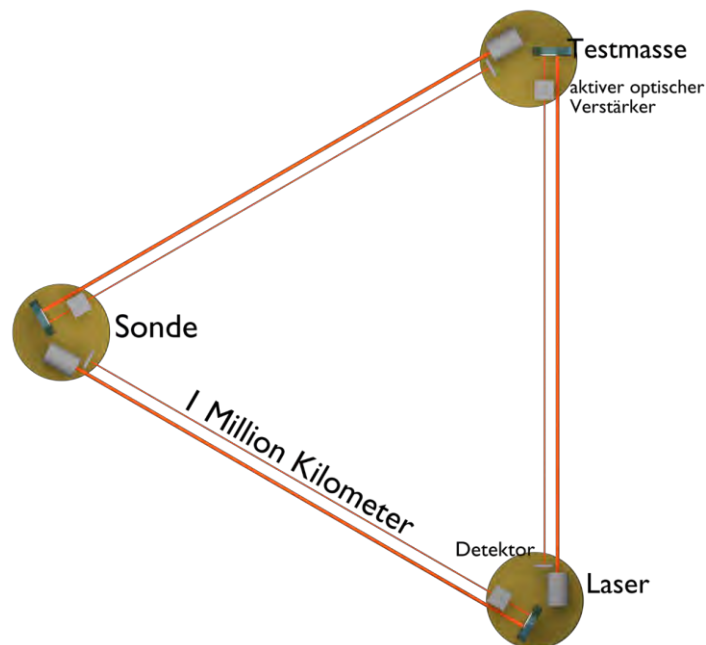


Abb.4 Aufbau des LISA Projekts

der gemessenen Wellen besser bestimmt werden können. Durch den großen Abstand zwischen den Sonden ist es nicht möglich, das ausgesandte Laserlicht wieder

zurück zu reflektieren, da ein Laser nicht so stark fokussiert werden kann, dass genügend Licht an der Testmasse ankommt. Daher sendet jede Sonde an einen Nachbarn einen Laserstrahl, der es diesem durch aktive optische Verstärker ermöglicht, das Licht wieder zurückzusenden. Durch den Vergleich mit dem ursprünglichen Laserstrahl, ähnlich wie bei Systemen auf der Erde, wird die Distanzänderung zwischen den Sonden gemessen. Diese Art der Messung ist jedoch nicht so präzise wie die auf der Erde, was aber durch die größere Armlänge ausgeglichen wird. Insgesamt kommt man wieder auf eine Genauigkeit von 10^{-21} , was es tatsächlich ermöglicht, Gravitationswellen zu messen.¹⁵

4.3 Pulsar Timing Arrays

Pulsar Timing Arrays (PTA) funktionieren, im Gegensatz zu Laserinterferometern, auf einem ganz anderen Prinzip der Gravitationswellendetektion. Dem Namen nach misst man das Timing von Pulsaren. Pulsare sind Neutronensterne, also ehemalige Sterne, die nahezu ausschließlich aus Neutronen bestehen, daher haben sie einen sehr kleinen Durchmesser, aber eine sehr hohe Masse. Wenn sich Neutronensterne schnell um ihre eigene Achse drehen, strahlen sie Radiowellen aus und werden Pulsare genannt. Die Radiowellen werden in Pulsen ausgesendet. Zur Erkennung von Gravitationswellen bei PTAs spielt die Pulsfrequenz eine wichtige Rolle. Wenn Pulsare älter werden, gleicht sich ihre Form immer mehr einer Kugel an. Dadurch wird auch die Pulsfrequenz immer gleichmäßiger. Wenn man die Pulsfrequenz genau misst und einen gleichmäßigen Pulsabstand erkennt, ist bei einer Veränderung der Frequenz eine Gravitationswelle die Ursache. Dies liegt daran, dass der Abstand zur Erde, den die Radiowellen zurücklegen, durch die Gravitationswellen verändert wird und sich somit der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Pulsen minimal verändert. Da bei PTAs die Veränderung des Pulses eines Pulsars gemessen wird, spricht man von einem indirekten Nachweis im Gegensatz

¹⁵ vgl. ebd. S. 190ff.

zu einem direkten bei Laserinterferometern.

Um eine Gravitationswelle genau messen zu können, muss man mehrere Pulsare gleichzeitig messen, weil man sonst Frequenz, Wellenlänge oder Ursprung

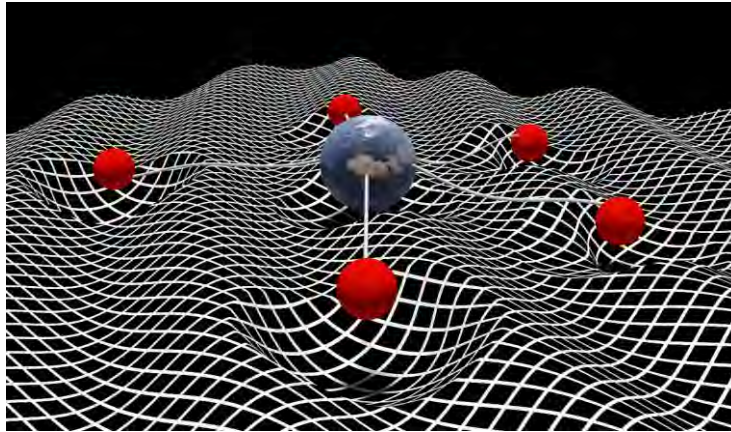


Abb.5 Pulsare für Pulsar Timing Arrays

nicht erkennen kann, daher werden derzeit etwa 30 Pulsare regelmäßig ausgemessen und analysiert. Pulsare befinden sich, außer bei Doppelsystemen, sehr weit voneinander entfernt, weshalb man mit PTAs langwellige Gravitationswellen messen kann. Diese können eine Schwingungsdauer von Monaten oder sogar Jahren besitzen. Sie können somit kosmische Ereignisse, wie beispielsweise die Fusion von Galaxien und Supernovae, und unter Umständen auch den Gravitationswellenhintergrund, der während oder kurz nach dem Urknall entstand, messen. Ein Beispiel für PSAs ist das European Pulsar Timing Array, das fünf Radioteleskope der 100-m-Klasse beinhaltet. Dabei steht 100-m für die 100 Meter Durchmesser des Schirms der Teleskope. Wegen den langwelligen und niederfrequenten Radiowellen der Pulsare werden Schirme dieser Größenordnung benötigt.¹⁶

¹⁶ vgl. ebd. S. 202ff.

5 Erste Messung einer Gravitationswelle

Mit den Worten „We have detected gravitational waves. We did it!“, wurde am 11. Februar 2016 die erste Messung einer Gravitationswelle von David Reitze, dem Direktor von LIGO, verkündet. Das war ganze fünf Monate nach der tatsächlichen Messung der Gravitationswelle GW150914 am 14.09.2015. In dieser Zeit wurde pausenlos daran gearbeitet, die Messung als richtig zu beweisen und Informationen daraus zu ziehen.

Die Messung der Gravitationswelle gelang durch einen glücklichen Zufall. Anfang September 2015 wurde aLIGO, nach einer mehrjährigen Bauphase, auf seinen ersten Testlauf vorbereitet. Unter anderem sollten am 13. September kurz vor Mitternacht noch einige Tests durchgeführt werden. Sie wurden aber wegen Verzögerungen auf den nächsten Tag verschoben, weshalb die Detektoren die Nacht über in Betrieb gelassen worden sind. Mitten in der Nacht durchlief die Gravitationswelle den Detektor in Livingston und 7 ms später den in Hanford. Ein paar Minuten später erkannte ein Analyse-Algorithmus die Welle und die Mitarbeiter des Projekts wurden per E-Mail informiert. Solche E-Mails wurden zu dieser Zeit ungefähr einmal am Tag geschickt, da aLIGO noch nicht optimal justiert war und es immer wieder zu Fehlmessungen und –interpretationen kam. Bei der ersten Auswertung durch einige Wissenschaftler konnte ein charakteristischer Kurvenverlauf erkannt werden. Zu diesem Zeitpunkt musste aber erst sichergestellt werden, dass kein künstliches Signal absichtlich eingeschleust wurde, um die Analyse-Algorithmen zu testen. Nachdem das erfolgreich ausgeschlossen worden war, entschied man sich Stillschweigen zu bewahren, bis man alle Ergebnisse hatte.

In den darauffolgenden Monaten wurden beide Detektoren weiter justiert, um das Hintergrundrauschen zu minimieren. Um eine Falschmeldung auszuschließen, wurden die Messwerte einer umfassenden Analyse unterzogen. Da aLIGO während des Betriebs sehr große Mengen an Daten liefert, müssen diese mit Suchalgorithmen auf Supercomputern genau untersucht werden, um Fehlmessungen automatisiert erkennen zu können. Schlussendlich wurde GW140915 von zwei unterschiedlichen Algorithmen erkannt. Der Eine suchte nach dem typischen Kurvenverlauf bei der Verschmelzung zweier Objekte in einem Doppelsystem, der durch die Allgemeine Relativitätstheorie bekannt ist. Der andere Suchalgorithmus erkennt

lediglich allgemeine Wellencharakter. Beim ersten Suchverfahren liegt statistisch gesehen alle 22.500 Jahre ein Fehler vor, wenn man also dieses Verfahren für 22.500 Jahre verwendet, sollte es nur einmal zu einem Fehlalarm kommen. In Kombination mit dem zweiten Suchverfahren erreicht man eine geringere Fehlalarmrate von nur einem Fehler in 200.000 Jahren.

Um weitere Informationen aus den Messwerten zu erhalten, wird eine Simulation durchgeführt, bei der die Parameter der Objekte erraten und anschließend mit dem tatsächlich Gemessenen verglichen werden. Wiederholt man dies mehrmals, nähern sich die Parameter weiter an die tatsächlichen Werte an. Dadurch konnten die Massen der ursprünglichen Schwarzen Löcher und des finalen Schwarzen Lochs berechnet werden. Die freigesetzte Energie, der Abstand zur Erde und die Eigenrotation des entstandenen Schwarzen Lochs wurden identisch bestimmt. Dabei gibt die Eigenrotation das Verhältnis zwischen tatsächlicher Rotations- und Maximalgeschwindigkeit an. Durch diese Messwerte konnte zusätzlich bewiesen werden, dass Schwarze Löcher dieser Größe stellaren Ursprungs entstehen und zusätzlich ein Doppelsystem bilden können.

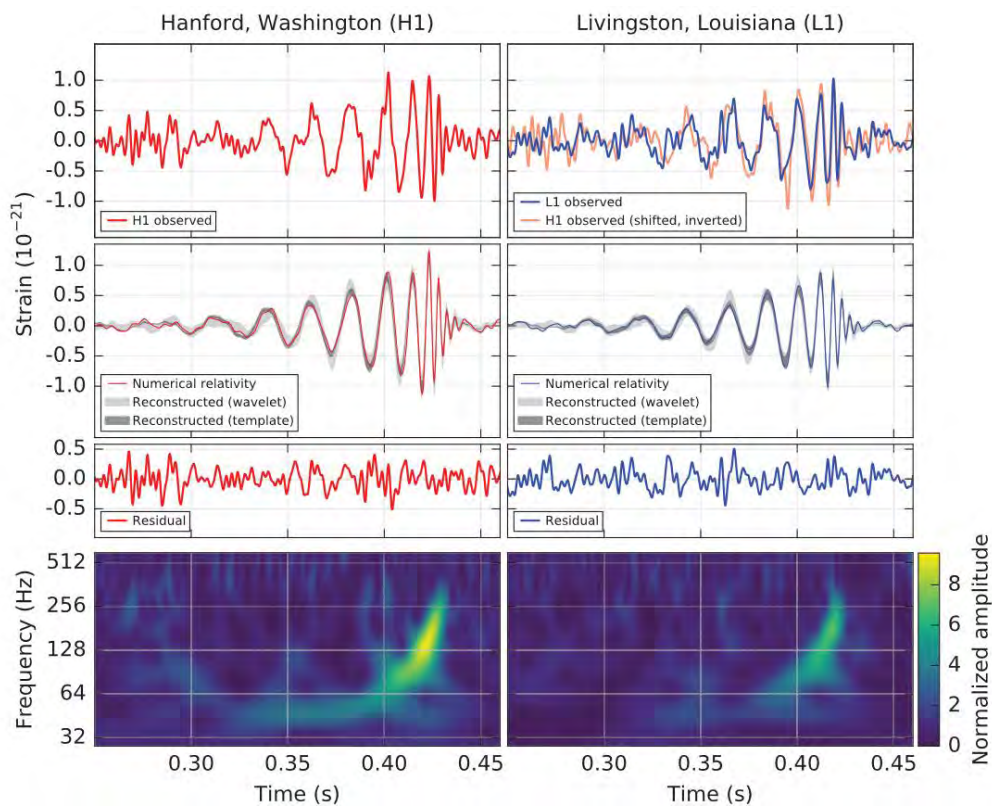


Abb.6 GW150914 gemessen durch die LIGO Detektoren in Hanford und Livingston.

Die Abbildung 6 zeigt die Originalsignale der Gravitationswelle. Die beiden oberen Diagramme stellen die relative Verschiebung durch die Gravitationswelle dar. Links sieht man die Messungen vom Observatorium in Hanford und rechts das von Livingston mit dem invertierten Signal von Hanford. Dieses musste invertiert werden, da die Ausrichtung der Observatorien unterschiedlich ist. Der Startwert der Zeitachse entspricht 9:50:45 Uhr der Weltzeit. In der zweiten Zeile sieht man die jeweiligen Simulationen und Rekonstruktionen des originalen Signals. Darunter ist die Differenz zwischen dem Gemessenen und Berechneten dargestellt, welche das Hintergrundrauschen zeigt. In der untersten Zeile lässt sich die Frequenz der Gravitationswelle erkennen, die im Verlauf langsam auf 130 Hz ansteigt und anschließend schnell abfällt.

Dieser Verlauf wird als Chirp bezeichnet. Wenn man die Frequenzen in Schallwellen umwandelt, hören sie sich wie ein Zwitschern (engl. chirp) an.

Insgesamt wurden bis zu diesem Zeitpunkt mehr als eine Milliarde US-Dollar in das LIGO Projekt investiert, weshalb man von dem Milliarden-Dollar-Signal spricht. Durch diese bahnbrechende Messung ist die Finanzierung für das Projekt nun besser vertretbar und hat dazu geführt, dass in den

nächsten Jahren weitere Observatorien in Indien und Japan gebaut werden.¹⁷

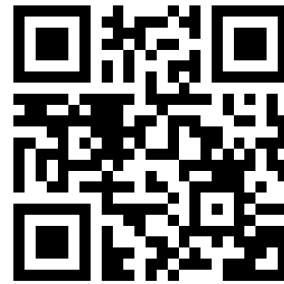


Abb.7 Chirp zum Anhören

¹⁷vgl. ebd. S. 137ff.

6 Zusammenfassung

Gravitationswellen sind insgesamt auf Grund ihrer Vierdimensionalität schwer vorstellbar. Des Weiteren arbeitet man mit sehr großen und sehr kleinen Werten, die ohne Veranschaulichung nicht auskommen. Trotzdem hat dies weder Einstein noch spätere Wissenschaftler daran gehindert, an Gravitationswellen zu forschen. Sie haben es geschafft, komplexe Formeln für Simulationen aufzustellen und Gravitationswellen sowohl indirekt, als auch direkt zu messen und in diversen Grafiken darzustellen.

Meiner Meinung nach haben sich die Investitionen für Gravitationswellendetektoren gelohnt. Vor allem der Bau der Laserinterferometer, LIGO ermöglichte die erste Messung einer Welle, die auch als Milliarden-Dollar-Signal beziehungsweise GW150914 in die neuere Geschichte einging. Dies steigerte die Bereitschaft zur Finanzierung weiterer Projekte, um auch mit anderen Methoden Gravitationswellen zu messen, wie Pulsar Timing Arrays oder dem LISA-Projekt. Obwohl durch Pulsar Timing Arrays oder die LISA-Sonden im Weltraum die Messung bestimmter Gravitationswellen erwartet wird, kann es sein, dass trotzdem andere Arten aufgezeichnet und analysiert werden können. Eine solche Überraschung stellte beispielsweise GW150914 dar, bei der man herausfand, dass es Schwarze Löcher stellaren Ursprungs in dieser Größenordnung gibt und sie sich in einem Doppelsystem befinden können. Selbst mit all diesen neuen Technologien ist es nicht möglich in die Zukunft zu schauen, aber anhand der Berechnungen, Messungen und Investitionen der letzten 100 Jahren kann man auf eine spannende Zukunft der Gravitationswellenforschung hoffen.

Dabei stellt sich die Frage, welchen Nutzen die Gravitationswellenforschung tatsächlich mit sich bringt. Vermutlich wird die Entdeckung der Gravitationswellen neben der Forschung keine direkten Auswirkungen zeigen, jedoch können die entwickelten Technologien wie beispielsweise Laser und Spiegelbeschichtung definitiv in anderen Versuchen oder Produkten zur Anwendung kommen. Vor allem aber über die Eigenschaft der Gravitationswellen, ungestört Materie zu passieren, sollten wir viele neue Erkenntnisse über unser Universum erlangen.¹⁸

¹⁸ vgl. ebd. S. 265ff.

Anhang

7 Literaturverzeichnis

Auger, Gerard/Plagnol, Eric: An overview of gravitational waves, theory, sources and detection, New Jersey/ London/ Singapore (u.a.), 2017.

B. P., Abbott u.a.: Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, 2016.

Baumgarte, Thomas W.: Gravitationswellen gefasst! in: Physik-Journal, 15. Jahrgang, April 2016, Nr. 4, Seite 16-17.

Collins, Harry: Gravity's kiss, the detection of gravitational waves, London, 2017.

D'Inverno, Ray: Einführung in die Relativitätstheorie, Auflage 2, Weinheim [u.a.], Wiley-VCH, 2009.

Grote, Hartmut: Gravitationswellen, Geschichte einer Jahrhundertentdeckung, München, 2018.

Keller, Hans-Ulrich: Das Vibrieren der Raumzeit, in: Naturwissenschaftliche Rundschau, 69. Jahrgang, Juni 2016, Heft 6, Jahrgang 69, Seite 281-288.

Lesch, Harald: Die Entdeckung der Gravitationswellen, oder warum die Raumzeit kein Gummituch ist, München, 2017.

Reicher, Uwe: Eine neue Ära der Astrophysik, das Zeitalter der Gravitationswellen-Astronomie hat begonnen, in: Sterne und Weltraum, Heft 55, April 2016, Seite 24-35.

Rüdiger, Albrecht: Per aspera ad astra, in: Physik in unserer Zeit, 48. Jahrgang Juni 2017, November, Seite 272-277.

Schilling, Govert: Einsteins Ahnung, das Rennen um den Nachweis der Gravitationswellen, München, 2017.

Spanner, Günter: Das Geheimnis der Gravitationswellen, Einsteins Vision wird Wirklichkeit, Stuttgart, 2016.

Vaas, Rüdiger: Signale der Schwerkraft, Gravitationswellen: Von Einsteins Erkenntnis zur neuen Ära der Astrophysik, Stuttgart, 2017.

Wischnewski, Erik: Art. „Gravitationswellendetektoren, Gravitationswellensender“, in: *Astronomie in Theorie und Praxis*, Kaltenkirchen, 2013, Sp. 283-290.

8 Abbildungsverzeichnis

Titelblatt: Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Hrsg., 2003): The first binary black-hole merger observed by LIGO,
<http://www.aei.mpg.de/1825029/?page=2> (Stand: 01.11.2018).

Abbildung 1: Eigene Darstellung

Abbildung 2: Eigene Darstellung

Abbildung 3: Eigene Darstellung

Abbildung 4: Eigene Darstellung

Abbildung 5: Eigene Darstellung

Abbildung 6: B. P., Abbott u.a.: Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, 2016, S. 2

Abbildung 7: Eigene Darstellung

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt habe und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

....., den

Ort

Datum

.....

Unterschrift des Schülers