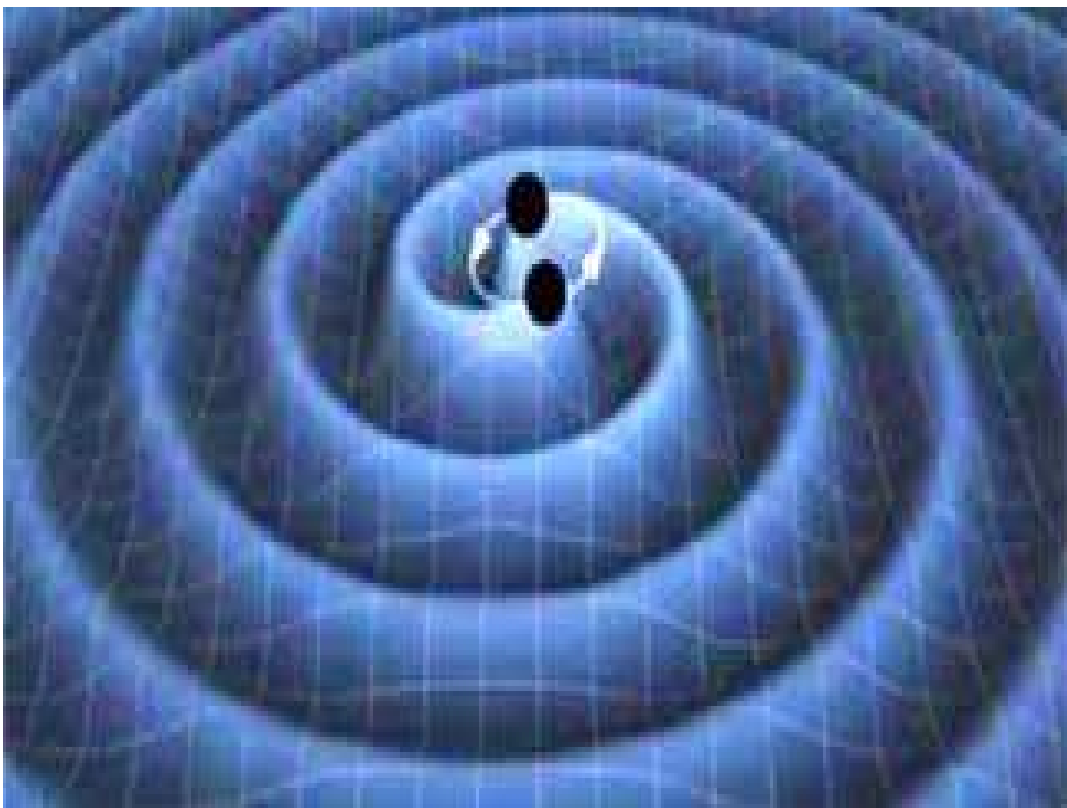


Astronomie und Astrophysik

Evidenz für Gravitationswellen im Weltraum

**von
Andreas Schwarz**



Stand: 28.09.2016

0.0 Inhaltsverzeichnis

1.0 Einleitung.....	3
1.1 Die Newtonsche Gravitationstheorie.....	3
1.2 Die Spezielle Relativitätstheorie.....	3
1.3 Die Allgemeine Relativitätstheorie.....	4
2.0 Allgemeine Relativitätstheorie und Gravitationswellen.....	5
2.1 Die vierdimensionale Raumzeit in der Allgemeinen Relativitätstheorie.....	5
2.2 Gravitationswellen in der Allgemeinen Relativitätstheorie.....	6
3.0 Gravitationswellen in der vierdimensionalen Raumzeit.....	7
4.0 Der Nachweis von Gravitationswellen.....	9
4.1 Der indirekte Nachweis von Gravitationswellen.....	9
4.2 Der direkte Nachweis von Gravitationswellen.....	9
5.0 Fazit und Ausblick.....	11
6.0 Schlusswort.....	12
7.0 Literatur-, Quellen- und Bilderverzeichnis.....	12

1. Einleitung

Zwischen der Elektrodynamik und der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es unter anderem folgende Analogie:

1. beschleunigte Ladungen erzeugen elektromagnetische Wellen und
2. beschleunigte Massen erzeugen Gravitationswellen.

Ebenso wie elektromagnetische Wellen im Vakuum pflanzen sich Gravitationswellen mit Lichtgeschwindigkeit $c = 299792458$ m/s fort. Sowohl elektromagnetische Wellen als auch Gravitationswellen sind Transversalwellen. D.h. ihre Schwingung erfolgt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Stärke der Gravitationswellen nimmt wie die der elektromagnetischen Wellen umgekehrt proportional zum Quadrat ihrer Entfernung von der Quelle ab. Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen durchdringen Gravitationswellen ungehindert Materie und werden von dieser nicht absorbiert. Trotz gewisser Analogien unterscheiden sich Gravitationswellen klar von elektromagnetischen Wellen oder Schallwellen. Gravitationswellen sind eine Verzerrung der Geometrie der vierdimensionalen Raumzeit. Grundlage für die Beschreibung der Eigenschaften von Gravitationswellen ist die Allgemeine Relativitätstheorie. Aufgrund dieser Theorie wurde die Existenz von Gravitationswellen auch gefolgert. In dieser Einleitung wird noch auf die Grundsätze der Relativitätstheorie eingegangen, bevor im nächsten Kapitel die Konkretisierung der Gravitation und der Gravitationswellen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie erfolgt.

1.1 Die Newtonsche Gravitationstheorie

Die Gravitationstheorie von Isaak Newton geht von einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit aus. Dort spielen sich alle Naturvorgänge ab. Konkret würde das bedeuten, dass es einen absoluten Maßstab geben würde. Wenn zwei Systeme mit einer konstanten Geschwindigkeit (ohne Beschleunigung) gegeneinander bewegt würden, dann ließen sich alle Vorgänge im System 1 in das System 2 transformieren. Ein Beobachter würde z.B. ein Ereignis in beiden Systemen unter gleichen Bedingungen wahrnehmen, wenn die Gravitationstheorie nach Newton uneingeschränkt gelten würde. In einem System mit einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit addieren sich Geschwindigkeiten uneingeschränkt. Steht ein Beobachter an einem Bahndamm, auf dem ein Zug mit 100 km/h vorbei fährt und läuft jemand mit 5 km/h in diesem Zug in Fahrtrichtung, dann sieht der Beobachter am Bahndamm diesen Jemand mit 105 km/h vorbeirauschen. Die Zuggeschwindigkeit von 100 km/h und die Laufgeschwindigkeit von 5 km/h addieren sich zu einer Gesamtgeschwindigkeit von 105 km/h. Allerdings stimmt die Newtonsche Theorie nur für kleine Geschwindigkeiten, wie die Messung der Lichtgeschwindigkeit unter verschiedenen Bedingungen zeigte. Wenn jemand mit einer Taschenlampe auf dem Zug stünde, dann müssten sich nach Newton die Geschwindigkeit des Lichtes aus der Taschenlampe und die Zuggeschwindigkeit addieren. Doch das passiert nicht, es wird immer nur die Lichtgeschwindigkeit gemessen. Bei hohen Geschwindigkeiten versagt die Newtonsche Theorie.

1.2 Die Spezielle Relativitätstheorie

Eine Lösung lieferte erst die im Jahre 1905 von Albert Einstein aufgestellte „Spezielle Relativitätstheorie“. Nach dieser gibt es keinen absoluten Raum und keine absolute Zeit. Es gibt damit im Ergebnis auch keinen absoluten Raum- und Zeitmaßstab mehr. Die Spezielle Relativitätstheorie beschreibt folgerichtig die Transformation der physikalischen Größen Länge, Zeit, Masse bzw. Energie, Impuls, Ladung, elektrisches und magnetisches Feld von einem gleichförmig bewegten System in ein anderes. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Systems ändern sich nun die Werte für die Länge in Bewegungsrichtung, die Zeit oder die Masse um einen bestimmten Faktor („Gamma-Faktor“). So wird die Länge in Bewegungsrichtung verkürzt, der Zeitverlauf verlangsamt sich und die Masse vergrößert sich. Merklich werden diese Änderungen allerdings erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten, in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit. Die Lichtgeschwindigkeit selbst kann allerdings nicht erreicht werden. In

diesem Fall würde die Masse unendlich groß und es müsste unendlich viel Energie aufgebracht werden. Die Photonen der elektromagnetischen Strahlung können sich nur deshalb mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, weil sie im Ruhezustand keine Masse (Ruhemasse) haben. Hier kann es daher auch zu keinem Massenzuwachs kommen. Das gilt selbstverständlich auch für die Gravitonen, die Träger der gravitativen Wechselwirkung. Aufgrund der Relativität von Raum und Zeit finden auch die Geschwindigkeitsadditionen bei hohen Geschwindigkeiten oder der immer gleiche Wert der Lichtgeschwindigkeit ihre Erklärung. Die Maßstäbe von Raum und Zeit ändern sich immer so, dass der Wert der Lichtgeschwindigkeit in allen gleichförmig bewegten Systemen immer gleich ist. Ein aus der Speziellen Relativitätstheorie folgender Faktor (Gamma-Faktor) zieht im Übrigen den Wert der addierten Geschwindigkeiten immer unterhalb des Wertes der Lichtgeschwindigkeit. Der Faktor wird allerdings erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten wirksam, so dass bei niedrigen Geschwindigkeiten eine uneingeschränkte Addition der Geschwindigkeiten stattfindet. Dieser Gamma-Faktor wirkt dann auch bei anderen physikalischen Größen, etwa der Länge, der Zeit oder der Masse. Die Newtonsche Theorie ist als Grenzfall für niedrige Geschwindigkeiten enthalten. Ein Ergebnis der Speziellen Relativitätstheorie ist z.B., dass ein Beobachter im System 1 zwei Ereignisse gleichzeitig wahrnimmt während ein anderer Beobachter im System 2 dieselben Ereignisse nicht gleichzeitig sondern nacheinander wahrnimmt. Bekannt ist auch ein weiteres Beispiel, das Zwillingsparadoxon. Ein Zwilling begibt sich mit einem Raumschiff auf eine lange Reise in den Weltraum und bewegt sich dabei mit annähernder Lichtgeschwindigkeit. Er kehrt um und kommt zur Erde zurück. Im Raumschiff ist die Zeit langsamer verlaufen als auf der Erde. Sein auf der Erde verbliebener Zwillingsbruder, bei der Abreise natürlich gleich alt wie er, ist nun deutlich älter geworden bzw. der im Raumschiff reisende Zwilling ist nun deutlich jünger als sein auf der Erde verbliebener Zwillingsbruder. Eine weitere wichtige Konsequenz der Speziellen Relativitätstheorie ist die Äquivalenz von Energie und Masse $E = mc^2$.

1.3 Die Allgemeine Relativitätstheorie

Die Spezielle Relativitätstheorie beschränkt sich auf gleichförmig (ohne Beschleunigung) bewegte Systeme. Die von Albert Einstein im Jahre 1915 aufgestellte „Allgemeine Relativitätstheorie“ ist die Verallgemeinerung auf alle bewegten Systeme, sie berücksichtigt also auch die Beschleunigung. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie sind alle Gesetze der Physik in jedem Bezugssystem, ob gleichförmig oder beschleunigt bewegt, gleich. Die Allgemeine Relativitätstheorie stellt eine Theorie des Gravitationsfeldes dar. Zugrunde gelegt wird hierbei das Äquivalenzprinzip, die Äquivalenz (Gleichwertigkeit) von schwerer und träger Masse. Das Äquivalenzprinzip sagt aus, dass das Verhältnis von schwerer und träger Masse den Wert Eins hat. Schwere Masse ist die Eigenschaft, dass Massen sich gegenseitig gravitativ anziehen. Träge Masse ist die Eigenschaft, dass Massen der Änderung ihres Bewegungszustandes einen Widerstand entgegenbringen. Die Äquivalenz von schwerer und träger Masse ist auch der Grund dafür, dass alle Körper unabhängig von ihren Massen im Vakuum (also ohne Reibung) gleich schnell fallen. Zwar ziehen sich größere Massen stärker an und würden dann natürlich auch schneller fallen. Doch haben sie auch eine größere Trägheit, die dem schnelleren Fallen in gleicher Größenordnung entgegenwirkt. Im Ergebnis fallen daher alle Körper unabhängig von ihrer Masse gleich schnell. Aufgrund des Äquivalenzprinzips zeigt die Allgemeine Relativitätstheorie, dass die Kraft, die ein Massepunkt in einem homogenen Gravitationsfeld erfährt, als Trägheitskraft in einem beschleunigten Bezugssystem angesehen werden kann. Zur Veranschaulichung soll das Fahrstuhlbeispiel herangezogen werden. Ein Fahrstuhl ohne Fenster hängt über der Erdoberfläche, so dass das Gravitationsfeld der Erde wirkt. Ein Physiker im Fahrstuhl würde eine Anziehungskraft spüren wie wir sie auch spüren. Alles fällt auf den Boden und bleibt liegen bzw. alles verhält sich so, wie wir es in unserem Alltag gewöhnt sind. Nun soll sich der Fahrstuhl außerhalb des Erdgravitationsfeldes oder eines sonstigen Gravitationsfeldes befinden. Am Dach des Fahrstuhls hängt ein stabiles Seil, welches am anderen Ende an einer Rakete befestigt ist. Die Rakete beschleunigt und zieht den Fahrstuhl mit gleicher Beschleunigung hinter sich her. Nun drücken die Beschleunigungskräfte alles an den Fahrstuhlboden. Wie im Gravitationsfeld der Erde fallen alle Gegenstände zu Boden bzw.

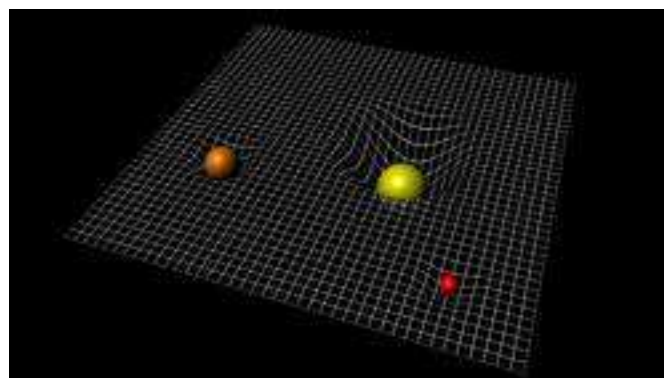
alles verhält sich wie in einem Gravitationsfeld. Ohne Blickmöglichkeit nach draußen kann der Physiker im Fahrstuhl nicht unterscheiden, ob er sich in einem Gravitationsfeld befindet oder beschleunigt wird. Diese Tatsache folgt aus der Äquivalenz von schwerer und träger Masse. Die bei gleichförmig bewegten Bezugssystemen (Inertialsysteme) auftretenden Eigenschaften von Raum und Zeit treten auch in beschleunigten Bezugssystemen auf. So verlangsamt sich z.B. der Zeitablauf auch in einem beschleunigten Bezugssystem gegenüber einem anderen Bezugssystem. Wegen dem Äquivalenzprinzip gilt das auch für ein Gravitationsfeld. In einem Gravitationsfeld ist der Zeitablauf ebenfalls verlangsamt. In der Nähe der Oberfläche eines Schwarzen Loches altern wir gegenüber den weiter außerhalb liegenden Bereichen sehr viel langsamer. Auch die Allgemeine Relativitätstheorie enthält die Newtonsche Theorie als Grenzfall für kleine Geschwindigkeiten und für kleine Gravitationsfelder. Nach der Newtonschen Theorie ist die Gravitation eine anziehende Kraft, welche zwischen den Massen wirkt. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Gravitation eine geometrische Eigenschaft der Raumzeit. Auf diese werden wir im nachfolgenden Kapitel eingehen, um auch die Gravitationswellen erklären zu können

2.0 Allgemeine Relativitätstheorie und Gravitationswellen

Die Existenz und die Eigenschaften von Gravitationswellen folgen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Gravitation als eine geometrische Eigenschaft der Raumzeit. Hierbei handelt es sich um eine vierdimensionale Raumzeit. Diese besteht aus drei Raumdimensionen und der Zeit, welche allerdings eine Einheit bilden. Massen krümmen diese vierdimensionale Raumzeit. Je größer die Masse, desto stärker die Krümmung. Die Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit wirkt als Gravitation. Anschaulich darstellbar ist das nicht, sondern nur das zweidimensionale Analogon.

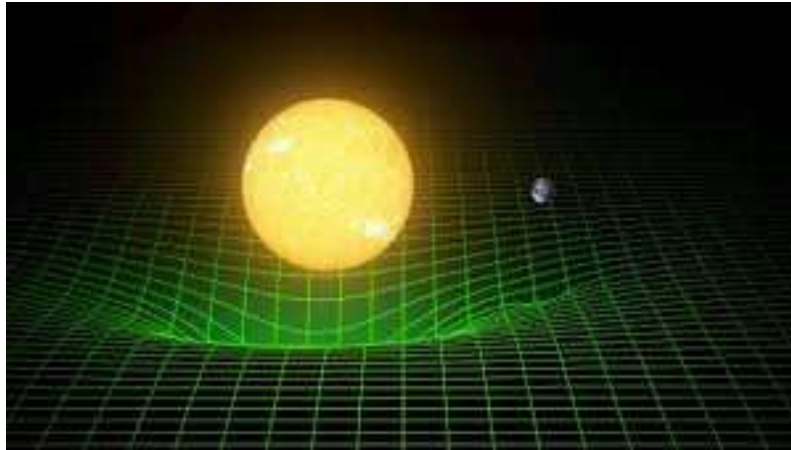
2.1 Die vierdimensionale Raumzeit in der Allgemeinen Relativitätstheorie

Zur Veranschaulichung stellt uns die vierdimensionale Raumzeit als eine Fläche vor. Wir können uns zum Beispiel eine große Fläche aus Gummi vorstellen. Die Massen können wir uns als Metallkugeln unterschiedlicher Größe und Schwere vorstellen, die auf der Gummifläche eingebettet sind. Je größer die Masse der Metallkugel, desto tiefer drücken sie sich in die Gummimatte ein. Die Einwölbungen in der Gummimatte wären in unserem Beispiel das Analogon zur Raumkrümmung. Große Massen erzeugen große Mulden, in denen sich kleinere Massen bewegen können. Dies wäre z.B. die Veranschaulichung der Bewegungen der Planeten im Gravitationsfeld der Sonne:



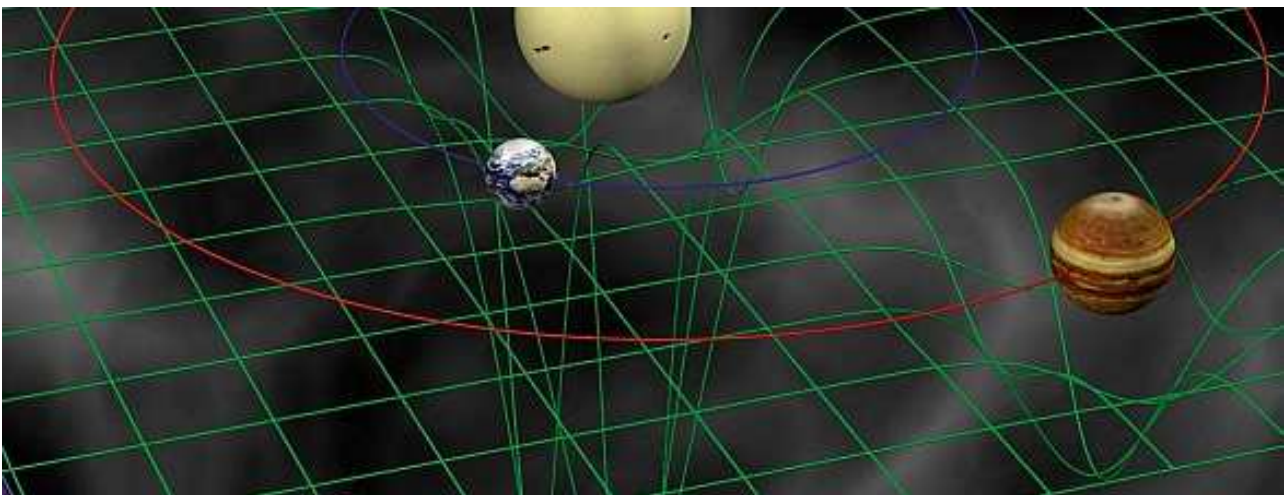
(Bild 1)

Die Erde im Gravitationsfeld der Sonne würde in unserem zweidimensionalen Analogon wie folgt dargestellt. Die Sonne krümmt aufgrund ihrer großen Masse den Raum, innerhalb dieser Krümmung bewegt sich der Planet Erde:



(Bild 2)

Im folgenden Bildbeispiel haben wir einen Ausschnitt aus dem Sonnensystem mit den Planeten Erde und Jupiter. Nicht nur die Sonne, sondern auch die Planeten krümmen den Raum. Der Jupiter aufgrund seiner 318 Erdmassen natürlich deutlich stärker als die Erde:



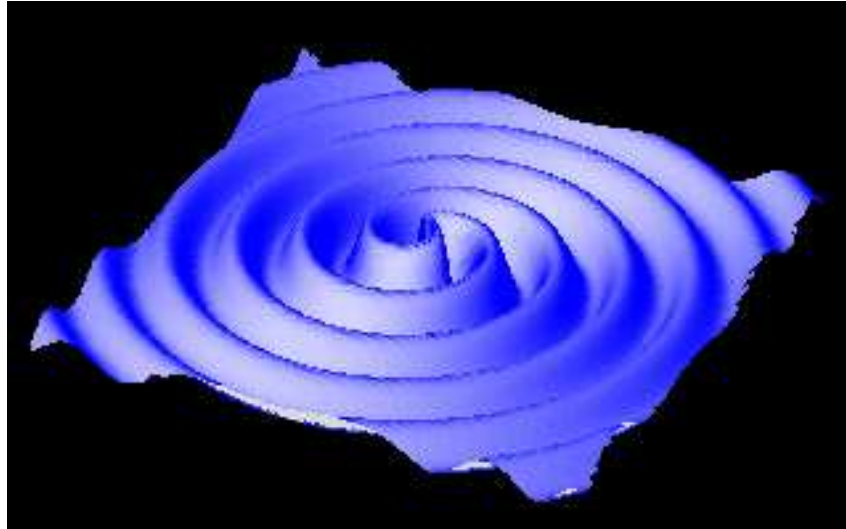
(Bild 3)

Die anschaulichen Beispiele gehen von einer zweidimensionalen Raumzeit aus. Allerdings gilt das alles genauso auch für die vierdimensionale Raumzeit, die wir in der Realität haben und von der Allgemeinen Relativitätstheorie folgerichtig mit allen ihren Eigenschaften beschrieben wird. Natürlich besteht die Raumzeit auch nicht aus Gummi oder einem anderen Stoff, sondern ist immateriell. In dieser Raumzeit bewegen sich auch die Gravitationswellen.

2.2 Gravitationswellen in der Allgemeinen Relativitätstheorie

Beschleunigte Massen erzeugen Gravitationswellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ausbreiten. Gravitationswellen stellen Verzerrungen bzw. Kräuselungen der vierdimensionalen Raumzeit dar. Die vierdimensionale Raumzeit wird in der Allgemeinen Relativitätstheorie geometrisch beschrieben. Also ändern Gravitationswellen die Geometrie der Raumzeit bzw. stellen eine Verzerrung der Geometrie der Raumzeit dar. Konkret bedeutet diese Verzerrung, dass sich Abstände in der Raumzeit ändern. Die Raumzeit wird abwechselnd gestaucht und gestreckt. Hier kann wieder das zweidimensionale und anschauliche Analogon mit der Gummimatte herangezogen werden. Diese kann gestaucht und gestreckt werden, was als Wellenvorgang in der Gummimatte erscheint. Ein in der vierdimensionalen Raumzeit eingebettetes Objekt wird durch eine

Gravitationswelle getaucht und gestreckt. Der ganze Vorgang ist sehr kurz und sehr klein. Er ist in der Praxis kaum messbar und nicht beobachtbar. Eine Kugel würde also durch eine Gravitationswelle in einer Richtung zusammengepresst und in der anderen Richtung auseinandergezogen werden. D.h. beim Durchgang einer Gravitationswelle würde die Kugel sehr kurz eiförmig erscheinen. Das folgende Bild zeigt eine Darstellung einer Gravitationswelle in einer zweidimensionalen Raumzeit:

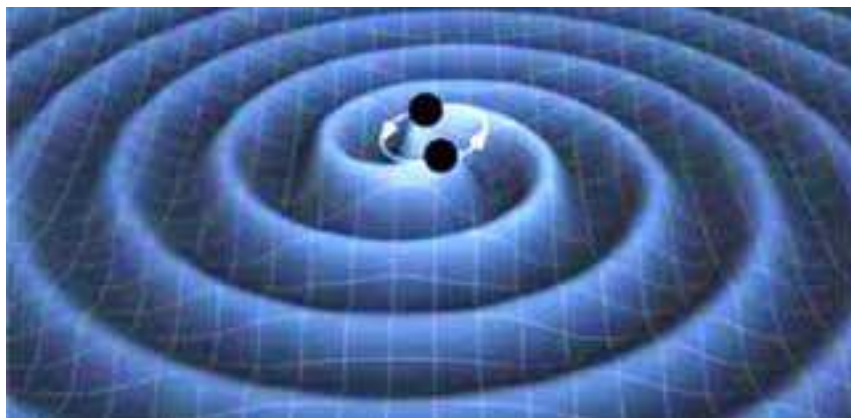


(Bild 4)

Im folgenden Kapitel soll das Verhalten der Gravitationswellen in der vierdimensionalen Raumzeit stärker evaluiert werden.

3.0 Gravitationswellen in der vierdimensionalen Raumzeit

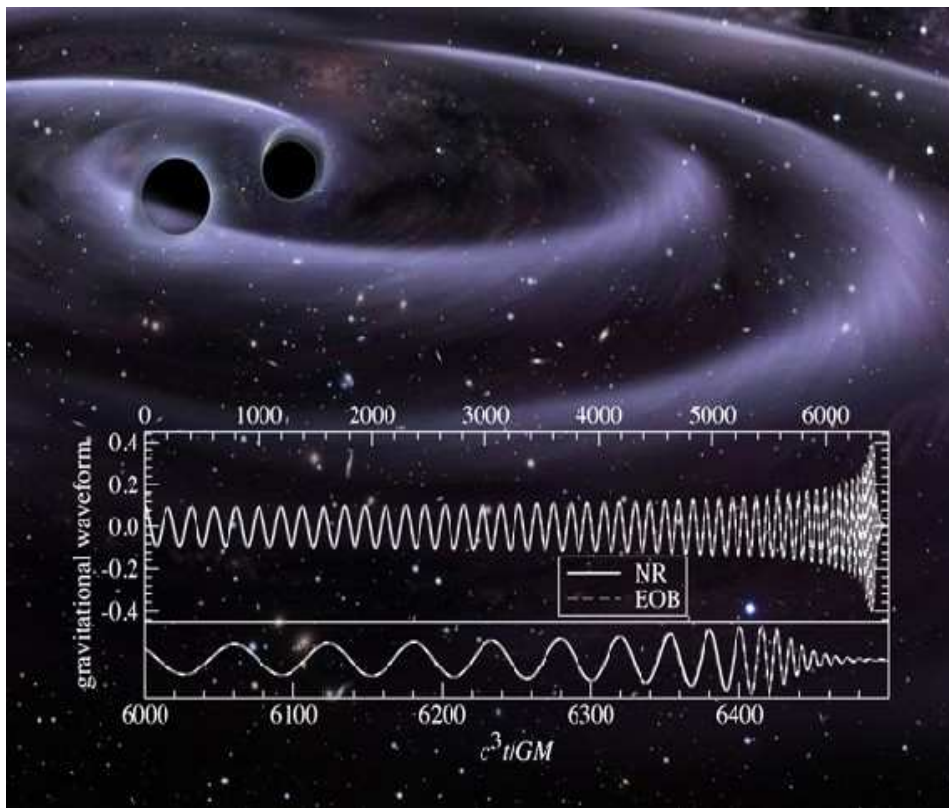
In der Regel ist die durch Gravitationswellen hervorgerufene Verzerrung der Raumzeit extrem minimal und daher nicht beobachtbar. Erst sehr große Massen erzeugen größere Verzerrungen, die dann ggf. auch gemessen werden können. Beispiele hierfür sind zwei sich umkreisende Neutronensterne oder Schwarze Löcher. Sie verlieren aufgrund der Gravitationswellen Energie, umkreisen sich daher immer enger und stürzen dann ineinander. Das folgende Bild zeigt zwei kompakte Objekte, die sich eng umkreisen:



(Bild 5)

Die Schwingungsdauer der Gravitationswelle entspricht einem halben Umlauf der Objekte. Umso näher sich die Objekte kommen, desto größer wird die Frequenz der Gravitationswellen. Im

Maximum können einige 100 Hertz erreicht werden. Das folgende Bild zeigt den Vorgang mit Angabe der sich ändernden Frequenzen:



(Bild 6)

Generell hängt die Frequenz der Gravitationswellen von der Objektmasse ab. Je größer die Masse des Objektes, desto kleiner die Frequenz bzw. desto größer die Wellenlänge. Die Frequenzen von Gravitationswellen liegen zwischen 10^{-18} und 10^4 Hertz. Zum Vergleich: Schallwellen im hörbaren Bereich liegen zwischen 20 und 20.000 Hertz. Sichtbares Licht liegt in einem Frequenzbereich von etwa 10^{12} Hertz.

Schnell rotierende, nicht rotationssymmetrische Neutronensterne erzeugen Gravitationswellen in einem Frequenzbereich von 10 bis 1.000 Hertz. Supermassive Schwarze Löcher in Zentren von Galaxien mit Millionen bis Milliarden Sonnenmassen erzeugen Gravitationswellen im Milli-Hertz-Bereich. Verschmelzende Schwarze Löcher mit ein Dutzend Sonnenmassen erzeugen Gravitationswellen mit Frequenzen von etwas unter 100 Hertz. Der gleiche Fall mit Schwarzen Löchern von etwas unter einer Sonnenmasse erzeugt Gravitationswellen von etwas über 100 Hertz.

Gravitationswellen transportieren große Mengen Energie. So erzeugt eine Supernova Gravitationswellen mit einer Energie von etwa einem Kilowatt pro Quadratmeter. Dies entspricht ungefähr der Energie, welche ein Quadratmeter Erdoberfläche von der Sonne erreicht. Allerdings verhält sich die Raumzeit steif, so dass diese Energien die Raumzeit nur extrem minimal verzerren. Aufgrund der minimalen Verzerrung der Raumzeit lassen sich Gravitationswellen nur sehr schwer nachweisen. Nur größere Verzerrungen der Raumzeit lassen sich mit entsprechend großflächigen Messgeräten nachweisen. Diese größeren Verzerrungen können wie oben geschildert durch kompakte, massereiche und sich eng umkreisende Objekte, Neutronensterne oder Schwarze Löcher, erzeugt werden. Auch eine Supernova kann eine größere Verzerrung der Raumzeit bzw. eine nachweisbare Gravitationswelle hervorrufen. Im folgenden Kapitel wird darauf eingegangen, wie Gravitationswellen zunächst indirekt nachgewiesen wurden. Anschließend wird auf den erstmals gelungenen direkten Nachweis von Gravitationswellen eingegangen.

4.0 Der Nachweis von Gravitationswellen

Gravitationswellen können indirekt oder direkt nachgewiesen werden. Der indirekte Nachweis gelang bereits in den 80er Jahren. Der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen erfolgte am 14.09.2015 und wurde am 11.02.2016 bekanntgegeben. Zunächst wird auf den indirekten Nachweis von Gravitationswellen eingegangen, bevor dann auf ihren direkten Nachweis eingegangen wird.

4.1 Der indirekte Nachweis von Gravitationswellen

Der indirekte Nachweis von Gravitationswellen gelang den Physikern Russel Hulse und Joseph Taylor von der Princeton University. Ausgangslage war die Entdeckung des Doppelpulsars PSR 1913+16 im Jahre 1974. Hierbei handelt es sich um zwei sich eng umkreisende Neutronensterne. Wie bereits in Kapitel 3 erläutert erzeugen die sich umkreisenden, kompakten Neutronensterne Gravitationswellen. Diese Gravitationswellen haben eine bestimmte Frequenz und damit eine bestimmte Energie. Die Energie von Wellen ist direkt proportional zu ihrer Frequenz. Die von den Gravitationswellen wegtransportierte Energie wird dem Neutronenstern-System entzogen. In Folge kommen sich die Neutronensterne immer näher und umkreisen sich mit immer höheren Geschwindigkeiten. Eines Tages werden sie ineinander stürzen. Die erwartete Energie der Gravitationswellen lässt sich im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie berechnen. Die Wissenschaftler Hulse und Taylor beobachteten den Doppelpulsar über viele Jahre und veröffentlichten ihre Ergebnisse Anfang der 80er Jahre. Die Beobachtungen zeigten, dass das System Energie verlor. Die Wissenschaftler konnten nachweisen, dass der Energieverlust des Systems genau dem Wert der zu erwartenden Energie der ausgesendeten Gravitationswellen entsprach. Damit war die Existenz der Gravitationswellen indirekt nachgewiesen und für viele Wissenschaftler galten die Gravitationswellen als evident. Die Physiker Russel Hulse und Joseph Taylor erhielten für ihre Entdeckung im Jahre 1993 den Physik-Nobelpreis. Es wurden in Folge weitere vergleichbare Systeme entdeckt, bei denen ebenfalls aufgrund ihres Energieverlustes indirekt Gravitationswellen nachgewiesen werden konnten. Doch sollten noch über 30 Jahre seit dem ersten indirekten Nachweis von Gravitationswellen vergehen, bis Gravitationswellen erstmals direkt nachgewiesen wurden.

4.2 Der direkte Nachweis von Gravitationswellen

Es gab einige Experimente, mit denen versucht wurde Gravitationswellen direkt nachzuweisen. Von 1957 bis 1959 entwarf Joseph Weber an Universität Maryland verschiedene Modelle für zylindrische Gravitationswellendetektoren. Im Prinzip handelte es sich dabei um einen etwa zwei Meter langen und einen halben Meter breiten Metallzylinder aus Aluminium mit einem Gewicht von einer Tonne. Dieser Zylinder musste quer zu den einfallenden Gravitationswellen ausgerichtet sein. Die oszillierenden Gravitationswellen sollten die Enden des Zylinders periodisch zusammendrücken und auseinanderziehen. Damit der Zylinder durch die Gravitationswellen zum Schwingen angeregt werden konnte, musste die Frequenz der Gravitationswellen im Bereich der Resonanzfrequenz des Zylinders liegen. Dies grenzte den Messbereich bereits ein. An den Zylindern wurden Kristalle als Sensoren befestigt, die den piezoelektrischen Effekt zeigten. Aufgrund dieses Effektes erzeugt eine mechanische Verformung der Kristalle einen elektrischen Strom, der gemessen werden kann. Mehrere Kristalle wurden in Reihe geschaltet, was den Strom verstärkte. Mehrere Forschungsgruppen in verschiedenen Staaten arbeiteten nach diesem Prinzip und variierten es. Allerdings blieben die Versuche mit den zylindrischen Gravitationswellendetektoren bisher erfolglos. Die Wirkung der Gravitationswellen ist sehr klein. Die Größenordnung der durch Gravitationswellen hervorgerufenen Verformung liegt im Bereich von 10^{-21} m. Hierzu ein Vergleich: Die Größenordnung des Atoms liegt bei 10^{-10} m und die des Atomkerns bei 10^{-15} m. Der durch Gravitationswellen hervorgerufene Effekt ist 100 Milliarden mal kleiner als der Durchmesser des Atoms und immer noch 10 Millionen mal kleiner als der Durchmesser des Atomkerns. Außerdem mussten alle anderen Einwirkungen auf den Zylinder ausgeschlossen werden. Das macht den Nachweis von Gravitationswellen extrem schwierig. Nachgewiesen wurden Gravitationswellen schließlich mit dem „Laser-Interferometer

Gravitationswellen-Observatorium“ LIGO (Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory). Ursprünglich gegründet wurde das LIGO von Ronald Drever (California Institute of Technology, Caltech), Kip Thorne und Rainer Weiss (Massachusetts Institute of Technology, MIT) im Jahre 1992. Mittlerweile sind an diesem Projekt hunderte Wissenschaftler in 40 Instituten weltweit beschäftigt. Der Detektor des LIGO besteht aus zwei senkrecht zueinander verlaufenden Röhren, durch die jeweils ein Laserstrahl läuft. Am Ende der Röhren befinden sich Spiegel, welche den Laser-Strahl wieder zurückwerfen. Dadurch kommt es zu Interferenzen, zu einer Überlagerung der (Laser-)Lichtwellen. D.h. die Lichtwellen addieren sich und es kommt zu einer daraus resultierenden Lichtwelle. Wenn ein Wellenberg auf einen Wellenberg bzw. ein Wellental auf ein Wellental trifft addieren sich die Wellen und es entsteht eine resultierende Welle mit einer größeren Amplitude. Trifft ein Wellenberg auf ein Wellental subtrahieren sich die Wellen bzw. löschen sich gegenseitig aus. Der ganze Vorgang wird Interferenz genannt und führt zu einem charakteristischen Interferenzspektrum. Eine durchlaufende Gravitationswelle staucht die eine Röhre des Interferometers, während sie die andere streckt. Auf diese Weise verkürzen bzw. verlängern sich die von den Laserstrahlen durchlaufenden Strecken. Die Überlagerung der Wellen verändert sich entsprechend und damit auch das Interferenzmuster. Schon sehr kleine Änderung führen zu einer Änderung des Interferenzmusters, was gemessen werden kann. Folgendes Bild zeigt den Advanced-LIGO-Detektor:



(Bild 7)

Bevor die Messwerte einer Gravitationswelle zugerechnet werden können, muss klar sein was für Werte zu erwarten sind. Die theoretische Physik stellte hierzu Modelle auf, auf deren Basis analytische und numerische Berechnungen die theoretisch zu erwartenden Werte lieferten. Diese Werte mussten dann mit den Messwerten des LIGO verglichen werden. Eine Übereinstimmung bedeutet den Nachweis von Gravitationswellen. Am 14.09.2015 war es dann so weit. An den Standorten Hanford und Livingston in den Vereinigten Staaten von Amerika zeichneten die Gravitationswellendetektoren ein vielversprechendes Signal (GW150914) auf. Die Auswertung ergab, dass die Messwerte den theoretischen Erwartungen entsprachen und diese nur durch Gravitationswellen erklärt werden konnten. Damit waren die Gravitationswellen erstmals direkt nachgewiesen worden.

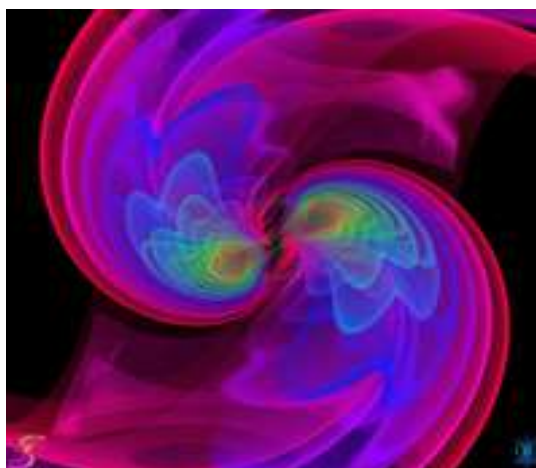
Der Öffentlichkeit wurde diese Entdeckung am 11.02.2016 mitgeteilt. Vermutlich gingen die Gravitationswellen von zwei verschmelzenden Schwarzen Löchern aus, die 1,3 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind. Die beiden Schwarzen Löcher mit 29 und 36 Sonnenmassen in einem Doppelsystem umkreisten sich immer enger, da das System Energie durch Aussendung von Gravitationswellen verlor. Anschließend stürzten sie ineinander und verschmolzen zu einem Schwarzen Loch mit 62 Sonnenmassen. Die Differenz von 3 Sonnenmassen wurde als Energie in Form von Gravitationswellen abgestrahlt, was einer Leistung von $3,6 \cdot 10^{49}$ W entspricht bzw. der Ruheenergie von 200 Sonnenmassen. Diese besonders starken Gravitationswellen konnten durch das LIGO gemessen werden.

5.0 Fazit und Ausblick

Die 1915 aufgestellte Allgemeine Relativitätstheorie postulierte die Existenz von Gravitationswellen. Sie stellen eine Verzerrung bzw. Kräuselung der vierdimensionalen Raumzeit dar. Dieser Effekt ist äußerst klein, so dass Gravitationswellen nur sehr schwer nachweisbar sind. Gravitationswellen transportieren zwar große Mengen Energie, doch führen diese aufgrund der Steifigkeit der Raumzeit zu keinen großen Effekten. Nur bei bestimmten Ereignissen, etwa der Verschmelzung von Neutronensternen bzw. Schwarzen Löchern und Supernovae, sind die Effekte durch Gravitationswellen etwas größer und kommen in den Bereich der Nachweisgrenzen.

Der indirekte Nachweis von Gravitationswellen gelang den Physikern Russel Hulse und Joseph Taylor von der Princeton University anfang der 80er Jahre. Ausgangslage war die Entdeckung des Doppelpulsars PSR 1913+16 im Jahre 1974. Dieses Doppelsystem verlor kontinuierlich Energie, was natürlich aufgrund der Kleinheit des Effekts erst nach jahrelanger Beobachtung festgestellt werden konnte. Der Wert des Energieverlustes entsprach genau der Energie der zu erwartenden Gravitationswellen. Für diese Feststellung erhielten Russel Hulse und Joseph Taylor im Jahre 1993 den Physiknobelpreis.

Verschiedene Versuche die Gravitationswellen direkt nachzuweisen scheiterten zunächst. Den Anfang machten zylindrische Gravitationswellendetektoren, welche von 1957 bis 1959 vom Physiker Joseph Weber entwickelt und auch von anderen Forschungsgruppen weltweit aufgegriffen wurden. Die durch Gravitationswellen hervorgerufene Verformung des Zylinders lag nach theoretischen Berechnungen bei 10^{-21} Metern, was 100 Milliarden mal kleiner als der Atomdurchmesser ist. Erst das „Laser-Interferometer Gravitationswellen-Observatorium“ LIGO brachte im September 2015 den Nachweis von Gravitationswellen. Der Detektor des LIGO besteht aus zwei Röhren, die senkrecht zueinander stehen und von Laser-Strahlen durchlaufen werden. Diese werden am Ende der Röhren durch Spiegel zurückgeworfen und überlagern sich mit den einlaufenden Wellen. Auf diese Weise kommt es zur Interferenz und zu charakteristischen Interferenzmustern. Treffen Gravitationswellen auf den Detektor, wird eine Röhre gestaucht und die andere gestreckt. In Folge ändert sich das Interferenzmuster, was nachgewiesen werden kann. Am 11.02.2016 wurde die Entdeckung der Gravitationswellen der Öffentlichkeit bekanntgeben. Folgendes Bild zeigt die Simulation der gemessenen Gravitationswellen:



(Bild 8)

Im Juni 2016 wurde vom LIGO bekanntgegeben, dass am 26.12.2015 ein weiteres Signal (GW151226) gemessen wurde. Dieses Signal soll von zwei verschmolzenen Schwarzen Löchern in 1,4 Milliarden Lichtjahren gekommen sein, welche 8 und 14 Sonnenmassen hatten. Das resultierende Schwarze Loch hat 21 Sonnenmassen, womit eine Energie von einer Sonnenmasse in

Form von Gravitationswellen abgestrahlt wurde. Entsprechende Signale werden mit GW für Gravitationswellen und dem Mess-Datum des Signals gekennzeichnet. Daher werden das Signal vom 14.09.2016 mit GW150914 und das vom 26.12.2015 mit GW151226 bezeichnet.

Der direkte Nachweis von Gravitationswellen ist nicht nur wieder eine Bestätigung für die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein. Vielmehr wird ein neues Beobachtungsfenster geöffnet. Die Gravitationswellen-Astronomie wird ein grundlegender Forschungszweig werden, da wir mit Hilfe von Gravitationswellen Informationen erlangen können, die wir mit anderen Beobachtungsmöglichkeiten bisher nicht erlangen konnten. So werden auch in den Anfängen des Universums vielfältige Quellen von Gravitationswellen vermutet. Unter anderem dürfte der Urknall selbst eine Quelle für Gravitationswelle sein. Eine weitere Quelle dürften die Supermassiven Schwarzen Löcher sein, welche bei der Bildung der Galaxien entstanden sein dürften. Doch auch die Vorgänge bei der Verschmelzung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern in Doppel- oder Mehrfachsystemen können durch Gravitationswellen besser verstanden werden. Denn nur diese liefern uns Informationen über diese Vorgänge. Elektromagnetische Strahlung oder Teilchenstrahlung bringen uns in diesen Fällen keine ausreichenden Informationen. Zunächst wird die Messtechnik zur Erfassung von Gravitationswellen weiter verfeinert und ausgebaut werden müssen, bevor die Forschung auf dem Gebiet der Gravitationswellen-Astronomie oder Gravitationswellen-Astrophysik vorangetrieben werden kann. Zweifellos wird das mit dem Erfolg des direkten Nachweises von Gravitationswellen im Rücken auch geschehen. Vor allem haben wir ein weiteres Beobachtungsfenster, um die Geheimnisse des Kosmos weiter zu enträtseln.

6.0 Schlusswort

Diese Abhandlung stellt eine Literaturrecherche zum Thema „Gravitationswellen“ dar. Dabei sind die neusten Forschungsergebnisse mit eingeflossen. Die verwendete Literatur und die verwendeten anderen Quellen sind im Literaturverzeichnis angegeben. Die Entdeckung der Gravitationswellen markiert den Beginn eines neuen Forschungszweiges. Jetzt geht es nicht mehr nur um den Nachweis von Gravitationswellen, sondern darum aus den Gravitationswellen Informationen über astronomische und kosmische Sachverhalten zu erlangen. Bewusst wurde in dieser Abhandlung auf eine streng mathematisch-physikalische Behandlung des Themas verzichtet. Es geht hier vor allem um eine anschauliche Darstellung zum Themenkomplex Gravitationswellen. Die Forschung wird natürlich vorankommen, so dass diese Abhandlung nur eine Momentaufnahme des gegenwärtigen Wissensstandes zu Gravitationswellen sein kann.

Andreas Schwarz

Wilhelmshaven, 28.09.2016

7.0 Literatur-, Quellen- und Bilderverzeichnis

- 1) Arnold Hanslmeier, Einführung in die Astronomie und Astrophysik, 2013.
- 2) Andrew Liddle, Einführung in die Kosmologie, 2009.
- 3) Kip S. Thorne, Gekrümmter Raum und verbogene Zeit, 1994.
- 4) Albert Einstein, Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, 1917/1992.
- 5) Ernst Schmutzer, Relativitätstheorie Aktuell, 1996.
- 6) <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/gravitationswellen/> Abgerufen: 02/2016.
- 7) Astronomie + Raumfahrt im Unterricht Nr. 155 / Gravitationswellen, Ausgabe 5/ 10.2016.
- 8) Sterne und Weltraum, 09.2016.

Bilder: 1,4,5,7 und 8 <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/gravitationswellen/>

Bild 2: <http://www.heise.de/>,

Bild 3: <http://www.spektrum.de/>

Bild 6: <http://www.geo600.org/2337/de>

Alle Bilder wurden im Februar 2016 abgerufen