

Mariengymnasium Papenburg  
Am Stadtpark 29/31  
26871 Papenburg

# **Gravitationswellen**

**Suche nach einem neuen Fenster ins Weltall**

Facharbeit im Leistungskurs Physik

Verfasserin: Nancy Erickson

Fachlehrer: Gerhard Johannsen

Abgabetermin: 22. März 2002 in der 5. Stunde

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einführung .....	2
2. Gravitationswellen .....	2
2.1. Einsteins Pionierarbeit .....	2
2.2. Welleneigenschaften .....	3
2.3. Quellen der Gravitationswellen .....	7
2.4. Der Pulsar PSR1913+16 als Quellenbeispiel .....	8
3. Nachweis von Gravitationswellen durch Messversuche .....	9
3.1. Der Webersche Zylinder .....	9
3.2. Das Michelson-Interferometer .....	10
3.2.1. Geschichtliche Hintergründe .....	10
3.2.2. Aufbau .....	10
3.2.3. Störquellen und deren Isolierung .....	12
4. Projekte zur Messung von Gravitationswellen .....	13
4.1. Übersicht über derzeit laufende Projekte .....	13
4.2. GEO 600 .....	14
4.3. LIGO .....	14
5. Zukunftsaussichten .....	15
5.1. Zukunftsprojekte .....	15
5.2. Gravitationswellenastronomie – Astronomie der Zukunft .....	16
5.3. Fazit .....	18
6. Literaturverzeichnis	
7. Versicherungen	

## **1. Einführung**

In den letzten Jahren wurde häufig zur Entschlüsselung des Universums nach neuen Möglichkeiten im Bereich der Astronomie gesucht, die in Form von Gravitationswellen (GW) vermutet werden, wobei jetzt alle Kräfte auf direkte Messungen konzentriert sind. In der vorliegenden Arbeit möchte ich mich schwerpunktmäßig mit den Eigenschaften von GW befassen, dem Pulsar PSR1913+16, der als derzeit sicherster und zuverlässigster Beweis für die Existenz von GW gilt, sowie mit mehreren direkten Nachweisversuchen durch Messungen, bei denen ich mich hauptsächlich auf den in den Projekten GEO 600 und LIGO benutzten Nachfolger des Michelson-Interferometers beschränken möchte, wie auch auf diese beiden Projekte als solche, die besonders durch ihre enge Zusammenarbeit und ihren baldigen Messbeginn hervorstechen, während sich eine lange Geschichte des Nachweisversuches von GW über Einstein, Michelson und Weber bis hin zur modernen Technologie skizzieren lässt. Mein Ziel ist es, mit dieser Facharbeit einen Überblick über GW, ihre Herkunft und ihre Nachweisbarkeit sowie über Zukunftsmöglichkeiten, die sich aus einer neuen Ära der Astronomie ergeben, zu geben.

## **2. Gravitationswellen**

### **2.1. Einsteins Pionierarbeit**

Die Grundidee der von Albert Einstein 1915 aufgestellten Allgemeinen Relativitätstheorie besagt, dass die Materie die Krümmung des Raumes und der Raum die Bewegung der Materie bestimmt ([3], S. 35). Daraus erkannte Einstein 1916, dass beschleunigte Massen eine wellenförmige Veränderung des Raumes herbeiführen, ähnlich wie beschleunigte Ladungen elektromagnetische Wellen produzieren. Einsteins Theorie zufolge breiten sich diese Verzerrungen der Raumzeit wellenförmig, transversal und mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die Tatsache, dass Gravitationskraft Zeit braucht, um zwischen Massen zu wirken ([11], S. 58-59) und das Feld dabei als Vermittler dient (Feldtheorie), bestärkt die Existenzannahme von GW als Schwingungen der Raumzeit, die indirekt durch die Allgemeine Relativitätstheorie bewiesen werden können, da beschleunigte Massen Energie in Form von GW abstrahlen müssen ([1], S. 15). GW sind aber für einen Nachweis durch Laborexperimente zu schwach, wie es Einsteins

Quadrupolformel von 1918 beweist:  $h_{\mu\nu} = \frac{2G}{rc^4} \frac{d^2}{dt^2} \left[ Q_{\mu\nu} \left( t - \frac{r}{c} \right) \right]$ , wobei  $h_{\mu\nu}$

die relative GW-Amplitude (oder GW-Stärke),  $r$  (m) den Abstand von der Masse,  $t$  (s) die Zeit und  $Q_{\mu\nu}$  das Quadrupolmoment ( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}$ ) darstellt. Trennt

man den Faktor  $\frac{2G}{c^4}$  mit der Gravitationskonstante  $G \approx 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$

und der Lichtgeschwindigkeit  $c \approx 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  heraus, erhält man den extrem kleinen genäherten Wert von  $1,65 \cdot 10^{-44} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ([3], S. 37), der die besonderen Messanforderungen in so kleiner Größenordnung verdeutlicht und Einsteins Vermutung, dass ein „experimentelle[r] Nachweis [...] aussichtslos“ ([16], S. 49) sei, bestätigt. Die Quadrupolformel besagt desweiteren, wieviel Energie ein System in Form von GW abstrahlt, sowie, dass unsymmetrische Systeme GW abstrahlen, was bedeutet, dass sich ein symmetrischer Stern beliebig schnell drehen kann und niemals GW aussenden wird, weil die Raumzeit durch einen solchen Stern nicht verzerrt wird. Ein einzelner unsymmetrischer Stern ist jedoch keine optimale Quelle für GW, da er keine genügend große Drehbewegung besitzt, sondern eher Binärsysteme beispielsweise bestehend aus Neutronensternen mit quadrupolarer Struktur und großen Beschleunigungen ([11], S. 63). Insgesamt emittieren nur beschleunigte Massenquadrupole GW, wobei gilt: je asymmetrischer, also ellipsenförmiger ein Stern ist, desto mehr Energie in Form von GW strahlt er ab.

Einige Wissenschaftler sind aber aufgrund ihrer fehlerhaften und extrem schwierigen Berechnung und den auf expandierende und nicht auf schrumpfende Binärsysteme hindeutende Vermutungen skeptisch gegenüber der Existenz von GW, und selbst Einstein versuchte 1936 jedoch vergeblich, ihre Existenz zu widerlegen, da er der Meinung war, seine exakte Theorie der Schwerkraft ließe GW nicht zu ([16], S. 49). Ein direkter Nachweis von GW durch Messungen wäre also für die fundamentale Physik von entscheidender Bedeutung und würde Einsteins Relativitätstheorie erneut bestätigen.

## 2.2. Welleneigenschaften

Bei einem Vergleich der Feldkonstanten des Coulomb-Gesetzes mit  $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ , das die Kraft zwischen elektrischen Ladungen definiert und des Newtonschen Gravitationsgesetzes mit  $f \approx 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ , das die

Kraft zwischen Massen beschreibt, geht aus den zwei extrem unterschiedlichen Werten hervor, dass Gravitation eine sehr schwache Kraft ist und GW dementsprechend von heftigsten kosmischen Ereignissen herrühren müssen, um überhaupt nachgewiesen werden zu können. Solche Ereignisse verzerren die Raumzeit, so dass sich diese Verzerrungen wellenförmig in alle Richtungen ausbreiten und im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen, die durch Materie gestreut oder absorbiert werden, nur unbedeutend geschwächt werden ([6], S. 103). In der Nähe einer GW-Quelle, beispielsweise einer Supernova im Galaxiezentrum, ist die Raumzeit extrem gestört und verzerrt, so dass Massen im Umfeld zerreißen. Die relative GW-Amplitude  $h$  nimmt antiproportional zum Quellenabstand  $D$  ab ( $h \sim 1/D$ ). Das bedeutet, dass GW von weit entfernten Quellen noch messbar, jedoch beim Erreichen der Erde extrem schwach sind, so dass sie eine relative Abstandsänderung von  $10^{-24}$  bis  $10^{-18}$  hervorrufen ([1], S. 15). Dies entspräche einer Längenänderung des Abstands Sonne - Erde um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms und zeigt, dass die Raumzeit ein relativ starres System ist. Um die relative Stärke der GW zu bestimmen, kann man einen Kreis mit dem Radius  $l$  (m) aus Testmassen verwenden, der sich durch eine GW in eine pulsierende Ellipse mit der Abweichung  $\delta l$  (m) von der Kreisgestalt verwandelt (vgl. Abb. 2), da GW die Charaktereigenschaft besitzen, Massen zu strecken und gleichzeitig senkrecht dazu zu stauchen (vgl. Abb. 1), wobei sich dieser Vorgang periodisch während des GW-Durchlaufes wiederholt.

Top: Gravitational waves shrink and stretch space in a quadrupolar manner, with motion simultaneously in two directions. (By contrast, dipolar electromagnetic waves, like those emitted by a radio transmitter, consist of electric fields that alternate within one plane.) Bottom: Imagine you are a source of gravitational waves that are hitting the Earth. This image sequence suggests how our planet would be distorted by the wave's passage as seen from your vantage point. (The distortions are exaggerated by many orders of magnitude.)

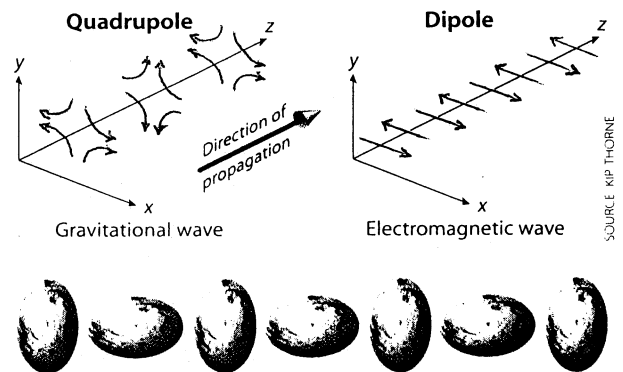


Abb. 1, ([13], S. 44)

Dies beruht vor allem auf folgender Tatsache: „The tensor character of gravity (the putative graviton is a spin-2 particle) means that the push/pull pattern of the strain field for a plane gravitational wave has two orthogonal polarisations“ ([4], keine Seitenangabe). Für die relative GW-Amplitude  $h$  gilt:

$h = 2\delta l / l$  (vgl. Abb.2). Mit  $l = 1,0 \text{ m}$  und  $\delta l = 5,0 \cdot 10^{-19} \text{ m}$  beträgt diese  $h = 2(5,0 \cdot 10^{-19} \text{ m}) / 1,0 \text{ m} = 10^{-18}$ .

Zwei umeinander kreisende Neutronensterne senden Gravitationswellen aus, die zur Erde gelangen. Sie verzerren das Raumzeitgefüge und damit auch die Länge  $l$  der Arme eines Michelson-Interferometers. Als Stärke oder Amplitude der Gravitationswelle bezeichnet man die relative Längenänderung  $\delta l/l$ .

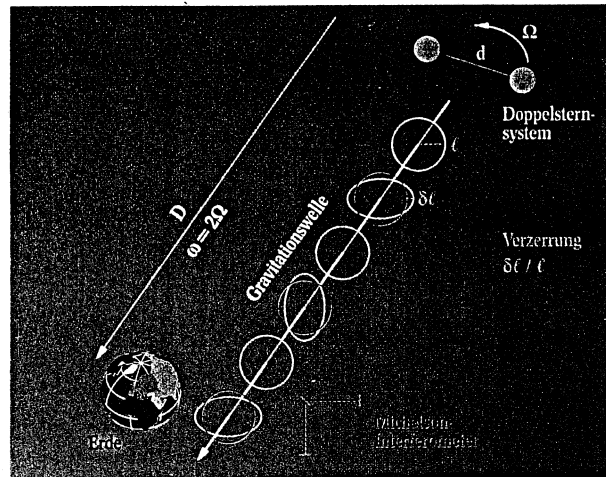


Abb. 2 ( [2], S. 34 )

Für die daraus resultierende relative Phasenveränderung  $\delta_p$  für die auf dem Photodetektor eines Interferometers interferierenden Teillaserstrahlen gilt

$$\delta_p(t) \cong 2 \cdot \omega_0 \cdot \frac{L}{c} \cdot h(t) \quad [\delta_p] = \text{s}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \quad ([2], \text{S. 34})$$

mit der Frequenz  $\omega_0$  (Hz), der relativen GW-Amplitude  $h$ , sowie der Lichtlaufzeit  $2L/c$  (s) als Quotient aus der Interferometerarmlänge  $L$  (m) und der Lichtgeschwindigkeit

$c \approx 3,0 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Trifft nun eine GW mit  $\omega_0 = 100 \text{ Hz}$  (z.B. bei einer annähernden Kollision eines Doppelsternsystems) auf ein Interferometer mit  $L = 600 \text{ m}$  (GEO 600), erhält man für die relative Phasenveränderung  $\delta_p \cong$

$$(2 \cdot 100 \text{ s}^{-1} \cdot 600 \text{ m} \cdot 10^{-18}) / (3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) \approx 4 \cdot 10^{-21},$$

die wahrscheinlich nur mit einem GW-Detektor der zweiten Generation registriert werden kann. Die Signaldauer beträgt dabei nur einige hundertstel Sekunden, bei der die theoretisch mit einem Verstärker hörbare Frequenz zwischen  $10^{-18}$  bis  $10^4 \text{ Hz}$  liegt, der angenommene messbare Bereich hingegen erst oberhalb von  $10^{-4} \text{ Hz}$  ([1],

S. 15).

Da GW nur bei extremen kosmischen Ereignissen emittiert werden, muss folglich auch ihre Strahlungsleistung  $P$  (W) sehr hoch sein. Für diese gilt

$$P \approx \frac{G}{c^5} \omega^6 \sum Q_{\alpha\beta}^2 \quad [P] = \text{m}^7 \cdot \text{s}^5 \cdot \text{kg}^2 \cdot \text{s}^{-8} \cdot \text{m}^{-5} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{J} \cdot \text{s}^{-1} = \text{W}$$

(1.) mit der Gravitationskonstante  $G \approx 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ , der Lichtge-

schwindigkeit  $c \approx 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , der Frequenz  $\omega \text{ (s}^{-1}\text{)}$  und dem Quadrupolmoment  $Q_{\alpha\beta} \text{ (m}^2 \cdot \text{kg)}$  der Massenverteilung, das die Abweichung der Masse von der Kugelform angibt. Bei kugelförmigen Massen fällt dieser Faktor weg und es werden keine GW abgestrahlt. Für  $Q_{\alpha\beta}$  gilt im Erd – Sonnensystem näherungsweise  $m \cdot r^2$  mit der Erdmasse  $m \text{ (kg)}$  und dem Erd – Sonnenabstand  $r \text{ (m)}$ , wobei die Sonne aufgrund ihrer „festen“ Lage im Zentrum nicht zum Quadrupolmoment beiträgt ([14], S. 101 – 102). In Gl. (1.) eingesetzt erhält man für  $P \approx \frac{G}{c^5} \cdot \omega^6 (m \cdot r^2)^2 = \frac{G}{c^5} \cdot \omega^6 \cdot m^2 \cdot r^4$  (2.). Setzt man nun für  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  mit

der Periodendauer  $T \text{ (s)}$  ein, gilt  $P \approx \frac{G}{c^5} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^6 m^2 r^4 = \frac{G}{c^5} \left( \frac{2\pi r}{T} \right)^6 \frac{m^2}{r^2}$  (3.).

Stellt man  $\omega = \frac{v}{r}$  nach der Bahngeschwindigkeit  $v \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$  um, gilt  $v = \omega \cdot r =$

$\frac{2\pi r}{T}$  und in Gl.(3.) eingesetzt ergibt  $P \approx \frac{G}{c^5} v^6 \frac{m^2}{r^2}$  (4.). Nun folgt ein Kraft-

ansatz, bei dem die Newtonsche Gravitationskraft  $F_G \text{ (N)}$  mit der Zentripetal-

kraft  $F_z \text{ (N)}$  gleichgesetzt wird:  $G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$ , wobei bei  $F_G$   $r$  den Schwer-

punktabstand der beiden Massen  $M$  des Zentralkörpers (hier die Sonne) und  $m$  der Erde, bei  $F_z$   $r$  den Bahnradius (beides in m) darstellt ([8], S. 9f.). Durch

Kürzen erhält man für  $v^2 = \frac{MG}{r}$ , was in Gl. (4.) eingesetzt  $P \approx \frac{G}{c^5} \left( \frac{MG}{r} \right)^3 \frac{m^2}{r^2}$

(5.) ergibt. Durch Erweiterung mit  $G$  und  $c$  erhält man  $P \approx$

$\frac{Gc^{10}}{c^5 G^2} \left( \frac{MG}{rc^2} \right)^3 \left( \frac{m^2 G^2}{r^2 c^4} \right) = \frac{c^5}{G} \left( \frac{MG}{rc^2} \right)^3 \left( \frac{mG}{rc^2} \right)^2$  (6.). Durch Einsetzen der

Gleichungen für die Schwarzschildradien, die angeben, wann Licht aufgrund der extremen Gravitationskraft der Masse nicht mehr entweichen kann,

$R_1 = \frac{2MG}{c^2}$  und  $R_2 = \frac{2mG}{c^2}$  erhält man  $P \approx \frac{c^5}{G} \left( \frac{R_1}{r} \right)^3 \left( \frac{R_2}{r} \right)^2$ , wobei die Klam-

merausdrücke durch Einheitenwegkürzung (beides m/m) dimensionslos sind

und deshalb für  $P \approx \frac{c^5}{G} [\text{P}] = \text{m}^5 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-5} \cdot \text{m}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} = \text{J} \cdot \text{s}^{-1} = \text{W}$

näherungsweise  $3,6 \cdot 10^{52}$  W herauskommt. Vergleicht man diesen extrem großen Wert mit der Strahlungsleistung der Sonne mit  $10^{26}$  W, erkennt man, dass eine solche Abstrahlung nur für Sekundenbruchteile, wie etwa bei einer Supernova stattfinden kann ( [14], S. 101 – 103 ), da sich sonst die gesamte Masse in GW-Energie auflösen müsste.

### 2.3. Quellen der Gravitationswellen

GW sind nur auf kosmische Ereignisse zurückzuführen, bei denen quadrupolare Massen ausreichend groß, kompakt und stark beschleunigt sind. Dies sind vor allem rotierende Neutronensterne, Schwarze und superschwere Schwarze Löcher mit einer GW-Länge von mehreren Millionen Kilometern, sowie rotierende Doppelsternsysteme bestehend aus beispielsweise zwei Schwarzen Löchern oder Neutronensternen, wie der Pulsar PSR1913+16, die sich im Frequenzbereich von messbaren  $10^{-4}$  Hz bis zu einigen Hertz befinden, in dem vom Urknall herrührende Signale vermutet werden. Im hochfrequenten Bereich von bis zu einigen Kilohertz befinden sich Supernovae – verursacht durch den Gravitationskollaps eines ausgebrannten Sterns zu Neutronensternen oder Schwarzen Löchern -, bei denen die abgestrahlte Energie  $10^{45}$  J beträgt, wovon 1% durch GW frei wird ( [1], S. 16 ), sowie Kollisionen mit anschließender Verschmelzung von Doppelsternsystemen. Dabei gilt: je größer die Kollisionsmasse (ca. 20 – 30 Sonnenmassen), desto mehr Energie wird in Form von GW abgestrahlt und desto länger ist die Signaldauer ( [12], S. 22 ).

Besonders gute Quellen sind aus einer Supernova entstandene Schwarze Löcher, wobei die Schockwellen des Kollapses aufgrund der extremen Gravitation nicht entweichen können, im System erhalten bleiben und eine stark asymmetrische Form bewirken ( [9], S. 56 ), deren Verformungen anschließend durch GW-Abstrahlung „abgegeben“ werden. Weitere gute Quellen sind Kollision und Verschmelzung von Doppelsternsystemen bestehend aus Schwarzen Löchern, bei denen aufgrund neuester Berechnungen per Computersimulation mehr Energie frei wird, als bislang angenommen, und zwar 3% der Gesamtmasse, was ca.  $10^{49}$  Watt entspricht und ein sehr ermutigendes Ergebnis für die GW-Forschung darstellt. Dabei rührt die Spiralstruktur der GW von der Rotation des Schwarzen Loches her: „*Nachdem ein Puls starker Raumverzerrung nach außen gelaufen ist, kehrt im Zentrum wieder Ruhe ein*“ ( [12],



S. 22 ). Beim Verschmelzen von superschweren Schwarzen Löchern mit  $10^6 - 10^9$  Sonnenmassen bei einem Galaxiezusammenstoß entsteht eine gut messbare hohe Signalamplitude, durch die man durch mehrere Detektoren befähigt wäre, die Quelle und deren Lage in einer bestimmten Galaxie zu bestimmen. Außerdem wäre die Materiedichte des Universums durch mathematische Berechnungen ermittelbar und würde Aufschluss über die Zukunft des Universums geben ( [1], S.17 ).

#### **2.4. Der Pulsar PSR1913+16 als Quellenbeispiel**

Ein erster indirekter Nachweis von GW gelang 1974 durch die Astronomen Russel Hulse und Joseph Taylor mit der Entdeckung eines rasch rotierenden Neutronensterns, der um einen unsichtbaren Begleiter rotiert und in regelmäßigen Zeitabständen messbare Radiowellen in Form von gepulster Strahlung aussendet, was die Bestimmung der Umlaufbahn und die Messung von dem „*Energieverlust durch Abstrahlung von Gravitationswellen*“ ( [15], S. 86 ) ermöglicht. Außerdem ist dieses binäre System sehr eng und massereich und bewegt sich auf einer ellipsenförmigen Bahn, stellt also aufgrund starker Beschleunigung beste Voraussetzungen für GW dar. Hulse und Taylor stellten in 20-jähriger Beobachtung fest, dass die Bahnperiode des Pulsars um 0,076 ms pro Jahr abnimmt und erhielten für ihre Arbeit 1993 den Nobelpreis der Physik ( [10], S. 369 ). Diese Abnahme der Bahnperiode ist auf Energieverlust durch GW zurückzuführen, da die Bahnbewegung des Pulsars als Energiequelle für GW dient. Die Beobachtungen stimmten mit denen der Relativitätstheorie um 0,3% Abweichung überein: „*Gravitational waves are clearly being emitted, though they have not been observed directly*“ ( [13], S. 43 ). Eine direkte Messung der durch den Pulsar abgestrahlten GW mit einem GW-Detektor ist nicht möglich, da diese derzeit zu schwach sind. Erst wenn sich die Sterne kurz vor ihrer Kollision mehrere hundert Mal pro Sekunde fast mit Lichtgeschwindigkeit umkreisen, wird eine deutliche Messung aufgrund der erheblich verzerrten Raumzeit und den in immer höherer Frequenz abgestrahlten GW möglich sein, was jedoch erst in ca. 200 Millionen Jahren stattfinden wird ( [13], S. 43 ). Allerdings werden die Interferometer in den nächsten Jahren technisch so weit entwickelt sein, dass sie die Kollisionen anderer Binärsysteme entdecken können. Insgesamt stellt die Entdeckung und Beobachtung

des Pulsars PSR1913+16 eine deutliche Ermutigung für die GW-Forschung dar, da der Pulsar der bisher deutlichste und überzeugendste Beweis für die Existenz von GW ist.

### **3. Nachweis von Gravitationswellen durch Messversuche**

#### **3.1. Der Webersche Zylinder**

Ende der 60er Jahre wagte Joseph Weber den Versuch zu einem direkten Nachweis von GW durch Messungen mit Resonanzantennen in einer Entfernung von 2000 km voneinander, indem er je einen Detektor in Washington und Chicago aufstellte, die später durch einen dritten in Maryland ergänzt wurden. Die Entfernung der Detektoren diente zur Ausschließung von lokalen Störquellen und zur Bestätigung eines GW-Empfangs bei Koinzidenzmessung. Der Webersche Detektor selbst war ein vibrationsfrei in einer Vakuumkammer aufgehängter 1,5 t schwerer Aluminiumzylinder, in dessen Umfang sich ein Gürtel aus piezoelektrischen Quarzen befand. Traf nun eine GW senkrecht zur Zylinderachse ein, wurde der Zylinder zu Resonanzschwingungen angeregt, und die Piezoquarze erzeugten durch Stauchung des Zylinders elektrische Impulse, die mit einem Messverstärker registriert werden konnten. Nachteile dieser Detektoren waren die Richtungsgebundenheit durch Zylinderform und die schmale Frequenzbandbreite von  $1660 \text{ Hz} \pm 0,003 \text{ Hz}$  (Schmalbanddetektor), da das thermische Rauschen bei Zimmertemperatur eine starke Empfindlichkeitsschranke darstellte. Die meisten registrierten Schwingungen rührten also von dieser Störquelle her, so wahrscheinlich auch die vielen Koinzidenzmessungen 1969, die bisher nicht bestätigt werden konnten ([14], S. 104 – 106).

Webers Arbeit gab aber den Anstoß dazu, sich ernsthaft mit dem Nachweis von GW zu beschäftigen, neue Messmethoden wie das Interferometer zu entwickeln und Modernisierungen an den Resonanzantennen durchzuführen, wie beispielsweise kugelförmige Antennen zur Umgehung der Richtungsabhängigkeit, Kühlung bis an den Nullpunkt gegen Wärmestörungen sowie die Verwendung von hochempfindlichen supraleitenden Verstärkern (SQUIDs), die die Funktion der Piezoquarze übernehmen ([1], S. 15), die jedoch alle ohne bisherige Messergebnisse blieben.

## 3.2. Das Michelson-Interferometer

### 3.2.1. Geschichtliche Hintergründe

In den Jahren 1881 bis 1887 bewiesen Albert Michelson und Edward Morley mit ihrem Interferometer, dass „*die Lichtgeschwindigkeit in Richtung der Erdbewegung und senkrecht dazu gleich ist*“ ([16], S. 52) und widerlegten damit die Äthertheorie, nach der das Universum mit einem bestimmten Stoff ausgefüllt ist. Mit diesem Interferometer in modernisierter und abgewandelter Form versucht man heute, die Existenz von GW durch direkte Messungen nachzuweisen. Das moderne Interferometer geht vor allem auf Rainer Weiss zurück, der 1970 Webers Messversuche neu entdeckte und eine detaillierte Studie über verschiedene Detektorformen, insbesondere über Laserinterferometer durchführte ([5], S. 57).

Zunächst wurden ab 1975 mehrere Prototypen der Laserinterferometer von 3 – 40 m Armlänge gebaut und auf Empfindlichkeitseinflüsse, technische Anforderungen und Isolierungen gegen mögliche Rauschquellen oder Störungen getestet ([1], S. 18). Diese waren für die Messung von GW jedoch nicht geeignet, da sie eine viel zu kurze Armlänge für eine Signalaufnahme aufwiesen.

### 3.2.2. Aufbau

Da GW den Raum strecken und gleichzeitig dazu senkrecht stauchen, muss das Interferometer, wie Weiss erkannte, in der Lage sein, den relativen Längenunterschied in zwei Richtungen zu messen und besitzt daher zwei Arme in L-förmiger Anordnung, in deren Winkel sich ein halbreflektiver Spiegel (vgl. Abb. 3, Strahlenteiler) befindet, um die von einem leistungsstarken und frequenzstabilen Infrarotlaser mit der Leistung  $P = 10 \text{ W}$  und der Wellenlänge  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  ([2], S. 36) ausgehenden Lichtstrahlen gleichmäßig in beide Arme zu lenken, an deren Ende sie durch Spiegel total reflektiert werden (vgl. Abb. 3,  $M_3$  und  $M_4$ ). Durch mehrmaliges Hin- und Herreflektieren des Laserstrahls erhält man eine höhere Detektorempfindlichkeit, da die Auslenkung proportional zur Laserlichtstrecke wächst und dadurch besser registrierbar ist. Die optimale Armlänge, die allein wegen der Erdkrümmung nicht realisierbar ist, beträgt eine halbe GW-Länge ( $\approx 150 \text{ km}$  bei  $1 \text{ kHz}$ ), da der Effekt der Empfindlichkeitssteigerung in der nächsten Halbwelle umgekehrt würde ([1], S. 18). Am Ende der Laserlichtstrecke passieren die Strahlen erneut den halb-

reflektiven Spiegel, der sie um  $180^\circ$  invertiert, so dass sie auf dem Photodetektor interferieren, sich gegenseitig auslöschen und Dunkelheit auf dem Detektor herrscht (vgl. Abb. 3, normaler Zustand). Hierbei spricht man von destruktiver Interferenz, da Wellenberg und Wellental aufeinander treffen. Dabei wird das Licht jedoch nicht vernichtet, sondern nur umverteilt und kann mit einem zusätzlichen Spiegel (vgl. Abb. 3,  $M_1$ ) wieder konstruktiv in das Interferometer eingespeist werden, was den Streuverlust des Lichtes ausgleicht und die Lichtstärke  $P$  auf 10 kW erhöht. Dieses Verfahren nennt man „Power-Recycling“ (Leistungsrückführung) und wird bei allen bisherigen Projekten verwendet ([1], S. 19 f.). Das „Signal-Recycling“ ist eine ähnliche Methode, wird jedoch vorerst nur bei GEO 600 installiert. Die durch eine GW ausgelenkten Teilstrahlen ober- und unterhalb der Lichtfrequenz verlassen das Interferometer am Ausgang, wo ein weiterer Spiegel (vgl. Abb. 3,  $M_2$ ) diese so genannten Seitenbänder, nicht jedoch gestreutes Licht resonant überhöht und eine bis zu 10-fache Signalüberhöhung erzeugt ([3], S. 40). Trifft nun eine GW auf das Interferometer, werden die beiden Armlängen und daher auch das Interferenzmuster auf dem Photodetektor verändert, wobei Wellenberg auf Wellenberg trifft, konstruktive Interferenz herrscht und durch Helligkeit ein Signal erzeugt wird (vgl. Abb. 3, Signal).

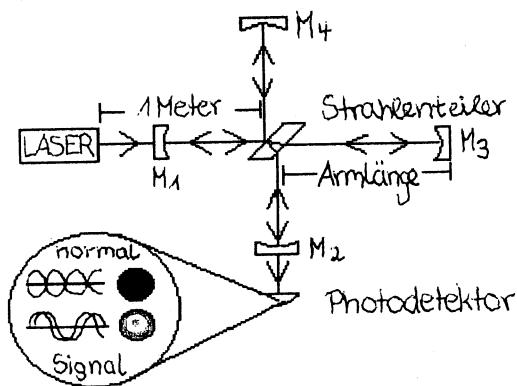


Abb.3,  
eigene Abbildung nach ([2], S. 35 )  
und ([13], S. 42 )

$M_1$  : „Power-Recycling“ Spiegel

$M_2$  : „Signal-Recycling“ Spiegel

$M_3 ; M_4$  : total reflektive Spiegel

Die dabei entstehende Phasendifferenz gleicht dem Längenunterschied beider Arme. Diese Phasendifferenzmessung dient als direkte Messung der Raumzeitveränderung durch eine GW, wodurch das Interferometer flexibler als eine Resonanzantenne ist, da es außerdem mit der Änderung der Spiegelposition entweder für eine breitbandige Suche über Frequenzbandbreiten von einigen

kHz für alle Quellen oder für eine schmalbandige, wesentlich empfindlichere Suche über wenige Hz bei bereits bekannten Quellen eingesetzt werden kann ([3], S. 40). Diese Vorteile eines solchen Breitbanddetektors können auch in Zukunft nach der Entdeckung einiger GW-Quellen effektiv genutzt werden.

### 3.2.3. Störquellen und deren Isolierung

Die Detektorempfindlichkeit wird durch eine Vielzahl von Störquellen terrestrischer oder interferometerinterner Herkunft beschränkt, durch die es häufig zu einer Wellenfrontverzerrung und damit zur Erzeugung falscher Signale kommt. Zur Abschirmung dieser Störquellen werden Edelstahlröhren mit 60 cm Durchmesser als Interferometerarme verwendet und in einem Graben aufgehängt. In den Röhren herrscht ein Ultrahochvakuum von  $10^{-11}$  bar, was zur Vermeidung von lichtstreuenden Luftschlieren und organischer Beschmutzung der optischen Elemente dient und durch magnetisch, also erschütterungsfrei gelagerte Turbomolekularpumpen erzeugt wird ([2], S. 36).

Seismische Störungen werden durch Erschütterungen des Bodens, Verkehr, Wind, Wasser (Meeresdünung) und den Menschen erzeugt, die im tiefen schwer herauszufilternden Frequenzbereich von 10 – 100 Hz liegen. Die Schwingungsisolierung des Interferometers hingegen wird in aktive und passive Komponenten unterteilt: *„Im aktiven Teil werden die Schwingungsamplituden mit Geophonen gemessen und durch Piezoaktuatoren weitgehend kompensiert“* ([2], S. 35). Der passive Teil besteht aus einem komplexen Dämpfungssystem aus Edelstahl, Gummi und einer monolithischen Spiegelaufhängung aus Quarzglas und -fäden zur Vermeidung von Reibungsverlusten, mit dem Frequenzen über 40 Hz einfach herausgefiltert werden, wobei zu *„kleineren Frequenzen hin [...] die Schwingungsisolierung immer aufwendiger“* ([1], S. 19) wird.

Thermisches Rauschen in dem mittleren Frequenzbereich von ca. 100 Hz stellt den größten Störfaktor dar und wird durch Dicke- oder Biegeschwingungen der Spiegel verursacht, weil das Laserlicht nicht perfekt reflektiert werden kann, sondern zu einem minimalen Teil absorbiert wird, die Spiegel aufheizt und deren Atome zur Wärmebewegung anregt, wodurch eine Lichtauslenkung zustande kommt. Einen Ausweg bietet die Verwendung homogener und hochreflektiver Quarzglasspiegel in zylindrischer Form, eine Interferometerabkühlung mit einer Höchsttemperatur  $T$  von derzeit technisch unmöglichen 4 K, da

man zum einen nur mit Strahlungs- und nicht mit Gaskühlung arbeiten kann, und zum anderen die thermische Amplitude nur proportional zur Wurzel aus  $T$  abnimmt ([7], S. 24 f.), sowie eine Verlagerung der Rauschfrequenz über die zu messende Frequenz.

Weitere Störungen sind Lichtfluktuationen, verursacht durch Überreste von Gasmolekülen in den Interferometerröhren, sowie das Schrot- und Strahlungsdruckrauschen im hohen Frequenzbereich. Das Schrotrauschen wird durch Photonenzahlschwankungen auf der Photodiode erzeugt, kann jedoch durch eine Laserleistungserhöhung abgeschwächt werden. Dabei nimmt aber das Strahlungsdruckrauschen zu, und eine Verminderung beider Rauschquellen verlangt nach einer Lichtleistung von genau 1 MW, die derzeit in keinem verwendbaren Laser vorhanden ist und eine zusätzliche Aufheizung der optischen Elemente nach sich ziehen würde ([1], S. 19). Einen annähernden Ausweg bietet hier das „Power-Recycling“.

Insgesamt können die Störquellen nie ganz beseitigt werden und die Beseitigung einer Quelle bewirkt oft die Verstärkung einer anderen. Die beste „Isolierung“ gegen Störquellen ist jedoch noch immer die Koinzidenzmessung.

#### **4. Projekte zur Messung von Gravitationswellen**

##### **4.1. Übersicht über derzeit laufende Projekte**

Es gibt im allgemeinen zwei verschiedene Detektortypen, Resonanzantenne und Interferometer, wobei letzteres bei den weltweit fünf fertiggestellten oder sich noch im Bau befindlichen Projekten verwendet wird. Dieses weltweite Netz besteht aus dem amerikanischen LIGO, dem mit 450 Mio. DM teuersten Projekt (siehe 4.3.), dem deutsch-britischen GEO 600 bei Hannover (siehe 4.2.) und VIRGO, einem italienisch-französischen Projekt in der Nähe von Pisa mit 3 km Armlänge und Kosten von rund 150 Mio. DM durch eine besondere seismische Isolierung, dessen Datenaufnahme 2002 beginnt.

Schließlich gibt es noch das australische AIGO 400 in der Nähe von Perth mit einer Armlänge von 400m und zuletzt das mit einer Armlänge von nur 300m kleinste, aber auf technische Entwicklung und Erprobung spezialisierte japanische TAMA 300 in Mitaka mit Kosten von 20 Mio. DM, dessen Messbeginn schon 2000 stattgefunden hat ([1], S. 19 und [10], S. 369). Diese Projekte benutzen alle den gleichen Laser, „Power-Recycling“ und sind für hohe Töne im Frequenzbereich von einigen Hz bis kHz empfindlich. Sie sind außerdem auf

Zusammenarbeit und Datenaustausch angewiesen, da mindestens zwei Anlagen in großer Entfernung voneinander benötigt werden, um einen GW-Empfang zu beweisen, da eine Koinzidenzmessung innerhalb von 10 ms und Übereinstimmung von Amplitude und Wellenform nötig sind, um Störsignale auszuschließen. Ein Vergleich von mindestens vier Anlagen ist notwendig, um vollständige Informationen über Polarisation und Position der Quelle durch Messung der Differenz der Ankunftszeit zu erlangen ([3], S. 41). Ein einziger Detektor wäre demzufolge nur bei einer langandauernden und periodischen Abstrahlung von GW dazu in der Lage, die Quelle, wie etwa ein eng rotierendes Doppelsystem zu lokalisieren und wäre beim Empfang auf Zusatzindikatoren wie Röntgen- oder Gammastrahlung, bei einer Supernova auf gleichzeitig eintreffende Lichtstrahlen, angewiesen ([16], S. 54).

#### **4.2. GEO 600**

Nachdem der Bau und die Testphase von mehreren Interferometer-Prototypen ab 1975 abgeschlossen war, startete das deutsch-britische Projekt GEO im Jahr 1989, dessen Bau 1995 mit Kosten von 10 Mio. DM bei Hannover begann und inzwischen abgeschlossen ist ([2], S. 34). Die aus Kostengründen kürzere Armlänge von nur 600 m gegenüber anderen Projekten kompensiert GEO 600 durch Verwendung modernster optischer Elemente und Lasertechnik, und verwendet beispielsweise als einziges Projekt duales Recycling, bestehend aus „Power-“ und „Signal-Recycling“, sowie eine monolithische Spiegelaufhängung und die Möglichkeit, die Empfangsfrequenz durch Veränderung der Spiegelposition zu variieren ([1], S. 19 – 20). Die wissenschaftliche Inbetriebnahme ist für Ende 2002 geplant, bei der GEO 600 und LIGO eine besonders enge Zusammenarbeit mit gemeinsamer Datenanalyse und Ergebnisveröffentlichung führen werden, während ein bereits gemeinsam absolvierter Probelauf zwischen Ende Dezember 2001 und Mitte Januar 2002 mit anschließender Detektoroptimierung stattgefunden hat ([2], S.38). Die Frequenzbandbreite von GEO 600 liegt zwischen 50 Hz und 1,5 kHz und richtet sich demnach auf GW aus, die vornehmlich von Supernovae und kollidierenden Doppelsystemen herrühren.

#### **4.3. LIGO**

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) besteht aus zwei 4 km langen Anlagen, von denen sich eine in Hanford, WA, und eine in

Livingston, LA, befindet, während die in Hanford befindliche eine Schwesterantenne mit 2 km Armlänge besitzt. Die Entfernung der beiden großen Detektoren beträgt 3030 km und dient dazu, lokale Störungen durch Koinzidenzmessung innerhalb von 10 ms auszuschließen: „*In addition, the shape and size of the wave should be identical in both places*“ ( [5], S. 58 ), wobei diese Merkmale bei der kleinen Anlage aufgrund der halben Länge genau halb so groß sein müssen. Außerdem werden alle eingehenden Signale mit 20.000 – 30.000 errechneten Modellsignalen verglichen, um ein echtes Signal von einem falschen unterscheiden und erkennen zu können, von welchem kosmischen Ereignis ein solches herrührt: „*According to computer simulations, this system [of two inward spiraling neutron stars] can produce many possible wave patterns because the signal depends on both the masses of the neutron stars and their orientation as viewed from earth*“ ( [5], S. 59 ).

Ende dieses Jahres wird der wissenschaftliche Messbetrieb zusammen mit GEO 600 aufgenommen, während größere Verbesserungen nach dessen Beispiel für 2004 geplant sind. Diese enthalten den Einbau eines leistungsstärkeren Lasers, reiner und wärmeableitender Saphirspiegel, eines effektiveren Dämpfungssystems mit Priorität auf passive Komponenten, sowie die Installation einer monolithischen Spiegelaufhängung ( [5], S. 59 ). Als zentraler Verbesserungspunkt wird die Absenkung des thermischen Rauschens gesehen, wodurch die Bandbreite des Detektors, welche derzeit zwischen 100 und 3.000 Hz liegt, auf eine untere Grenze von 10 Hz gesenkt wird. Selbst nach solchen tiefgreifenden Verbesserungen wird die gesamte Lebenserwartung von LIGO auf nicht mehr als 30 Jahre geschätzt ( [4] ), da es in geraumer Zeit von LIGO II, einem Zukunftsprojekt als Detektor der zweiten Generation mit einer erheblich gesteigerten Empfindlichkeit abgelöst wird.

## **5. Zukunftsaussichten**

### **5.1. Zukunftsprojekte**

Bereits in Planung sind LIGO II und das Weltraumprojekt LISA. LIGO II wird ähnliche technische Fortschritte aufweisen wie die in den Verbesserungsvorschlägen von LIGO genannten Komponenten, sowie eine Temperatursenkung bis nahe dem Nullpunkt ( $-273^{\circ}$  C), wodurch GW-Amplituden von bis zu  $10^{-24}$  m nachgewiesen werden sollen. Beträgt die Detektionsentfernung von LIGO nur 300 Mio. Lichtjahre, könnte die von LIGO II 6 Milliarden



Lichtjahre betragen. Könnte LIGO eine Supernova in unserer Galaxie 1-3 mal in hundert Jahren messen, so könnte LIGO II hingegen mit einer Entfernung von 60 Mio. Lichtjahren zur Quelle 2-3 Messungen pro Jahr registrieren ([5], S. 59). Die einzig wesentliche Empfindlichkeitsbegrenzung von LIGO II stellt das Photonenrauschen dar.

LISA (Laser Interferometer Space Antenna), dessen Bau ESA bereits angefangen hat, soll 2010 in den Weltraum starten, wo drei Satelliten die Eckpunkte eines Interferometers mit 5 Mio. km Armlänge bilden, das tiefe Töne im Frequenzbereich unter 1 Hz messen soll, die von der Kollision Schwarzer Löcher und Doppelsterne, sowie vom Urknall in sehr schwacher Form herrühren ([16], S. 55). Die Lage im Weltraum ermöglicht die Umgehung seismischer Störungen und der Unschärferelation durch ein perfektes Vakuum. Desweiteren erfordert die Messung tiefer Frequenzen aufgrund ihrer Langwelligkeit eine extrem große Anlage, für die sich nur im Weltraum genügend Platz findet.

## **5.2. Gravitationswellenastronomie – Astronomie der Zukunft**

Die direkte Messung von GW würde Entdeckungen und Erkenntnisse auf einem völlig neuen Astronomiegebiet mit Informationen über den Aufbau und die Entwicklung des Universums, sowie die Sammlung notwendiger Daten für die fundamentale Physik ermöglichen und die Allgemeine Relativitätstheorie erneut bestätigen, da diese die Existenz von GW vorhersagt.

GW liefern andere Informationen als Röntgenstrahlung, Licht- und Radiowellen, da diese nur Aufschluss über den physikalischen Zustand (Temperatur, Alter, Bestandteile etc.), nicht aber über die Bewegung der Masse geben.

Außerdem können diese Wellen- bzw. Strahlungsarten gestreut oder absorbiert werden, wodurch ihre Informationen verfälscht werden oder verloren gehen.

Dies geschieht insbesondere durch so genannte Dunkelwolken, die weite Teile des Universums verdecken und elektromagnetische Strahlen, die Basis der herkömmlichen Astronomie, absorbieren ([1], S. 16).

Durch GW-Astronomie könnte man detailliertere Informationen über andere GW-Quellen, die sich nicht im elektromagnetischen Bereich befinden und demnach unentdeckt sind, erhalten, da die meisten GW-Quellen keine elektromagnetischen Strahlen aussenden ([2], S. 38), sowie über die Verteilung von Neutronensternen, Schwarzen Löchern etc. Dazu würde sich die Frage durch

einen genaueren Wert für die Materiedichte im Universum beantworten, ob das Universum ewig weiter expandiert oder am Ende kollabiert.

Da GW durch Masse hindurch laufen und „*keinerlei Wechselwirkung mit Materie zeigen*“ ( [2], S. 38 ), sind sie von  $10^{-35}$  Sekunden nach dem Urknall in schwacher Form vorhanden, während die kosmische Hintergrundstrahlung erst 300.000 Jahre später entstanden ist, als die Temperatur für die Entstehung von Wasserstoff aus Protonen und Elektronen niedrig genug war ( [13], S. 43 ).

Diese Primordialwellen wurden in alle Richtungen ausgesandt und sind wahrscheinlich mit einem GW-Detektor der zweiten Generation messbar, wodurch man Informationen über den Urknall, die Entstehung und das genaue Alter des Universums erhalten würde.

Erhält man gesicherte Informationen über die Eigenschaften der GW, würde sich eine der vier Theorien über GW bewahrheiten, bei denen man zwischen Einsteins Theorie mit transversalen und sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden GW, der Theorie der GW als Longitudinalwelle, einer langsameren GW aufgrund der Massebehaftung eines Gravitons und einer anders polarisierten GW unterscheidet ( [1], S. 15 ).

Eine direkte Messung der GW würde desweiteren helfen, die Gravitonen, aus denen GW aufgrund der Parallelen zu den aus Photonen bestehenden elektromagnetischen Wellen bestehen müssten, besser zu beschreiben und dadurch die Krümmung der Raumes zu verstehen, wenn man von folgender Annahme ausgeht: da Gravitonen „*alle Wirkungen der Gravitation zwischen allen Objekten des Universums, die Masse besitzen*“ ( [6], S. 109 ), vereinen, also Energie besitzen, dadurch schwer sind und unter dem Einfluss anderer Gravitonen stehen müssten, der sie, ähnlich wie Elektronen beim Elektromagnetismus, auf gekrümmte Bahnen lenkt, wodurch schließlich die Raumkrümmung zustande kommt ( [6], S.109 ).

Insgesamt würde die GW-Messung ein genaueres Bild über das Aussehen und die Quellen der GW liefern und eine vollständigere Vorstellung vom Universum ermöglichen als herkömmliche Astronomiemethoden es tun. Diese GW-Astronomie könnte also ein neues, unbekanntes Fenster mit erweiterten Erkenntnissen über die Vergangenheit und Zukunft ins Weltall aufstoßen.

### 5.3. Fazit

Die bisherigen Ergebnisse der GW-Forschung, insbesondere der indirekte Existenzbeweis von GW durch den Pulsar PSR1913+16 und die neuesten Computerberechnungen von höheren GW-Abstrahlungen als bisher angenommen, sind sehr ermutigend für deren direkte Messung und lassen wenig Raum für Zweifel an deren Existenz. Dabei spielen Resonanzantennen als Schmalbanddetektoren mit begrenzteren Verbesserungsmöglichkeiten im Gegensatz zu den Interferometern eine eher untergeordnete Rolle. Das Weltraumprojekt LISA ist nun auch keine Zukunftsvision mehr, sondern befindet sich im Anfangsstadium seines Baus. Dies ist das bislang ehrgeizigste Projekt in Bezug auf GW.

Mit dem diesjährigen Messbeginn von GEO 600 und LIGO könnten bereits Anfang nächsten Jahres erste Messergebnisse vorliegen, wobei eine Modernisierung in naher Zukunft die „Reichweite“ der Interferometer ausdehnt und die GW-Astronomie, sowie neue Betrachtungsweisen unseres Universums möglich machen. Zwar ist die Empfindlichkeit der Interferometer aufgrund der Vielzahl von insbesondere detektorinternen Störungen begrenzt, die gewonnenen Informationen würden jedoch unvergleichliche Erkenntnisse über das Weltall liefern.

## 6. Literaturverzeichnis

- 1.) Aufmuth, Peter und Rüdiger, Albrecht: „Gravitationswellen – ein neues Fenster zum Universum“ in: Physik in unserer Zeit, 31. Jahrg. 2000, Nr.1, S. 14-21
- 2.) Aufmuth, Peter und Danzmann, Karsten: „Auftakt zum Konzert der Sterne“ in: Physik Journal, Nr.1 2002, S. 33-38
- 3.) Aufmuth, P. und Tiemann, E.: „Gravitationswellen“ in: Praxis der Naturwissenschaften, Juli 2000, S. 35-41
- 4.) Barish, Barry C. und Weiss, Rainer: „LIGO and the Detection of Gravitational Waves“ in: Physics Today, October 1999, ohne Seitenangabe
- 5.) Bartusiak, Marcia: „Catch a Gravity Wave“ in: Astronomy, October 2000, S. 54-59
- 6.) Calder, Nigel: „Einsteins Universum“, Frankfurt am Main 1980, Umschau Verlag
- 7.) Danzmann, Karsten: „Das ist ein ständiger Kampf“ in: Spektrum der Wissenschaft, März 2002, S. 24-25
- 8.) Fischer, Tilo und Dorn, Hans-Jerg: „Physikalische Formeln und Daten“, Stuttgart 1982, Klett Verlag
- 9.) Frank, Adam: „The Dynamic World of General Relativity“ in: Sky & Telescope, October 2000, S. 50-56
- 10.) Grehn, Joachim und Krause, Joachim: „Metzler Physik“, Hannover 1998<sup>3</sup>, Schroedel Verlag
- 11.) Kennefick, Daniel: „A Prehistory: Gravitational Waves“ in: Sky & Telescope, October 2000, S. 58-64
- 12.) Pössel, Markus: „Lazarus und das große Fressen“ in: Spektrum der Wissenschaft, März 2002, S. 16-22
- 13.) Sanders, Gary H. und Beckett, David: „LIGO: An Antenna tuned to the Songs of Gravity“ in: Sky & Telescope, October 2000, S. 41-48
- 14.) Sexl, R. und H.: „Weiße Zwerge – Schwarze Löcher“, Braunschweig 1985<sup>2</sup>, Vieweg Verlag
- 15.) Weisberg, Joel M., Taylor, Joseph H. und Fowler, Lee A.: „Pulsar PSR1913+16 sendet Gravitationswellen“ in: Spektrum der Wissenschaft, 1987, S. 84-94

16.) Wolschin, Georg: „Jagd auf Gravitationswellen“ in: Spektrum der Wissenschaft“, Dezember 2000, S. 48-55