

# Ein **theoretischer** Gravitationswellendetektor

Hochecker Hans-Joerg, Donaustr. 22, 30519 Hannover  
e-mail

Abstrakt: Das Messen von Gravitationswellen ist von fundamentaler Bedeutung für viele Bereiche der Physik. Hier können wir etwas über die Gravitation erfahren und die allgemeine Relativitätstheorie wird auf die Probe gestellt, welche sich ja von der speziellen Relativitätstheorie ableitet. Sowohl die Gravitation als auch die Relativitätstheorie sind wichtige Teile der Physik. Leider aber ist das messen von Gravitationswellen mit Hilfe von Interferometern sehr, sehr aufwendig. Um so wichtiger ist es, einfachere Methoden zur Messung von Gravitationswellen zu finden. Ich stelle in dieser Arbeit **eine weitere, wenn auch nur theoretische, Methode** vor. **Vielleicht wird es in fernerer Zukunft Möglichkeiten geben, sie zu realisieren.**

Schlüsselwörter: Gravitationswellen, Detektoren, Relativitätstheorie, Gravitation  
PACS: 04.30.-w; 04.30.Db; 04.30.Nk; 04.80.Nn; 95.55.-n; 95.55.Ym;

Gravitationswellen [Literatur ] werden zur Zeit mit Hilfe von Interferometern [Literatur ] gesucht. Es ergeben sich allerdings viele Probleme [Probleme bei der Messung von GW]. Die größten Probleme entstehen wegen der thermisch bedingten Schwankungen [ ] und wegen der seismischen Erschütterungen [ ]. Der wesentliche Grund für diese Probleme ist, dass die Längenänderungen, welche die Gravitationswellen am Interferometer bewirken, sehr klein sind [ ]. Dies liegt an der geringen Kraft der Gravitation. Aus diesem Grund sind die noch am besten messbaren Quellen [ ] für Gravitationswellen explodierende Sterne [ ]. Bei diesen Explosionen ergeben sich charakteristische Wellenmuster bei den Gravitationswellen [ ] mit charakteristischen Frequenzen [Frequenzen bei GW]. Man hofft nun, diese Wellenmuster in den entsprechenden Frequenzen herauszufiltern [Filter ]. Zu diesem Zweck muss das Interferometer eine möglichst hohe Auflösung haben [Auflösung von Interferometern]. Ein gutes Mittel eine hohe Auflösung zu erzielen, ist es, die Armlänge des Interferometers möglichst groß zu machen. Doch selbst mit großen Armlängen [ GEO 600, USA, Japan ..] können die zahlreichen Probleme nur mühsam gelöst werden, wie sich gezeigt hat. Aus diesem Grund wird man jetzt das Interferometer im Weltraum installieren; dies ist das berühmte LISA-Projekt [ ]. Bei LISA werden drei Satelliten in eine Umlaufbahn um die Sonne gebracht, und zwar so, dass sie ein Interferometer mit gewaltiger Armlänge bilden. Man darf erwarten, dass LISA hervorragende Ergebnisse liefern wird.

Man geht prinzipiell davon aus, dass Gravitationswellen recht häufig vorkommen [ ]. Sie messen zu können, würde der Physik und speziell der Astrophysik ein neues Fenster [Beobachtungsfenster der Astrophysik] eröffnen. Gravitationswellen-Detektoren wären hier ein vollkommen neuer Typ des Beobachtungsinstruments, so etwas wie eine neue Art von Teleskop. Das Problem sind hier allerdings die enorm hohen Kosten [Kosten für LISA] für solche Detektoren. Um so wichtiger erscheint es, nach neuen und kostengünstigeren Methoden der Gravitationswellen-Messung zu suchen. Solche Ansätze gibt es bereits: [alternative Methoden zur Gravitationswellen-Messung]

In dieser Arbeit wird eine weitere, alternative Methode zur Messung von Gravitationswellen vorgestellt. Die hier vorgestellte Idee basiert auf Winkeländerungen. Jede einseitige Längenänderung - wie sie durch Gravitationswellen bewirkt wird - erzeugt Winkeländerungen. Ändert man z.B. in einem Dreieck die Länge einer Seite, dann ändern sich alle Winkel in dem Dreieck. Natürlich sind Winkeländerungen, welche durch Gravitationswellen bewirkt werden, genau so klein, wie die Längenänderungen, welche die Gravitationswellen bewirken. Aus diesem Grund wird nicht der Winkel direkt gemessen, sondern es wird die Ablenkung gemessen, welche von der Winkeländerung erzeugt wird. Diese Ablenkung ist um so größer, je länger die Strecke ist, deren Winkel sich ändert. In Skizze 1 ist zu sehen, was gemeint ist.

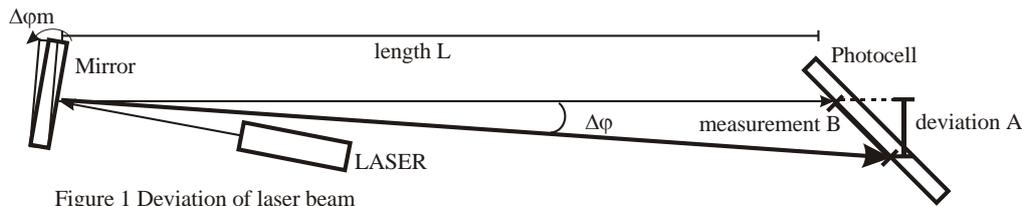


Figure 1 Deviation of laser beam

Man erkennt sofort, dass die Ablenkung (A) um so größer ist, je größer die Strecke L ist. Es macht natürlich Sinn, die Ablenkung eines Laserstrahles zu messen. Hier könnte man dann die Vakuum-Strecken der bereits vorhandenen Gravitationswellen-Interferonmeter verwenden. Beim GEO 600 wäre L dann immerhin 600 Meter lang. Um den Effekt noch zu verstärken, kann man die Photozelle schräg zum Laserstrahl stellen: man erkennt (in Skizze 1), dass die Länge der Messung B größer ist als die Ablenkung A.

Wie kommt jetzt die Winkeländerung zustande? Betrachten wir hierzu Skizze 2. Die Gravitationswelle (GW) ändert hier *nur* die Länge in x-Richtung. Dadurch ändert sich der Winkel ( $\varphi_1$ ), mit welchem der Laserstrahl (b1) vom Laser kommt. Der Winkel des Spiegels ändert sich in analoger Weise ( $\varphi_{m1}$ ). Die Änderungen von  $\varphi_1$  und  $\varphi_{m1}$  führen nun automatisch zu einer Änderung des Reflexionswinkels bzw. des Winkels, den der Laserstrahl nach der Reflexion hat ( $\varphi_2$ ). In Skizze 2b ist dies für eine Verkürzung der x-Richtung (überdeutlich) dargestellt. Man erkennt, dass die Änderung des Winkels des Spiegels die Winkeländerung des Laserstrahles noch unterstützt.

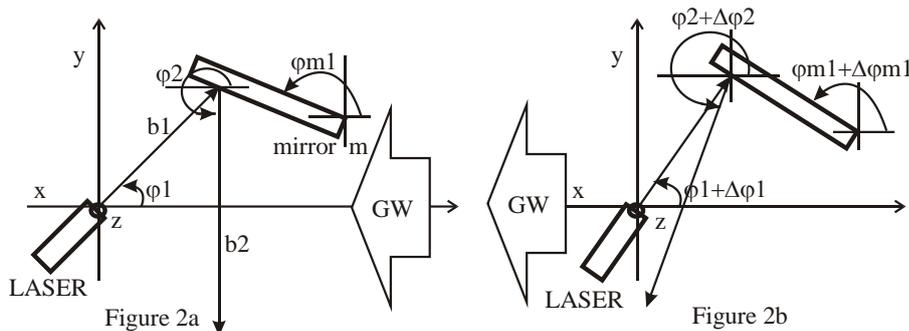


Figure 2a

Figure 2b

Leider aber ist auch hier der Effekt (die Ablenkung A) immer noch **viel zu klein**, als dass er jemals gemessen werden könnte. Wir müssen also versuchen, die Ablenkung des Laserstrahles zu verstärken. Der naheliegendste Gedanke (Idee) funktioniert hier tatsächlich: Der Laserstrahl wird einfach mehrfach reflektiert. Bei jeder Reflexion kommt eine weitere Winkeländerung hinzu. Hier ergeben sich zwei Probleme: 1. Die Winkeländerungen dürfen sich nicht gegenseitig aufheben. 2. Der insgesamt vom Laserstrahl zurückgelegte Weg darf nicht zu lang sein, da auch die Gravitationswelle nur kurz wirkt (gemäß  $c = L \cdot f$ ). Es lassen sich viele verschiedene Aufbauten für Reflexionswege finden, welche ich hier aber nicht alle im einzelnen ansprechen möchte.

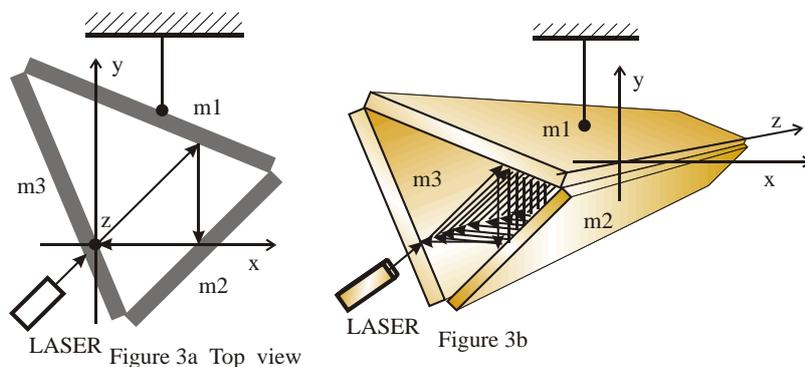


Figure 3a Top view

Figure 3b

Der am einfachsten zu realisierende Weg erscheint mir letztendlich folgender zu sein: Man baut mit **vier** Spiegeln ein **Trapez** auf, wie dies in Skizze 3 zu sehen ist, und schickt einen Laserstrahl hinein. Am einfachsten wird alles, wenn Spiegel und Laserstrahl so aufgebaut werden, dass der Laserstrahl

immer an seinem Ausgangspunkt zurückkehrt, wie in Skizze 3a, der Draufsicht, zu sehen ist. In Skizze 3a bewegt sich der Laserstrahl nur in der x-y-Ebene. Tatsächlich aber bekommt der Laserstrahl einen winzigen Winkel in z-Richtung. Auf diese Weise bewegt sich der Laserstrahl in z-Richtung durch den Hohlraum, den die vier Spiegel bilden, hindurch, und erreicht nach zahlreichen Reflexionen schließlich das andere Ende der Spiegel, wo er austritt (Skizze 3b). Die Zahl der Reflexionen, bis zum Austritt ergibt sich durch die Länge der Spiegel in z-Richtung ( $L_z$ ) und durch den Winkel ( $\varphi_z$ ) des Laserstrahls in z-Richtung. Bei sehr kleinem  $\varphi_z$  können sich sehr viele Reflexionen ergeben, selbst wenn  $L_z$  klein ist. Solange sich das Spiegelgebilde nicht verformt, wird der Laserstrahl mit unverändertem Winkel an einem der vier Reflexionsspiegel austreten. Sobald aber eine Gravitationswelle das Spiegelgebilde verformt (z.B. in x-Richtung verkürzt), ändern sich die Winkel des Trapezes und die des Laserstrahls. Da die Winkel dann nicht mehr übereinstimmen, wird der Laserstrahl mit jeder Reflexion stärker von seinem ursprünglichen Weg und Winkel abweichen. Und bei der Vielzahl der Reflexionen addiert sich dies zu einer ganz erheblichen Abweichung auf. Die Größe der Spiegel spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. Tatsächlich ist es am günstigsten, wenn die Spiegel möglichst klein sind, damit der insgesamt zurückgelegte Weg möglichst klein ist. Wenn der Laserstrahl mit jedem Reflexionsdreieck z.B. nur 0.01 Meter zurücklegt, dann kann er innerhalb einer einzigen Wellenlänge einer Gravitationswelle mehrer hundert mal reflektiert werden.

Leider aber hat die Winkelabweichung, welche sich aus jedem Reflexionszyklus ergibt, die selbe Größenordnung wie die Längenänderung, welche durch die Gravitationswellen bewirkt wird. Da sich diese Winkelabweichungen linear aufaddieren, wären etwa  $10^{15}$  Reflexionszyklen nötig, um ein messbares Ergebnis zu erhalten. Dies ist natürlich viel zu viel. Man kann aber die Linearität verhindern, indem man die Spiegelflächen krümmt. Mit jeder Winkeländerung ändern sich nämlich auch die Position, an welcher der Laserstrahl auf den Spiegel trifft. Wenn der Spiegel gekrümmt ist, dann ändert sich mit der Position auch die Reflexionsebene, und dies verstärkt die Winkelabweichung zusätzlich. Aber auch hier würde sich nur dann ein messbarer Effekt ergeben, wenn die Krümmung der Spiegel extrem groß wäre. Bei so großen Krümmungen aber geht der Laserstrahl sehr schnell verloren. Man müsste also anstelle des Laserstrahles einen sehr, sehr feinen Teilchenstrahl oder Gamma-Strahl nehmen, und anstelle der Spiegel bräuchte man vielleicht gekrümmte Reflektoren auf Atomarer Ebene. Vielleicht ließe sich ein Halbleitermaterial entsprechend dotieren? Wenn dies gelänge, dann würde sich der Winkel, des von ihm ausgesandten Strahles, durch eine Gravitationswelle ändern.

Wichtig ist hier, dass das Reflexionsgebilde so klein ist (gestaltet werden kann), dass es im Vergleich zur Ablenkungsstrecke  $L$  (Skizze 1) als beinahe punktförmig angesehen werden kann. Dies hat Bedeutung. Denn bei den Reflexionen im Inneren des Reflexionsgebildes ändert der Laserstrahl nicht nur seinen Winkel, sondern auch seine Position. Bei einem geräumigeren Spiegelgebilde müssten diese Ablenkungen berücksichtigt werden, was zu vielen praktischen Problemen führen würde. Unser kleines, kompaktes Reflexionsgebilde dagegen erzeugt im wesentlichen nur eine deutliche Winkeländerung, sobald es von einer Gravitationswelle beeinflusst wird.

Andere Einflüsse dagegen können sehr gut isoliert werden. Die Temperatur kann wegen der geringen Größe relativ leicht niedrig und konstant gehalten werden.

Seismische Einflüsse können durch eine einfache, eindimensionale Aufhängung (z.B. an einem Draht, wie in Skizze 3 angedeutet) kontrolliert werden, denn jede seismische Schwingung, die nur durch einen einfachen Draht geht, kann leicht gemessen werden, und entweder herausgerechnet oder kompensiert werden.

Auch kann die Position des aufgehängten Reflexionsgebildes leicht kontrolliert und gehalten werden (z.B. mit Hilfe von kleinen Laserimpulsen auf Positionskorrekturflächen). Solche Positionskorrekturen haben kaum Einfluss auf die im Inneren des Reflexionsgebildes erzeugten durch Gravitationswellen bedingte Winkeländerungen.

Natürlich ist die hier vorgestellte Idee eine nur sehr theoretische Möglichkeit. Andererseits können solche Ideen auch oft auf überraschende Weise realisiert werden. Hier hätte man dann einen Gravitationswellendetektor im Taschenformat.