

Kapitel 2

Wie wirken Gravitationswellen auf mich und Materie?

Wellen und ihre Auswirkungen sind sehr vielfältig. Einige Wellen, die wir aus dem Alltag kennen, können wir wahrnehmen oder spüren, z. B. Schallwellen oder Meereswellen. Manche Schallwellen bleiben aber für uns unhörbar, weil sie zu hohe oder zu tiefe Frequenzen haben. Lichtwellen können wir mit unseren Augen sehen, aber andere elektromagnetische Wellen wie Radiowellen oder Röntgenstrahlung nicht. Röntgenstrahlung ist sogar gefährlich, weil sie viel Energie enthält, die unseren Körper schädigen kann, wenn wir intensiver Röntgenstrahlung ausgesetzt sind. Wie ist das nun bei den Gravitationswellen? Müssen wir uns vor ihnen in Acht nehmen? Was passiert, wenn wir von Gravitationswellen getroffen werden? Das schauen wir uns in diesem Kapitel genauer an.

Zunächst lasse ich im ersten Interview einen ausgewiesenen Experten zu Wort kommen, der sich schon seit Jahrzehnten mit Gravitationswellen befasst und viele wichtige Forschungsbeiträge dazu geleistet hat.

2.1 Kann eine Gravitationswelle zum Schwarzen Loch kollabieren, Herr Schäfer?

1. Herr Prof. Dr. Schäfer, seit wann beschäftigen Sie sich mit Gravitationswellen, und was motivierte Sie dazu?

G. Schäfer: Mit Gravitationswellen beschäftige ich mich seit 1979, nachdem auf dem 9. Texas Symposium über Relativistische Astrophysik im Dezember 1978 in München vom ersten indirekten Nachweis der Gravitationswellen berichtet worden war. Es ging dabei um Bahnbeobachtungsdaten vom Hulse-Taylor-Pulsar (Kap. 6), mit spektakulärer Bestätigung der damals noch kontrovers diskutierten Quadrupolformel der gravitativen Strahlungsdämpfung. Gemäß dieser Quadrupolformel verkürzt sich die Bahnumlaufperiode des Doppelneutronensternsystems – einer der beiden Neutronensterne tritt als

Abbildung 2.1 Prof.
Dr. Gerhard Schäfer von
der Friedrich-Schiller-
Universität Jena. (Quelle:
G. Schäfer)



Pulsar in Erscheinung – ständig, und das mit dem winzig kleinen Bruchteil von acht Sekunden in 100.000 Jahren. Eine neue Form der hier zum Tragen kommenden Strahlungsrückwirkungskraft habe ich im Jahre 1982 publiziert [109].

2. Was erforschen Sie beim Thema Gravitationswellen genau?

G. Schäfer: Meine Forschungen sind vielfältiger Natur, von Strahlungsrückwirkungs- und Abstrahlungsrechnungen über Berechnungen von Bewegungsgleichungen und deren Lösungen bis hin zur Datenanalyse von Gravitationswellen.

Ende der 1980er Jahre war ich an der Ausarbeitung des Forschungsantrags für einen interferometrischen Gravitationswellendetektor in der Bundesrepublik Deutschland beteiligt, der später als GEO600 realisiert wurde. Aktuell habe ich mit zwei Kollegen erstmalig die Bahndynamik von zwei Schwarzen Löchern in einer Näherungsordnung berechnet, bei der die am bindenden Gravitationsfeld rückgestreuten Gravitationswellen selbst mit zur Bindung beitragen [46]. Der Nachweis der Richtigkeit dieser äußerst komplizierten Berechnung konnte erst Jahre später vollumfänglich erbracht werden [47] und, ganz aktuell, auch von anderer Seite, in einer Arbeit über enge Doppelsternsysteme [23].

3. Und welche Methoden setzen Sie dabei ein?

G. Schäfer: Ich verwende analytische Näherungsverfahren, um die auftretenden Gleichungen, seien es Feldgleichungen oder Bewegungsgleichungen, zu lösen. Hierbei hat sich das Post-Newton'sche Näherungsverfahren (**PN-Verfahren**, Kap. 7) bestens bewährt. Das ist ein Verfahren, das aus der Newton'schen Dynamik heraus entwickelt wurde. Es enthält explizite, analytische Ausdrücke, die sehr gut mit beobachtbaren Größen verglichen werden können. Zum Einsatz kommen dabei Rechenverfahren, die auch in der Elementarteilchenphysik eine große Rolle spielen wie z.B. analytische und dimensionale Regularisierungen. Die oben erwähnte Berechnung der Dynamik binärer Schwarzer Löcher betrifft die vierte Post-Newton'sche Ordnung

oder vier Größenordnungen in $1/c^2$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Aus dem Post-Newton'schen Näherungsverfahren ist übrigens das **effektive Einkörperproblem** (*effective-one-body approach*, *EOB-Verfahren*, Kap. 7) hervorgegangen [30], das bei der erstmaligen direkten Messung von Gravitationswellen auf der Erde eine große Rolle gespielt hat. In den Jahren 2000 bis 2015 habe ich mehrfach zur vertieften Ausgestaltung des effektiven Einkörperproblems beigetragen.

4. Der Durchbruch geschah im September 2015. Über was verfügten wir in 2015, das wir in 2014, 2010 oder 2000 nicht hatten?

G. Schäfer: Der Durchbruch nach 2014 kam durch neue Hochleistungslasersysteme sowie durch verbesserte monolithische Spiegelaufhängungen. Im Vergleich zu 2000 gab es hochgenaue analytische **Wellenform**-Modelle von Gravitationswellen und im Vergleich zu 2010 waren diese in leistungsfähigen Computerclustern für eine sichere Signalidentifikation und Signalanalyse bestens implementiert.

5. Was dachten Sie, als Sie vom Durchbruch mit GW150914 zum ersten Mal hörten?

G. Schäfer: Endlich! Ich hatte die direkte Messung einer Gravitationswelle, wenn auch nicht unbedingt mit hoher Signifikanz, eigentlich schon 2012 erwartet, also nach Auswertung der letzten Messkampagne vor der finalen Empfindlichkeitssteigerung der Detektoren. Besonders toll war natürlich, dass es sich bei der Quelle von GW150914 um Schwarze Löcher handelt, die als Grenzobjekte der Einstein'schen Gravitationstheorie von besonderer Bedeutung sind – so bedeutend wie der **Urknall**, wo die Theorie ja ebenfalls an ihre Grenzen stößt.

6. Wie kann man sich die beiden Polarisationszustände $+$ und \times von Gravitationswellen erklären und ableiten?

G. Schäfer: Die Einstein'schen Feldgleichungen erlauben Wellenlösungen. In linearer Näherung der Gleichungen sind dies, als Grundlösungen, die üblichen ebenen Wellen. Das Gravitationsfeld solcher Lösungen hat nur Komponenten, die senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung der Welle stehen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Einen Kreis von frei beweglichen Teilchen, der senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Gravitationswelle liegt, deformiert die Gravitationswelle als Welle vom Quadrupoltyp flächenerhaltend zu Ellipsen und wieder zurück (Abb. 2.2). Dies geschieht auf genau zwei verschiedene Weisen, die zueinander einen Winkel von 45° einschließen und $+$ bzw. \times -**Polarisation** genannt werden. Der Winkel von 45° wird verständlich, wenn man bedenkt, dass Bilder schwingender Ellipsen bei einer Drehung um 90° in sich übergehen und genau in der Mitte dieser 90° die dazu einzig weitere Polarisation zu liegen kommen muss.

Bei elektromagnetischen Wellen sind es 90° zwischen den beiden unabhängigen linearen Polarisationsrichtungen. Hier muss um 180° gedreht wer-

den, um eine Polarisierung in sich zu überführen. Dieser Unterschied hängt unmittelbar damit zusammen, dass das Gravitationsfeld ein Feld vom **Spin-2**-Typ, d.h. vom Quadrupoltyp, ist, während das elektromagnetische Feld ein Feld vom Spin-1-Typ, d.h. vom Vektortyp, ist. Solche Eigenschaften haben primär nichts mit der Quantentheorie zu tun. Erst durch die Besetzung dieser Moden mit diskreten Energien (den Energiequanten) kommt die Quantentheorie ins Spiel. Die Gravitationswellen sind wie die elektromagnetischen Wellen transversal polarisiert und haben zwei Freiheitsgrade – Eigenschaften, die auf der Masselosigkeit dieser Felder beruhen, ebenso wie deren Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit. Eine zirkular polarisierte Gravitationswelle erhält man wie im elektromagnetischen Fall durch Überlagerung der beiden linearen Polarisierungen, hier $+$ und \times , mit einem Phasenunterschied von 90° .

7. Wenn Gravitationswellen einen 10^{21} -mal stärkeren Effekt hätten, was würden wir dann spüren?

G. Schäfer: In der Nähe der Frequenzresonanz mit der Gravitationswelle und auch beliebig oberhalb dieser würde ein Gegenstand periodisch gedehnt und gestaucht werden, und zwar von der Größenordnung seiner eigenen geometrischen Maße: Die Wellenlänge der Gravitationswelle ist dabei sehr viel größer als der Gegenstand selbst. Bei einer infrage kommenden Frequenz der Gravitationswelle von, sagen wir, 1000 Hertz, beträgt deren Wellenlänge ja stolze 300 Kilometer¹. Reibungsfrei auf einem Tisch liegende Gegenstände würden der Gravitationswellenamplitude folgend sichtbar periodisch hin und her bewegt werden, falls die Ausbreitungsrichtung der Gravitationswelle eine Komponente senkrecht zur Tischoberfläche besitzt.

8. Können starke Gravitationswellen zu einem Schwarzen Loch kollabieren?

G. Schäfer: Ja, durch extreme Fokussierung der Gravitationswelle können in der Tat Gravitationswellen zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Hierzu muss sich die Energie der Gravitationswelle so stark konzentrieren, dass sie in eine Kugel passt, die einen Radius hat, der so groß ist wie der zugehörige **Schwarzschild-Radius** (Kap. 5). Zur Energie der Welle gehört gemäß $E = mc^2$ eine Masse m der Welle. Diese Masse setzen wir beim Schwarzschild-Radius ein und erhalten einen Radius, der der doppelten Energie der Welle mal Newton'sche Gravitationskonstante dividiert durch die vierte Potenz der Lichtgeschwindigkeit passt. Dann ist die Gravitationsanziehung in der Gravitationswelle so stark, dass sie jegliches Auseinanderlaufen der Welle verhindert, ja, diese sogar von einer nach außen unpassierbaren Fläche aus reiner Geometrie, einem Ereignishorizont, umschlossen wird.

¹ Allgemein gilt für die Wellenlänge $\lambda = c/f$ mit der Lichtgeschwindigkeit c und der Wellenfrequenz f .

9. Wenn Sie sich eine Quelle wünschen könnten, von der Sie gerne Gravitationswellen messen würden, welche wäre das, und was wäre der besondere Erkenntnisgewinn dabei?

G. Schäfer: Die Gravitationswelle vom Urknall würde ich mir wünschen. Am weitesten zurück in die Vergangenheit kann man mit Gravitationswellen „sehen“ (besser gesagt: „hören“), sogar bis auf 10^{-15} Sekunden an den Urknall heran und noch darunter. Das ist jenseits des Bereichs des elektroschwachen Phasenübergangs bei um die 10^{-12} Sekunden, bei dem die Vereinigung der elektromagnetischen Wechselwirkung mit der schwachen Wechselwirkung zerbricht. Das älteste Signal, das die Menschheit aktuell direkt messen kann, ist die kosmische Hintergrundstrahlung, die sich 380.000 Jahre nach dem Urknall (vor fast 13,8 Milliarden Jahren) frei ausbreiten konnte. Mit elektromagnetischen Wellen kann man nicht in frühere Entwicklungsphasen zurückschauen, weil da das Universum noch nicht elektrisch neutral war. Das urzeitliche Plasma, das es davor gab, kann jedoch von Gravitationswellen durchdrungen werden und so kann man mit Gravitationswellen in allerfrüheste Phasen zurückblicken. Das ist ein gewaltiger Unterschied mit zu erwartenden äußerst spektakulären Einsichten in die physikalischen Prozesse ganz nahe am Urknall.

10. Welchen Durchbruch erwarten Sie in den nächsten fünf, zehn und 20 Jahren bei den Gravitationswellen?

G. Schäfer: In den nächsten fünf Jahren erwarte ich Signale, bei denen Neutronensterne als Quelle eine Rolle spielen, und in den kommenden zehn Jahren Signale, die zeigen, dass es zu Schwarzen Löchern keine Alternativen gibt. In den nächsten 20 Jahren erwarte ich ein Gravitationswellenobservatorium im erdnahen Raum (die ESA plant eLISA, Abschn. 4.5) mit der Möglichkeit, verschmelzende Galaxien mit Schwarzen Löchern von Millionen Sonnenmassen in deren Zentren zu beobachten. Auch das Gravitationswellensignal vom Urknall sollte bis dato gemessen worden sein. In dem Meer von Urwellen leben wir ja schon immer, nur gehört haben wir sie bis jetzt noch nicht.

2.2 Schall und elektromagnetische Wellen

Grundsätzlich übertragen Wellen Energie. Im Seilexperiment in Kap. 1 wird die zweite Person, die von der Seilwelle getroffen wird, ordentlich durchgeschüttelt.

Schallwellen übertragen einen Druck auf unser Trommelfell, sodass wir Töne und Geräusche hören können. Unsere Ohren sind nur in einem bestimmten Frequenzbereich zwischen 20 und 20.000 Hertz empfindlich. Tiefere Töne nennt man Infraschall. Elefanten in der afrikanischen Savanne verständigen sich per Infraschall, der für sie über viele Kilometer hörbar ist. Am hochfre-

quenten Ende oberhalb von 20.000 Hertz gibt es ebenfalls eine „Viecherei“. Fledermäuse stoßen hochfrequenten Ultraschall aus, um sich damit zu orientieren. Wie bei einem Echolot prallt der Ultraschall an Höhlenwänden, Bäumen, Häusern und anderen Hindernissen zurück und wird von den Ohren der Fledermäuse aufgefangen. Aus der Dauer zwischen Ausstoß des Rufs und dessen Wahrnehmung ermittelt die Fledermaus die Entfernung zum Hindernis und kann so geschickt eine Kollision verhindern. Mit ihrem Ultraschallgehör kann sie auch ihre Beute aufspüren.

Elektromagnetische Wellen wirken je nach Energie ganz unterschiedlich auf uns. Generell gilt: Je kürzer die Wellenlänge oder je höher die Frequenz ist, umso höher ist die Energie der elektromagnetischen Welle. In einem schmalen Band zwischen 380 und 780 milliardstel Metern (Nanometern) Wellenlänge nehmen wir diese Wellen als sichtbares Licht wahr. Je nach Wellenlänge interpretiert das unser Gehirn als Farbe: 380 Nanometer erscheinen blau und 780 Nanometer rot. Dazwischen arrangieren sich die bekannten Regenbogenfarben. Jenseits der 780 Nanometer bei größeren Wellenlängen schließt sich das Infrarot an. Wir können diese Wellen nicht sehen, aber als Wärme fühlen. Bei noch größeren Wellenlängen gelangen wir in den Mikrowellen und Radiobereich. Mit Mikrowellen von einigen Zentimetern Wellenlänge können wir Essen warm machen. Aber auch die älteste Strahlungsform, die die Menschheit messen kann, liegt im Mikrowellenbereich: die kosmische Hintergrundstrahlung, die sich kurz nach dem Urknall vor 13,8 Milliarden Jahren ausbreitete und von den ersten, leichten, chemischen Elementen abgestrahlt wurde. Die sehr langwelligen Radiowellen mit Wellenlängen im Bereich von Metern werden von Radiostationen abgestrahlt. Auf die Radiowellen haben sie Information codiert, z. B. Musik oder die Wettervorhersage für morgen.

Am kurzwelligen Ende unterhalb von 380 Nanometern schließt sich das Ultraviolett an. Einige Tiere wie beispielsweise Bienen können diese Strahlung wahrnehmen, sodass Blüten in noch auffälligeren Farben leuchten. Bei noch kürzeren Wellenlängen um einen Nanometer herum liegt die Röntgenstrahlung. Sie ist sehr energiereich und kann daher mühelos einen Menschen durchqueren. Beim Röntgenarzt macht man sich diese Eigenschaft zunutze, um Knochen im menschlichen Körper zu fotografieren. Denn durch Knochen geht viel weniger Röntgenstrahlung. Allerdings ist die Röntgenstrahlung nicht ganz unbedenklich, weil sie den Körper und Zellen schädigen kann, wenn man sich ihr zu lange aussetzt. Noch gefährlicher sind die energiereicheren Gammastrahlen, die kürzere Wellenlängen als Röntgenstrahlung bzw. größere Frequenzen haben. Gammastrahlung kommt in der Regel aus dem Inneren von Atomkernen und ist eine Folge des radioaktiven Gammazerfalls. Sie ist die gefährlichste Form von Radioaktivität und war das, was am Reaktorunfall von Tschernobyl 1986 so lebensgefährlich war. In der Astronomie sind Quellen bekannt, die Gammastrahlen auch auf andere Weise erzeugen, z. B. in Form von Synchrotronstrahlung.

2.3 Verformter Ring aus Testmassen

Sind Gravitationswellen unter Umständen auch gefährlich? Was richten sie in unserem Körper an, wenn sie uns durchqueren? Bevor wir uns das anschauen, müssen wir eine weitere Eigenschaft von Wellen klären: die Polarisierung. Erinnern wir uns dazu an unsere mechanische Seilwelle aus Abschn. 1.1. Die Person, die die Welle erzeugt, kann das Seil senkrecht auf und ab schwingen. Sie kann aber auch das Seil waagrecht nach links und rechts schwingen. Die Schwingung findet jeweils in einer Ebene statt. Eine solche Welle nennt man *linear polarisiert*.

Es ist auch möglich, dass die Schwingung nicht in einer Ebene stattfindet, sondern auf einem Kreis rotiert. Das würde passieren, wenn man beide gerade beschriebene Wellen in senkrechter und waagerechter Schwingungsrichtung mit gleicher Amplitude und einer *Phasendifferenz* von null überlagern würde. Phasendifferenz null bedeutet, dass beide Teilwellen (identischer Frequenz) zeitlich so aufeinander treffen, dass Wellenberg auf Wellenberg passt. Diese Schwingungsform heißt *zirkular polarisiert*. Hierbei wird noch zwischen links- und rechtszirkular polarisiert unterschieden, je nachdem, ob sich beim Blick in Ausbreitungsrichtung die Welle entgegen oder mit dem Uhrzeigersinn dreht.

Überlagern sich die beiden linear polarisierten Wellen mit ungleichen Amplituden und Phasendifferenz null, dann schwingt die Welle nicht mehr auf einem Kreis, sondern auf einer Ellipse. Entsprechend nennt man das *elliptisch polarisiert*.

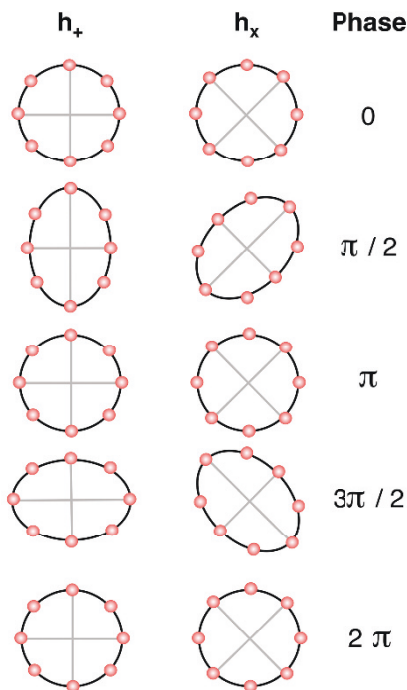
Eine genaue Auswertung der Wellengleichung für Gravitationswellen in der Allgemeinen Relativitätstheorie ergibt, dass es zwei Schwingungsformen, genauer gesagt Polarisierungen der Wellen, gibt. Man unterscheidet die Polarisation $+$ („Plus“) von der Polarisation \times („Kreuz“). Sie sind gegeneinander um 45° gedreht. Aber warum genau 45° ? In Abschn. 1.2 haben wir erfahren, dass die Gravitation durch ein Tensorfeld beschrieben wird. Solche Felder werden durch Spin-2-Teilchen vermittelt wie die Quantenfeldtheorie lehrt (Box 5.4). Es ist allerdings aktuell nicht klar, ob die Gravitation quantisiert und damit als Quantengravitation beschrieben werden muss. In allen Experimenten verhält sich die Gravitation bislang klassisch, d.h. sie zeigt kein Quantenverhalten und verhält sich so, wie es Einsteins ART vorsieht. Sollte es ein quantenhaftes Teilchen geben, das die Gravitationskraft vermittelt – das Graviton (Box 10.2) –, dann muss es aufgrund des Tensorcharakters der Gravitation Spin $S = 2$ haben. Allgemein gilt: Das Strahlungsfeld, das durch ein Teilchen mit Spin S beschrieben wird, ist symmetrisch unter Drehungen um den Winkel $360^\circ/S$ um seine Ausbreitungsrichtung [87]. Das sehen wir für die Gravitation mit $S = 2$ direkt in Abb. 2.2. Denn hier ist der Drehwinkel $360^\circ/2 = 180^\circ$. Eine weitere Regel besagt: Ein Strahlungsfeld mit Spin S besitzt genau zwei unabhängige Zustände linearer Polarisation, die um den Winkel $90^\circ/S$ gegeneinander verdreht sind. Für die Gravitation mit $S = 2$ erhalten wir $90^\circ/2 = 45^\circ$. Aha, da ist ja der 45° -Winkel! Anders ist das bei

elektromagnetischen Wellen. Die Austauschquanten der elektromagnetischen Kraft sind die Photonen mit Spin $S = 1$. Die linearen Polarisierungen von elektromagnetischen Wellen sind demnach um $90^\circ/1 = 90^\circ$ gegeneinander verdreht.

Sehr anschaulich wird die Wirkung einer Gravitationswelle, wenn wir uns einen kreisförmigen Ring vorstellen, auf dem viele kleine, punktförmige Massen sitzen (Abb. 2.2). Diese Punktmassen sollen am Anfang relativ zueinander in Ruhe sein und auf sie sollen keine Kräfte außer der Gravitation wirken. Eine linear polarisierte Gravitationswelle trifft nun senkrecht auf die Fläche des Rings. Die Welle quetscht dann den Ring zu einer Ellipse zusammen. Danach schwingt die Ellipse wieder zur Ringform zurück und wird zu einer Ellipse verformt, die nun aber senkrecht zur ersten Ellipse steht. Schließlich stellt sich wieder die Ausgangsform des Kreisrings ein. Die Flächen von Kreis bzw. Ellipse bleiben dabei immer gleich groß; sie werden nur verformt. Gravitationswellen sind Transversalwellen, d. h. die geometrischen Verhältnisse werden nur senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verändert.

Die spannende Frage ist nun, wie stark die kreisrunde Ringform zusammengequetscht wird. Wir wollen dazu eine typische Quelle annehmen, z. B. zwei umeinander kreisende Schwarze Löcher mit jeweils zehn Sonnenmassen

Abbildung 2.2 Verformung einer kreisförmigen Anordnung von Punktmassen, wenn sie eine linear polarisierte Gravitationswelle senkrecht zur Papierebene trifft. Die Phase variiert zwischen 0 und 2π . Dabei bedeutet 0, dass hier die Schwingung beginnt. Bei 2π ist eine volle Schwingung vorüber und beginnt wieder von vorn. Es gibt zwei Schwingungsformen (genauer: Polarisationen), die Polarisation $+$ (linke Spalte) und die Polarisation \times (rechte Spalte), die 45° gegeneinander verdreht sind. Die Fläche von Kreis bzw. Ellipse bleiben immer gleich groß. (Quelle: A. Müller 2016)



in einer Milliarde Lichtjahre Entfernung. Der Ring soll nun den Durchmesser der Erde haben, also ungefähr 10.000 Kilometer – wenn wir mal großzügig abrunden. Die Gravitationswelle der beiden Schwarzen Löcher staucht diesen erdgroßen Ring um nur 10^{-14} Meter zusammen; das entspricht nur zehn Atomkerndurchmessern!

Gravitationswellenforscher drücken das gerne als relative Längenänderung aus, d.h. als gemessene Längenänderung ΔL in Metern (die gerade genannten 10^{-14} Meter) geteilt durch die ursprüngliche Länge (oder den ursprünglichen Durchmesser) des Objekts. Das war im gerade genannten Beispiel der Erddurchmesser von 10.000 Kilometern. Demnach wird die relative Längenänderung $\Delta L/L = 10^{-21}$, eine dimensionslose Zahl. Eine wirklich erstaunlich winzige Zahl! Diese Zahl ist allerdings nicht universell, sondern hängt von den beteiligten Massen und Abständen ab, also den Eigenschaften der Quelle. Wir werden sie dimensionslose Gravitationswellenamplitude nennen. Extrem klein ist die Zahl immer. Gravitationswellen dehnen und stauchen Referenzlängen ganz, ganz, ganz wenig. Warum ist das so?

2.4 Die Gravitationswelle und ich

Bei der Besprechung der Quadrupolformel hatten wir den vernichtenden Vorfaktor G/c^5 entdeckt. Er macht alle Gravitationswellen platt, könnte man ganz salopp sagen. Auch die Gravitationswellenamplitude wird mit einem ähnlichen Vorfaktor G/c^4 stark unterdrückt. Damit können wir nun grundsätzliche Fragen wie diese beantworten: Tut es weh, wenn mich eine Gravitationswelle durchdringt? Werde ich mit Gravitationswellen sogar schlank? Ha, netter Versuch, aber beides müssen wir klar verneinen. Die Dehnung und Stauchung durch eine Gravitationswelle sind extrem gering und bewegen sich weit unterhalb der subatomaren Längenskala. Dermaßen winzige Verformungen spüren wir nicht, und wir nehmen auch keinen Schaden dabei. Wenn aber die Auswirkungen auf den menschlichen Körper so gering sind, wie könnte dann ein Messgerät solch extrem kleine Effekte anzeigen? Offenbar muss man dazu eine sehr subtile Messmethode haben.

Hinzu kommt aber noch eine faszinierende Eigenschaft von Gravitationswellen. Wir könnten uns fragen, ob wir mit einem Lineal den Durchgang einer Gravitationswelle nachweisen könnten. Das Lineal sollte ja periodisch gedehnt und gestaucht werden. Gravitationswellen wirken aber auch auf die Struktur der Raumzeit, d.h., das Lineal selbst wird gedehnt und gestaucht, sodass ein Referenzabstand (z. B. ein Zentimeter) selbst hin und her schwingt! Wie die Relativitätstheoretiker sagen: Die Metrik wird in Schwingungen versetzt.

Auch die Abmessungen des Körpers müssen passen. Nicht jede Gravitationswelle macht einen Effekt. Ist nämlich die Frequenz der Gravitationswelle niedriger als die Grundfrequenz (Eigenmode) des Lineals, dann wird es zu keinem Effekt der Gravitationswelle kommen. Das ist ähnlich wie bei einem

Balken, der an den Enden fest eingespannt ist und mit Schall in Resonanz gebracht werden soll, so dass der Balken schwingt. Das geschieht erst, wenn die Schallwelle eine Wellenlänge hat, die halb so groß ist wie der Balken. Das ist die Grundschiwingung, bei der die Knoten der Schallwelle genau mit den Balkenenden zusammenfallen. Weiterhin gibt es Oberschwingungen (Oberwellen) höherer Frequenz, die den Balken anregen können. Auch hier liegen Knoten auf den Balkenenden, aber es gibt nun auch Knoten zwischen den Balkenenden. Unterhalb der Grundfrequenz ist allerdings nichts zu machen. Bei den Gravitationswellen ist das auch so. Die entsprechenden Detektoren, die auf diesem Messprinzip beruhen, sind die Resonanzdetektoren (Abschn. 3.2).

Wie wir in Kap. 3 sehen werden, wurden seit den frühen 1970er Jahren „Lineale“ aus Laserlicht gebaut, die in der Folgezeit zu extrem genauen Abstandsmessungen benutzt werden konnten. Sie heißen Interferometer, in denen Spiegel das Licht auf kilometerlangen Strecken hin und her sausen lassen. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist immer dieselbe – unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle. Die Phasenverschiebung, die eine Gravitationswelle im Detektor bewirkt, ist *nicht* nur ein Raumeffekt, der sich auf den (räumlichen) Spiegelabstand auswirkt. Wenn dem so wäre, könnte man Licht ja schneller machen als die Lichtgeschwindigkeit c , indem man einfach die Laufstrecke des Lichts mit einer Gravitationswelle verkürzt.

Genauso wenig ist es allein ein Zeiteffekt. Vielmehr ist es ein *Raumzeiteffekt*, den eine Gravitationswelle hervorruft. Die Einstein-Gleichungen der Relativitätstheorie sind unabhängig von Koordinatensystemen – kovariant – formuliert. Somit sind auch die Gravitationswellen unabhängig vom Koordinatensystem. Es gibt da verschiedene, aber äquivalente Sichtweisen, wie man die Auswirkung der Gravitationswelle betrachten kann: In den Koordinaten, die die Theoretiker benutzen (die sog. TT-Eichung²), bewegen sich die Balkenenden (bzw. Spiegel in einem Interferometer, Kap. 3) gar nicht, sondern befinden sich immer an denselben Positionen im Koordinatensystem. Aber das Koordinatensystem zwischen ihnen schwingt hin und her. Ganz anders im Laborsystem, das der Experimentator verwendet: Hier bewegen sich die Spiegel und schwingen durch den Einfluss der Gravitationswelle hin und her.

Dehnt eine Gravitationswelle eine Lichtwelle? Oder bewirkt sie, dass sie langsamer schwingt? Das kann man so oder so sehen. Man kann es auf die Lichtwellenlänge – den räumlichen Anteil – schieben oder auf die Frequenz – den zeitlichen Anteil. Die Lichtgeschwindigkeit c ist auf jeden Fall immer eine Konstante. Das besagt Einsteins SRT, und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hat sich bis heute bewährt.

² Achtung, nur für Relativitätstheoretiker: TT steht für transverse traceless, also transversal und spurfrei, und bezieht sich auf eine bestimmte Wahl eines Koordinatensystems, in dem die Störung $h_{\mu\nu}$ aus Box 1.2 nur räumliche Anteile hat, $h_{0\mu} = 0$, und damit transversal ist. Sie ist auch spurfrei, d.h. $h_{kk} = 0$, wobei k nur räumliche Indizes annimmt.

10 Dinge, die Sie über Gravitationswellen wissen wollen

Von schwächsten Signalen und stärksten Ereignissen

Müller, A.

2017, XV, 255 S. 57 Abb. in Farbe. Book + eBook.,

Softcover

ISBN: 978-3-662-54408-2