

Die historische Entwicklung der Gravitationstheorien, ausgehend von der Newton'schen bis zu Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, zeigt einige interessante Analogien, aber auch wesentliche Unterschiede zur Entwicklung der Theorie des Elektromagnetismus. Um später die Bedeutung besser würdigen zu können, die die Entdeckung der Gravitationswellen für die Gravitationsphysik im allgemeinen und die Allgemeine Relativitätstheorie im besonderen besitzt, wollen wir uns in diesem Kapitel einige dieser Gemeinsamkeiten und auch Unterschiede bewusst machen.

Bis zur Aufstellung der Maxwell'schen Elektrodynamik um die Mitte des 19. Jahrhunderts galt die Newton'sche Gravitationstheorie fast 200 Jahre lang als das Musterbeispiel einer mathematischen Formulierung physikalischer Gesetzmäßigkeit. Diese hatte Isaac Newton (1643 bis 1727) in seinem Hauptwerk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*¹ gegeben, dessen erste Auflage 1687 in London erschien.² Mathematisch streng beschreibt Newton darin, wie Massen einerseits als Quellen von Gravitationsfeldern wirken und wie sie andererseits ihren Bewegungszustand durch das Einwirken äußerer (also nicht der von ihnen selbst erzeugten) Gravitationsfelder ändern. Beide Gesetze zusammen erlauben dann, aus beobachteten Bahndaten eines Objekts, etwa eines Planeten oder Satelliten, auf die Quellen des Gravitationsfeldes zu schließen, in dem es sich bewegt.

¹Zu deutsch: „Die mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie“, wobei man heute „Naturphilosophie“ sinngemäß eher mit „Physik“ übersetzen würde; vgl. Schüller (1999).

²Eine zweite Auflage erschien 1713, eine dritte 1726. In beiden wurden jeweils zum Teil umfangreiche Streichungen und Ergänzungen angebracht, die in der Ausgabe von Schüller (1999) sichtbar gemacht sind.

Wichtig für das weitere Verständnis der Newton'schen Theorie ist die Tatsache, dass es Newton in den *Principia* primär um die mathematische Darlegung empirisch überprüfbarer Gesetzmäßigkeit geht und nicht um die philosophische oder theologische Reflexion ihrer möglichen Ursache. Newton wusste sehr genau, dass die Möglichkeit mathematischer Exaktheit einhergehen muss mit einem zum Teil erkauften Verzicht auf Antworten weiterführender Fragen, die, das sei betont, ihm deshalb nicht weniger wichtig waren. In der zweiten Auflage der *Principia* findet sich im *Allgemeinen Scholion* seine diesbezüglich berühmten Sätze (Schüller 1999, S. 516):

Den Grund für diese Eigenschaften der Schwere konnte ich aber aus den Naturerscheinungen noch nicht ableiten, und Hypothesen erdichte ich nicht. [...] Hypothesen, gleichgültig ob es metaphysische, physikalische, mechanische oder diejenigen von den verborgenen Eigenschaften sind, haben in der *experimentellen Physik* keinen Platz. In der hier in Rede stehenden Physik leitet man die Aussagen aus den Naturerscheinungen her und macht sie durch Induktion zu allgemeinen Aussagen.

Besonders drastisch zeigt sich in Newtons Denken diese pragmatische Unterscheidung zwischen dem, was aus den Erscheinungen ableitbar ist, und dem, was gemäß allgemein naturphilosophischer Prinzipien akzeptabel scheint, an einem für uns ganz wesentlichen Aspekt seiner Gravitationstheorie: der Abwesenheit von Gravitationswellen. Diese folgt sofort aus der Tatsache, dass gemäß der Newton'schen Theorie das Gravitationsfeld ein reines Attribut der Materie im folgenden Sinne darstellt: Ist die Massenverteilung der Materie im Raum vorgegeben, so ist nach der Newton'schen Theorie das Gravitationsfeld im ganzen Raum *eindeutig* bestimmt. Es ist also keiner lokalen Änderungen mehr fähig. In der bereits eingeführten Sprache der modernen Physik heißt dies dann, dass das Newton'sche Gravitationsfeld keine eigenen Freiheitsgrade besitzt. Bewegen sich die das Gravitationsfeld erzeugenden Massen im Raum, so folgt das Gravitationsfeld dieser Momentanverteilung instantan im *ganzen Raum*. Will man überhaupt von einer Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gravitationswechselwirkung sprechen, so muss man sagen, dass diese unendlich hoch sei. Allgemein bezeichnet man das auch als „Fernwirkung“, einer Wirkung also, die sich unendlich schnell – also instantan – über den ganzen unendlichen Raum verteilt, scheinbar ohne die stetige Vermittlung des dazwischenliegenden Raumes. Solche Fernwirkungen sind aber nach den Vorstellungen der modernen Physik, die wir ja bereits angesprochen haben, völlig inakzeptabel. So gilt insbesondere nach Einsteins Spezieller Relativitätstheorie die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum als die

absolute obere Grenze aller Geschwindigkeiten für die Ausbreitung von Signalen oder Wirkungen.³

Obwohl Newton in den *Principia* das Gravitationsgesetz als reines Fernwirkungsgesetz formuliert hat, gab er an anderer Stelle frei zu, dass gerade dieser Aspekt seinen naturphilosophischen Überzeugungen diametral widersprach, auch wenn es sich als mathematisch-operationale Vorschrift zur Berechnung tatsächlicher Phänomene glänzend bewährte (und das weit über Newtons Zeit hinaus). Über Newtons kritische Einstellung wissen wir aus seinem erhaltenen Briefwechsel sehr genau Bescheid, insbesondere aus seinem ausgedehnten Meinungsaustausch mit dem bekannten englischen Philologen, Theologen und an Naturwissenschaften sehr interessierten Richard Bentley (1662 bis 1742), der zur Vorbereitung seiner Vorlesungsreihe *A Confutation of Atheism* des Jahres 1692 immer wieder Newtons Rat einholte, wohl in der Absicht, Schützenhilfe aus dem Lager der Naturphilosophie für seine Sache – der Widerlegung des Atheismus – zu bekommen. In einem langen Brief vom 25. Februar des Jahres 1692 – also erst fünf Jahre nach Publikation der *Principia* – schrieb ihm Newton (Turnbull 1961, Brief Nr. 406, S. 253–254)⁴:

Es ist undenkbar, dass rohe unbelebte Materie ohne die Vermittlung von etwas anderem, das nicht materiell ist und ohne direkte Berührung auf andere Materie wirkt und sie beeinflusst [...]. Deshalb wünschte ich auch, dass Sie mir die Idee einer der Materie inhärenten Gravitation nicht zuschreiben würden. Dass die Gravitation inhärent und der Materie angeboren sei, und dass ein Körper auf einen anderen über die Ferne [acting at a distance] durch das Vakuum hindurch wirkt, ohne dass etwas anderes vorhanden wäre, das diese Wirkung oder Kraft von einem zum anderen Körper transportiert, stellt für mich eine so große Absurdität dar, dass ich nicht glaube, dass jemand der in philosophischen Dingen auch nur einigermaßen kompetent denken kann [any competent faculty of thinking], jemals darauf verfallen würde. Die Gravitationwechselwirkung wird durch einen Vermittler verursacht, der unablässig gemäß gewisser Gesetze wirkt, aber ob dieser Vermittler materiell oder immateriell ist, habe ich der Beurteilung meiner Leser [der Principia] überlassen.

Wie also eine Theorie zu formulieren sei, in der die Ausbreitung der Gravitation gemäß kausaler Gesetze von Raumpunkt zu Raumpunkt sich vollzieht, war Newton nicht bekannt; dass es aber einmal eine solche Theorie geben müsse, schien

³Der Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt 299 792 458 m/s. Dieser Wert ist *exakt*, da man heute die Längeneinheit m (Meter) über die Zeiteinheit s (Sekunde) definiert, und zwar so, dass Licht im Vakuum in einer Sekunde gerade die angegebene Anzahl von Metern zurücklegt. Die Sekunde ist seit 1967 definiert als die Zeitspanne für 9.192.631.770 Perioden des Lichts, das ein Cäsium-133-Atom beim Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands aussendet.

⁴Diese Übersetzung aus dem Englischen ist unsere.

ihm wohl sicher. Die theoretische Erfüllung dieser Forderung kam erst mit Aufstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie durch Albert Einstein im Jahre 1915, 223 Jahre nachdem Newton die obigen Zeilen schrieb. Und dann dauerte es sogar nochmals weitere einhundert Jahre, bis im Jahre 2015 der erste *direkte* Nachweis von Gravitationswellen dieses theoretische Bild auch direkt faktisch bestätigte.

Wie schon erwähnt, hatte eine solche Bestätigung die Maxwell'sche Elektrodynamik bereits 1888 durch Heinrich Hertz erfahren. Die Bedeutung, die damals die internationale und gerade zwischen Deutschland und England in starker Konkurrenz stehende Wissenschaftsgemeinschaft dieser Entdeckung gab, geht eindrücklich aus einem Brief hervor, den der irische Physiker George Francis FitzGerald (1851 bis 1901) am 8. Juni 1888 an Hertz schrieb. Darin heißt es unter anderem (zitiert nach Fölsing 1997, S. 349)

Ich denke, dass in diesem Jahrhundert kein wichtigeres Experiment gemacht wurde. ...Ihr Experiment wird „Hertz' klassisches Experiment, das zwischen den Theorien der elektromagnetischen Fernwirkung und der Wirkung vermöge des Äthers unterscheidet“ genannt werden.

Hertz antwortete am 11. Juni 1888 (auf deutsch) und meinte etwas bescheiden (Fölsing 1997, S. 350):

Nach Ihren Ausdrücken fürchte ich zwar, daß Sie mehr voraussetzen, als vorhanden ist, und enttäuscht sein werden. ...so glaube ich, daß diese Versuche noch nicht ein letztes Ziel sind, sondern vielmehr der Anfang und die Einleitung zu besseren Versuchen ...und in der Tat ist es mir inzwischen auch geglückt, in der Luft selbst stehende Wellen erzeugen und ihre Wellenlänge zu messen, so daß es allerdings keinem Zweifel mehr unterliegt, daß die Ausbreitung von Punkt zu Punkt erfolgt. So zweifle ich auch nicht, daß die Ansichten von Faraday und Maxwell dauernd triumphieren werden.

Und wie stand es um die Vorstellung, dass auch die Gravitation sich in ähnlicher Weise auch nur mit Lichtgeschwindigkeit und in Form von Wellen ausbreiten könne? Im Jahr 1905, in dem Albert Einstein die Spezielle Relativitätstheorie aufstellte, äußerte der französische Mathematiker und Physiker Henri Poincaré (1854 bis 1912) eine solche Idee. In der Sitzung der Akademie der Wissenschaften in Paris vom 5. Juni 1905 drückte er sich dabei wie folgt aus⁵:

Ich wurde zuerst zu der Annahme geführt, dass die Ausbreitung der Gravitation nicht instantan ist, sondern mit Lichtgeschwindigkeit erfolgt. ...Wenn wir also von Ort und Geschwindigkeit des anziehenden Körpers sprechen, so handelt es sich um den Ort und die Geschwindigkeit zu dem Zeitpunkt, an dem die *Gravitationswelle* Teil

⁵Diese Übersetzung aus dem Französischen ist unsere.

dieses Körpers ist; wenn wir von Ort und Geschwindigkeit des angezogenen Körpers sprechen, so handelt es sich um den Ort und die Geschwindigkeit zu dem Zeitpunkt, an dem dieser angezogene Körper von der Gravitationswelle erreicht wird, die der andere Körper ausgesandt hat; es ist klar, dass der erste Zeitpunkt vor dem zweiten liegt.

In dieser Passage prägte Poincaré den Begriff Gravitationswelle (*onde gravifique*). Freilich hatte diese Welle wenig mit den Gravitationswellen von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie zehn Jahre später zu tun. Im Jahr 1905 betrachtete man die Raumzeit noch als starren Hintergrund, auf dem sich physikalische Einflüsse ohne Rückwirkung auf diese ausbreiten. Da außer dem Elektromagnetismus nur die Gravitation als fundamentale Wechselwirkung bekannt war, spekulierte Poincaré, dass sich auch die Gravitation in Form einer Welle *auf* der starren Raumzeit ausbreiten müsse, analog zu einer elektromagnetischen Welle. In Einsteins Theorie gibt es den starren Hintergrund der Raumzeit nicht mehr, und bei Gravitationswellen handelt es sich dort quasi um Störungen der Raumzeit selbst, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, und nicht wie bei den elektromagnetischen Wellen um etwas, das zusätzlich zur Raumzeit existiert.

Trotz dieses wichtigen Bedeutungsunterschieds ist die mathematische Beschreibung von Gravitationswellen nicht wesentlich schwieriger als die elektromagnetischer Wellen, zumindest in der sogenannten *linearen Näherung*, in der vorausgesetzt wird, dass die Wellenamplituden sehr klein sind. Unter bestimmten Voraussetzungen darf man nämlich das sehr komplexe und nichtlineare System der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die man die *Einstein-Gleichungen* nennt, näherungsweise durch ein sogenanntes lineares System ersetzen, das dem von vornherein linearen System von Gleichungen der Elektrodynamik, also den Maxwell-Gleichungen, sehr ähnelt. Die notwendigen mathematischen Voraussetzungen dieses Schrittes sichern dann gerade, dass die strengen Lösungen des approximativen (linearen) Systems von Gleichungen tatsächlich etwas Relevantes ergeben, nämlich zumindest approximative Lösungen der exakten, physikalisch relevanten nichtlinearen Einstein-Gleichungen. Der Witz an diesem mathematischen Trick ist, dass es sehr einfach ist, Lösungen des linearen Systems zu finden, sodass man aus ihnen sofort auf die Existenz von Gravitationswellen der vollen Theorie schließen darf, die im Gültigkeitsbereich der linearen Näherung mit den erhaltenen Lösungen im Wesentlichen übereinstimmen. Der physikalische Grund für die im Prinzip vorhandenen nichtlinearen Korrekturen der Gravitationswellen, die keine Entsprechung bei elektromagnetischen Wellen haben, ist dem Umstand geschuldet, dass *jede* Form von Energie gravitiert, also insbesondere auch die, die in den Gravitationswellen selbst enthalten ist, während im Unterschied das Feld einer elektromagnetischen Welle nicht seinerseits als Quelle weiterer elektrischer und magnetischer

Felder wirkt. Im Prinzip wechselwirken Gravitationswellen also untereinander und mit sich selbst, wenn auch sehr schwach, während sich elektromagnetische Wellen wechselwirkungsfrei durchdringen. Als Folge gilt für elektromagnetische Wellen das *Superpositionsprinzip* streng,⁶ gemäß dem sich zwei oder mehr Wellen einfach überlagern, was mathematisch durch die *Summe* der einzelnen Wellenfunktionen dargestellt wird, während dies für Gravitationswellen nur so lange in guter Näherung gilt, wie die dabei entstehenden Amplituden nicht zu groß werden.

Auf Grundlage dieser linearen Approximation leitete Einstein die Existenz von Gravitationswellen zuerst in einer Arbeit ab, die er am 22. Juni 1916 der Preußischen Akademie der Wissenschaften vorlegte und die den passenden Titel trug: *Näherungsweise* [gemeint ist damit die linearisierte] *Integration der Feldgleichungen der Gravitation* (Einstein 1916). Das war gut ein halbes Jahr nach Fertigstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Eineinhalb Jahre später kommt er erneut und gesondert auf das Thema der Gravitationswellen zurück, um einen formalen aber sonst folgenlosen mathematischen Fehler der ersten Arbeit zu korrigieren. Diese zweite Arbeit trägt den Titel *Über Gravitationswellen* und wurde am 31. Januar 1918 wieder bei der Preußischen Akademie der Wissenschaften eingereicht (Einstein 1918).

In beiden Arbeiten leitete Einstein auch die bekannte *Quadrupolformel* ab, die angibt, wie viel Energie pro Zeiteinheit ein physikalisches System durch Abstrahlung in Gravitationswellen verliert. Physiker sprechen in diesem Zusammenhang von der Gravitationswellen-*Luminosität* dieses Systems. Diese Formel werden wir in Kap. 4 eingehend besprechen.

Trotz dieser beiden Arbeiten Einsteins aus den Jahren 1916 und 1918 dauerte es noch viele Jahre, bis die wissenschaftliche Gemeinschaft von der Existenz dieser Wellen überzeugt war. Das lag zum einen natürlich daran, dass es damals nicht möglich war, Gravitationswellen direkt oder indirekt nachzuweisen. Ein wesentlicher Grund lag aber auch in einem mangelhaften begrifflichen Verständnis der Wellen, deren Energie ja im Gravitationsfeld gespeichert und durch das Gravitationsfeld transportiert werden sollten. Die Schwierigkeit dieser Vorstellung lag darin, dass das Gravitationsfeld nach Einstein nicht wie das elektromagnetische relativ zu

⁶Wir beziehen uns hier ausschließlich auf die sogenannte „klassische“ Elektrodynamik, in der das Superpositionsprinzip tatsächlich streng gilt. In der für die Elementarteilchenphysik relevanten Quantenelektrodynamik gibt es typisch quantenfeldtheoretische Korrekturen, die dann auch zu Nichtlinearitäten in den elektromagnetischen Wechselwirkungen führen. Relevant sind diese allerdings nur in Bereichen weit unterhalb atomarer Dimensionen, wo Teilchenpaare aus dem Vakuum spontan entstehen und sich wieder gegenseitig vernichten können. Die gravitativen Nichtlinearitäten sind hingegen bereits rein „klassisch“ existent, also ohne Berücksichtigung möglicher quantenfeldtheoretischer Korrekturen. Das ist ein wesentlicher Unterschied.

einem fest gegebenen Gefüge von Raum und Zeit definiert ist, sondern selbst als Bestandteil dieses Gefüges aufgefasst wird. Damit war nach der Emanzipation des Feldbegriffs von einem handgreiflichen materiellen Träger (Wasser oder Luft), die die Maxwell'sche Theorie mit sich brachte, eine weitere Abtraktionsstufe gefordert, in der der Feldbegriff sich nunmehr auch von der Vorstellung einer festen Raumzeit löste und auf diese selbst Anwendung finden sollte. Nicht jedem Zeitgenossen Einsteins war bei dieser Vorstellung von *Wellen reiner Geometrie* wohl. Kann damit tatsächlich Energie abgestrahlt und transportiert werden, wie man es bei einem realen physikalischen Prozess erwarten sollte? Oder jagen die Theoretiker hier nur Artefakten einer unphysikalischen Beschreibung nach (sogenannten Koordinateneffekten), die sich daran entlarven lassen sollten, dass diese Wellen überhaupt keine Energie transportieren? Seltsamerweise bekam Einstein später (1936) selbst Zweifel an der physikalischen Richtigkeit seiner ersten Ableitungen und schrieb darüber im Jahre 1936 einen Artikel mit seinem Kollegen Nathan Rosen (1909 bis 1995),⁷ in dem er fälschlicherweise glaubte, mathematisch gezeigt zu haben, dass die vollen, nichtlinearen Gleichungen seiner Theorie überhaupt keine Wellenlösungen zulassen und dass seine erste, auf den linearisierten Gleichungen fußende Deduktion solche Lösungen nur vorgespiegelt hätten, gleichsam als Artefakt einer nicht zulässigen mathematischen Approximation. Wir wissen heute nach eingehenderen Analysen, dass das Argument von Einstein und Rosen fehlerhaft ist und dass wir Einsteins erster Ableitung vertrauen dürfen. Aber noch 1955, wenige Wochen nach Einsteins Tod, vertrat Rosen auf einer großen internationalen Konferenz, die aus Anlass des 50-jährigen Bestehens der Speziellen Relativitätstheorie in Bern stattfand, seinen sehr kritischen Standpunkt, der, wie wir heute wissen, unbegründet war.

Die Wende kam erst zwei Jahre nach Einsteins Tod. Im Jahre 1957 versammelte sich in Chapel Hill (USA) eine illustre Runde von Physikern, um die Grundprobleme der Gravitationsphysik zu diskutieren. Wir verdanken dieser Tagung, deren Protokolle neu herausgegeben wurden (Rickles und DeWitt 2011), eine ganze Reihe von wichtigen Durchbrüchen, neben dem Fortschritt beim Verständnis der Gravitationswellen auch tiefe Einsichten in die Probleme des Zusammenhangs von Quantentheorie und Gravitation. Letztere betreffen zum Beispiel die Frage, ob man das Gravitationsfeld auch dann noch richtig berechnen kann, wenn die felderzeugende Materie in typisch quantenmechanischen Zuständen ist, etwa der Superposition

⁷Es handelt sich um den Rosen aus der berühmten EPR-Arbeit (Kiefer 2015).

verschiedener räumlicher Lokalisationen.⁸ An dieser Stelle drängt sich dann die Diskussion auf, ob nicht auch die Gravitation – so wie die Elektrodynamik – einmal zu einer Quantentheorie verallgemeinert werden muss. Im Falle der Elektrodynamik kennen wir diese Theorie; es ist die *Quantenelektrodynamik*, die aus der Beschreibung des Verhaltens elementarer Teilchen nicht wegzudenken ist und nach wie vor eine der am besten bestätigten Theorien der gesamten Physik ist. Müssen wir also auch die Theorie der Gravitation zu einer *Quantengravitation* verallgemeinern, das heißt die Allgemeine Relativitätstheorie „quantisieren“? Wir werden auf diesen Punkt nochmals zurückkommen, weisen aber schon jetzt darauf hin, dass er bis heute eine der großen offenen Fragen der Theoretischen Physik geblieben ist.

Eine treibende Kraft auf dieser Tagung war der britische Physiker Felix Pirani (1928 bis 2015). Er betonte, dass ein Nachweis von Gravitationswellen durch Beobachtung der Bewegung eines einzelnen Objektes unmöglich sei. Man benötige mindestens zwei Objekte, um beim Durchgang der Welle aus der Relativbewegung auf diese schließen zu können. Gemeinsam mit seinen Kollegen Hermann Bondi (1919 bis 2005) und Richard Feynman (1918 bis 1988) entwickelte er ein sehr einfaches Gedankenexperiment, das als *Sticky bead argument* (deutsch etwa: Argument der klebrigen Perle) bekannt ist. Dabei wird angenommen, dass sich eine Perle frei auf einem Stab bewegen könne. Eine einlaufende Gravitationswelle erzeugt periodische Spannungen im Stab, die sich auf die Bewegung der Perle auswirken. Falls zwischen Perle und Stab Reibung vorliegt, erwärmen sich beide, was bedeutet, dass die durchgehende Gravitationswelle tatsächlich Energie auf das System überträgt. Feynman merkt dazu an:⁹

...es entspricht meiner Intuition, dass eine Vorrichtung, die in der Lage ist, Energie aus einer auf sie einwirkenden Welle zu ziehen, auch Wellen der gleichen Art erzeugen muss, wenn sie zu der entsprechenden Bewegung gezwungen wird.

In den Jahren danach konnte mathematisch sauber geklärt werden, dass Gravitationswellen weitab von der Quelle positive Energie transportieren und dass die für die Abstrahlung zur Verfügung stehende Energie beschränkt ist. Da Gravitationswellen zudem mittlerweile nachgewiesen worden sind, sowohl direkt als auch indirekt, gibt es an deren Existenz nun keinen Zweifel mehr.

⁸Man kann hier an das berühmte Doppelspaltexperiment in der Quantenmechanik denken und sich fragen, wie das Gravitationsfeld des im Superpositionszustand befindlichen Teilchens aussieht. Diese scheinbar einfache Frage hat bis heute tatsächlich keine abschließende Antwort gefunden. Für eine Diskussion dieser und einiger damit verbundener Fragen aus der modernen Forschung sei auf Giulini (2013) verwiesen.

⁹Diese Übersetzung aus dem Englischen ist unsere.

Am Schluss dieser etwas kurios verlaufenen Geschichte¹⁰ stellt sich natürlich die Frage, warum die Physiker die Verunsicherung nicht viel früher beendet haben, zum Beispiel indem sie selbst Gravitationswellen im Labor erzeugt und wieder empfangen haben, so wie das Heinrich Hertz 1888 mit elektromagnetischen Wellen vorgemacht hatte. Warum dauerte es überhaupt so lange bis zum ersten Nachweis, wenn doch ständig um uns herum Gravitationswellen von beschleunigten Massen erzeugt werden? Die Antwort darauf kann nur auf Basis einer quantitativen Analyse der Wechselwirkung von Gravitationswellen mit Materie und Licht gegeben werden. Wir werden sehen, dass sowohl die Raten, mit denen diese Wellen von realistischen Quellen im Labor emittiert als auch von zurzeit technologisch möglichen Detektoren absorbiert werden können um viele Größenordnungen kleiner sind als für elektromagnetische Wellen, und dass an eine Erzeugung *im Labor* mit hinreichend großer Amplitude überhaupt nicht zu denken ist. Wir werden aber auch sehen, und dies an quantitativen Zahlenbeispielen erläutern, dass unser Universum kompakte Objekte von ganz außerordentlichen physikalischen Eigenschaften beheimatet, deren Energieausstoß in Gravitationswellen kurzzeitig gigantische Ausmaße annehmen kann, vergleichbar der Lichtenergie *aller* sichtbaren Quellen im Universum! Davor werden wir aber einen kurzen Blick auf die Ausbreitung und die Auswirkung von Gravitationswellen werfen.

¹⁰Wir verweisen auf Kenneficks (2007) Buch für eine sehr lesenswerte wissenschaftshistorische Aufbereitung.

Gravitationswellen

Einblicke in Theorie, Vorhersage und Entdeckung

Giulini, D.; Kiefer, C.

2017, IX, 54 S. 7 Abb., 3 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-16012-8