

Galina Weinstein, Einstein and gravitational waves 1936-1938
Übersetzung aus dem Englischen, 2020
Dr. Manfred Pohl, Deutschland
E-Mail: unipohl@aol.com
Netz: www.unipohl.de

Einstein und die Gravitationswellen (1936-1938)

Galina Weinstein

15.02.2016

Um 1936 schrieb Einstein an seinen engen Freund Max Born und erzählte ihm, daß er zusammen mit Nathan Rosen zu dem interessanten Ergebnis gekommen war, daß Gravitationswellen nicht existierten, obwohl sie in der ersten Näherung als sicher angenommen worden waren. Er hatte nämlich einen Fehler in seiner Arbeit mit Rosen von 1936 gefunden und glaubte, daß Gravitationswellen existieren. Doch im Jahr 1938 überprüfte Einstein die Arbeit erneut mit dem Ergebnis, daß es keine Gravitationswellen geben könne!

1916 und 1918 hatte Einstein Berechnungen der Gravitationswellen in einer linearisierten Approximation im schwachen Feld durchgeführt, wo er vereinfachende Annahmen über das Gravitationsfeld einsetzte. Einstein erhielt seine Näherungslösungen von ebenen Gravitationswellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, durch Einführen harmonischer Koordinatenbedingungen in seine Feldgleichungen, die zu linearisierten Gravitationsfeldgleichungen führten. Er fand Lösungen der Feldgleichungen im schwachen Feld in analoger Weise wie die der retardierten Potentiale in Elektrodynamik.

Die Berechnung der Gravitationsfelder mit nichtlinearisierten Gravitationsfeldgleichungen (d. h. das Finden einer exakten Lösung für die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie, die die ebenen Gravitationswellen beschreiben) könnte zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. In der Tat stellte sich heraus, daß in der exakten nichtlinearen Theorie die Lösungen der ebenen Gravitationswellen die harmonische Bedingung nicht mehr erfüllt haben und sie enthielten Singularitäten. Einstein änderte deshalb seine Meinung bezüglich der Gravitation und behauptete, sie seien nicht vorhanden.

Um 1936 schrieb Einstein an seinen engen Freund Max Born und erzählte ihm, daß er zusammen mit Nathan Rosen zu dem interessanten Ergebnis gekommen war, daß Gravitationswellen nicht existierten, obwohl sie in der ersten Näherung als sicher angenommen worden waren. Einstein schloß, daß dies zeigte, daß die nichtlinearen allgemeinen relativistischen Feldgleichungen uns mehr oder weniger beschränken könnten, mehr als wir bis dahin geglaubt hatten (Einstein und Born 1969, Einstein an Born, 1936, Brief 71, undatiert).

Im Jahre 1936 versuchte Einstein zusammen mit Rosen die nichtlinearen Feldgleichungen zu lösen und die exakten ebenen Gravitationswellen zu finden, aber er mußte dann Singularitäten in die Komponenten der Metrik einfügen, die die Welle beschreibt. Einstein aber war gegen Singularitäten und im Angesicht der Singularitäten versuchte er, mit diesem Argument zu demonstrieren, daß keine exakten Lösungen der ebenen Gravitationswellen für seine Feldgleichungen existieren.

Im Juni 1936 schickten Einstein und Rosen die Arbeit über Gravitationswellen „Existieren die Gravitationswellen?“ an die Zeitschrift *The Physical Review*, aber *The Physical Review* lehnte die Arbeit ab und provozierte damit eine wütende Reaktion Einsteins. Der anonyme Gutachterbericht über Einsteins Arbeit enthielt eine Diskussion über eine Tatsache, daß (koordinierte) Singularitäten in der Metrik der Beschreibung ebener Gravitationswellen mit unendlichen Wellenfronten unvermeidlich sind.

Einstein schrieb an den Herausgeber der Zeitschrift *The Physical Review* in Deutsch, daß er und Rosen ihm ihr Manuskript zur Veröffentlichung gesandt hätten und ihn nicht autorisiert hatten, es Fachleuten zu zeigen, bevor es gedruckt war. Einstein sagte dem Herausgeber, er sehe daher keinen Grund, die fehlerhaften Bemerkungen seiner anonymen Experten zu debattieren, und er zog es vor, die Arbeit an anderer Stelle zu veröffentlichen. Er fügte hinzu, daß Rosen, der inzwischen in die Sowjetunion gegangen war, ihn zur Vertretung in dieser Angelegenheit ermächtigt hatte. Der anonyme *Physical-Review*-Gutachter war der Kosmologe Harvey Percy Robertson (Kennefick 1999, 210).

Nach diesem Vorfall hat Einstein in der Zeitschrift *The Physical Review* nie wieder veröffentlicht. Stattdessen hat er die Arbeit im Journal des Franklin Instituts eingereicht, in der er bereits im vorangegangenen Jahr eine Arbeit veröffentlicht hatte.

1936 erschien Leopold Infeld in Princeton, um Rosen als Einsteins neuen Assistenten einzusetzen. In seiner Autobiographie beschreibt Infeld sein erstes Treffen mit Einstein, bei dem Einstein ihm seinen Beweis für die Nicht-Existenz von Gravitationswellen erklärte. Einstein begann, über seine neueste und

noch unveröffentlichte Arbeit zu sprechen, über die durchgeführte Arbeit mit seinem Assistenten Rosen im vergangenen Jahr. Es ging um das Problem der Gravitationswellen. Infeld erklärt die Grundidee in einfachen Worten so (Infeld 1941, 260-261): Die Allgemeine Relativitätstheorie ist eine Feldtheorie für die Probleme der Gravitation, was Maxwells Theorie für die Probleme der elektromagnetischen Phänomene ist. Aus diesem Grund können Gravitationswellen aus der allgemeinen Relativitätstheorie abgeleitet werden und die Existenz elektromagnetischer Wellen aus der Maxwellschen Theorie. In ihrer Bewegung senden die Sterne Gravitationswellen aus, die sich in der Zeit durch den Raum ausbreiten, ebenso wie oszillierende Elektronen elektromagnetische Wellen aussenden. Es ist ein gemeinsames Merkmal aller Feldtheorien, daß sich die Wirkung eines Objektes auf ein anderes mit einer großen, aber endlichen Geschwindigkeit in Form von Wellen durch den Raum ausbreitet.

Einstein glaubte immer, daß eine gründlichere Untersuchung nur dieses Ergebnis bestätigen konnte, indem einige genauere Merkmale der Gravitationswellen enthüllt werden. Doch in den vergangenen beiden Jahren – vor Infelds Ankunft in Princeton im Jahre 1936 – begann Einstein, an der Existenz der Gravitationswellen zu zweifeln. Bei einer näherungsweisen Untersuchung des Problems fand er aber, daß Gravitationswellen zu existieren schienen. Aber eine tiefere Analyse brachte ihn zu einem Schluß, der der vorherigen Schlußfolgerung völlig widersprach. Einstein dachte, wenn dieses Ergebnis, daß es Gravitationswellen gab, nicht wahr war, dies von grundlegender Natur wäre, weil in diesem Fall, anders als in vorhergehenden Überzeugungen, eine Feldtheorie (die allgemeine Relativitätstheorie) dann nicht schlüssig mit der Existenz von Wellen verbunden werden konnte.

Einstein bat Infeld, ihn nach Hause zu begleiten, wo er ihm das Manuskript seiner Arbeit geben würde. Unterwegs sprachen sie über Physik. Einstein sprach zum Thema Gravitationswellen, auf das sie noch oftmals in ihren späteren Gesprächen zurückkommen. Infeld ging mit dem Manuskript von Einstein und Rosen nach Hause.

Infeld stand diesem letzten Ergebnis skeptisch gegenüber. Obwohl er Einstein als den größten Wissenschaftler der Welt bewunderte, vertraute er doch seinem eigenen Verstand mehr als seiner Bewunderung für Einstein; und er konnte die Nicht-Existenz von Gravitationswellen nicht akzeptieren. Seine eigene Intuition ließ ihn dieses neueste Ergebnis nicht dogmatisch akzeptieren.

Am selben Tag, an dem Infeld sein Gespräch mit Einstein hatte, begegnete er Robertson, dessen Arbeit über die Allgemeine Relativität und die Kosmologie ihm wohlbekannt war. Robertson war Professor für theoretische Physik an der *Princeton University*, der soeben von einem Forschungsurlaub aus Caltech zurückgekehrt war. Infeld berichtete Robertson von Einsteins neuer Gravitationswellenarbeit, die Einstein ihm zum Lesen gegeben hatte, die er aber noch nicht zu Ende gelesen hatte, aber das Ergebnis schien ihm dennoch seltsam zu sein. Robertson äußerte sofort, daß er auch nicht an das Ergebnis glaubte und sagte, es müsse ein Fehler irgendwo in Einsteins Arbeit sein. Gravitationswellen existieren. Er war sich sicher. Infeld stimmte Robertson zu und sie setzten ihre Diskussion für eine lange Zeit in Robertsons Büro fort.

Infeld studierte sorgfältig Einsteins Gravitationswellenarbeit nach dem Treffen mit Robertson und war sehr beeindruckt von diesem Manuskript, das zu dem Schluß führte, daß Gravitationswellen nicht existieren! Es scheint, daß Infeld auf lange Sicht seiner Bewunderung für Einstein doch mehr vertraute als allem anderen.

Nachdem Infeld wieder ein Gespräch mit Einstein hatte, traf er Robertson am nächsten Tag und sagte ihm, daß er die Überzeugung gewonnen hatte, daß Gravitationswellen nicht existieren. Infeld war sogar überzeugt, daß er in der Lage war, dies zu demonstrieren, aber Robertson verwarf die Idee. Er nahm die beiden Seiten, auf denen Infeld seine Idee niedergeschrieben hatte, überprüfte alle Schritte des Arguments und behauptete, daß es einen Fehler in seinem eigenen Berechnungen geben muß. Tatsächlich fand er einen trivialen Fehler: Infeld hatte ein Minus statt eines Plus gesetzt. Infeld diskutierte die Gravitationswellen weiter mit Robertson und diese Diskussionen überzeugten ihn, daß Gravitationswellen tatsächlich existieren. Aber wenn das stimmt, muß es doch einen Fehler in Einsteins Arbeit geben.

In ihrer nächsten Sitzung klärte Robertson Infeld über den Irrtum in Einsteins Erklärung über die Gravitationswellen auf: Die linearisierte Approximation führt tatsächlich zu transversalen ebenen Gravitationswellen. Man kann aber Gravitationswellen nicht genau beschreiben, ohne daß Singularitäten in die Komponenten der die Welle beschreibenden Metrik eingeführt werden, aber diese Singularitäten sind koordinative Singularitäten und keine echten Singularitäten. Man kann aber durch Änderung der Koordinaten mit diesen Singularitäten umgehen. Robertson schlug daher vor, einen „Trick“ anzuwenden. Er schlug vor, die sogenannte Einstein-Rosen-Metrik (von Einsteins und Rosens Arbeit) umzuformen aus Raum-Zeit-Koordinaten, geeignet für die Darstellung von ebenen Gravitationswellen, in zylindrische Koordinaten. Die Singularität kann am Ursprung der zylindrischen Achse liegen, wo man die Quelle der zylindrischen Wellen zu finden erwarten würde; so kann man die Singularität als Beschreibung einer materiellen

Quelle betrachten. Die erhaltene Lösung kann eher als Beschreibung zylindrischer Gravitationswellen als ebener Gravitationswellen betrachtet werden.

Am nächsten Tag ging Infeld zu Einstein und sagte ihm, daß er (Infeld) einen Fehler in der Berechnung gefunden hatte und daß er glaubte, daß Gravitationswellen existieren. Einstein antwortete, daß er auch einen Fehler in seiner Arbeit mit Rosen, die dem *Physical Review* vorgelegt worden war, gefunden hat. Es war weniger trivial als Infelds Fehler in den beiden Seiten, in denen er versucht hatte, zu beweisen, daß es Gravitationswellen nicht gibt, und schwerer zu erkennen. Einstein war zu derselben Schlußfolgerung gekommen wie Infeld, nämlich daß Gravitationswellen tatsächlich existieren; und mit Robertsons Hilfe (noch wußte er nicht, daß es Robertson war, der Einsteins Vorlage an *The Physical Review* geprüft und beurteilt hatte) korrigierte er schließlich seine Einstein-Rosen-Unterlage (Weinstein 2015, 261-264).

Seit Rosen in die Sowjetunion abgereist war, handelte Einstein allein in der sofortigen und gründlichen Revision ihrer gemeinsamen Arbeit und fügte einen Abschnitt: „Genauere Lösung für zylindrische Wellen“ hinzu (Einstein und Rosen 1937, 49). Die neue Version der Arbeit wurde unter dem Titel „On Gravitational Waves“ umbenannt und folgte Robertsons Vorschlag einer Umwandlung in zylindrische Koordinaten. Einstein erhielt exakte Lösungen der Feldgleichungen der allgemeinen Relativität für zylindrische Wellen. Die Metrik dieser Wellen erfüllt drei exakte Gleichungen, von denen die erste, eine lineare Gleichung, zylindrische Wellen im dreidimensionalen euklidischen Raum darstellt (das Feld ist unabhängig von x_4). Somit präsentierte Einstein zylindrische Wellen, die lokal die gleichen wie ebene Wellen sind (Einstein und Rosen 1937, 52-53).

Einstein schloß seine Arbeit mit der Aussage, daß eine progressive Welle mit guter Näherung vertreten werden kann durch eine Menge, die nicht verschwinden kann und immer das gleiche Vorzeichen hat. Progressive Wellen erzeugen daher eine säkulare Veränderung in der Metrik. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, daß die Wellen Energie transportieren, die mit einer systematischen Zeitveränderung einer Gravitationsmasse (in Wirklichkeit einer Quelle der Gravitationswellen) verbunden ist, die sich im Ursprung der Achse $x = 0$ befindet. Deshalb stellt Einstein die Materie (die Quelle der Gravitationswellen) durch Singularitäten des Feldes dar (Einstein und Rosen 1937, 54).

Dies ist die Version, die schließlich im Jahre 1937 im Journal des Franklin-Instituts erschien. Die Ironie ist, daß Einstein die oben genannte Flucht zu zylindrischen Wellen Monate zuvor hätte finden können, einfach durch das Lesen des *Physical-Review*-Gutachter-Berichts, den er so eilig verworfen hatte (Kenefick 2005, 43-48).

Am Ende der Arbeit „On Gravitational Waves“, fügte Einstein eine Notiz an, daß der zweite Teil der Arbeit mit zylindrischen Wellen von ihm war, der nach dem Weggang von Rosen nach Rußland erheblich verändert worden war, weil sie ursprünglich ihre Formelergebnisse falsch ausgelegt hatten. Er sagte, er wolle seinem Kollegen, Professor Robertson, für seine freundliche Unterstützung bei der Klärung des ursprünglichen Fehlers danken (Einstein und Rosen 1937, 54).

1938 wollten Einstein, Infeld und Banesh Hoffmann eine einheitliche Feldtheorie schaffen, die sowohl die Gravitation als auch den Elektromagnetismus umfassen sollte. Das Problem war, daß gewöhnliche Maxwell-Gleichungen für leere Räume Feldgleichungen waren, die linear waren, in denen elektrische Teilchen als Punktsingularitäten betrachtet wurden. Jedoch war die Bewegung dieser Singularitäten nicht durch diese linearen Feldgleichungen bestimmt. Darüber hinaus waren die Vakuumfeldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie nichtlinear, und sie bestimmten die Bewegung der materiellen Punkte, die als Singularitäten in diesem Feld auftreten.

Es gibt drei mögliche Näherungen bei der Annäherung an die Aufgabe der Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen: Das Gravitationsfeld ist schwach, es ist statisch und die Materialpartikel bewegen sich langsam. In den Jahren 1916 und 1918 betrachtete Einstein das Gravitationsfeld als schwach und wie die Gleichungen des Elektromagnetismus als linear. Diese Näherung begrenzt nicht die Beschleunigung der materiellen Teilchen und tatsächlich erzeugen beschleunigende Materieteilchen Gravitationswellen.

1938 schlägt Einstein eine neue Methode der Näherung zur Bestimmung des Gravitationsfeldes eines sich bewegenden Teilchens vor - eine schwache Feldnäherung wählen und sehr niedrige Beschleunigungen berücksichtigen. In der Arbeit von 1938 mit Infeld und Hoffmann betrachtete Einstein daher die Näherung des schwachen Feldes und setzte eine Begrenzung der Beschleunigung der Materialpartikel ein. Dies wird nach-newtonsche Näherung genannt.

Einstein berechnete mit seinen Assistenten Infeld und Hoffmann die ersten beiden Näherungsstufen und sie fanden, daß in der ersten Stufe die Bewegungsgleichungen die newtonsche Form annehmen (Einstein, Infeld und Hoffmann 1938, 65-66). In dieser Näherung, wenn wir sehr niedrige Beschleunigungen

annehmen, nehmen die exakten Bewegungsgleichungen in der Tat die Newtonsche Form an und erhalten materielle Teilchen, die nicht strahlen können. In diesem Zustand haben wir die gute alte Annahme wiederhergestellt, daß es keine Gravitationswellen geben kann.

Übersetzung aus dem Englischen:

18.04.2020

Dr. Manfred Pohl

Strausberg

Germany

Literatur

Einstein, Albert und Born, Max (1969). *Albert Einstein Max Born Briefwechsel 1916-1955*. (Briefwechsel zwischen Albert Einstein und Max Born). München: Nymphenburger Verlagshandlung GmbH.

Einstein, Albert, Infeld, Leopold und Hoffmann, Banesh (1938). Die Gravitationsgleichungen und das Problem der Bewegung. "*Annalen der Mathematik* 39, 65-100.

Einstein, Albert und Rosen, Nathan (1937). „Über die Gravitationswellen.“ Zeitschrift des Franklin-Instituts 223, 43-54.

Infeld, Leopold (1941). *Quest: Eine Autobiographie*. New York: Doubleday, Doran & Company.

Kennefick, Daniel (1999). „Kontroversen in der Geschichte des Strahlungsreaktions-Problem in der Allgemeinen Relativität.“ In Goenner Hubert, Ritter, Jim, Renn, Jürgen und Sauer, Tilman (1999). *Die expandierenden Welten der Relativitätstheorie. Einstein-Studien 7*. New York: Birkhäuser, 207-234.

Kennefick, Daniel (2005). „Einstein versus *The Physical Review*“. *Physik Heute* 58, 43-48.

Weinstein, Galina (2015). *Allgemeine Relativitätstheorie, Konflikte und Rivalitäten: Einsteins Polemik mit Physikern*, (Newcastle, Großbritannien: Cambridge Scholars Publishing).