Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie

Eine allgemein wissenschaftliche und methodologische Diskussion der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins und deren praktische Verifizierung

Inhalt

1. Vorbemerkungen

2. Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie
a) Spezielles und Allgemeines Relativitätsprinzip
b) Postulate
c) Gravitationsfeld und Gleichheit von träger und schwerer Masse
d) Unzulänglichkeiten der Speziellen Relativitätstheorie und Konklusionen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie

3. Gravitationsgleichgewichts- und Kollapszustand

4. Die Suche nach Schwarzen Löchern

5. Sterne auf relativistischen Bewegungsbahnen
a) Euklidisches und Nichteuklidisches Kontinuum
b) Das raumzeitliche Kontinuum der Speziellen Relativitätstheorie
c) Das raumzeitliche Kontinuum der Allgemeinen Relativitätstheorie
d) Weiterführende Bemerkungen

6. Gravitationswellen und ihr (direkter) Nachweis

a) Genauere Formulierung des Allgemeinen Relativitätsprinzips
b) Der physikalische Feldbegriff
c) Nachweis von Gravitationswellen

7. Weitere Untersuchungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

a) Die Lichtablenkung durch das Gravitationsfeld
(b) Die Rotverschiebung der Spektrallinien

8. Bibliographie

1. Vorbemerkung

- Nach Newton gilt für den Betrag der Gravitationskraft zwischen zwei durch gegenseitigen Abstand r zueinander entfernten Körpern die vertraute Identität: $F = \frac{G * M * m}{r^2}$

- Die Gravitationskraft erweist sich in moderner Physik als eine der vier basischen Wechselwirkungsarten physikalischer Objekte (die weiteren drei Fundamentalkräfte sind die starke, schwache und elektromagnetische Interaktion), die allerdings erst auf makroskopischer Kontemplationsebene, insbesondere im Bereich astronomischer Größenordnungen, relevant wird und 1915 in **Albert Einstein**s Allgemeiner Relativitätstheorie endgültige theoretische Beschreibung mittels nichteuklidischer Geometrie erhalten hatte.

- Dennoch fingiert der Betrag der Gravitationskraft definitiv in der Nähe solcher astronomischer Objekte am größten zu sein, die im Allgemeinen als Schwarze Löcher bezeichnet werden (dieser Begriff wurde von **John Wheeler** um 1960 geprägt).

- Die Gravitationskraft in der Umgebung eines Körpers kann im Allgemeinen durch diejenige Geschwindigkeitsrate charakterisiert werden, die ein „Probekörper“ (ergo ein verhältnismäßig kleinerer oder aber weniger massereicher astronomisches Objekt) zu erfahren hätte, um dessen anziehender Gravitationswirkung zu entfliehen (die sog. Austrittsgeschwindigkeit).

- Bereits **John Michell** stellte sich 1784 die Frage, wie sich der Gravitationseffekt um einen solchen Körper manifestierte, der dem ihm nähergebrachten „Probekörper“ eine Austrittsgeschwindigkeit abverlangte, die derjenigen des Lichtes entspräche.

- Schwarze Löcher sind astronomische Objekte (Sterne), die der Michellschen Austrittsgeschwindigkeitsbedingung genügen, dessen enorme Masse auf einem äußerst kleinen Volumen verteilt wäre, sodass Lichtstrahlen entlang gekrümmter (z. B. geodätischer) Bahnen zu diesem Körper verliefen und sein unmittelbares Gravitationswirkungsgebiet niemals verlassen könnten.

- Denn Schwarze Löcher und Neutronensterne (beide Objektklassen dürfen also als Sterne aufgefasst werden) erfüllen die oben angesprochenen Extremalbedingungen, da deren Austrittsgeschwindigkeit dem Betrage c der Lichtgeschwindigkeit äußerst genau nahe kommt und Lichtstrahlen in ihrem angrenzenden Umfeld einem hypothetischen Beobachter mit dessen zunehmender Höhendistanz von der Sternoberfläche einen immer größer werdenden Beobachtungshorizont zuließen, der in einem bestimmten Höhendistanzpunkt sogar den vollen Umfang eben dieser angesprochenen Sternoberfläche erfassen könnte!

2. Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie

a) Spezielles und Allgemeines Relativitätsprinzip

- **Galileisches Relativitätsprinzip**: Ein sich selbst überlassener, von allen Massenpunkten hinlänglich entfernter Massenpunkt bewegt sich gleichförmig und geradlinig, wobei im Bezuge auf das Inertialsystem K (Galileischer Bezugskörper) physikalische Gesetze die einfachste Form aufweisen müssen.

- **Spezielles Relativitätsprinzip**: Außer dem Inertialsystem K sollten alle diejenige Bezugskörper K' bevorzugt und mit K für die Formulierung der Naturgesetze genau gleichwertig sein, welche relativ zu K eine geradlinig gleichförmige, rotationsfreie Bewegung ausführen: alle diese Bezugskörper werden als Galileische Bezugskörper angesehen und nur für sie wurde die Gültigkeit des Relativitätsprinzips angenommen, für andere (anders bewegte) nicht.

- **Allgemeines Relativitätsprinzip**: Alle Bezugskörper K, K', usw. sind für die Naturbeschreibung (Formulierung der allgemeinen Naturgesetze) gleichwertig, welches auch deren Bewegungszustand sein mag.

b) Postulate

- **Das Machsche Prinzip**: Den Kern der Speziellen Relativitätstheorie nehmen Inertialsysteme ein. **Ernst Mach** bemerkte, dass Newtonsche Inertialsysteme nicht gegen das System der Fixsterne rotieren, woraus er das Prinzip ableitete, dass Trägheitseigenschaften durch die Existenz (Anwesenheit) anderer Körper im Universum bestimmt sind.

- **Das Äquivalenzprinzip**: Die schwere Masse eines beliebigen Körpers kann immer und überall gleich seiner trägen Masse gesetzt werden.

- **Das Prinzip der Kovarianz**: Alle Beobachter, unabhängig davon, ob sie sich in einem Inertialsystem befinden, wie im Falle der Speziellen Relativitätstheorie, oder ob sie sich in Nicht-Inertialsystemen bewegen, beobachten dieselben Gesetze der Physik.

- **Das Korrespondenzprinzip**: In schwachen Gravitationsfeldern und für Geschwindigkeiten, die viel kleiner sind als die Lichtgeschwindigkeit, müssen die Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie approximativ mit den Vorhersagen der Newtonschen Mechanik übereinstimmen. Im Grenzfall verschwindender Gravitationsfelder müssen die Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie in die der Speziellen Relativitätstheorie übergehen.

- **Das Prinzip der minimalen Kopplung**: Beim Übergang von der Speziellen zur Allgemeinen Relativitätstheorie sollen keine Terme eingeführt werden, die explizit die Krümmung enthalten.

c) Gravitationsfeld und Gleichheit von träger und schwerer Masse

- Das Feld ist das physikalische Analogon zur Masse eines Körpers, das im Allgemeinen als Nahwirkungsmedium, eine Art „elastischer Membran“, aufgefasst werden kann, das Einwirkungen vorhandener Massenkörper „erleidet“ und auf diese auch durch „Krümmung“ des Raum-Zeit-Kontinuums adäquat „reagiert“. Diese „Krümmung“ des Raum-Zeit-Kontinuums ruft stets etwas „physikalisch Reales“ hervor, das seinerseits wieder auf das betrachtete Massenstück einwirkt und es zum größeren zentralen Massenkörper streben lässt, durch dessen Anwesenheit sich in der dazugehörenden unmittelbaren Membranfeldumgebung die erwähnte „Krümmung“ des Raum-Zeit-Kontinuums auch am stärksten manifestiert.

- *Die sich unter ausschließender Wirkung des Schwerefeldes bewegenden Körper erfahren nämlich eine Beschleunigung, die weder vom Material noch vom physikalischen Zustande dieser Körpers im geringsten abhängt*.

- Die schwere und träge Masse eines Körpers gleichen einander! Denn dieselbe *Qualität* eines Körpers (seine Masse nämlich) manifestiert sich, je nach Umständen, entweder als „Trägheit“ (der Widerstand des Körpers gegen jede ihn beschleunigende externe Kraft) oder aber als „Schwere“ (die vom Gravitationsfelde zu überwindende Widerstandsintensität eines Körpers seiner Anziehung gegenüber) desselben,

- Es gibt kein lokales Experiment, das zwischen einem rotationslosen freien Fall in einem Gravitationsfeld und gleichförmiger Bewegung in Abwesenheit von Gravitationsfeldern unterscheiden könnte. Ebenso können lokale Experimente nicht unterscheiden, ob ein Körper in einem homogenen Gravitationsfeld ruht oder in Abwesenheit von Gravitationsfeldern gleichförmig beschleunigt wird (beispielsweise in einer Rakete).

d) Unzulänglichkeiten der Speziellen Relativitätstheorie und Konklusionen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie

- Einstein unterscheidet in der Allgemeinen Relativitätstheorie zwischen der Materie und dem Raum, genau wie es Newton tat. Der Raum ist nun aber nicht eine a priori gegebene absolute Größe, die zwar – wie bei Newton – physikalische Wirkungen ausüben, aber keine empfangen kann, sondern er hat eine von Ort zu Ort veränderliche Krümmung, welche durch die dort vorhandene Materie kausal hervorgebracht wird.
- Die klassische Mechanik sowie die Spezielle Relativitätstheorie bevorzugen ohne einen sinnvollen Grund Inertialsysteme (Galileische Bezugskörper) gegenüber Nicht-Inertialsystemen, die mit gleichem Recht als der Formulierung von Naturgesetzen dienende Bezugssysteme fungieren dürften, und “begründen” eine derartige Bevorzugung nur dadurch, dass in diesen Systemen die mathematische Beschreibung physikalischer Phänomene die einfachste Form annehmen würde.
- Einige wichtige Schlussfolgerungen der Allgemeinen Relativitätstheorie: Lichtgeschwindigkeit erweist sich, der Wirkung von starken Gravitationsfeldern ausgesetzt, als örtlich veränderlich. Lichtstrahlen pflanzen sich in nicht vernachlässigbaren Gravitationsfeldern im allgemeinen krummlinig fort. Auch der ursprünglich spezialrelativistische Zeitdilatationseffekt wird bei sich im Gravitationsfelde einer Masse befindlichen Uhren vom dessen Zentrum nach außen hin zunehmen. Im Massenzentrum wird dagegen keine Zeitdehnung festgestellt.

3. Gravitationsgleichgewichts- und Kollapszustand

- Schwarze Löcher sind als astronomische Objekte, die infolge der Zerstörung des Gleichgewichtszustandes der Gravitation und des Kernfusionsdrucks in ihrem Inneren in sich kollabierten, äußerst massereichen Sterne, die in der Membran des Gravitationsfeldes starke Krümmungen derselben verursachen. Sie emittieren Gravitationsstrahlung in Form von Gravitationswellen (periodische Verzerrungen der Feldmembran), drehen sich häufig um die eigene Achse und fungieren somit als wichtigste potentielle Nachweisquellen der Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie, da die allgemeinrelativistischen Messabweichungen von den Berechnungen der Newtonschen Gravitationstheorie sowie Anomalieeffekte der Rotationsbahnen von Sternen und Planeten erst unter extremen Intensitäten von Gravitationsfeldern experimentell eindeutig verifizierbar werden.

4. Die Suche nach Schwarzen Löchern

- Für Physiker dürften Schwarze Löcher auch wegen neuer, durch ihre Untersuchung erzielbarer Informationen über die Struktur des Raumes eine gravierende Rolle spielen, da Lichtstrahlen unter den ihnen innewohnenden extremen Gravitationsbedingungen neuartige Bewegungsbahnen verfolgen, deren genauere mathematische Charakterisierung auch menschliche Realitätsvorstellung von Raum und Zeit revolutionieren könnte.

- Des Weiteren dienen sie als große Quellen der Gravitationsstrahlung der Verifizierung der Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie, zu denen auch die Postulierung von Gravitationswellen gehört.

- Singularitätspunkt des Schwarzen Lochs gilt immer noch als durch Allgemeine Relativitätstheorie unzureichend erklärbar, sodass man sich im Rahmen dieser Problematik auch der theoretischen Verschmelzung der Einsteinschen Gravitationstheorie mit der Quantenmechanik annehmen kann.

5. Sterne auf relativistischen Bewegungsbahnen

a) Euklidisches und Nichteuklidisches Kontinuum

- Der Term „Kontinuum“ impliziert die Möglichkeit einer unbegrenzt feinen Teilbarkeit eines zusammenhängenden Ganzen.

- Das euklidische Kontinuum wird durch kartesische starre kartesische Koordinatensysteme beschrieben, die als Bezugskörper die Spezielle Relativitätstheorie prägen und den geometrischen Axiomen Euklids gehorchen.

- Nicht-euklidische Kontinua werden von der Riemann – sowie Lobatschewski – Geometrie charakterisiert und implizieren die Einführung krummliniger, nichtstarrer, deformierbarer, krummliniger Gaußscher Koordinatensysteme, die als eine mathematisch abstrakte Verallgemeinerung kartesischer Koordinatensysteme als „Bezugskörper“ in der Allgemeinen Relativitätstheorie Anwendung finden.

- Alle Gaußschen Koordinatensysteme müssen sich allerdigs auf sehr kleinen Kontinuumsgebieten euklidisch verhalten und die Orthonormalitätsbedingung erfüllen.

b) Das raumzeitliche Kontinuum der Speziellen Relativitätstheorie

- Die in der Speziellen Relativitätstheorie übliche Auswahl der imaginären Zeitvariablen $\sqrt{-1}\,ct$ statt des reellen Zeitwertes *t* wird der allgemeinen Auffassung des raum-zeitlichen Kontinuums als der eines „euklidischen“ vierdimensionalen Kontinuums, des Sonderfalls durch Gaußsche Koordinaten bestimmter Kontinua, völlig gerecht.

- Das Raum-Zeit-Kontinuum der Speziellen Relativitätstheorie wird durch den Minkowski-Raum versinnbildlicht und zeichnet sich durch eine Invarianz gegenüber der orthogonalen linearen Lorentztransformation seiner Koordinaten zwischen zwei Inertialsystemen aus.

- Die lorentzinvariante Abstandsquadrik der Speziellen Relativitätstheorie lautet

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - ct^2$$

c) Das raumzeitliche Kontinuum der Allgemeinen Relativitätstheorie

- Das raum-zeitliche Kontinuum der Allgemeinen Relativitätstheorie kann nicht euklidisch sondern mittels nicht-euklidischer Gaußscher Koordinatensysteme interpretiert werden. Diese Gaußsche Koordinatensysteme werden nur symbolisch als “Mollusken” bezeichnet und als allgemeinrelativistische Bezugskörper bewertet, obwohl die Konklusionen der Allgemeinen Relativitätstheorie bezugskörperunabhängigen Charakter haben.

- Mit Gaußschen Koordinatensystemen hat man ein mächtiges mathematisches Werkzeug , um das vierdimensionale raum-zeitliche Kontinuum auf Gaußsche
- Koordinaten zu beziehen, wobei eine derartige Beziehung überhaupt nicht von der Auswahl eines der Beobachtung zugrundeliegenden Bezugskörpers abhängt.

- Denn jedem Punkte (Ereignis) eines vierdimensionalen Kontinuums ordnen wir vier Zahlen (Koordinaten) (X, X', X'', X''') zu, die überhaupt keine physikalische Bedeutung zu besitzen haben.

- Die Gaußschen Koordinaten sind nicht an den euklidischen Charakter des darzustellenden Kontinuums gebunden und ersetzen dadurch einwandfrei die Beschreibung physikalischer Ereignisse mit Hilfe eines Bezugskörpers. Denn jede physikalische Beschreibung löst sich in eine bestimmte Anzahl von Aussagen auf, deren jede sich auf die raum-zeitliche Koinzidenz zweier Ereignisse A und B bezieht, und gerade diese Koinzidenz von Ereignissen dient als sog. „ Orientierungszustand“, von dem aus man weitere Zustände sich begegneter Punkte sinnvoll definieren und charakterisieren kann. D.h. die Bezugskörper werden in der Allgemeinen Relativitätstheorie einfach von durch Gaußsche Koordinaten bestimmten „Koinzidenzzuständen“ zweier zu untersuchender physikalischer Ereignisse abgelöst, ja Bezugskörper sind Prinzipiell diese „Koinzidenzzustände“ (nämlich kartesische Koordinatensysteme) für euklidischen Kontinua der Speziellen Relativitätstheorie!

d) Weiterführende Bemerkungen

- Sich langsam bewegende astronomische Objekte (wie beispielsweise Planeten), die entlang von langen Umlaufradien geprägter Bewegungsbahnen um eine zentrale Masse (wie unsere Sonne oder irgendeinen anderen Stern) rotieren, befolgen der Allgemeinen Relativitätstheorie zufolge, Bahnen, deren geometrische Form nicht völlig derjenigen einer von Newton vorhergesagten standarden Idealellipse entspricht. Solche Bewegungsbahnen, vor allem die eines in ein Schwarzes Loch hineinfallenden Sterns, können sogar spiralförmig sein.

- Diese Formkomplexität von (planetaren) Bewegungsbahnen hat allerdings nichts mit der von gegenseitiger Anziehung zwischen rotierender und zentraler (inerter) Masse herrührender Präzession des rotierenden Objekts zu tun und tritt sogar im Bezuge auf Bewegungsbahnen nicht um die eigene Achse rotierender Körper auf.

- In unserem Sonnensystem tritt dieser als Langachsenrotation bekannte, verhältnismäßig sehr schwer praktisch nachweisbare Effekt in Form einer „Anomalie“ der Rotationsbahn Merkurs zu Tage; genauer gesagt geht es dabei um die Präzession des Perihels, des Bahnpunktes des kleinsten Abstandes Merkurs von der Sonne, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins überzeugend erklärt und auch experimentell zufriedenstellend gemessen werden konnte.

6. Gravitationswellen und ihr (direkter) Nachweis

a) Genauere Formulierung des Allgemeinen Relativitätsprinzips

- Alle Gaußschen Koordinatensysteme sind für die Formulierung der allgemeinen Naturgesetze prinzipiell gleichwertig. Diese Gaußschen Koordinatensysteme stellen nichtstarre, nichteuklidische allgemeinrelativistische Bezugskörper („Mollusken“) dar, ähnlich wie starre, der euklidischen Geometrie genügende kartesische Inertialsysteme als bevorzugte Bezugskörper gedacht werden können. In der Allgemeinen Relativitätstheorie existiert keine Bevorzugung unter einzelnen „Mollusken“, einzig raum-zeitliche Koinzidenzpunkte des vierdimensionalen Kontinuums von zwei oder mehreren Ereignisweltlinien sich bewegender Punkte spielen eine übergeordnete Rolle von Orientierungspunkten bei der Zeit- und Abstandsmessung.

b) Der physikalische Feldbegriff

- Felder sind physikalische Realitäten, die derjenigen der Materie völlig gleichwertig sind , ja diese sogar völlig ersetzen können! Felder und Materie sind also zwei völlig selbständige Begriffe.

- Rene Descartes behauptete: “Einen leeren Raum kann es nicht geben! Denn Raum ist eine an Ausdehnung materieller Körper gebundene Eigenschaft und kann nicht ohne diese existieren!”

- Die Allgemeine Relativitätstheorie betrachtet diese Aussage Descartes als prinzipiell richtig und argumentiert: es mag einen materiefreien Raum im Newtonschen Sinne geben, wie etwa Vakuum – ein feldfreier Raum dagegen, im Sinne der klassischen Mechanik als Bühne für physikalische Ereignisse betrachtet, der sogar dann übrig bleibt, wenn das Materielle völlig weggedacht werden könnte, existiert nicht!

- Erst wenn man die Descartes’sche Ablehnung des „leeren Raumes“ auf die eben geschilderte Art liest, wird ihre intuitiv richtige, grandiose Kernaussage, die, solange man das physikalisch Reale ausschließlich im Sinne der klassischen Mechanik in ponderablen materiellen Körpern erblickt, völlig absurd erscheinen mag, durch die Idee des Feldes als Darsteller des Realen in Verbindung mit dem Allgemeinen Relativitätsprinzip in all ihrer Wahrheitspracht aufgezeigt.

c) Nachweis von Gravitationswellen

- Gravitationswellen können als periodische „Verzerrungen“ der Gravitationsfeldmembran betrachtet werden. Wie sehen denn diese „Verzerrungen“ aus? Man stelle sich einen „Gummikreisring“ als Ausschnitt der elastischen Gravitationsmembran vor, der gegenüber der Quelle von Gravitationswellen senkrecht steht. Passiert die sich radial ausbreitende Gravitationswelle ähnlich einer „Schockwelle“ diesen „Ring“, so „deformiert“ er sich – er wird nämlich zunächst in die eine Hauptachsenrichtung, dann aber in die andere gestreckt und damit zur Ellipse verformt, um nach dem Vorbeilaufen der Welle zur ursprünglichen Kreisform zurückzufinden. Dieses periodische Muster der gegenseitigen Streckung und Stauchung des „Gummikreisrings“ in beiden zueinander senkrechten Hauptachsenrichtungen darf als charakteristisches Zeichen (Symptom) für das Auftreten und Ausbreitung der Gravitationsstrahlung in einem Gravitationsfeldbereiche angesehen werden

- Gravitationswellen können mittels eines interferometerähnlichen, L-förmigen Detektors nachgewiesen werden, sodass Laserstrahlen eine Zentralmasse, hinter der sich der Laser befindet, passieren und beide ungleiche, zueinander orthogonale Entfernungsstrecken A und B von erwähnter Zentralmasse zu weiteren zwei, an beiden Enden der L-Form angebrachten, mit Reflexionsspiegeln versehenen Massen überschreiten.

- Gravitationswellen verursachen abwechselnde Längenänderungen der Strecken A und B zueinander, was zur Konsequenz Änderungen des durch an beiden Endmassen reflektierte Laserstrahlen verursachten Interferenzmusters im unter der Zentralmasse positionierten Photodetektor hat. Diese Interferenzmusteränderungen bewegen sich in einem Trillionstelbruchteil der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, weswegen der Nachweis von Gravitationswellen im Allgemeinen äußerst aufwendig verläuft.

7. Weitere Untersuchungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

a) *Die Lichtablenkung durch das Gravitationsfeld*

- Einen Stern, der, wäre die Sonne nicht vorhanden oder den Lichtstrahlen auf dem Wege stehen, würde man direkt als unendlich weit entfernten Punkt im Weltraum sehen. Nun soll zwischen dem Beobachter und dem beobachteten Stern die Sonne stehen. Der Stern, der sich immer noch im nämlichen „Weltallpunkt“ befindet, erscheint dem Beobachter dieses Mal als von seiner ursprünglichen (wahren) Position nach rechts hin verschoben.

- In der Praxis werden zur Prüfung dieses Sachverhaltes zunächst die Sterne in der Sonnenumgebung während einer Sonnenfinsternis fotografiert. Einige Monate später oder früher, wenn sich die Sonne an einer anderen Himmelsstelle befindet, wird eine zweite Fotographie derselben Sterne durchgeführt. Dann haben, wenn die obige theoretische Vorhersage stimmen sollte, die während der Sonnenfinsternis aufgenommenen Sternbilder gegenüber der zweiten Aufnahme radial nach außen, d.h. vom Sonnenmittelpunkt weg verschoben sein.

- Dieses Ergebnis wurde tatsächlich während der Sonnenfinsternis vom 30. Mai 1919 im Auftrag der Royal Society u.a. auch vom Astronomen Eddington, wie Einstein bescheiden feststellt, fast auf hundertstel Millimeter genau „befriedigend bestätigt“.

Tabelle 1: Mess- und Beobachtungsergebnisse von Sir Arthur Eddington vom 30. Mai 1919

Nummer des Sterns	*1. Koordinate*		*2. Koordinate*	
	beobachtet	**berechnet**	**beobachtet**	**berechnet**
11	– 0,19	– 0,22	+ 0,16	+ 0,02
5	– 0,29	– 0,31	– 0,46	– 0,43
4	– 0,11	– 0,10	+ 0,83	+ 0,74
3	– 0,20	– 0,12	+ 1,00	+ 0,87
6	– 0,10	– 0,04	+ 0,57	+ 0,40
10	– 0,08	+ 0,09	+ 0,35	+ 0,32
2	+ 0,95	+ 0,85	– 0,27	– 0,09

(b) Die Perihelbewegung des Planeten Merkur

- Newtons Gravitationsgesetz behauptet, ein einziger um die Sonne kreisender Planet würde um sie bzw. um den gemeinsamen Schwerpunkt der Sonne und des Planeten eine Ellipsenbahn beschreiben, wobei diese Ellipsenbahn als fix im Raume zu denken wäre, sodass die Sonne in einem der beiden Ellipsenbrennpunkte läge. Spannt man die Gedanken weiter aus, so ergibt sich, dass der Abstand zwischen der Sonne und dem betrachteten Planeten im Laufe eines Planetenjahres von einem Minimum (dem Perihel, dem Punkte auf der Ellipsenbahn des kleinsten Abstandes des Planeten von der Sonne) bis zu einem Maximum (dem sog. Aphel) anwächst, um wieder abzunehmen, bis der Perihel erneut erreicht ist und neuer Jahreszyklus der Planetenrotation beginnt.

- Der Allgemeinen Relativitätstheorie zufolge soll in der Beschreibung der Rotationsbahn eines Planeten um die Sonne allerdings eine kleine rechnerische, vom Einflusse des vorhandenen Gravitationsfeldes der Sonne herrührende Abweichung von Kepler – Newtonschen Bahnbewegung derart berücksichtigt werden, dass der zwischen zwei Perihelpunkten der Umlaufbahn vom Radius zwischen der Sonne und dem Planeten beschriebene Winkel (im absoluten Winkelmaß natürlich) nicht ۲π sondern

$$۲٤\pi^{۳}\frac{a^{۲}}{[T^{۲}c^{۲}(۱-e^{۲})]}$$

betragen soll.

Hierbei bedeuten *a* die Große Halbachse der Ellipse, *e* deren Exzentrizität, *c* die Lichtgeschwindigkeit und T die Umlaufsdauer des Planeten um die Sonne.

- Aus angeführter Identität geht eindeutig hervor, dass nach der Allgemeinen Relativitätstheorie die Ellipse nicht, im Gegensatz zur Newtonschen Interpretation, fix ist, sondern dass deren Große Halbachse im Sinne der Bahnbewegung um die Sonne rotiert, wobei diese Drehung der Großen Halbachse für den Planeten Merkur 43'' (Bogensekunden) in 100 Jahren betragen und bei anderen Planeten unseres Sonnensystems unmerklich sein müsste. Diese Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie wurde 1895 durch Messungen von **Leverrier** mit einer Fehlerbreite von einigen Bogensekunden eindrucksvoll bestätigt.

- Man gelangt durch das eben Erwähnte zum folgenden Schluss: Während die klassische Mechanik ungeheuer komplizierte Hypothesen einführen muss, um dieses Messergebnis der Rotation der Merkurellipse zu erklären, besagt die Allgemeine Relativitätstheorie, dass jede Planetenellipse um die Sonne ähnlich der Merkurellipse zu rotieren hat, dass diese Rotation bei allen Planeten des Sonnensystems außer Merkur jedoch zu klein ist, um bei der (gegenwärtig) erzielbaren Beobachtungsgenauigkeit festgestellt zu werden.

8. Bibliographie

- **[1] Begelman, Mitchell / Rees, Martin**: „*Gravity's fatal Attraction*", Scientific American Library 1998.
- **[2] Einstein, Albert**: „*Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*", Springer-Verlag 2001.
- **[3] Einstein, Albert**: „*Grundzüge der Relativitätstheorie*", Springer-Verlag 2002.
- **[4] Freund, Jürgen**: „*Spezielle Relativitätstheorie für Studienanfänger*", vdf – Hochschulverlag, Zürich 2005.
- **[5] Goldstein, Herbert / Poole Jr., Charles P. / Safko, John L.**: „*Klassische Mechanik*", Wiley-VCH, 2006.
- **[6] Misner, Charles M. / Thorne, Kip S. / Wheeler, John A.**: „*Gravitation*", W. H. Freeman and Company, 2003.
- **[7] Nolting, Wolfgang**: „*Grundkurs Theoretische Physik, Band 4: Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik*", Springer-Verlag 2002.
- **[8] Rindler, Wolfgang**: "*Introduction to Special Relativity*", Oxford University Press 1991.
- **[9] Rindler, Wolfgang**: "*Relativity: Special, General, and Cosmological*", Oxford University Press, 2001.
- **[10] Schröder, Ulrich E.**: „*Gravitation – Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie*", Verlag Harri Deutsch 2004.
- **[11] Weizsäcker, Carl F. v.**: „*Zum Weltbild der Physik*", S. Hirzel – Verlag Stuttgart 1976.