JÜRGEN ALTENBRUNN

Die Masse - Energie - Äquivalenz und Folgerungen daraus

Inhalt

Zusammenfassung

Jede Masse hat eine Energie, und jede Energie hat eine Masse. Diese Folgerung aus der Masse - Energie - Äquivalenz gilt immer und überall und für alle Energien und Energieformen. Es gilt auch für elektromagnetische Felder (Photonen), Bindungsenergien in Atomen, elektrische Felder (Ladungen) und auch für die kinetische und die potentielle Energie von Massen.

Der Einfluß der potentiellen Energie auf eine Masse ist bisher wenig untersucht und soll hier etwas verdeutlicht werden.

Die wesentlichste Folge der Berücksichtigung der Masse der potentiellen Energie ist das Verschwinden der Singularitäten in der Relativitätstheorie.

1. Einleitung

Albert Einstein hat 1905 die spezielle Relativitätstheorie veröffentlicht. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde auch seine berühmte Gleichung zur Masse - Energie - Äquivalenz

(1) $$E = m \cdot c^2$$

publiziert. Ich möchte hier nun kurz ein wenig aufzeigen, welche Folgerungen sich daraus ergeben. Ganz speziell möchte ich auch eine ganz wesentliche Folge für die Relativitätstheorie zeigen.

2. Die Masse - Energie - Äquivalenz

Äquivalenz bedeutet eine gewisse Entsprechung von Eigenschaften. Man kann für eine Erscheinung eine andere äquivalente Erscheinung einsetzen. In unserem Fall sind das Masse und Energie. Jede Masse hat eine Energie. Und die Energie einer Masse kann man mit Gleichung (1) ausrechnen. Das ist allgemein akzeptiert. Es gilt aber auch umgekehrt : jede Energie hat eine Masse. Das wird deutlich, wenn man Gleichung (1) umstellt. Man erhält

(2) $$m = \frac{E}{c^2}$$

und kann damit die Masse einer beliebigen Energie ausrechnen. Wenn jede Energie eine Masse hat, dann bedeutet das aber auch, daß jede Energie auch schwer und träge ist.

Ich möchte das hier an einem Beispiel verdeutlichen. Ein Photon ist eigentlich nur Energie. Es ist das Wechselwirkungs-Energiequantum des elektromagnetischen Wechselfeldes oder der elektromagnetischen Welle. Ein Photon hat die Energie

(3) $$E = h \cdot f$$

Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum und f die Frequenz des elektromagnetischen Feldes. Wenn man jetzt Gleichung (3) in Gleichung (2) einsetzt, erhält man

(4) $$m = \frac{h \cdot f}{c^2}$$

Das ist die Masse eines Photons. Da sich ein Photon immer mit Lichtgeschwindigkeit c in Ausbreitungsrichtung des elektromagnetischen Feldes bewegt, hat ein Photon auch immer einen Impuls. Der Impuls des Photons ist :

$$p = m \cdot c = \frac{h \bullet f}{c} \tag{5}$$

Bei einer senkrechten Reflektion des Lichtes in einem Spiegel wird der doppelte Impuls auf den Spiegel übertragen und erzeugt eine meßbare Kraft auf den Spiegel. Man kann also über die Masse - Energie - Äquivalenz Masseeigenschaften des Photons bestimmen, obwohl das Photon ja nur das Wechselwirkungs-Energiequantum der elektromagnetischen Welle ist.

Auch die kinetische Energie hat eine Masse. Die Masse der kinetischen Energie kommt in der relativistischen Massenzunahme zum Ausdruck. Diese Massezunahme ist für Geschwindigkeiten die wir üblicherweise benutzen so klein, daß wir sie nicht messen können. Nur einige Elementarteilchen-Beschleuninger können Elementarteilchen so weit beschleunigen, daß deren Bewegungsenergie weitaus größer ist, als deren Energie der Ruhemasse. Diese Elementarteichen werden dabei durch die kinetische Energie deutlich schwerer.

Auch die potentielle Energie hat eine Masse. Das ist aus der Atomphysik bekannt. Die Bestandteile eines Atomkerns wiegen mehr als der Atomkern selbst. Bei der Fusion des Atomkerns wird potentielle Energie der Bestandteile des Kerns zu einander frei. Und diese frei werdende Energie macht den Atomkern leichter.

Der Einfluß der potentiellen Energie auf die Masse eines Objektes gilt natürlich nicht nur im Atomkern, er gilt in jedem Kraftfeld, in dem potentielle Energie gespeichert ist. Auch im Gravitationsfeld.

Jedes Potential Energie zu erzeugen ist endlich, es gibt kein unendlich großes Potential. Auch an Punktmassen (die es ja nicht gibt) ist das Gravitationspotential nicht unendlich ! Aus einem unendlich großen Potential ließe sich ja auch unendlich viel Energie erzeugen. Und unendlich viel Energie gibt es nicht (Energieerhaltung). Daher gibt es auch kein Potential, bei dem ein Körper, um dem Potential zu entweichen, Lichtgeschwindigkeit oder noch größere Geschwindigkeiten benötigen würde. Dieser Körper würde dann unendlich viel Energie beim Fallen aufnehmen.

Abschließend kann man sagen : jede Masse hat eine Energie und umgekehrt gilt ebenso : jede Energie hat eine Masse, ausnahmslos jede. Unendlich große Massen gibt es nicht, und unendlich große Energien gibt es auch nicht in dem Teil des Universums, den wir überblicken können.

3. Der Einfluß der potentiellen Energie auf die Masse

Wenn von einem Objekt ein Kraftfeld ausgeht, dann hat dieses Objekt ein Potential. Das Objekt hat das Potential (die Fähigkeit) Energie zu erzeugen. Die erzeugbare Energie entsteht natürlich nicht aus dem Nichts, sondern ist schon in dem Kraftfeld enthalten. Das bedeutet, daß das Objekt, von dem das Kraftfeld ausgeht, so viel Masse entsprechend Gleichung (2) haben muß, wie mit dem Kraftfeld maximal an Energie erzeugbar ist. Die Energie, die mit dem Kraftfeld erzeugbar ist, ist vor der Erzeugung im Kraftfeld enthalten. Auf Grund der Masse - Energie - Äquivalenz wird dadurch das Objekt, von dem das Kraftfeld ausgeht schwer und träge. Das trifft auf das Gravitationsfeld genau so zu, wie auf das elektromagnetische Feld zu. Es triff auf jedes Kraftfeld zu.

Durch die Erzeugung von Energie mit einem Kraftfeld wird diesem Kraftfeld Energie entzogen. Entsprechend der Masse - Energie - Äquivalenz wird das Objekt, von dem das Kraftfeld ausgeht durch den Energieentzug auch leichter. Die potentielle Energie eines Objektes beeinflußt also auch die Masse eines Objektes.

Der Einfluß der potentiellen Energie eines Objektes auf die Masse des Objektes ist in der Physik bis heute nicht komplett berücksichtigt. Und das hat tiefgreifende Folgen.

Wenn man ein Objekt von einer Masse hochhebt, dann vergrößert man die potentielle Energie des Objektes und die Masse des Objektes wird ebenso größer. Bisher hat noch niemand so etwas bewußt erlebt, oder nachmessen können. Das liegt daran, daß die Massedifferenz bei uns auf der Erde so extrem klein ist.

Beispielsweise wird eine Masse, die auf der Erdoberfläche 1000 kg wiegt, durch das Anheben in 36000 km Höhe (synchrone Umlaufbahn) nur um etwa $6 \cdot 10^{-7}$ kg (0,6mg) mehr. Das ist viel zu wenig, um es nachzuweisen. Und diese Massezunahme kann man auch nur über die Wirkung der Trägheit nachweisen, denn mit der Höhe nimmt das Gravitationsfeld der Erde viel stärker ab, als die Masse des hochzuhebenden Objektes zunimmt. Die Gewichtskraft eines hochzuhebenden Objektes nimmt also in jedem Fall ab, auch wenn die Masse des Objektes beim Hochheben minimal zunimmt.

Umgekehrt wird natürlich potentielle Energie frei, wenn man aus der Höhe ein Objekt auf eine Masse herunterlassen würde. Damit wird die Masse des Objektes durch das Herunterlassen auf die Masse kleiner. Wesentlich werden diese Masseänderungen erst bei Abständen unterhalb von 10 Schwarzschild-Radien.

Der Schwarzschild-Radius R_S ist definiert als

$$R_S = \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2} \tag{6}$$

Das ist ein sehr kleiner Radius, der nur von der Masse m, der Gravitationskonstanten G und der Lichtgeschwindigkeit c abhängig ist. Der Durchmesser der Sonne ist $1{,}4 \cdot 10^6$ km (1400000 km, 1,4 Millionen km). Die Masse der Sonne müßte in einer Kugel mit weniger als 6 km Durchmesser konzentriert sein, damit man sich bis auf den Schwarzschild-Radius von knapp 3 km annähern könnte. Es sind also Massen erheblicher Dichte notwendig, um sich einer Masse bis auf den Schwarzschild-Radius nähern zu können. Nur im kosmologischen Maßstab sieht das anders aus.

Mit Punktmassen wird der Einfluß der potentiellen Energie auf die Masse noch deutlicher. Punktmassen gibt es nicht, und so bleibt es eine theoretische Betrachtung. Aber wenn man zwei gleichgroße Punktmassen langsam aneinander annähert, bis sie beide am selben Punkt sind, und die potentielle Energie dabei aus dem System entfernt, dann wurde alle potentielle Energie nach außen abgegeben. Das System der beiden Punktmassen hat dann auch keine Masse mehr, es existiert nicht mehr. Deshalb kann man auch sagen, die Ruhemasse eines Objektes ist nichts weiter, als die potentielle Energie der Masse des Objektes gegen die Unendlichkeit. Bei sehr kleinen und dichten Objekten läßt sich diese Ruhemasse effektiv in andere Energieformen umsetzen. Bei Objekten mit gewöhnlicher Dichte hat die potentielle Energie in den uns zugänglichen handhabbaren Systemen (außerhalb der subatomaren Physik) keinen meßbaren Einfluß auf die Masse.

Wenn Massen bis auf die Größenordnung des Schwarzschild-Radiusses oder noch näher aneinander angenähert werden, spielt die Masse der potentiellen Energie eine wesentliche Rolle.

Das selbe gilt natürlich nicht nur für Gravitationsfelder sondern auch für elektrische Felder. Wenn man zwei betragsgleiche entgegengesetzte Punktladungen langsam aneinander annähert, baut man die potentielle Energie der Ladungen zueinander ab. Wenn die beiden Punktladungen am selben Ort angelangt sind, gibt es keine potentielle Energie und auch keine Ladung mehr. Alle verfügbare potentielle Energie wurde dann abgebaut. Dieser Vorgang ist absolut äquivalent zur Annäherung zweier Punktmassen, aber bedeutend plausibler.

4. Folgerungen aus dem Einfluß der potentiellen Energie auf die Masse

Aus der Änderung der Masse durch die potentielle Energie ergeben sich tiefgreifende Schlußfolgerungen.

Bei Newton gab es das Axiom : träge Masse = schwere Masse. Es war nicht beweisbar und deshalb ein Axiom. Bis in das 20. Jahrhundert hat man genau geprüft, ob dieses Axiom auch wirklich immer und überall stimmt. Man hat keine Abweichungen gefunden. Bei Einstein hieß das Äquivalenzprinzip. Man kann die Gravitationskraft (lokal) nicht unterscheiden von einer beliebigen anderen Kraft auf ein Objekt. Wenn man die Masse der potentiellen Energie betrachtet, kann man das Axiom der Newtonschen Mechanik über die Energieerhaltung belegen. Es ist dann kein Axiom mehr, sondern über ein mathematisches Modell begründbare Tatsache. Mit Hilfe der Masse - Energie - Äquivalenz.

In meinen Augen die wichtigste Folge der Berücksichtigung der Masse der potentiellen Energie ist das Verschwinden der Singularitäten in der Relativitätstheorie. Das ist ausführlich in [1] beschrieben. Der Ereignishorizont verschwindet. Für reale Massen mit endlicher Dichte (keine Punktmassen) werden auch keine neuen Singularitäten erzeugt. Es ergibt sich nirgendwo eine unendliche Rotverschiebung. Man kann von außen prinzipiell auch Objekte innerhalb des Schwarzschild-Radiusses sehen, und auch Physik innerhalb des Schwarzschild-Radiusses betreiben. Wie in [3] gezeigt wird, können die Rotverschiebungen aber so extrem groß werden, daß das Objekt keinerlei meßbare Strahlung mehr emittiert. Die Massekonzentration in galaktischen Zentren sind so groß, daß Objekte durch die extreme Rotverschiebung nur noch als schwarze Objekte erscheinen. Das ist in [3] dargelegt.

Abschließend möchte ich noch einige Bilder zeigen, in denen die Abhängigkeit der Masse und der Kraft von der Entfernung zur anderen Masse dargestellt sind. In diesen Bildern wir der Einfluß der potentiellen Energie auf die Masse sehr deutlich. Es werden zwei Fälle dargestellt: im ersten Fall werden zwei gleichgroße Massen aneinander angenähert, und im zweiten Fall wird eine sehr kleine Masse an eine sehr große Masse angenähert. Die Herleitung der Abhängigkeiten ist in [1] aufgezeigt. Da dieses hier eine populärwissenschaftliche Schrift sein soll, möchte ich die Rechnung hier weglassen. Auch die hier gezeigten Bilder stammen aus [1] . Wer sich für die Rechnung interessiert, kann sich in [1] informieren.

Die Veränderung zweier gleichgroßer Massen bei ihrer Annäherung ist im Bild 1 dargestellt. Beide Massen verändern sich in der selben Weise und bleiben daher, auch wenn sie sich bei der Annäherung verändern, immer gleich groß. Die Masse ist als Verhältnis der aktuellen Masse m_A zur Anfangsmasse m_0 dargestellt, und die Entfernung ist als Verhältnis der Entfernung r zum Schwarzschild-Radius R_{S0} der Anfangsmasse m_0 dargestellt. Dadurch erhält man normierte Darstellungen. Man kann erkennen, daß für große Entfernungen gilt

(7) $$m_A = m_0 = \text{const.} \qquad (m_A \text{ nähert sich beliebig an } m_0)$$

Das entspricht unserer Erfahrung (Abweichungen unter 1% kann man in der graphischen Darstellung der Kurve nicht mehr erkennen). Für sehr kleine r gilt

(8) $$m_A = \frac{2 \cdot c^2}{G} \cdot r \qquad (\text{für sehr kleine Entfernungen } r)$$

Die aktuelle Masse der Objekte ist direkt proportional zum Abstand bei sehr kleinen Abständen. Zwischen den beiden Kurventeilen gibt es einen Übergang. Die vollständige Gleichung für Abhängigkeit der

Masse von der Entfernung bei Annäherung zweier gleicher Massen lautet

(9) $$m_A = \frac{r}{\frac{G}{2 \cdot c^2} + \frac{r}{m_0}}$$

Wenn man eine sehr kleine an eine sehr große Masse annähert, passiert durchaus vergleichbares. Es ändert sich aber fast nur die kleine Masse, die große Masse ändert sich so wenig, daß man sie als konstant ansehen kann. Abweichungen treten erst auf, wenn man sehr viele kleine Massen auf die große Masse herabläßt. Die Abhängigkeit der kleinen Masse von der Entfernung zur großen Masse ist in Bild 2 dargestellt. Die kleine Masse ist als Verhältnis von aktueller kleiner Masse m_{KA} zur kleinen Anfangsmasse m_{K0} dargestellt und der Abstand r ist als Verhältnis r zum Schwarzschild-Radius der großen Masse R_{SG} dargestellt. Die Kurve sieht durchaus vergleichbar zur Kurve im Bild 1 aus, ist aber anders geformt. Für große Abstände r gilt wieder etwa

(10) $$m_{KA} = m_{K0} = \text{const.}$$ (Näherung siehe Gleichung (12))

Für die Abhängigkeit der Masse zum Abstand r gilt die e-Funktion

(11) $$m_{KA} = m_{K0} \cdot e^{-\frac{R_{SG}}{4 \cdot r}}$$ (gilt für alle Abstände)

Wie im Bild 2 zu erkennen ist, geht diese Funktion für kleine r recht schnell gegen 0, die kleine Masse nimmt also unterhalb des Schwarzschild-Radiusses der Großen Masse bei der Annäherung an die große Masse sehr schnell ab.

Als Näherung für kleine Massendifferenzen gilt

(12) $$m_{KA} = m_{K0} \cdot \left(1 - \frac{R_{SG}}{4 \cdot r}\right)$$ (Näherung für große Abstände)

oder auch für die Massendifferenz

(13) $$m_{K0} - m_{KA} = m_{K0} \cdot \frac{R_{SG}}{4 \cdot r}$$ (Näherung für große Abstände)

Man sieht also, die Massendifferenz ist umgekehrt proportional zum Abstand der Massen. Beim größten Abstand ist die geringste Massendifferenz.

Der Verlauf der Kräfte zwischen den Massen ist in den Bildern 3 und 4 dargestellt. Dabei fällt auf, daß es eine maximale Kraft bei der Annäherung von zwei gleichgroßen Massen gibt. Bei der weiteren Annäherung der Massen wird immer genau so viel potentielle Energie (und damit auch Masse) abgebaut, daß die anziehende Kraft konstant bleibt. Diese maximale Kraft ist unabhängig von der Masse

(14) $$F_{MAX} = \frac{4 \cdot c^4}{G} = 4{,}8410 \cdot 10^{44}\ \text{N} \qquad \text{(für beliebige Massen)}$$

Im Bild 3 ist der Kraftverlauf bei der Annäherung von zwei gleicher Massen dargestellt. Ganz klar geht die Kurve mit zunehmendem r von $F = F_{MAX} = \text{const.}$ in die Kurve F proportional $1/r^2$ über.

Der Kraftverlauf für die Annäherung einer kleinen an eine große Masse ist im Bild 4 dargestellt. In diesem Beispiel wurde eine kleine Masse von 1 kg an eine große Masse von $6{,}7329 \cdot 10^{30}$ kg (R_{SG}=10km) angenähert. Man kann erkennen, daß die Kraft bei der Annäherung aus der Entfernung wieder zu $1/r^2$ proportional ist. Etwa bei 0,13 R_{SG} wird ein Kraftmaximum erreicht, bei weiterer Annäherung geht die Kraft sehr schnell gegen 0. Die maximale Kraft ist weit entfernt (über 30 Größenordnungen) von F_{MAX} und ist proportional zu m_K. Die Masse m_K ist auch mehr als 30 Größenordnungen kleiner als m_G.

Ich mache noch einmal darauf aufmerksam, daß in dieser Betrachtung hier nur das Gravitationspotential der Masse beschrieben ist. Es ist die Fähigkeit beschrieben, aus dem Potential Energie zu gewinnen. Es ist keine Fallbewegung (freier Fall) beschrieben ! Die Annäherung der Massen soll bei dieser Betrachtung bei geringen Geschwindigkeiten erfolgen, bei denen die Bewegungsenergie keine Rolle spielt. Beim freien Fall im relativistischen Bereich sieht das anders aus ! Diese Fallbewegung ist nur in [4] bechrieben. Aber auch da ist die Energieumsetzung begrenzt ! Auch da kann kein ruhemassebehaftetes Objekt die Lichtgeschwindigkeit erreichen ! Auch nicht am Schwarzschild-Radius.

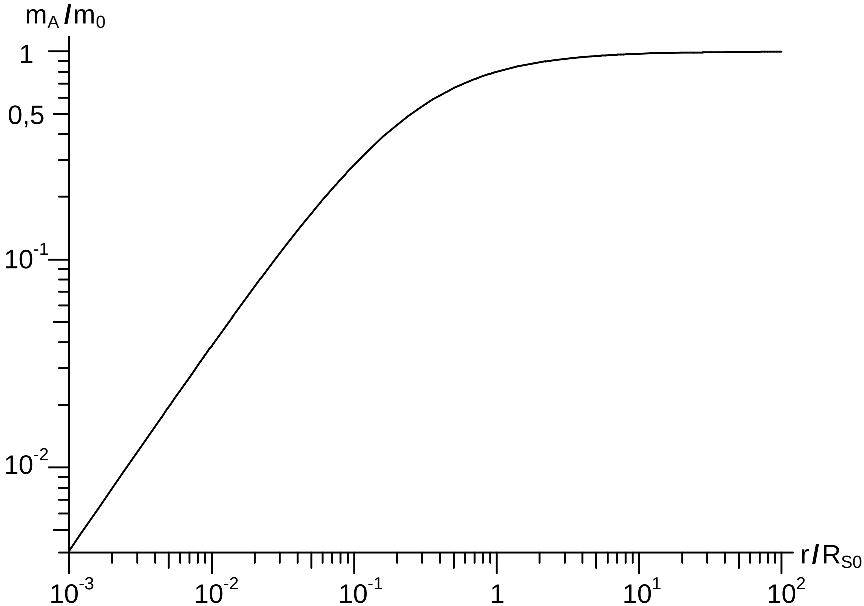

Bild 1: Annäherung zweier gleicher Massen. Darstellung der Masse m_A/m_0 in Abhängigkeit von der Entfernung r/R_{S0}. m_A ist die aktuelle Masse, m_0 ist die Anfangsmasse der beiden Massen, und R_{S0} ist der Schwarzschild-Radius jeder Anfangsmasse

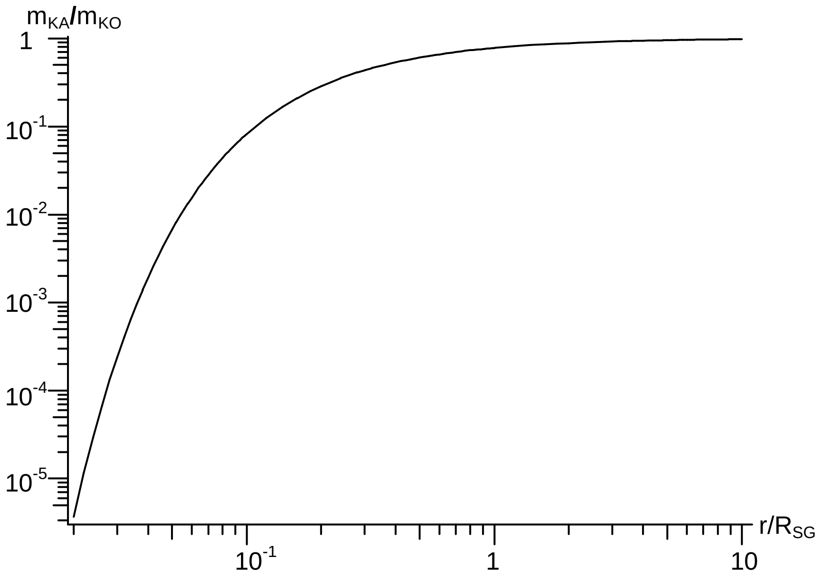

Bild 2 : Abhängigkeit der kleinen Masse m_A/m_0 vom Abstand r/R_{SG} zur großen Masse

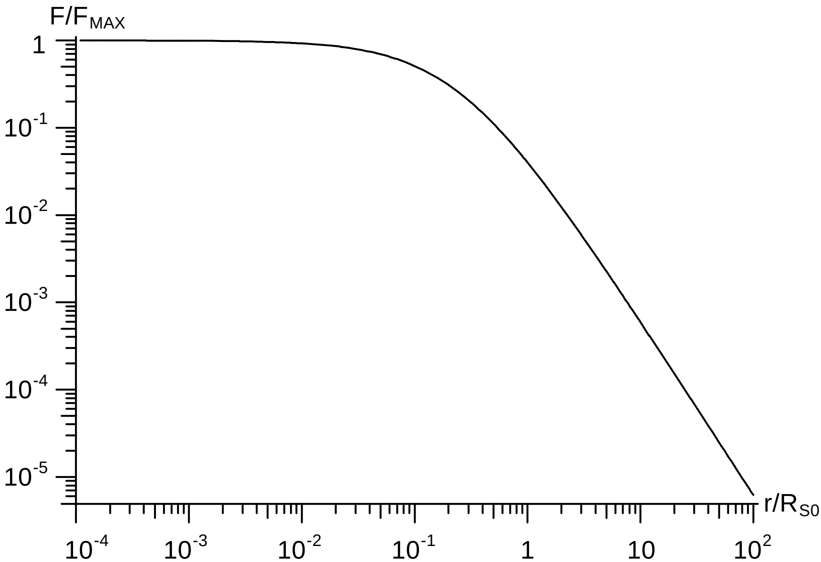

Bild 3 : Verlauf der Kraft F/F_{MAX} zwischen zwei gleichen Massen über die Entfernung r/R_{S0}. Auch hier ist F_{MAX} die maximale Kraft von $4{,}84 \cdot 10^{44}$ N und R_{S0} ist der Schwarzschild-Radius der ursprünglichen Masse von Masse1 oder Masse2.

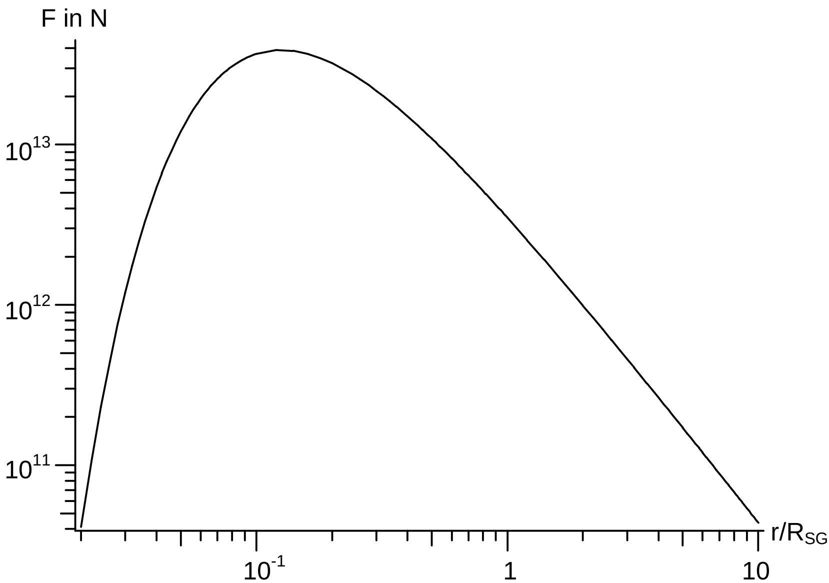

Bild 4 : Abhängigkeit der Kraft auf eine kleine Masse von 1kg vom Abstand zur großen Masse von $6{,}7329 \cdot 10^{30}$ kg (R_{SG}=10km)

5. Literatur / Referenz

Bis auf [3] sind die Dateien als PDF-Dateien im Internet auf :

www.altenbrunn.de/wissen.htm

erhältlich. Dort sind auch noch andere Dateien zum herunterladen, einige auch in englischer Sprache. Die englisch-sprachigen Dateien sind Übersetzungen der deutschen Originaldateien.

[1] Jürgen Altenbrunn, Die Relativitätstheorie ohne Singularitäten
Selbstverlag (PDF im Internet auf www.altenbrunn.de)
(in englisch auch www.vixra.org/abs/1502.0233)

[2] Jürgen Altenbrunn, Die kosmologische Rotverschiebung als Folge der allgemeinen Relativitätstheorie
Selbstverlag (PDF im Internet auf www.altenbrunn.de)
(in englisch auch www.vixra.org/abs/1502.0235)

[3] Jürgen Altenbrunn, Rotverschiebung bei Sagittarius A*
(bisher noch nicht veröffentlicht, PDF bei mir erhältlich)

[4] Jürgen Altenbrunn, Die Fluchtgescwindigkeit einer kleinen Masse aus dem Schwerefeld einer großen Masse.
Selbstverlag (PDF im Internet auf www.altenbrunn.de)