

# **Eine Erklärung der Masse des Elektrons auf der Basis der Energie seiner Felder**

von Claus W. Turtur

Adresse des Autors: Prof. Dr. Claus W. Turtur  
Fachhochschule Braunschweig- Wolfenbüttel  
Salzdahlumer Straße 46/48  
D - 38302 Wolfenbüttel  
Telefon: 05331 / 939 - 3412  
E-Mail : C-W.Turtur@fh-wolfenbuettel.de

## **Zusammenfassung:**

Im Artikel wird gezeigt, daß die Masse des Elektrons vollständig durch die Energie seiner Felder erklärt werden kann, sobald alle seine Felder berücksichtigt werden – das elektrische Feld ebenso wie das magnetische Feld. Allerdings führt das Modell zu einem anderen Wert des Elektronenradius als dem klassischen Wert, nämlich:

$$r_0 = 4.9 \cdot 10^{-13} \text{ Meter .}$$

Basierend auf dem zugrunde liegenden Modell sollte es möglich sein, zu allen Teilchen die Masse aus der Energie seiner Wechselwirkungsfelder zu berechnen. In diesem Sinne könnte man das Modell als die "feldenergie- basierte Erklärung der Masse" bezeichnen, wobei die "ursächlichen" Wechselwirkungen (elektromagnetische, starke und schwache) aufgrund ihrer Wechselwirkungsenergie dafür verantwortlich wären, die Gravitation als "Folgewechselwirkung" hervorzurufen.

Da die Energie der Wechselwirkungsfelder sowohl in der klassischen Physik wie auch in der Quantenphysik berechnet werden können, ist das Modell für beide Arten von Ansätzen tauglich.

---

## **Inhaltsverzeichnis:**

1. Einleitung / Grundidee
2. Das Scheitern bisheriger Ansätze
3. Das Elektron als in sich bewegte Feldquelle
4. Diskussion der Ergebnisse
5. Ausblick in die Zukunft
6. Literaturliste

### **1. Einleitung / Grundidee:**

Der Versuch, die Masse von Elementarteilchen durch Bindungs- oder Wechselwirkungs- Energien zu erklären ist weit verbreitet. So erklärt man z.B. die Masse von Hadronen auf der Basis der Bindungsenergie der Quarks (siehe z.B. [PER 91] oder [FRA 99]), wobei allerdings noch immer die Ruhemasse der Quarks zu berücksichtigen ist. Führt man diese Sichtweise der Erklärung der Masse aufgrund

der Energie konsequent zu Ende, so will man die Masse von Elementarteilchen vollständig durch Bindungs- und Wechselwirkungs- Energien erklären.

In diesem Sinne stellen sich Elementarteilchen als Objekte dar, die irgendwelche Felder erzeugen, z.B. Felder der Coulomb- Wechselwirkung oder der starken oder der schwachen Wechselwirkung, ggf. auch mehrere dieser Felder gleichzeitig nebeneinander. In jedem dieser Felder ist eine gewisse Energie gespeichert - und ebendiese Energie soll es sein, die die gesamte Masse des jeweiligen Teilchens erklärt. Jedes Teilchen ist dann als räumliches Zentrum eines oder mehrerer Felder zu verstehen, eben als Feldquelle. Im Falle von Bindungsenergie herrschen im Volumen in der Nähe der aneinander gebundenen Feldzentren vergleichsweise hohen Energiedichten, die Felder kompensieren sich aber mit zunehmendem Abstand von den aneinander gebundenen Feldzentren gegenseitig.

In dieser Sichtweise ist das Wesen aller Masse nichts anderes als die Manifestation von Feldenergie, bzw. in einem quanten- oder einem feld- theoretischen Bild die Manifestation der Energie von Austauscheteilchen. Eben darin liegt die Idee des Konzeptes der feldenergiebasierten Masse.

Andersherum formuliert: Kennen wir die Felder eines Teilchens, so können wir aus deren Energie auf seine Masse zurückschließen. Auch dieser Ansatz ist nicht neu. So berichtet z.B. Feynman von dem Versuch, die Masse des Elektrons anhand seines elektrischen Feldes zu erklären (siehe [FEY 91]). Feynman kommt dabei zu dem Ergebnis, daß die Elektrodynamik hier zu Schwierigkeiten führt, und zwar sowohl die klassische Formulierung der Elektrodynamik nach Maxwell wie auch die moderne Quantenelektrodynamik. Feynman beschreibt sogar "Versuche der Abänderung einer Maxwell'schen Theorie" (siehe z.B. Kap. 28-5 in [FEY 91]), die alle erfolglos blieben.

In der hier vorliegenden Arbeit wird gezeigt, daß es durchaus möglich ist, die Masse des Elektrons vollständig anhand seiner Feldenergie zu erklären. Dies gelingt sogar schon auf der Basis der klassischen Maxwell'schen Elektrodynamik. Der entscheidende Punkt liegt in der Berücksichtigung sämtlicher Felder des Elektrons. So genügt es nicht, die im elektrostatischen Feld des Elektrons (also im Coulombfeld) enthaltene Energie zu berücksichtigen, vielmehr muß zusätzlich noch die im magnetischen Feld enthaltene Energie in die Berechnung mit aufgenommen werden. Berücksichtigt man diese beiden Felder, so läßt sich die Masse des Elektrons aufgrund der Feldenergie erklären, wie auf den nachfolgenden Seiten gezeigt werden wird. (Im ersten hier dargestellten Ansatz sei die Energie der schwachen Wechselwirkung als vernachlässigbar gering gegenüber der Energie der elektromagnetischen Wechselwirkung betrachtet.)

Anzumerken sei, dass man im Falle einiger Elementarteilchen heute einen Beitrag von Higgs- Bosonen zur Masse der Teilchen diskutiert ([HIG 64]). Dieser Beitrag ist natürlich wesentlich davon abhängig, wie groß die feldenergie- basierte Masse der Teilchen ist. Insofern ist die Berücksichtigung sämtlicher Felder zur Bestimmung der Teilmasse eine entscheidende Grundlage bei den Überlegungen zu den bis jetzt noch immer nicht experimentell verifizierten Higgs- Bosonen – vielleicht sogar eine Alternative dazu.

Bevor wir uns nun den Modellrechnungen zuwenden, sei noch eine kurze Anmerkung zum Umgang mit Vorstellungen der klassischen Physik angebracht:

Natürlich bedenkt man an dieser Stelle die Grenzen klassischer oder halbklassischer Sichtweisen in Dimensionen von Elementarteilchen. Deshalb ist im vorliegenden Artikel die Anwendung von Formeln der klassischen Physik auf solche beschränkt, die im mikroskopischen Bereich Gültigkeit besitzen – wie z.B. das Coulomb- Gesetz. Von dieser Begrenzung bleiben nichtklassische (modernere) Formeln, die speziell für den mikroskopischen Bereich entwickelt worden waren, freilich unberührt.

---

## **2. Das Scheitern bisheriger Ansätze**

Betrachten wir bisherige Ansätze (siehe z.B. [FEY 91]), so ist das Elektron als geladene Kugel anzusehen, die Ladung ist dabei homogen über die Oberfläche der Kugel verteilt. Die dort besprochenen Ansätze zur Erklärung der Masse des Elektrons auf der Basis des elektrostatischen Feldes führen zu Widersprüchen, d.h. die Theorie ist nicht selbstkonsistent. Man gelangt schließlich zu Annahmen wie Poincaré- Spannungen im Inneren des Elektrons, bei denen Dehnungen und Kräfte innerhalb der Elektronen- Oberfläche vorausgesetzt werden müssen. Zu guter Letzt führen derartige Ansätze zur Notwendigkeit einer Abänderung der Maxwell'schen Elektrodynamik, welche (wie eingangs erwähnt) bisher nicht gelungen ist.

Feynman berichtet von einer Reihe von Lösungsversuchen zu dieser Problematik, von denen keiner als befriedigend angesehen werden kann. Die Schwierigkeiten können laut Feynman auch dann nicht behoben werden, wenn man quantenphysikalische Ansätze wählt.

Betrachten wir nun die nachfolgend beschriebene Sichtweise, die als Weg zur Lösung des Problems zu verstehen ist, am Beispiel des Elektrons.

Tatsache ist, daß das elektrostatische Feld nicht das einzige Feld ist, welches vom Elektron erzeugt wird. Betrachten wir das Elektron (gemeinsam mit Feynman und den meisten anderen Ansätzen) als eine an der Oberfläche geladene Kugel, so erzeugt diese ein elektrostatisches Feld und aufgrund ihres Spins außerdem noch ein magnetisches Feldes. Bei der Berechnung der Feldenergie des Elektrons müssen dann beide Beiträge berücksichtigt werden, sowohl die elektrostatische als auch die magnetische Energie.

(Nebenbei sei bemerkt, daß der erste Einstieg in den Ansatz hier, noch nicht zum brauchbaren Endergebnis führen wird. Aber dieser Einstieg ist nötig, um in Kürze die endgültige Lösungen des Problems zu verstehen, die in Kapitel 3 durch minimale Änderungen am Einsteigmodell erhalten werden wird.

### Teil 1. Die elektrostatische Energie:

Im Innenraum des Elektrons herrscht das elektrische Feld NULL, im Außenraum folgt die Feldstärke dem Coulombgesetz:

$$|\vec{E}| = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (\text{Glg. 01})$$

$$\text{mit } q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Jm}} \quad [\text{KOH 85}]$$

**r = Abstand zum Mittelpunkt des Elektrons**

Damit ergibt sich die Energiedichte des elektrostatischen Feldes zu:

$$u_{\text{el,stat}} = \frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2 = \frac{q^2}{32\pi^2 \epsilon_0 r^4} \quad \begin{array}{l} \text{(im Außenraum des Elektrons)} \\ \text{[ALE 71/81]} \end{array} \quad (\text{Glg. 02})$$

Integration der Energiedichte über das Volumen des gesamten Raumes ( $\mathbb{R}^3$ ) liefert die im elektrostatischen Feld enthaltene Gesamtenergie, wobei nur Beiträge im Außenraum des Elektrons nicht verschwinden.:

$$W_{\text{elektr.}} = \int_{\mathbb{R}^3} u_{\text{el,stat}} dV = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_{r_0}^\infty \frac{q^2}{32\pi^2 \epsilon_0 r^4} \cdot r^2 \sin\vartheta \, dr \, d\vartheta \, d\varphi = \frac{q^2}{8\pi \epsilon_0 r_0} \quad (\text{Glg. 03})$$

mit  $r_0 =$  Radius der homogen geladenen Kugel "Elektron"

Anmerkung:

Nach dem bisher üblichen Ansatz führt diese Gleichung zur Definition des sog. klassischen Elektronenradius ([COD 98]) und zu den eingangs erwähnten Widersprüchen und Inkonsistenzen. Wir wollen hier aber noch das magnetische Feld des Elektrons aufgrund seines Spins mitberücksichtigen.

### Teil 2. Die magnetische Energie:

Wir bleiben zunächst beim Bild des Elektrons als Kugel mit homogen auf der Oberfläche verteilter Ladung. Aufgrund ihres Spins dreht sich die Kugel mit einer Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und erzeugt dadurch ein Magnetfeld, wobei die Feldstärke als Funktion des Ortes nach Biot- Savart ([ALE 71/81]) berechnet werden kann. Obwohl auch der jetzt zunächst gezeigte allererste Ansatz noch nicht zu einer konsistenten Theorie führt wollen wir ihn dennoch nachfolgend kurz skizzieren, da im Anschluß daran eine stimmige, konsistente Erklärung folgen wird, die auf diesem allerersten Ansatz aufbaut:

Seien  $r, \vartheta, \varphi$  die Punkte der Oberfläche des Elektrons (in Kugelkoordinaten), also diejenigen Orte an denen sich die Ladung befindet (Kleinbuchstaben ohne Index) ,  
sowie  $R_0, \Theta_0, \Phi_0$  die Ortsangabe eines Aufpunktes im Raum (Kugelkoordinaten), an dem das vom Elektron erzeugte Magnetfeld bestimmt wird (Großbuchstaben mit Index "0") .

Die hier verwendete Nomenklatur der Kugelkoordinaten findet sich in Abb.1. Die Rotationsachse des Elektrons sei die z-Achse.

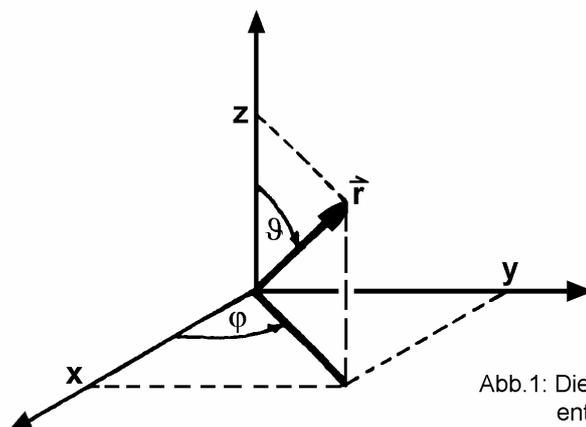


Abb.1: Die Festlegung der Kugelkoordinaten entspricht der üblichen Nomenklatur.

Das Biot- Savart'sche Gesetz besagt nun:

$$\vec{H}_{in} = q_{in} \cdot \frac{\vec{v}_{in} \times (\vec{s}_{in} - \vec{r})}{4\pi \cdot |\vec{s}_{in} - \vec{r}|^3} \quad \left( \begin{array}{l} \text{Der Index "in" steht für einen infinitesimal kleinen} \\ \text{Ladungs- bzw. Oberflächen- Bestandteil des Elektrons.} \end{array} \right)$$

(Glg. 04)

mit  $q_{in}$  = Ladung des infinitesimalen Elektronenbruchteils

$\vec{s}_{in}$  = Ort des infinitesimalen Elektronenbruchteils

$\vec{v}_{in}$  = Geschwindigkeit des infinitesimalen Elektronenbestandteils

$\vec{r}$  = Ort des Aufpunktes

, also  $\vec{s}_{in} = \begin{pmatrix} r_o \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi \\ r_o \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi \\ r_o \cdot \cos \vartheta \end{pmatrix}$       sowie  $\vec{v}_{in} = \begin{pmatrix} -\omega r_o \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi \\ -\omega r_o \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix}$

und  $\vec{r} = \begin{pmatrix} R_o \cdot \sin \Theta_o \cdot \cos \Phi_o \\ R_o \cdot \sin \Theta_o \cdot \sin \Phi_o \\ R_o \cdot \cos \Theta_o \end{pmatrix}$       (Glg. 05 a-c)

(bei Rotation des Elektrons um die z-Achse)

Integriert man das Feld  $\vec{H}_{in} = d\vec{H}$  der infinitesimalen Elemente nach Glg.04 als Oberflächenintegral entlang der Kugeloberfläche ([BRO 79],[SMI 81]), so erhält man das gesamte am Ort  $\vec{r}$  erzeugte Magnetfeld entsprechend dem vektorwertigen Integral:

$$\vec{H}_{ges} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sigma}{4\pi} \cdot \left[ (r_o \sin \vartheta \cos \varphi - R_o \sin \Theta_o \cos \Phi_o)^2 + (r_o \sin \vartheta \sin \varphi - R_o \sin \Theta_o \sin \Phi_o)^2 + (r_o \cos \vartheta - R_o \cos \Theta_o)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \cdot \begin{pmatrix} -\omega r_o \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi \\ -\omega r_o \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_o \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi - R_o \cdot \sin \Theta_o \cdot \cos \Phi_o \\ r_o \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi - R_o \cdot \sin \Theta_o \cdot \sin \Phi_o \\ r_o \cdot \cos \vartheta - R_o \cdot \cos \Theta_o \end{pmatrix} r_o^2 \sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi$$

(Glg. 06)

, worin  $\sigma$  = Flächenladungsdichte ist

, also Ladung  $q = \int \sigma \, dA = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sigma \cdot r_o^2 \sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi$       (Glg. 06b)

Iterative numerische Integration führt zu dem näherungsweise Ergebnis (Ergebnisse, die eine Iteration enthalten seien hier mit einem "≈" statt einem "=" gekennzeichnet):

$$\vec{H}_{au\beta en} \approx -C_1 \cdot \frac{\omega}{\omega_o} \cdot \frac{r_o^2}{R_o} \cdot \begin{pmatrix} \sin(2\Theta_o) \cdot \cos \Phi_o \\ \sin(2\Theta_o) \cdot \sin \Phi_o \\ \cos(2\Theta_o) + 1/3 \end{pmatrix} \quad \text{im Au\beta enraum des Elektrons}$$

(Glg. 07)

$$\vec{H}_{innen} \approx -C_1 \cdot \frac{\omega}{\omega_o} \cdot \frac{1}{r_o} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4/3 \end{pmatrix} \quad \text{im Innenraum des Elektrons}$$

(Glg. 08)

mit den Konstanten  $C_1 = 1$  Ampere

und  $\omega_o = \frac{\pi}{2} \cdot 10^{20}$  Hz

Die nun folgende Integration über das gesamte von Feld erfüllte Volumen (also den gesamten Raum  $\mathfrak{R}^3$ ) kann man analytisch ausführen, allerdings für Innen- und Außenraum getrennt. Sie liefert die im magnetischen Feld enthaltene Energie (siehe [ALE 71/81]):

$$W_{\text{magn innen}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{r_0} \frac{\mu_0}{2} \cdot |\vec{H}_{\text{innen}}|^2 \cdot R_0^2 \sin \Theta_0 \cdot dR_0 \cdot d\Theta_0 \cdot d\Phi_0 = \dots \approx \frac{32\pi}{27} \mu_0 C_1^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \cdot r_0$$

$$W_{\text{magn außen}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{\mu_0}{2} \cdot |\vec{H}_{\text{außen}}|^2 \cdot R_0^2 \sin \Theta_0 \cdot dR_0 \cdot d\Theta_0 \cdot d\Phi_0 = \dots \approx \frac{16\pi}{27} \mu_0 C_1^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \cdot r_0$$

$$\Rightarrow W_{\text{magn}} \approx \frac{48\pi}{27} \mu_0 C_1^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \cdot r_0$$

(Glg. 09)

für die gesamte im Magnetischen Feld des Elektrons enthaltene Energie

Darin ist  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$  [KOH 85]

Wie man in Glg.03 und Glg.09 sieht, beläuft sich die Gesamtenergie der elektrischen und magnetischen Felder des Elektrons auf

$$W_{\text{ges}} = W_{\text{elektr.}} + W_{\text{magn}} \approx \frac{q^2}{8\pi \epsilon_0 r_0} + \frac{48\pi}{27} \mu_0 C_1^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \cdot r_0 = m_0 c^2$$

(Glg. 10)

[EIN 65] Ziel der Arbeit ist es, aus der Gesamtenergie die Masse des Elektrons zu erklären.

Man sieht, daß ein Anteil vorliegt, der mit  $r_0$  steigt und einen anderen Anteil, der mit  $r_0$  sinkt. Allerdings enthält Glg.10 zwei Unbekannte, nämlich  $\omega$  und  $r_0$ . Um die Lösung zu finden, müssen wir eine zweite Gleichung hinzuziehen, die wir aus einer Betrachtung des magnetischen Moments des Elektrons finden, nämlich wie folgt:

Das magnetische Moment  $\mu$  einer Leiterschleife der Querschnittsfläche  $\tilde{A}$ , die vom Strom  $I$  durchflossen wird ist bekannt als

$$\mu = \tilde{A} \cdot I$$

(Glg.11)

Unsere Kugel "Elektron" unterteilen wir nun in infinitesimale Leiterschleifen gemäß Abb.2:

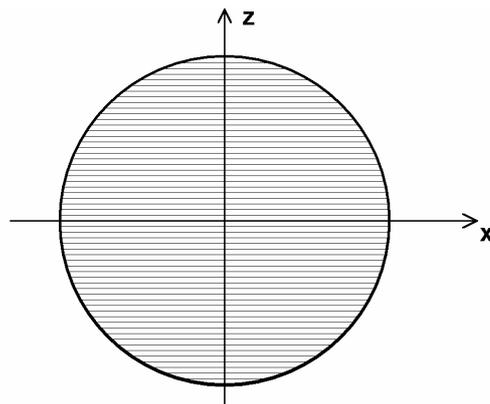


Abb.2: Veranschaulichung der Aufteilung des Elektrons in infinitesimale Leiterschleifen (bei Rotation des Elektrons um die z-Achse).

Das magnetische Moment der gesamten rotierenden Kugel ist dann:

$$\mu = \int \tilde{A}(\Theta_0, \Phi_0) \frac{\sigma(\Theta_0, \Phi_0)}{T} dA, \quad \text{das sich wieder als Oberflächenintegral lösen läßt.} \quad (\text{Glg. 12})$$

mit  $\tilde{A}(\Theta_0, \Phi_0) = \pi r_0^2 \cdot \sin^2 \Theta_0 =$  Querschnittsfläche jeder einzelnen Leiterschleife  
aber  $dA =$  Integration über die Oberfläche des Elektrons entsprechend Glg.06b

sowie  $\sigma(\Theta_0, \Phi_0) = \frac{q}{4\pi r_0^2} =$  Flächenladungsdichte auf der Oberfl. des Elektrons

$$\text{und } \mu = \int \frac{\sigma(\Theta_0, \Phi_0)}{T} dA = \frac{\text{Gesamtladung}}{\text{Zeit}} = \text{Strom}$$

$$\text{und } T = \frac{2\pi}{\omega} = \text{Umlaufdauer des Elektrons}$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \pi r_0^2 \sin^2 \Theta_0 \cdot \frac{q}{4\pi r_0^2} \cdot \frac{1}{T} \cdot r_0^2 \sin \Theta_0 d\Theta_0 d\Phi_0$$

$$= r_0^2 \cdot \frac{q}{T} \cdot \frac{4}{3} \cdot 2\pi = \frac{q\hbar}{2m} \quad (\text{Glg. 13})$$

[KÖP 97] Das Gesamtmoment muß dem Bohr'schen Magneton gleich sein, wenn wir hier zunächst Korrekturen der Quantenelektrodynamik außer Acht lassen.

$$\Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{3\hbar}{8mr_0^2} \quad (\text{Glg. 14})$$

Damit haben wir zwei Gleichungen, nämlich Glg.10 und Glg.14, die wir nach den beiden Unbekannten  $\omega$  und  $r_0$  auflösen können. Das Ergebnis lautet:

$$r_0 = 1.92 \cdot 10^{-14} m$$

$$\omega = 1.18 \cdot 10^{23} \text{ sec}^{-1}$$

Eine Berechnung der Umlaufgeschwindigkeit des Äquators zeigt sofort das Problem:

$$v = \omega r_0 \approx 22.6 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad (\text{Glg. 15})$$

Das ist unvereinbar mit der Relativitätstheorie !

Eine ganz simple Überlegung zeigt ebenso einfach ein noch größeres Problem:

Würde man den bekannten klassischen Elektronenradius von  $r_0 = 2.8 \cdot 10^{-15} m$  [COD 98] wie bisher üblich einfach nur in Glg.14 einsetzen, dann erhielte man

$$v = \omega \cdot r_0 = \frac{3\hbar}{8mr_0} = 1.55 \cdot 10^{10} \frac{m}{s} \quad (\text{Glg. 16})$$

für die Äquatorialgeschwindigkeit. Der Widerspruch zur Relativitätstheorie fällt noch drastischer aus, als bei Glg.15.

Das Ergebnis zeigt das Problem:

Unter Berücksichtigung beider Feldanteile, des elektrischen und des magnetischen, läßt sich zwar die Masse des Elektrons feldbasiert erklären, aber die Lösung widerspricht der Relativitätstheorie. Eine Begrenzung der Äquatorialgeschwindigkeit auf Lichtgeschwindigkeit hingegen würde zeigen, daß das Magnetfeld des Elektrons nicht ausreicht, um sein magnetisches Moment zu erklären.

Jetzt könnte man natürlich auf das Versagen der klassischen Physik im mikroskopischen Maßstab schließen, oder zumindest auf das Versagen einer oder einiger der hier verwendeten klassischen Formeln. Daß sich die Sache aber nicht so trivial darstellt, wird sich im weiteren Verlauf dieses Artikels noch zeigen.

Um den Widerspruch zu lösen wollen wir unsere bisher getätigten Annahmen reflektieren, um zu prüfen, welche vertretbar sind, und welche wir fallen lassen wollen. Es sind die folgenden:

- (a.) Die Masse (des Elektrons) könne aufgrund der Energie seiner Felder erklärt werden.
- (b.) Das magnetische Moment des Elektrons sei durch das Bohr'sche Magneton gegeben.
- (c.) Die Gesetze von Coulomb und Biot- Savart seien auch für sehr kleine Abstände gültig.
- (d.) Das Elektron sei eine starre Kugel, auf dessen Oberfläche seine Ladung mit konstanter Kreisfrequenz kreise.

Die Annahme (a.) können wir als Grundpostulat der vorliegenden Arbeit nicht fallen lassen; die Annahme (b.) ist bis auf Korrekturen der Quantenelektrodynamik mit Sicherheit richtig. Diese Korrekturen sind aber nicht groß genug, um den hier gezeigten Widerspruch zu lösen ([FEY 88]).

Die Annahme (c.) wollen wir nicht aufgeben, da bekannt ist, daß zumindest bis hinunter zu  $10^{-18} m$  das Coulomb- Gesetz nicht angezweifelt wird. Lediglich eine Abschirmung der Ladung des Elektrons (in derart kurzen Maßstäben) aufgrund der Vakuumpolarisation ist bekannt, die allerdings ebenfalls nicht ausreichen kann, um die Probleme der Gln. 15 und 16 zu beheben.

Somit bleibt als einzige Möglichkeit, die Annahme (d.) anzuzweifeln. Sie enthält eine ganze Reihe von Details:

- Die kugelige Form des Elektrons und die kugelsymmetrische Ladungsverteilung  
Diese wollen wir nicht anzweifeln, da alle bisher bekannten Experimente auf die Kugelsymmetrie des elektrischen Potentials des Elektrons hinweisen.
- Die Verteilung der Ladung auf der Oberfläche des Elektrons  
Diese könnte man anzweifeln, allerdings würde ein Hineinziehen von Ladung in das Innere des Elektrons zu einer Verringerung des magnetischen Feldes führen, also genau den gegenteiligen Effekt zu dem liefern, was wir suchen. Das Fallenlassen dieses Punktes könnte man ggf. später gesondert diskutieren.
- Die Starre der Kugel und die Konstanz der Kreisfrequenz  
Verzichten wir auf die Annahme der starren Kugel, so können wir allen Ladungsbestandteilen auf der gesamten Oberfläche des Elektrons erlauben, sich mit Lichtgeschwindigkeit zu bewegen. (Über die Strahlungsfreiheit des Kreisens wollen wir nicht nachdenken, da diese Aussage der klassischen Physik nicht auf die mikroskopische Physik übertragbar ist. Im übrigen geht vom Elektron ein magnetisches Feld aus, was ohne das Kreisen der Ladung nicht der Fall wäre.) Jedes Ladungselement hat dann konstante Bahngeschwindigkeit und konstante Kreisfrequenz, aber unterschiedliche Ladungselemente kreisen mit unterschiedlicher Kreisfrequenz. Ströme und Magnetfelder wären dann wesentlich größer als es bei einer starren rotierenden Kugel, bei der die Ladung mit wachsendem Abstand vom Äquator immer langsamer wird, bis sie an den Polen schließlich stillsteht.

Im nachfolgenden Kapitel 3 wird gezeigt, daß der letztgenannte Punkt der in sich bewegten (nicht starren) Elektronenoberfläche schon ausreicht zur Erklärung der gesamten Masse auf der Basis der Feldenergien.

### 3. Das Elektron als in sich bewegte Feldquelle :

Nehmen wir also an, die einzelnen Bestandteile des Elektrons könnten sich gegeneinander verschieben, und zwar genau derart, daß alle mit Lichtgeschwindigkeit laufen.

Da die kugelige Form des Elektrons nicht verändert wird, ändert sich auch an der Berechnung des elektrischen Feldes und der zugehörigen Feldenergie gegenüber Glg.03 nichts.

Auf die neue Berechnung des magnetischen Feldes hingegen wollen wir nachfolgend eingehen: Unter den Voraussetzungen zur Berechnung des magnetischen Feldes gemäß den Glgn. 04, 05a, 05b, 05c ändert sich nur die Glg.05b (für  $\vec{v}_{in}$ ), die die Bahngeschwindigkeit der Ladungselemente angibt. Der Betrag dieser Bahngeschwindigkeit beträgt nun nicht mehr  $\omega \cdot r_0 \cdot \sin \vartheta$  sondern einfach nur  $c =$  Lichtgeschwindigkeit.

Wir ersetzen also Glg.05b durch die nachfolgende Glg.17:

$$\vec{v}_{in} = \begin{pmatrix} -c \cdot \sin \varphi \\ +c \cdot \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{Glg. 17})$$

Bei der Berechnung des magnetischen Feldes und der magnetischen Feldenergie ersetzen wir also Glg.05b durch Glg.17 und führen die Rechnung ansonsten wie gehabt durch, nunmehr auf der Basis der Glgn. 04, 05a, 17, 05c.:

$$\vec{H}_{ges} = \frac{q}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left[ (r_0 \sin \vartheta \cos \varphi - R_0 \sin \Theta_0 \cos \Phi_0)^2 + (r_0 \sin \vartheta \sin \varphi - R_0 \sin \Theta_0 \sin \Phi_0)^2 + (r_0 \cos \vartheta - R_0 \cos \Theta_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$\cdot \begin{pmatrix} -c \cdot \sin \varphi \\ +c \cdot \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_0 \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi - R_0 \cdot \sin \Theta_0 \cdot \cos \Phi_0 \\ r_0 \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi - R_0 \cdot \sin \Theta_0 \cdot \sin \Phi_0 \\ r_0 \cdot \cos \vartheta - R_0 \cdot \cos \Theta_0 \end{pmatrix} \cdot r_0^2 \sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi \quad (\text{Glg. 18})$$

(in weitreichender Analogie zu Glg.06)

Die iterative numerische Integration zur Bestimmung des Magnetfeldes als Funktion des Ortes läßt einen komplizierten Feldverlauf mit zwei Unendlichkeitsstellen erkennen. Die eine Unendlichkeitsstelle liegt bei  $\lim_{R \rightarrow r_0}$ , also an der Stelle an der der Aufpunkt an die Oberfläche des Elektrons herantritt; die andere beobachtet man bei  $\lim_{\sin(\Theta_0) \rightarrow 0}$ , also dort, wo sich der Aufpunkt der Rotationsachse der Kugel nähert.

Die Berechnung der Feldenergie aus dem Integral über das Quadrat der Feldstärke wird also bei Annäherung des Aufpunkts an den Elektronenmantel sowie bei seiner Annäherung an die Rotationsachse des Elektrons zum uneigentlichen Integral. Wegen der Endlichkeit der Masse der Teilchen muß die Konvergenz der uneigentlichen Integrale gesichert sein und damit die Endlichkeit der Feldenergie.

An dieser Stelle beschränken wir uns auf eine untere Abschätzung der Feldenergie. Wir extrapolieren den Verlauf des Magnetfeldes abseits seiner Unendlichkeiten bis in den Elektronenmantel und in die Rotationsachse hinein. Wenn nun die nach unten abgeschätzte Energie bereits zur Erklärung der Masse (des Elektrons) aus seiner Feldenergie ausreicht, dann muß dies für die tatsächliche Energie erst recht der Fall sein.

Eine untere Abschätzung des Magnetfeldes nach iterativer Integration von Glg.18 können wir z.B. gemäß den Gleichungen 19 und 20 angeben:

$$\vec{H}_{\text{außen}} \approx \frac{r_0^2}{R_0^3} \cdot \begin{pmatrix} K_1 \cdot \sin(2\Theta_0) \cdot \cos \Phi_0 \\ K_1 \cdot \sin(2\Theta_0) \cdot \sin \Phi_0 \\ K_2 + K_3 \cdot \sin^2(\Theta_0) \end{pmatrix} \quad \text{mit den Konstanten}$$

$K_1 = -225.2 \text{ Ampere}$   
 $K_2 = -417.9 \text{ Ampere}$   
 $K_3 = +593.7 \text{ Ampere}$

(Glg. 19)

$$\vec{H}_{\text{innen}} \approx q \cdot c \cdot \begin{pmatrix} \frac{R_0^2}{r_0^4} \cdot K_4 \cdot \sin(2\Theta_0) \cdot \cos \Phi_0 \\ \frac{R_0^2}{r_0^4} \cdot K_4 \cdot \sin(2\Theta_0) \cdot \sin \Phi_0 \\ -\frac{1}{r_0^2} \cdot K_5 + \frac{R_0^2}{r_0^4} \cdot K_6 \cdot \sin^2(\Theta_0) \end{pmatrix} \quad \text{mit den Konstanten}$$

$K_4 = 1.273 \cdot 10^{-2} \text{ (ohne Einheit)}$   
 $K_5 = 7.958 \cdot 10^{-2} \text{ (ohne Einheit)}$   
 $K_6 = 3.96 \cdot 10^{-2} \text{ (ohne Einheit)}$   
 $c = \text{Lichtgeschwindigkeit}$

(Glg. 20)

Anmerkung:

Das Zeichen "≈" steht als Symbol für die Iteration und drückt zusätzlich aus, daß es sich um eine untere Abschätzung handelt. Aufgrund der Abweichung der gezeigten Abschätzung von den tatsächlichen Iterationswerten und aufgrund des von der Abweichung betroffenen Anteils des Feldvolumens nur in unmittelbarer Nähe der Unendlichkeitsstellen läßt sich die erwartete Ungenauigkeit der Abschätzung auf einige (wenige) Prozent, bezogen auf die gesamte Feldenergie, beziffern. Dies sollte einen weiteren Umgang mit den Gleichungen 19 und 20 rechtfertigen.

Eine graphische Veranschaulichung der in den Gleichungen 1 sowie 19 und 20 angegebenen Feldgeometrie findet sich in den Abbildungen 3 und 4. Die dort gezeigten Feldlinien- Plots setzen sich aus Pfeilen zusammen, deren Richtung und Länge die am Anfangsort der Pfeile jeweils herrschenden Feldstärken repräsentieren.

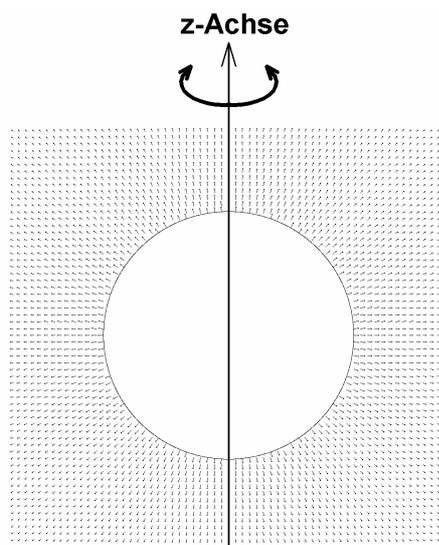


Abb.3.: Feldlinienplot zur Elektrischen Feldstärke des Elektrons. Die dreidimensionale Feldgeometrie wird vorstellbar, wenn man die Graphik um die z- Achse rotieren läßt.  
 Genaue Werte der Feldstärke entnehme man Glg.01

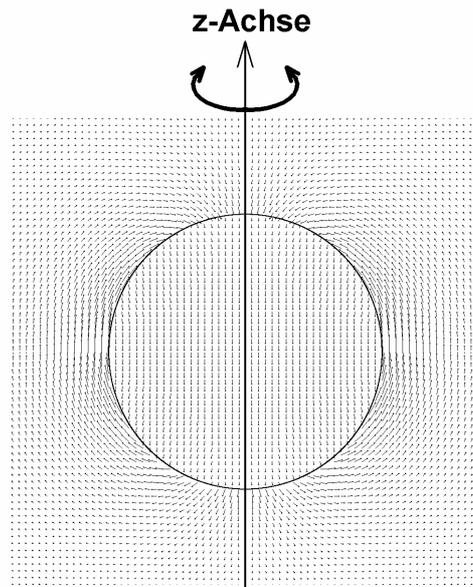


Abb.4.: Feldlinienplot zur magnetischen Feldstärke des Elektrons als in sich bewegte Quelle. Die dreidimensionale Feldgeometrie wird vorstellbar bei Rotation des Graphen um die z-Achse.

Genaue Werte der Feldstärken entnehme man Glgn.19 und 20.

Die Formulierung der unteren Abschätzung (in den Glgn. 19 und 20) ist derart gewählt, daß die Volumenintegration zur Bestimmung der Feldenergie analytisch möglich ist (in dieser Wahl liegt der eigentliche Grund für das Aufstellen der Glgn. 19 und 20 in der gezeigten Form):

$$\begin{aligned}
 W_{\text{magn außen}} &\cong \int \frac{\mu_0}{2} \cdot |\vec{H}_{\text{außen}}|^2 dV \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_{r_0}^\infty \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{r_0^4}{R_0^6} \cdot (K_1^2 \cdot \sin^2(2\Theta_0) + K_2^2 + 2K_2 \cdot K_3 \cdot \sin^2(\Theta_0) + K_3^2 \cdot \sin^4(\Theta_0)) \cdot R_0^2 \sin \Theta_0 dR_0 d\Theta_0 d\Phi_0 \\
 &= \dots = 0.155 \frac{J}{m} \cdot r_0 \quad (\text{Glg. 21})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{\text{magn innen}} &\cong \int \frac{\mu_0}{2} \cdot |\vec{H}_{\text{innen}}|^2 dV \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{r_0} \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{q^2 c^2}{r_0^8} \cdot (R_0^4 K_4^2 \cdot \sin^2(2\Theta_0) + r_0^4 K_5^2 - 2r_0^2 R_0^2 K_5 K_6 \sin^2 \Theta_0 + R_0^4 K_6^2 \cdot \sin^4 \Theta_0) R_0^2 \sin \Theta_0 dR_0 d\Theta_0 d\Phi_0 \\
 &= \dots = 2.5578 \cdot 10^{-29} \text{ Jm} \cdot \frac{1}{r_0} \quad (\text{Glg. 22})
 \end{aligned}$$

Wie man sieht, enthält nun auch die magnetische Feldenergie einen Anteil, der mit kleiner werdendem Elektronenradius  $r_0$  ansteigt.

Die gesamte Feldenergie erhält man nun durch Summation der Energien aus den Gln. 03, 21 und 22 zu:

$$W_{\text{ges}} \approx 1.408 \cdot 10^{-28} \text{ Jm} \cdot \frac{1}{r_0} + 0.155 \frac{\text{J}}{\text{m}} \cdot r_0 \quad \text{mit } W_{\text{ges}} = m_0 c^2 \quad (\text{Glg. 23})$$

Da wir die Umlaufgeschwindigkeit der Ladungselemente als Annahme vorausgesetzt haben, erhalten wir erwartungsgemäß eine einzige Gleichung mit einer Unbekannten. Die beiden Lösungen dieser in  $r_0$  quadratischen Gleichung (Glg.23) (sofern wir das Zeichen " $\approx$ " durch ein " $=$ " ersetzen), lauten:

$$r_{0,1} = 1.725 \cdot 10^{-15} \text{ m} \quad (\text{Glg. 24a})$$

$$r_{0,2} = 5.267 \cdot 10^{-13} \text{ m} \quad (\text{Glg. 24b})$$

Wie man sieht, läßt sich die Masse des Elektrons tatsächlich vollständig durch seine Feldenergie erklären. Eine Diskussion der Ergebnisse folgt in Kapitel 4.

#### 4. Diskussion der Ergebnisse:

Wir haben zweierlei Werte für den Elektronenradius erhalten, aber welcher ist der physikalisch richtige ?

Auch wenn einer der beiden Werte sehr dicht in der Nähe des klassischen Elektronenradius liegt, wollen wir die Entscheidung für den physikalisch sinnvollen Wert anhand einer physikalischen Überlegung treffen, und zwar wie folgt:

Die zweite Größe, die wir bereits benutzt haben, ist das magnetische Moment des Elektrons (vgl. die Glg. 12, 13 und 14).

Im Falle der jetzt "in sich bewegten" Feldquelle berechnet sich das magnetische Moment wie folgt:

$$\mu = \int \tilde{\mathbf{A}}(\Theta_0, \Phi_0) \frac{\sigma(\Theta_0, \Phi_0)}{T} dA \quad (\text{Glg. 25})$$

mit  $\tilde{\mathbf{A}}(\Theta_0, \Phi_0)$  und  $\sigma(\Theta_0, \Phi_0)$  wie bei Gln. 11,12,13.

$$\text{aber } T = \frac{\text{Strecke}}{\text{Geschwindigkeit}} = \frac{2\pi r_0 \sin\Theta_0}{c} = \text{Umlaufdauer der Ladung jeder einzelnen Leiterschleife.} \quad (\text{Glg. 26})$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \pi r_0^2 \sin^2\Theta_0 \cdot \frac{q}{4\pi r_0^2} \cdot \frac{c}{2\pi r_0 \sin\Theta_0} \cdot r_0^2 \sin\Theta_0 d\Theta_0 d\Phi_0 = \frac{\pi}{8} q c r_0 = \frac{q\hbar}{2m} \quad (\text{Glg. 27})$$

Gleichsetzen mit dem Bohr'schen Magneton.

$$\Rightarrow r_0 = \frac{4\hbar}{m\pi c} = 4.92 \cdot 10^{-13} \text{ m} \quad (\text{Glg. 28})$$

Dieser Wert steht im klaren Widerspruch zu  $r_{0,1}$ , bestätigt aber  $r_{0,2}$ . Bedenkt man nämlich, daß die Angabe der magnetischen Feldenergie nach Glg.23 nur eine untere Abschätzung darstellt, d.h. in Wirklichkeit ein wenig größer (um einige Prozent) ist, als in Glg.23 angegeben, so weiß man, daß ein etwas geringerer Elektronenradius als  $r_{0,2}$  nach Glg.24b bereits ausreicht, um genug Feldenergie zur Verfügung zu

stellen, sodaß diese die gesamte Masse des Elektrons erklärt. Damit ist die physikalisch sinnvolle Lösung gefunden, sie unterscheidet sich allerdings deutlich von dem Wert des klassischen Elektronenradius. Wie man sieht steckt der größere Teil der Feldenergie des Elektrons im magnetischen Feld und nur ein vergleichsweise geringerer Teil im elektrischen Feld.

### Resumée:

Damit ist der Beweis erbracht, daß sich die Masse des Elektrons theoretisch herleiten läßt und der Weg aufgezeigt, nach dem diese Herleitung funktioniert. Der in dieser Arbeit angegebene Wert stellt eine erste Abschätzung dar, der den allgemein bekannten Messwert mit einer Genauigkeit von wenigen Prozent wiedergibt. Der Weg dazu beginnt beim magnetischen Moment gemäß den Glgn.25 und 28, aus welchen sich ein Elektronenradius von  $r_{0,2} = 4.92 \cdot 10^{-13} m$  ergibt. Setzt man diesen Wert in die Gleichung (Glg.23) der magnetischen Feldenergie ein, so erhält man:

$$W_{\text{ges}} \approx 7.655 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 478 \text{ keV} \quad (\text{Glg. 29})$$

Der Wert liegt um 6.5% niedriger als der tatsächliche Wert von 511 keV, was mit der Aussage des Zeichens "≈" sehr treffend übereinstimmt. Das Besondere am zugrunde liegenden Bild ist nur die Annahme, daß sich alle Ladungsbestandteile des Elektrons auf dessen Oberfläche befinden und dort mit Lichtgeschwindigkeit kreisen. Das Elektron kann also nicht als starrer Kreisel aufgefasst werden.

---

## **5. Weiterführende Überlegungen**

### **(a.) Ausdehnen des Modells auf alle Elementarteilchen**

Die Idee, die Masse eines Teilchens aus seinen ursächlichen Wechselwirkungen zu berechnen, wurde hier vorgeführt am Beispiel des Elektrons. Wünschenswert wäre es natürlich, das Modell auf alle Elementarteilchen auszudehnen, Leptonen ebenso wie Quarks. Gelänge dies, so könnte man Elementarteilchen als Quellen von Wechselwirkungsfeldern verstehen.

### **(b.) Übertragen des Modells in quantentheoretische Ansätze**

Für quantentheoretische Ansätze müßte man die Felder durch Wechselwirkungsquanten ersetzen (z.B. W- oder Z- Bosonen) – was aber nichts am Prinzip des Modells ändern würde.

Gelänge es, diese Modelle mit hinreichender Präzision zu entwickeln, dann könnte man vielleicht sogar die Einflüsse quantenelektrodynamischer oder quantenchromodynamischer Effekte auf die Masse sichtbar machen (wie z.B. die Vakuumpolarisation). Speziell das Modell des Elektrons müßte dann natürlich um die schwache Wechselwirkung erweitert werden, was nachfolgend unter Punkt (d.) noch angesprochen werden wird.

### **(c.) Erhöhung der Rechengenauigkeit**

Die Rechengenauigkeit, in der vorliegenden Arbeit beträgt ca. 6.5%. Der Grund liegt in der Ungenauigkeit der Bestimmung der Felder, und damit eben auch der Feldenergien. Diese Ungenauigkeit muß noch (durch entsprechenden Rechenaufwand) wesentlich verringert werden. Die Ungenauigkeit von 6.5% bezieht sich nämlich auf das Elektron. Für andere Leptonen (Müon, Tauon) ergeben sich deutlich

andere Teilchenradien als für das Elektron, weshalb für diese Teilchen die vom Volumen abhängige Rechenungenauigkeit wesentlich größer wird als für Elektronen. Dies verhindert im momentanen Zustand der Berechnungen das Aufstellen einer Systematik der Leptonen. Eine entsprechende Verbesserung der Rechengenauigkeit läßt erhoffen, daß eine Systematik der Leptonen erkennbar werden sollte.

**(d.) Test der Relevanz der schwachen Wechselwirkung**

Welche Bedeutung haben die Felder der schwachen Wechselwirkung für Leptonen? Diese Frage stellt sich im Hinblick auf die ungeladenen Leptonen, die Neutrinos. Die einzige ursächliche Wechselwirkung an der sie teilnehmen ist die schwache Wechselwirkung, weshalb ihnen eine besonders geringe Feldenergie zukommt. Entsprechend klein muß ihre Masse sein.

Eine genaue Berechnung dieser Ruhemasse ist nur möglich auf der Basis der Quantenelektrodynamik (siehe Punkt (b.)), weil die schwache Wechselwirkung selbst nur mit Hilfe der Glashow- Weinberg- Salam- Theorie berechnet werden kann (siehe z.B. [SCH 97], [GRE 96]).

Eine grobe vorab-Abschätzung der Größenordnung könnte man z.B. anhand des Elektron- Neutrinos wie folgt motivieren. (Die Überlegung ist nicht als Berechnung zu missverstehen, sondern sie soll nur eine solche Berechnung motivieren.)

- Vergleich der Wechselwirkungsstärken anhand der Kopplungskonstanten:  
 elektromagnetische Wechselwirkung: Kopplungskonstante =  $\frac{1}{137.036} \approx 10^{-2}$   
 schwache Wechselwirkung: Kopplungskonstante  $\approx 10^{-5}$   
 (siehe dazu auch [GRO 89])  
 (Ein Laufen der Kopplungskonstanten wird für die vorliegende grobe Abschätzung als vernachlässigbar angesehen.)

- Die in der Wechselwirkung gespeicherte Energie ist proportional zum Quadrat der Feldstärke und damit zum Quadrat der Kopplungskonstanten.  

$$\text{Energie} \propto \text{Feldstärke}^2 \propto \text{Kopplungskonst.}^2$$

- Aus dem Verhältnis der Kopplungskonstanten lassen sich somit die zugehörigen Energiebeträge abschätzen gemäß:

$$\frac{E_{\text{schwach}}}{E_{\text{el. magn.}}} \approx \frac{(10^{-5})^2}{(10^{-2})^2} = 10^{-6} \quad (\text{Glg. 30})$$

- Bedenkt man noch die endliche Reichweite der schwachen Wechselwirkung im Unterschied zur unendlichen Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung, so weiß man, daß auch Glg.30 nur eine obere Abschätzung der Neutrino- Energie sein kann, denn das Volumenintegral über die Wechselwirkung enthält nur ein Volumen der Ausdehnung von ca.  $(\text{einigen } 10^{-18} \text{ m})^{-3}$ :

$$E_{\nu_e} \leq 10^{-6} \cdot E_e = 10^{-6} \cdot 511 \text{ keV} \quad (\text{Glg. 31})$$

, mit  $E_{\nu_e}$  = Energie (bzw. Masse) des Elektron- Neutrinos  
 $E_e$  = Energie (bzw. Masse) des Elektrons

Anmerkung: Die Reichweite der schwachen Wechselwirkung ergibt sich (z.B. nach [PAU 01]) aus der Masse des virtuellen Wechselwirkungs- Bosons ( $W^\pm, Z^0$ ) zu:

$$\text{Reichweite } R \leq \frac{\hbar}{m_w c} \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ m} \quad (\text{Gl g. 32})$$

, worin  $\hbar$  = Planck'sches Wirkungsquantum /  $2\pi$   
 $m_w$  = Masse des virtuellen Wechselwirkungsbosons  
 $c$  = Vakuumlichtgeschwindigkeit

- Aufgrund dieser geringen Reichweite der schwachen Wechselwirkung müßte die Abschätzung der Neutrinoenergie eher lauten:

$$E_{\nu_e} \lesssim 0.5 \text{ eV} \quad (\text{Gl g. 33})$$

sodaß eine Neutrinomasse im Bereich einiger milli-eV oder gar mikro-eV wahrscheinlich erscheint. Dieser Bereich genügt den Ansprüchen gewisser Kosmologiemodelle, die die kritische Dichte des Universums theoretisch untersuchen (siehe auch [HIL 96]). Auch die Experimente zu Neutrino-Oszillationen können nur verstanden werden, wenn die Neutrinos eine tatsächliche existierende Ruhemasse haben. Die Super- Kamiokande-Kollaboration gibt eine Neutrino- Ruhemasse im Bereich  $\frac{1}{2} \dots 6$  milli-eV an ([KAM 98]), die die hier getätigte grobe Abschätzung eher unterstützt.

- Eine genaue Berechnung der Neutrino- Masse wäre nur im Rahmen einer gesonderten Arbeit möglich, bei der das Konzept der Wechselwirkungsenergie- basierten Masse auf der Basis der Quantentheorie angewandt wird. Hierzu müssten nach der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung die Felder der geladenen und der neutralen Ströme berücksichtigt werden, d.h. sowohl die Felder die den  $W^\pm$ -Bosonen entsprechen als auch die Felder die den  $Z^0$ -Bosonen entsprechen, soweit die Neutrinos zu deren Austausch in der Lage sind. (Vgl. z.B. [SCH 97]) Integriert man deren Energiedichte über den durch die Reichweite der schwachen Wechselwirkung definierten felderfüllten Raum, so sollte sich die Masse des jeweiligen Neutrinos ergeben.

**(e.)** Erklärung der relativistischen Massenzunahme schnell bewegter Teilchen

Diese Massenzunahme sollte sich ganz natürlich aus der Längenkontraktion ergeben, welche zu einer Veränderung der Teilchen- Ausdehnung in Flugrichtung führt und damit zu einer Veränderung der Feld- Volumina. Dies bedeutet eine Zunahme der Feldenergie im Bereich besonders großer Feldstärken.

Sofern die Theorie konsistent ist, müßte sich aus der Längenkontraktion eben genau die Massenzunahme ergeben. Der Grenzfall ist klar: Geht die Teilchen- Länge gegen Null, so divergiert die Feldenergie gegen unendlich, was bei einer Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit der Fall wäre.

**(f.)** Abweichung des Coulomb- Gesetzes vom  $\frac{1}{r^2}$ - Verhalten

Diese Abweichung sollte z.B. bemerkbar werden beim Laufen der Kopplungskonstanten im Zusammenhang mit der Abschirmung von Ladung aufgrund der Vakuumpolarisation.

Das Coulomb- Gesetz gilt heute als bestätigt bis hinunter zu Abständen, die weitaus kleiner sind als der Elektronenradius, und zwar egal, ob man den altbekannten klassischen Elektronenradius von  $2.8 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  annimmt, oder den in dieser Arbeit

erhaltenen Wert von  $4.9 \cdot 10^{-13} m$ . (Bis hinunter zu Abmessungen von  $10^{-18} m$  ist es bis heute nicht gelungen, eine innere Struktur des Elektrons nachzuweisen). In diesem Zusammenhang ist eine Prüfung erforderlich, ob an der Oberfläche geladene Kugeln das selbe Kraftgesetz erzeugen, wie eine im Kugelmittelpunkt konzentrierte Punktladung. Die bekannte Tatsache der laufenden Kopplungskonstanten für sehr kurze Stoßabstände erhebt dann die Frage, ob Abweichungen der Ladungsverteilungen von der bisher im Allgemeinen angenommenen Oberflächenverteilung auftreten.

**(g.) Zusammenhang zu anderen modernen Theorien**

Ein in der Literatur bekannter moderner Ansatz zur Erklärung der Gravitation auf der Basis der anderen Wechselwirkungen stammt von der Arbeitsgruppe am California Institute of Physics and Astrophysics [CIPA 03].

Wie bei meiner Arbeit, so wird auch dort das Postulat der Higgs- Felder und Higgs-Bosonen überflüssig. In Publikationen wie z.B. [HAI 02] wird das Wesen der Masse auf eine sog „Zitterbewegung“ zurückgeführt, die aufgrund einer stochastischen Anwendung der Elektrodynamik zur Entstehung der Masse führt – interessanterweise ist diese Theorie ebenfalls (wie meine Theorie) halbklassischer Natur. Die Zitterbewegung beschreibt die Bewegung einer punktförmigen Ladung innerhalb einer Kugel deren Radius als Elektronenradius verstanden werden kann. Wie in meinem Ansatz so findet auch dort die Bewegung des punktförmigen Ladungselements mit Lichtgeschwindigkeit statt.

Die Unterschiede zu meinem Modell sind die folgenden:

- a. In [HAI 02] wird die Lichtgeschwindigkeit als Bewegungsgeschwindigkeit des Ladungselements ohne Begründung angenommen; in meiner Arbeit hingegen ergibt sich diese Bewegungsgeschwindigkeit zwangsläufig, da mit jeder niedrigeren Geschwindigkeit einer Erreichen des magnetischen Moments des Elektrons unmöglich wäre.
- b. In der Arbeit von [HAI 02] wird die Bewegung der Ladung auf ein einziges Ladungselement beschränkt, welches sich stochastisch innerhalb des Teilchenvolumens bewegt. In meiner Arbeit wird die Ladung in unendlich viele infinitesimale Elemente aufgeteilt, deren Bewegung im Raum geordnet abläuft. Summiert man aber über alle infinitesimalen Ladungselemente, so ist der Gesamtstrom der durch die Bewegung verursacht wird, in beiden Modellen der selbe. Beiden Sichtweisen gemeinsam ist auch die Bewegung innerhalb des von der Heisenberg' schen Unschärferelation vorgegebenen Raumes – wobei meine Sichtweise das Maximum dessen ausnützt, was die Unschärferelation gerade eben erfüllt.
- c. Die Frequenz der Bewegung der Ladungselemente ist nach CIPA stochastisch zu bestimmen, als Grenzfrequenz wird die Planck- Frequenz angegeben. In meiner Arbeit ist für die Bewegungsfrequenz der Ladungselemente eine untere Grenzfrequenz durch den Umlauf am Äquator bestimmt, die sich

$$\text{berechnen läßt zu } \omega_u = \frac{c}{r} = \frac{2.997 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{4.92 \cdot 10^{-13} m} = 6.09 \cdot 10^{20} Hz \quad (\text{Kreisfrequenz}).$$

In allen weiteren Konsequenzen lassen sich zwischen der Theorie des CIPA und meiner Theorie erhebliche Parallelen ziehen.

**(h.)** Zusammenhang zwischen der Gravitation und ursächlichen Wechselwirkungen  
Läßt sich tatsächlich alle Masse als Energie von Feldern verstehen (und die Teilchen als Feldzentren), so wird die Gravitation zu einer Folge aller anderen Wechselwirkungen, und zwar in folgendem Sinne:

Elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung betrachten wir als "ursächliche" Wechselwirkungen; sie erzeugen Felder, die sich als Masse der Feldquellen bemerkbar machen. Diese Masse hat dann eine Verkrümmung der Raum-Zeit entsprechend Einstein's Allgemeiner Relativitätstheorie zur Folge (siehe z.B. [GOE 96]), was der Bildung der Gravitation entspricht, die wir dann als Folge der ursächlichen Wechselwirkungen verstehen können und als "Folgewechselwirkung" betrachten können.

Für einzelne Elementarteilchen dominieren die ursächlichen Wechselwirkungen gegenüber der Folgewechselwirkung der Gravitation (z.B. in Elementarteilchenreaktionen). Kommen hingegen viele (oder sehr viele) Elementarteilchen zusammen, wie z.B. bei den Atomen (oder ganzen Gegenständen) in unserem Alltag, so gleichen sich die "ursächlichen" Felder der beteiligten Elementarteilchen auf engstem Raum gegenseitig aus (vgl. Bindungsenergien / Kompensation der Felder), sodaß in Summe die von den ursächlichen Wechselwirkungen hervorgerufenen Kräfte (für Abstände, die groß gegenüber der Ausdehnung der Elementarteilchen sind) nicht mehr bemerkbar sind. Nach außen hin bemerkbar bleibt dann nur noch die Krümmung der Raum-Zeit, sodaß wir jetzt dominant die Gravitation wahrnehmen werden (was nichts daran ändert, daß es Fälle gibt, in denen die Gravitation sehr stark werden kann, wie z.B. in schwarzen Löchern. In diesem Sinne macht die feldbasierte Erklärung der Masse einen Zusammenhang zwischen der Gravitation und den anderen Wechselwirkungen erkenntlich.

---

## **6. Literaturliste**

- [ALE 71/81] Allgemeine Lehrbücher der Elektrodynamik , wie z.B.
- "Bergmann- Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik"  
Band 2: "Elektrizität und Magnetismus" von H.Gobrecht  
z.B. 6.Aufl., W de Gruyter Verlag, 1971, ISBN 3-11-002090-0
  - „Klassische Elektrodynamik“ von John David Jackson  
im W de Gruyter Verlag, 1981, ISBN 3-11-007415-X
- [BRO 79] "Taschenbuch der Mathematik"  
von I.N.Bronstein und K.A.Semendjajew  
z.B. 18.Aufl. im Verlag Harri Deutsch 1979, ISBN 3-87144-016-7
- [CIPA 03] Arbeiten des CIPA, California Institute for Physics and Astrophysics Research  
zu finden unter <http://www.calphysics.org/>
- [COD 98] "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical  
Constants:1998" von Peter J. Mohr und Barry N. Taylor  
im Review of Modern Physics, Vol.72, No.2, page 351, April 2000
- [EIN 65] „Grundzüge der Relativitätstheorie“  
von Albert Einstein, 4.Auflage im Vieweg- Verlag, 1965
- [FEY 88] „QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie.“  
von Richard P. Feynman  
im Verlag R.Piper, 1988, ISBN 3-492-03103-X

- [FEY 91] "Feynman Vorlesungen über Physik"  
von Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands  
z.B. 2. Aufl. im R. Oldenbourg-Verlag 1991, ISBN 3-486-22058-6  
speziell Bd. 2, Kap. 28 "Elektromagnetische Masse"
- [FRA 99] „Teilchen und Kerne“ von H. Frauenfelder und E. M. Henley  
4. Aufl. im R. Oldenbourg Verlag, 1999, ISBN 3-486-24417-5
- [GOE 96] "Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie"  
von Hubert Goenner  
Spektrum, Akademischer Verlag, 1996, ISBN 3-86025-333-6
- [GRE 96] „Gauge Theory of Weak Interactions“ third edition  
by W. Greiner and B. Müller, Springer-Verlag, 2000  
ISBN 3-540-67672-4
- [GRO 89] "Die schwache Wechselwirkung in der Kern-, Teilchen- und Atomphysik" von  
K. Grotz und H. V. Klapdor  
im Verlag B. G. Teubner, Stuttgart 1989, ISBN 3-529-03035-7
- [HAI 02] „Update on an Electromagnetic Basis for Inertia, Gravitation, the Principle of  
Equivalence, Spin and Particle Mass Ratios“  
von Bernhard Haisch, Alfonso Rueda, L. J. Nickisch and Jules Mollere  
to be published: Conference Proceedings of the American Institute of Physics  
zu finden unter: arXiv:gr-qc/0209016v1 vom 5. Sept. 2002
- [HIG 64] "Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons"  
von Peter W. Higgs, Phys. Rev. Lett. Vol. 13, No. 6, Jahrgang 1964
- [HIL 96] "Elementare Teilchenphysik" von Helmut Hilscher  
Verlagsgesellschaft Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1996,  
ISBN 3-528-06670-9
- [KAM 98] "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos"  
The Super-Kamiokande Collaboration  
(paper submitted to Phys. Rev. Lett.)  
found in March-14-2004 in internet at:  
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/pub/nuosc98.submitted.pdf>
- [KOH 85] "Praktische Physik" (insbesondere Band 2)  
von F. Kohlrausch, z.B. 23. Aufl.  
im Verlag B. G. Teubner, Stuttgart 1985, ISBN 3-519-13002-5
- [KÖP 97] „Einführung in die Quanten - Elektrodynamik“  
von G. Köpp und F. Krüger  
im B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 1997, ISBN 3-519-03235-X
- [PAU 01] „ONLINE- Skript: Teilchen und Kerne“ an der Universität München  
von S. Paul und W. Weise, Version vom 20.6.2001  
zu finden unter: <http://axp01.e18.physik.tu-muenchen.de/~skript/>
- [PER 91] „Hochenergiephysik“ von Donald H. Perkins  
im Addison-Wesley Verlag, 1991, ISBN 3-89319-111-9
- [SCH 97] "Neutrino-Physik" von N. Schmitz  
im Verlag B. G. Teubner, Stuttgart 1997, ISBN 3-519-03236-8
- [SMI 81] "Lehrgang der höheren Mathematik" von W. I. Smirnow,  
z.B. 15. Aufl. im VEB "Deutscher Verlag der Wissenschaften"  
Lizenz-Nr. 206.435/81/81