

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 19

Artikel: Ein mechanisches Modell zur Demonstration der elektrischen Ladung und Struktur des Elektrons
Autor: Gerharz, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915741>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ein mechanisches Modell zur Demonstration der elektrischen Ladung und der Struktur des Elektrons

Von R. Gerharz

537.12

Elektrische Ladung, magnetisches Moment und die Feinstruktur des Elektrons werden auf zwei elektromagnetische Feldeinheiten zurückgeführt, die sich in stetiger Wechselwirkung auf der senkrecht zur Teilchenspinachse stehenden Umfangsline befinden. Die postulierten Feldeinheiten sind identisch mit einem Photon beziehungsweise einem Neutrino.

In einem Modell sind beide Feldeinheiten als Vektorkreuze dargestellt. Ihre Bewegungen werden mechanisch simuliert. Die Entstehung des elektrischen Monopols der Ladung wird mit der Modellmaschine beobachtbar gemacht.

Une charge électrique, un moment magnétique et la structure fine de l'électron sont ramenés à deux unités de champ électromagnétique agissant alternativement, d'une façon continue, et disposées sur l'enveloppante perpendiculaire à l'axe de spin des particuliers. Ces unités de champ sont identiques à un photon et à un neutron, respectivement.

Dans un modèle, les deux unités de champ sont représentées sous forme de vecteurs croisés, dont les déplacements sont simulés mécaniquement. La production du monopole électrique de la charge est rendue observable avec ce modèle mécanique.

1. Historische Bemerkungen

Seit Entdeckung des Elektrons durch *J. J. Thomson* [1]¹⁾ hat es nicht an Versuchen gefehlt, die physikalischen Eigenschaften dieses Fundamentarteilchens an einem Modell zu veranschaulichen. Die nie mit analytischen Methoden beantwortete Frage «Was ist denn eigentlich Elektrizität und die damit verbundene elektrische Ladung?» reflektiert in den 200 Jahren seit *Benjamin Franklin's* Arbeiten über die Ladungsarten die Unzulänglichkeit aller Modellvorstellungen, die auf dem veralteten Materiebegriff des Massepunktes aufbauen. Es blieb dabei belanglos, ob das Materiemodell im wissenschaftlichen Kolloquium oder im Schülerkreis der Grundschulklassen diskutiert wurde. Im folgenden soll daher ein einfaches Strukturmodell des Elektrons gezeigt werden, welches zwar den letzten Erkenntnissen über den Aufbau der Materie Rechnung zu tragen sucht, sich aber in seinen Ansätzen über *C. H. Windt* [2] bis *M. Abraham* [3] am Anfang dieses Jahrhunderts zurückverfolgen lässt. Brauchbare Modellvorstellungen wurden erst wieder in jüngerer Vergangenheit von *Bopp* [4], *Hönl* [5], *Kohl* [6] und *J. Thomson* [7] beschrieben. Ihre Darstellungen gehen hauptsächlich auf Pol-Dipolpaare zurück. Die elektrische Ladung und das magnetische Moment der dort besprochenen Modellansichten sind allerdings nicht befriedigend und deshalb undurchschaulich geblieben.

2. Physikalische Grundtatsachen und Vorbedingungen

Das im folgenden beschriebene Modell begründet sich auf 3 Voraussetzungen: 2.1 Materie (und somit alle Elementarteilchen) ist aufgebaut aus Lichtenergiequanten (d. h. Photonen) γ und aus Neutrinos ν . Das Elektron besteht nur aus je zwei dieser Komponenten. Sein Photon ist ein rotierendes elektromagnetisches Feldstärkekreuz.

Zur Modellvorstellung genügen zwei verschiedene Buntfarbstifte (z. B. rot oder blau) oder gleichlange Holzstäbchen. Eines davon stellt den elektrischen oder E -Vektor dar und wird gerne mit roter Farbe markiert. Das andere, meist blau markierte, steht orthogonal dazu und stellt den magnetischen oder H -Vektor dar (Fig. 1). Das Gebilde soll sich mit Lichtgeschwindigkeit in Richtung der gemeinsamen Normalen bei-

der Vektoren bewegen. Nach *Bohr* [8] und *Rubinowicz* [9] ist die Elementarform des Photons zirkular polarisiert. Das bedeutet, dass sich das elektromagnetische Vektormodell des Photons, als ein elementarer Träger von Energie, drehen muss. Das Photon des Elektrons (γ_e) dreht sich mit seiner Comptonfrequenz ν_e und enthält die Energie

$$E_\gamma = m_e c^2 = h \nu_e \triangleq 0,51 \text{ MeV}$$

Man erkennt sogleich, dass die Einstein-Gleichung der Energie- und Massenäquivalenz

$$E = m_e c^2$$

richtig den Energiezustand des ruhenden Elektrons wiedergibt. Beim Elektron ist das Photon ein linksdrehendes elektromagnetisches Feldstärkekreuz, welches zu dem Poyntingschen Vektor der Energieflussdichte des Photons führt [10].

2.2 Das Neutrino des Elektrons ist ebenfalls als Feldstärkekreuz der oben gezeigten Art symbolisiert.

Da das Neutrino energielos ist, darf es keine Rotation aufweisen. Das Neutrino bewegt sich also im Raum (wie das Photon) mit Lichtgeschwindigkeit, wobei hingegen der elektrische und magnetische Feldvektor stets in dieselbe Richtung (senkrecht zur Fortpflanzung) weisen. Wegen der Orthogonalität

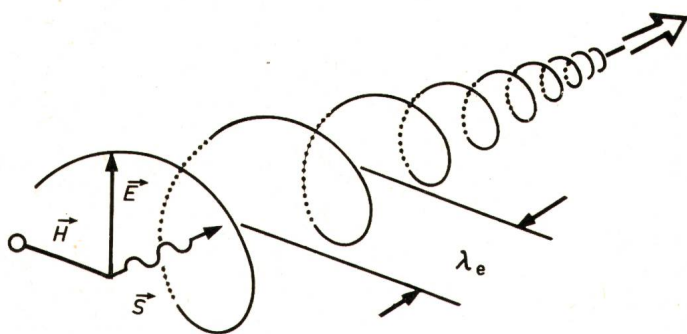


Fig. 1

Linkszirkular polarisiertes Photon

(Rechtsschraube!) auf gerader Ausbreitungsstrecke. \vec{E} elektrischer Feldvektor; \vec{H} magnetischer Feldvektor; \vec{S} Spinvektor des Photons; λ_e «Wellen»-länge des Photons. Man merke sich: Das Photon des Elektrons ist ein «Anti»-Photon und rechtszirkular polarisiert. Es hat negative Helizität und ist somit eine Linksschraube.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

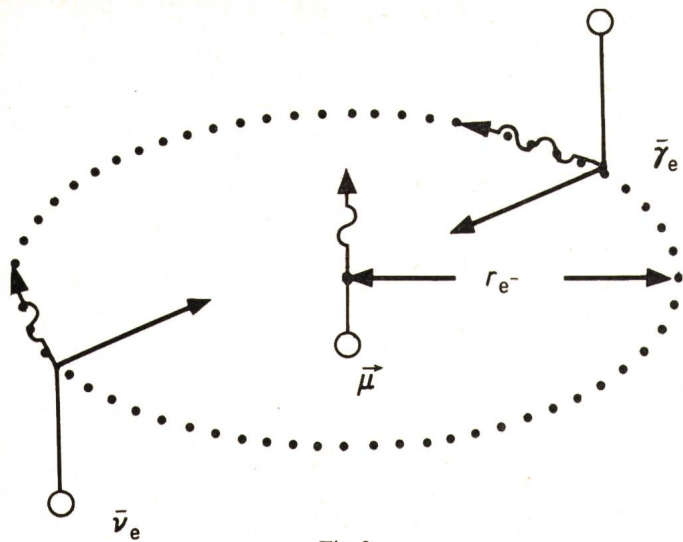


Fig. 2
Feldvektoren und Strukturmodell des Elektrons

- ▶ elektrisches Feld
- magnetisches Feld
- ▶ Spinvektor

Das Photonsymbol hat den Spin $-\hbar$, das Neutrinosymbol hat den Spin $-\frac{1}{2}\hbar$; beide haben rechtszirkulare Polarisation und laufen auf der kreisförmigen Führungsbahn U_e gegenläufig. Die Spingleichung lautet:

$$S_e = -\hbar - \left(-\frac{1}{2}\hbar\right) = -\frac{1}{2}\hbar$$

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

tät der Vektoren entsteht somit nur ein «innerer Spin», also ein Vektorprodukt aus $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ vom Betrage $S^* = +\frac{1}{2}\hbar$ (bzw. $-\frac{1}{2}\hbar$ beim Antineutrino) der Planckschen Wirkung.

2.3 Beide Elementarfelder (Photon und Neutrino) bewegen sich gegeneinander auf einer stabilen Kreisbahn, dem Elektronenumfang $U_e = 2\pi r_e = 1,75 \cdot 10^{-12}$ cm. Die physikalische Begründung für diese Bahnbewegung ist noch wenig verstanden. Man darf vermuten, dass die Kollision zweier elektromagnetischer Elementarfelder eine Entartung des lokalen mikrophysikalischen Raumelementes verursacht. Die beiden gegenläufigen Felder stossen nämlich als Gebilde mit gleichem Schraubensinn (Helizität) aufeinander und verdoppeln den Anteil des Spinfeldes im lokalen Raumelement. Die Fortbewegungsrichtung der Elementarfelder wird dabei stetig um 180° gekrümmt. Nach dieser Richtungsänderung, d. h. nach einem halben Kreisbogen $\frac{1}{2} U_e$ müssen die beiden Elementarfelder wieder kollidieren und das Spiel wiederholt sich solange wie das Elektron als stabiles Materieteilchen besteht (Fig. 2 und 3).

Die ständige Anwesenheit von Energie im lokalen Raumelement, nämlich durch das kreisbahngebundene Photon, erzeugt ein sehr schwaches, aber energieabhängiges Gravitationsfeld um das so entstandene Materieteilchen. Zweifellos gelten im Zeitraum der Kollision der beiden Elementarfelder physikalische Gesetze, die der Schwarzschildschen Metrik für degenerierte Energie- und Gravitationsräume folgen [11; 12; 13; 14]. Das Zentrum des Elektrons ist nicht nur leer, sondern auch dann feldfrei, wenn die entstehende elektrische Ladung durch ein Maximum geht.

3. Feldsymbole und Wirkungsweise des Modells

Es sei nun versucht, die Kinematik der elektromagnetischen Elementarfelder im Modell zu verfolgen und daraus die makro-

physikalischen Eigenschaften des Elektrons zu erkennen. Das Vektormodell (Fig. 2 und 3) benötigt daher zunächst eine Vorrichtung, welche die Elementarfelder in Feldliniendarstellung auf einer kollidierenden Kreisbahn zeigt.

An dieser Stelle empfiehlt es sich, den Drehsinn einer Schraubenbewegung etwas eingehender zu studieren. Eine geeignete Vorlage kann man sich aus einem langen steifen Draht herstellen, den man über einen Farbstift oder über den zylindrischen Holzstiel eines Werkzeugs wickelt. Dann nimmt man die Spirale vom Träger ab und streckt die einzelnen Windungen so, dass sie etwa den Abstand ihres Durchmessers voneinander haben. Rechtsdrehend fortschreitende Bewegung ist eine Rechtsschraube und hat positive Helizität. Nun macht man sich auch eine Linksschraube mit gleicher Steigung und Durchmesser. Eines der Schraubenmodelle sollte man doppelt herstellen.

Legt man die gleichartigen Drahtschrauben ineinander, so addieren sich ihre Linienführungen zu einer dickeren Schraubenlinie. Zwei ineinander gelegte ungleichartige Schrauben blockieren sich zweimal pro Windung, indem sich ihre Schraubenlinien kreuzen.

In dieser Modellvorstellung folgen die Pfeilspitzen der Vektoren des sich drehenden Photonfeldsymbols ebenfalls einer Schraubenbewegung (Fig. 1), die sich nach Richtungs- umkehr auf U_e mit dem Schraubensinn des gegenläufigen Neutrinos deckt. Man hat also hier zwei Linksschrauben, die sich überdecken. Setzt man anstelle der Schrauben die Feldsymbole, so bemerkt man, dass bei der Kollision beider Felder *ein* Feldanteil \mathbf{E} oder \mathbf{H} neutralisiert, während der *andere* verdoppelt wird. Die Durchschnittsverteilung und Felddichte auf U_e ist daher konstant, gleichwohl ob die Felder auf U_e momentan kollidieren, oder sich nach $\frac{1}{2} U_e$ gegenüberstehen. Dagegen haben Kollisionen von Feldern entgegengesetzten Schraubensinnes eine Katastrophenwirkung, die in unserem Modell zu energetischen Wechselwirkungen, bzw. zur Unstabilität des Teilchens führen würde.

Zunächst sei die Aufmerksamkeit auf die einfache Wechselwirkung der elektrischen Feldlinien beschränkt, welche ja für den Aufbau der elektrischen Ladung des Elektrons verantwortlich sind. Es sei mit dem elektrischen Feld des Neutrinos begonnen, dessen elementare Feldkomponenten in Fortbe-

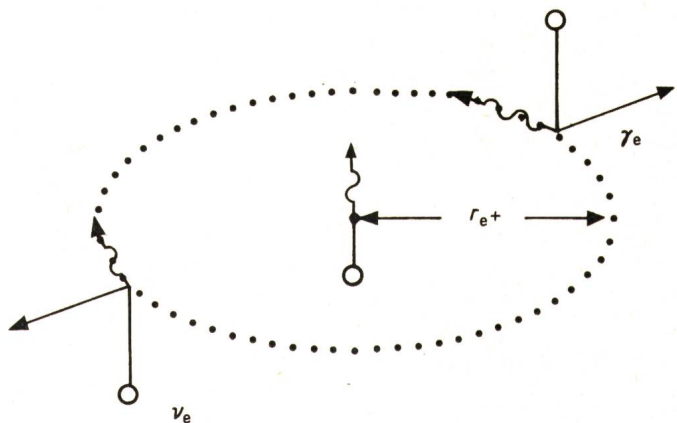


Fig. 3
Strukturmodell des Positrons

Die Schraubensinne der Vektorsymbole sind umgekehrt wie in Fig. 2.

Die Spingleichung lautet: $S_e = +\hbar - \left(+\frac{1}{2}\hbar\right) = +\frac{1}{2}\hbar$

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und im Text

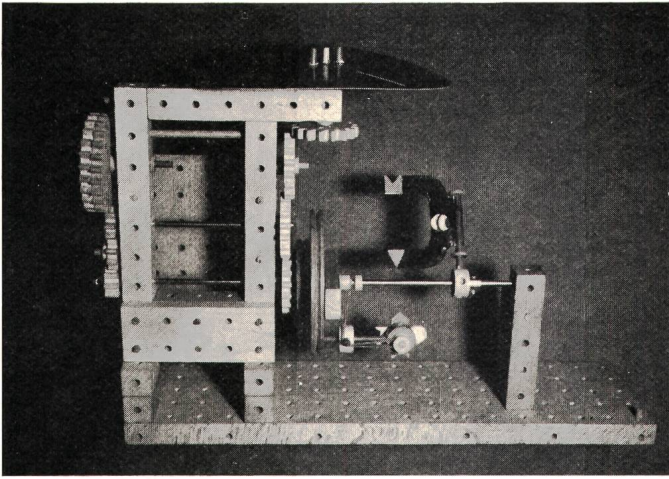


Fig. 4

Kinematisches Strukturmodell des Elektrons und dessen elektrische Ladung

Das Modell ist mit Holzteilen und Zahnrädern des Baukastens «Matador 3» (mit Eisenachsen und Zahnrädergänzungen) erstellt. Die Vektorsymbole sind bemaltes Hartpapier. Die spitzen Pfeile sind die Symbole des elektrischen Feldes zweier Elementarkomponenten. Bei der hier gezeigten Stellung handelt es sich um den Maximalwert der elektrischen Ladung. Das Zahngetriebe erzeugt eine gegenläufige Synchronbewegung. Antrieb von oben links mit dem Kurbelstäbchen.

wegungsrichtung keine Drehbewegung ausführen. Abwesenheit von Drehbewegung bedeutet aber ein Drehmoment von der Grösse Null und somit Energielosigkeit des Feldkreuzes. Die aufeinander orthogonal stehenden Feldvektoren haben aber einen inneren Spin, dem man einen Schraubensinn zuordnen muss.

Das Neutrinofeld bewegt sich wegen der Voraussetzung unter Ziff. 2.3 infolge multipler Kollisionen mit dem Photon des Elektrons kreisförmig gegenläufig um eine gemeinsame Dreh- bzw. Spinachse. In unserem Modell (Fig. 4) wird später das elektrische Feld des Neutrinos als roter spitzer Pfeil angedeutet, welcher auf ein Stück dunkles Hartpapier gemalt ist. Die Mitte des spitzen Feldvektors ist ausgeschnitten, um die Kollision mit dem Photon des Elektrons auf U_e vorzutauschen. Das Hartpapier ist so befestigt, dass es eine Drehbewegung (Revolution) um die Spinachse ausführen kann. Wegen der Energielosigkeit des Neutrinos zeigt das elektrische Feld stets nach dieser Spinachse. Um 90° versetzt ist auf dem Hartpapierstück ein blau-weisser Ball mit Streifen aufgemalt, der die Richtung des magnetischen Feldes des Neutrinos andeuten soll.

In Einklang mit experimentellen Ergebnissen muss es sich hier um ein Gebilde mit negativem innerem Spin $-\frac{1}{2} \hbar$, d. h. mit innerem Linksdrall (vom Standort des Beschauers gesehen, im Gegensinne des Uhrzeigers) handeln. Linksdrall bedeutet aber «Antispin» mit negativem Vorzeichen (Fig. 1 zeigt eine Rechtsschraube!), so dass unser Feldsymbol (Fig. 2) im Modell das Antineutrino des Elektrons (bzw. das Neutrino des Positrons in Fig. 3) richtig andeutet. Vom magnetischen Feldsymbol konnte in den Fig. 4 und 5 nur das Ende (nicht die Spitze) gezeigt werden. Wegen der negativen Ladung des Elektrons gehen alle elektrischen Feldlinien von aussen nach innen.

Das Photon des Elektrons ist ein elektromagnetisches Feldkreuz mit der Eigenrotation $\nu_e = 1,24 \times 10^{20} \text{ s}^{-1}$. Diese Rotationsfrequenz ist ableitbar aus der Comptonwellenlänge λ_e . Man erhält:

$$\nu_e = \frac{c}{\lambda_e}$$

Das daraus gefolgerte Drehmoment ist der Selbstenergie des Elektrons gleich, wobei

$$E_e = m_e c^2 = \hbar \cdot 2\pi \nu_e = \hbar \frac{c}{\lambda_e} \cdot 2\pi \triangleq 0,51 \text{ MeV}$$

Bei hochenergetischen Teilchenreaktionen, z. B. bei der Anihilation eines Elektron-Positronpaares werden 2 entgegengesetzt polarisierte Photonen mit dieser Mindestenergie frei. Zugleich werden die beiden, den Materieteilchen zugehörigen Neutrinos, ν_e und $\bar{\nu}_e$ emittiert. Die beiden Photonen müssen wegen der Spingleichung des Gesamtsystems entgegengesetzt zirkular polarisiert sein. Das Photon des Elektrons hat Linksdrall, das des Positrons hat Rechtsdrall. Alle Spinkriterien gelten hier wieder mit der Vorbedingung, dass das betreffende Feldkreuz in Fortbewegungsrichtung, und von hinten, betrachtet wird.

In unserem Modell kann man das positiv geladene Positron simulieren, indem einfach die Photonen-Eigenrotation und das Neutrinosymbol umgekehrt werden (Fig. 3). Die Eigenrotation des Photons wird mit einem Gummizugmechanismus erzeugt (Fig. 4). Die Rotationsgeschwindigkeit lässt sich mit der Spannung des Gummibändchens und mit geeigneter Rädchenübertragung weitgehend verändern.

Beim Elektron dreht sich das Vektorkreuz des Photons genau $\alpha = \frac{1}{137,0359}$ mal pro Umlauf um die Spinachse. Mithin vergehen $\frac{1}{\alpha} = 137,0359$ Umläufe auf U_e (Revolutionen um die Spinachse herum), bevor das Vektorkreuz eine Eigenrotation ausführt. Die Zahl α ist die bekannte Sommerfeld-Konstante:

$$\alpha = \frac{U_e}{\lambda_e}$$

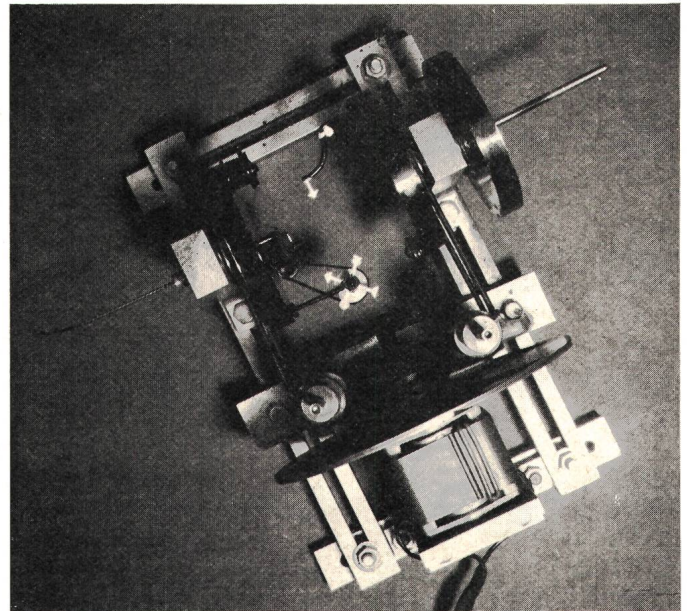


Fig. 5

Alternes Feldmodell aus Metallteilen und mit Motorantrieb

Die Stroboskopscheibe sitzt auf der Motorwelle. Die gegenläufige Bewegung der weissen Feldsymbole wird mit Riemenantrieb erzeugt. Die massiven Stirnräder tragen die Feldsymbole und Gewichte zur Auswuchtung. Ein mitrotierendes Schneckengetriebe dreht das Photonensymbol während des Umlaufs. Synchroner Lauf wird jedoch wegen des Schlupfs der Antriebsriemen etwas beeinträchtigt.

Der Restbetrag nach 137 ganzen Umläufen auf U_e ist $\Delta 1/\alpha = 137,0359 - 137 = 0,0359$ mal U_e , bzw. etwa 3,6% von U_e . Dies führt zu einem Exzesswinkel ε_{δ} auf U_e von der Grösse $360^\circ \cdot 0,0359 \approx 13^\circ$. Für eine vervollständigte Kreisbahn aller ε -Bogen auf U_e werden $\frac{360^\circ}{13^\circ} \approx 27,5$ dieser Bahnsegmente von 13° benötigt. Bei sorgfältiger Betrachtung erkennt man, dass sich infolge dieses Exzesswinkels das entstehende elektrische Ladungsfeld langsam, mit einer auf U_e bezogenen Geschwindigkeit von $\frac{c}{137}$ cm/s um die Spinachse dreht und damit ein anomales Zusatzmoment zum gewöhnlichen magnetischen Moment des Elektrons erzeugt. Die noch auftretenden höheren Glieder der Anomalie lassen sich mit dieser Modellvorstellung rechnerisch genau bestimmen und decken sich mit den neuesten Messergebnissen. Die Erklärung der magnetischen Anomalie mit einfachen deterministischen Argumenten macht unser Modell ganz besonders brauchbar und wirklichkeitstreu, zumal diese Erscheinung für eine lange Zeit nur mit den Besonderheiten der Quantenelektrodynamik erklärlich war.

Man erkennt jetzt, dass die Feldliniensymbole des Elektron-photons $\bar{\gamma}_e$ und des Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$ immer auf Kollisionskurs auf der Elektronenumfangsline U_e laufen. Pro Umlauf gibt es zwei Kollisionen. Nähme man eine gleichsinnige Bewegungsrichtung auf U_e an, so würden die beiden Elementarfelder — wie bei einem Doppelstern — stets ohne Kollision und mit 180° gegenseitigem Winkelabstand auf U_e laufen. Dann würde nicht nur die Annahme eines gekrümmten Propagators entfallen, sondern die Spingleichung des Gesamtsystems (nämlich Linkspin des Photons $-2\frac{1}{2}\hbar$, plus Linkspin des Antineutrinos $-1\frac{1}{2}\hbar$) würde einen Gesamtspin von $3\frac{1}{2}\hbar$ ergeben. Ein Teilchenspin von $3\frac{1}{2}\hbar$ ist aber ganz bestimmt falsch, und widerspricht allen Beobachtungstatsachen über das Elektron, dessen Gesamtspin wirklich $-1\frac{1}{2}\hbar$ beträgt. Man braucht dazu nur die Spingrössen der Feldkreuze $\bar{\gamma}$ und $\bar{\nu}_e$ als Komponenten einer Momentgleichung aufzutragen, um tatsächlich $\mathbf{S} = \hbar \downarrow - 1\frac{1}{2}\hbar \uparrow = 1\frac{1}{2}\hbar \downarrow$ zu erhalten.

Wenn man das magnetische Moment aus der Ampèreschen (Korkzieher-) Regel ableitet, findet man, wegen der Verschiedenheit des Schraubensinns der Komponenten und der daraus resultierenden Vorzeichen, dass Spin S und magnetisches Moment μ beim Elektron e^- antiparallel, und beim Positron e^+ parallel ausgerichtet sind. Das Modell des Positrons liefert dagegen, wie beim Elektron, antiparalleles S und μ , wobei μ durch die Orientierung des magnetischen Feldes des Positron-neutrinos ν_e^+ bestimmt wird. Dieser Widerspruch wurde bisher nicht völlig geklärt und ist wahrscheinlich durch die geschichtliche Entwicklung der Elektrodynamik und das lückenhafte Wissen über das magnetische Moment der Elementarteilchen bedingt.

4. Einzelheiten der Mechanik

Wir wollen uns nun den mechanischen Besonderheiten des Modells zuwenden. Die Hauptbestandteile des Elektronenmodells sind die Feldsymbole für das (Anti-)Photon $\bar{\gamma}_e$ und das Antineutrino $\bar{\nu}_e$. Diese sind auf Drehkörper im Beobachtungsraum montiert. Die tatsächliche Bewegungsgeschwindigkeit der Feldelemente im Elektron ist gleich der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s. Der Beobachtungsraum wird

am besten mit dunklem Papier ausgelegt, welches die mechanischen Teile während des Beobachtens verbergen soll.

Beide Feldsymbole bewegen sich gegenläufig und synchron. Ein Inversionsgetriebe erzeugt die achsenparallele Gegenrotation für die Trägerhalterung der Vektorsymbole. Zahnräder sorgen für schlupflose Übertragung der Bewegungen. Das in Fig. 4 gezeigte Modell ist aus Holzteilen gebaut. Drehachsen aus Eisen haben sich im Schulversuch jedoch als Notwendigkeit erwiesen. Natürlich kann man auch andere Baukastensortimente, als das gezeigte, zum Modellbau verwenden. Fig. 5 zeigt das erste Modell dieser Art, welches vor einigen Jahren im Laboratorium des Verfassers aus Metallteilen hergestellt wurde. Beim Nachbau der Modelle muss man auf gute mechanische Stabilität aller Bauteile achten. Die elektromagnetischen Feldsymbole des Modells sollen sich mit einer Drehzahl von mindestens 10 pro Sekunde frei bewegen lassen, um auch die unten beschriebene stroboskopische Betrachtung zu ermöglichen. Die Radscheiben im Beobachtungsraum (Fig. 4) dienen dazu, die Schwingungen der nicht ausgewuchteten Montierung für das Photonsymbol bei hoher Drehgeschwindigkeit etwas auszugleichen. Die Zahnradübersetzung jenseits des Beobachtungsraumes ermöglicht den Handantrieb des Modells mit geringer Drehzahl. Kraftbedarf und innere Reibung des Modells sind so gross, dass kleine Modellmotore zum Betrieb nicht ausreichen. Handantrieb ist sogar praktischer, weil man die Bewegung der Feldsymbole viel besser kontrollieren und verfolgen kann.

Die Wirkungsweise der Mechanik geht aus den Fig. 4 und 5 hervor und benötigt keine Erläuterung. Man beobachtet von oben durch eine Stroboskopscheibe, welche mit einem weiteren Zahnrad im Drehverhältnis 1:1 zu den Symbolträgern im Beobachtungsraum schlupffrei angetrieben wird. Die Drehrichtung der Scheibe ist nicht kritisch. Nach dem Auge zu ist die Stroboskopscheibe dunkel gefärbt. Die Scheibe hat zwei, sich diametral gegenüberstehende, 2 mm breite Radialschlitze. Eine helle Schreibtischlampe, die nach oben gut abgeschirmt ist, beleuchtet den Raum unterhalb der Scheibe. Zunächst wird einer der Schlitze mit schwarzem Klebestreifen abgedeckt. Man beobachtet mit einem Auge und nähert sich der Scheibe so nahe wie möglich, um beim Sehen störende Perspektiveffekte zu vermeiden. Die Ausgangsstellung der Modellmaschine und die Einstellung der Feldsymbole und Stroboskopscheibe im Betrieb stimmt nicht genau mit der Stellung in Fig. 4 überein. Zur Beobachtung muss man die gemeinsame Aufsichtsebene durch beide Feldsymbole auf deren Montierungen so verstellen, dass diese Ebene parallel zur Stroboskopscheibe zu liegen kommt. Der offene Schlitz der Scheibe soll über der Hauptdrehachse (Spinachse des Elektrons) stehen und zu dieser auch parallel sein.

5. Betrieb des Modells und physikalische Forderungen

Im Folgenden wollen wir einigen Einzelheiten der Beobachtung nachgehen. Mit der linken Hand halten wir die Rahmenkonstruktion des Modells fest. Die rechte Hand betätigt langsam das als Kurbel dienende Stäbchen im grossen Antriebszahnrad. Man sieht, wie sich beide Feldsymbole aufeinander zu bewegen und wie deren gedachte Mitte «kollidiert». Dasselbe ereignet sich einen halben Umlauf auf U_e später. Nach vielen (ganzen!) Umdrehungen bemerkt man, dass sich das Feldsymbol des Photons aus seiner ursprünglichen Lage etwas verdreht hat.

Wenn man jetzt bei erhöhter Drehzahl durch die Stroboskopscheibe nach unten in den Beobachtungsraum blickt, kann man die Momentanstellungen des Neutrinosymbols und die des diesem gegenüberstehenden Photonfeldsymbols erkennen. Auch die langsame Eigenrotation des letzteren wird jetzt deutlich sichtbar. Die roten Pfeile deuten die elektrischen Feldrichtungen an. Im Elektronenmodell (negative Ladung!) zeigt der Neutrino Pfeil ständig nach dem Innern des Elektrons. Inzwischen hat sich das Photonsymbol so weitergedreht, dass sein Feld dem des Neutrinosymbols entgegengesetzt parallel steht. In dieser Stellung zeigen alle Feldlinien senkrecht zur «Oberfläche» des Elektrons. Das im Makroraum experimentell nachweisbare negative elektrische Ladungsfeld erreicht hier einen Maximalwert und bildet den bekannten elektrischen Monopol des Elektrons. Im Innern des Elektrons neutralisieren sich somit die elektrischen Feldstärken und im Zentrum ist die Grösse des elektrischen Feldes gleich Null.

Es ist interessant festzustellen, dass in dem gleichen Zeitraum auch beide magnetischen Feldsymbole (blaue Stumpfpfeile) entgegengesetzt parallel zueinander stehen. Die magnetischen Feldlinien sind hier auf kürzestem Wege in sich geschlossen. Der entstehende magnetische Fluss des Elektrons geht ebenfalls durch ein Maximum. Beide Maxima werden also gleichzeitig erreicht. Wenn man nicht nach *Einstein* wegen der Bewegung der Feldkomponenten mit Lichtgeschwindigkeit Kräftefreiheit im Reaktionsraum erwarten müsste, wäre man geneigt zu argumentieren, dass dem gleichnamigen elektrischen Ladungsfeld die in sich geschlossenen magnetischen Feldlinien entgegenwirken und das Elektron «mechanisch» zusammenhalten. Aber dieses Kräftespiel ist noch nicht völlig geklärt.

Mit diesem Modell kann man auch den entgegengesetzten Fall konstruieren, bei dem das elektrische Aussenfeld durch Null geht. In diesem Zeitraum ist das Nahfeld des Elektrons während der Hälfte einer Compton-«Schwingung» einem elektromagnetischem Miniaturdipol vergleichbar. Mit herkömmlichen Experimenten lässt sich ein solches Feldgebilde aber nicht nachweisen.

Die physikalischen Eigenschaften des Elektrons, welche aus Experimenten bekannt sind, zeigen den Durchschnittszustand der elektrischen Ladung und des magnetischen Moments zwischen deren Extremwerten an. Man kann nun auch verstehen, dass noch dann elektrische Ladungsfeldkomponenten bestehen, wenn das elektrische Feldsymbol des Photons nicht mehr parallel zur elektrischen Feldrichtung des Neutrinos steht. Ferner ist es nicht schwer, sich vorzustellen, dass das Fernfeld der elektrischen Ladung als Durchschnitterscheinung die räumliche Ausdehnung eines kugelförmigen Rotationskörpers hat, wogegen das elektrische Nahfeld des Elektrons auf einen kreisringförmigen (torroidalen) Ladungs-«Körper» zurückführbar ist. Ursprung der elektrischen Ladung ist somit die Linie U_e , worauf auch die Feldliniendichte am grössten ist. Der elektrische «Monopol» ist also nicht ein Zentralpoloid, weil die Definition des Poloids vorschreibt, dass «alle Feldlinien in Ebenen liegen, die sich in einer gemeinsamen Achse schneiden». Diese Feldlinien sind beim Elektron nicht in sich selbst geschlossen.

Das Entstehen des Rotationskörpers mit elektrischer Ladung kann man schliesslich in diesem Modell simulieren, wenn man den zweiten Schlitz in der Stroboskopscheibe öffnet, oder sogar noch ein zweites Sehschlitzpaar darin einschneidet. Dies führt letztlich darauf hin, den Rotationskörper ohne

Stroboskop zu betrachten. Nun wird auch, ganz allgemein gesehen, das Phänomen des Tunneleffektes verständlich, welches nur zur ungefähren Zeit des Ladungsminimums erfolgen kann.

Die elektrische Ladung des Protons oder anderer Materieteilchen entsteht prinzipiell nach dem gleichen physikalischen Mechanismus. Die Selbstrotation eines oder mehrerer Photonen ist rascher bei grösserer Masse, und es können zusätzliche Neutrino Paare existieren, deren Ladungseffekte sich gegenseitig ausgleichen [15].

Zum Abschluss wenden wir uns wieder der Fig. 2 zu, die vorher nur einen flüchtigen Eindruck von der Feldsymbolik geben sollte. Die zuvor diskutierten Feldsymbole sind hier Vektoren gleicher Grösse. Der Schraubensinn der Spinrichtungen wird vektoriell addiert und erzeugt den resultierenden Teilchenspin $-\frac{1}{2} \hbar$ in der Mittelsenkrechten zur Ebene von U_e . Nach den Regeln der klassischen Optik gilt für rechts zirkular polarisiert ein Lichtstrahl, dessen elektrischer Vektor sich bei Bewegung zum Beschauer hin im Uhrzeigersinne dreht. Das stimmt überein mit dem Drehsinne unserer Linkschraube für Antineutrino und «Anti»-photon. Die in Fig. 2 gezeigten Spinzeiger auf U_e sind daher richtig und entsprechen beim Elektron auch den experimentellen Ergebnissen über Antiparallelismus des Teilchenspins und des magnetischen Moments. Letzteres entspricht der Richtung des magnetischen Vektors des Antineutrinos. Der Gesamteilchenspin entsteht als resultierender Spin-Vektor S aus den gegenläufigen Komponentenvektoren auf U_e .

6. Abschliessende Bemerkungen

Das Baukastenmodell (Fig. 4) wurde in mehreren Fachkreisen vorgeführt und nach anfänglicher Neugierde und Skepsis begeistert aufgenommen. Die Erfahrungen mit Schülergruppen sind noch zu spärlich, um daraus pädagogische Folgerungen zu gewinnen.

Literatur

- [1] J. J. Thomson: Cathode rays. Philosophical Magazine 44(1897)5, p. 293...316.
- [2] C. H. Wind: Über das Feld langsam bewegter Elektronen. Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles, Serie 2, 5(1900)-, S. 609...635.
- [3] M. Abraham: Prinzipien der Dynamik des Elektrons. Annalen der Physik 315/10(1903)1, S. 105...179.
- [4] F. Bopp: Über den Spin und die Struktur des Elektrons. Ztschr. Angew. Physik 1(1949)8, S. 387...390.
- [5] H. Hönl: Feldmechanik des Elektrons und der Elementarteilchen. Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften 26(1952)-, S. 291...382.
- [6] K. Kohl: Ein neues Modell des Elektrons. Physikalische Verhandlungen VDPG -(1962)10, S. 453...459.
- [7] J. Thomson: Some thoughts on the electron. Internat. J. Electronics 1/20(1966)1, p. 81...85.
- [8] N. Bohr: On the quantum theory of line-spectra. Skrifter det danske videnskabelig selskab. Naturvidenskabelig og matematisk afdeling 8(1968)4, p. 100...104.
- [9] A. Rubinowicz: Bohrsche Frequenzbedingung und Erhaltung des Impulsmomentes. Physikalische Ztschr. 19(1918)20, S. 441...445.
- [10] J. H. Poynting: On the transfer of energy in the electromagnetic field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 175(1884) 2, p. 343...361.
- [11] C. Lanczos: Undulatory Riemannian spaces. J. Mathematical Physics 4(1963)7, p. 951...959.
- [12] K. Schwarzschild: Zur Quantenhypothese. Berlin, Akademie der Wissenschaften, 1916.
- [13] J. A. Wheeler und D. R. Brill: Krümmung der leeren Raum-Zeit als Baumaterial der physikalischen Welt: Eine Einschätzung. Physikalische Blätter 19(1963)8, S. 354...361.
- [14] J. R. Oppenheimer und H. Snyder: Continued gravitational contraction. Physical Rev. 56(1939)9, p. 455...459.
- [15] R. Gerharz: A structure from magnetic moments. Internat. J. Electronics 32(1972)5, p. 481...504.

Adresse des Autors:

R. Gerharz, Burdette Road 8703, Bethesda, Maryland 20034.