

Klaus Rädle

Das Elektron

Impressum:

Rädle, Klaus
Das Elektron

1. Auflage 2019

© 2019 book-on-demand

in der Westarp Verlagsservicegesellschaft mbH
Kirchstr. 5
39326 Hohenwarsleben
www.westarp.de

ISBN: 978-3-96004-027-9

Druck und Bindung: Druckerei Kühne & Partner GmbH & Co. KG
www.unidruck7-24.de

Printed in Germany.

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere die der
fotomechanischen Vervielfältigung oder Übernahme
in elektronische Medien, auch auszugsweise.

Vorwort

Das Elektron ist ein fundamentales Elementarteilchen, mit Masse, einer negativen Elementarladung, einem Eigendrehimpuls (Spin) und einem magnetischen Moment. In der klassischen Physik gehört zu jedem Drehimpuls eine rotierende Masse. Doch im Standardmodell der Teilchenphysik wird das Elektron als Punkt betrachtet. Ein Punkt mit Masse und Ladung hat eine unendlich große Massen- und Ladungsdichte, d.h. ein punktförmiges Elektron wirft viele Fragen auf. Man umgeht das Problem mit dem Hinweis, dass das Elektron ein quantenmechanisches, d.h. klassisch nicht erklärbares Objekt darstellt.

Beim viel diskutierten Doppelspaltversuch (siehe das Kapitel 7) verhält sich das Elektron, abhängig vom Versuchsaufbau, sowohl als Teilchen als auch als Welle, ein höchst merkwürdiger Effekt. Haben wir das Elektron als Elementarteilchen wirklich verstanden? Auf keinen Fall ist es punktförmig, allein schon wegen der unendlich großen Massen- und Ladungsdichte. Die aus Experimenten bekannte Obergrenze für die Ausdehnung des Elektrons beträgt näherungsweise 10^{-19} m, d.h. sein Durchmesser ist wesentlich kleiner als der des Protons mit ungefähr $2 \cdot 10^{-15}$ m.

Zum Elektron gibt es viele offene Fragen. Woher kommt z.B. die elektrische Ladung bei der Paarbildung und wo bleibt sie nach der Paarvernichtung? In den Kapiteln 1 bis 20 werden Phänomene in Verbindung mit dem Elektron beschrieben, wie sein Eigendrehimpuls, der Bahndrehimpuls im H-Atom, die Vakuumfluktuationen, der Tunneleffekt, die Supraleitung, der Compton-Effekt und der Photo-Effekt. Das Kapitel 21 zeigt, wie man möglicherweise mit Hilfe der Dichteskala des Universums den Durchmesser des Elektrons bestimmen kann. Das Kapitel 22 enthält Näherungsformeln zur Berechnung des Verhältnisses der Protonen- zur Elektronenmasse und eine grobe Abschätzung der Ausdehnung des Universums.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Daten des Elektrons	3
3	Punktteilchen oder nicht	5
4	Der Millikan-Versuch	11
5	Der Drehimpuls	14
6	Der Bahndrehimpuls im H-Atom	18
7	Der Doppelspaltversuch mit Elektronen	21
8	Vakuumfluktuationen	27
9	Der Tunneleffekt	31
10	Paarbildung/Paarvernichtung	37
11	Ferromagnetismus	43
12	Der Mechanismus der Supraleitung	46
13	Fermigas in Weißen Zwergen	49
14	Das Pauli-Prinzip	55
15	Größenverhältnisse	61
16	Der Compton-Effekt	67
17	Der Photo-Effekt	69
18	Das Elektron im Magnetfeld	71
19	Das Elektron im elektrischen Feld	76
20	Elektronen in Halbleitern	79
21	Der Durchmesser des Elektrons	84
22	Anhang	93
22.1	Spannung und Geschwindigkeit relativistisch	93
22.2	Einfach- und Doppelbindung	95
22.3	Die kritische Dichte des Universums	97
22.4	Die Ausdehnung des Universums	99
22.5	Näherungsformeln mit der Elektronenmasse	100
23	Literaturverzeichnis	104
24	Verzeichnis der Bilder	105
25	Verzeichnis der Tabellen	107
26	Stichwortverzeichnis	108

1 Einführung

Die experimentell bestätigte Obergrenze für die Ausdehnung des Elektrons beträgt ungefähr 10^{-19} m. Im Vergleich zum Proton ist das Elektron mindestens um den Faktor 10.000 kleiner, im Vergleich zum Durchmesser eines Atoms mindestens um den Faktor 1.000.000.000. Im Standardmodell der Teilchenphysik wird das Elektron als punktförmig betrachtet, was man eigentlich ausschließen kann. Es hätte eine unendlich große Massen- und Ladungsdichte. Wie klein oder wie groß ist das Elektron wirklich?

Neben der Größe gibt es weitere offene Fragen. Woher kommt bei einem punktförmigen Elektron der Eigendrehimpuls (Spin)? Bei einer klassischen Betrachtung ergibt sich bei einem hypothetischen Durchmesser von 10^{-19} m an der Oberfläche des Elektrons eine Rotationsgeschwindigkeit von $3 \cdot 10^{15}$ m/s, im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit ein um den Faktor 10.000.000 höherer Wert (siehe das Kapitel 5).

Die Erklärung nach [FRITZSCH] (Seite 83 und 84) „*Im Gegensatz zum normalen Bahndrehimpuls ist der Spin des Elektrons eine reine Quanteneigenschaft, dem in der klassischen Physik nichts entspricht. Wie die Masse oder die Ladung des Elektrons ist der Spin eine innere Eigenschaft des Teilchens. Während man bei einem klassischen Objekt, etwa einer rotierenden Kugel, den Eigendrehimpuls auf Null bringen kann, etwa durch Abbremsen der Drehbewegung, ist dies beim Spin nicht möglich.*“ leuchtet ein, bleibt aber unbefriedigend. Ein punktförmiges Elektron kann nicht rotieren und sollte daher keinen Spin besitzen.

Der Bahndrehimpuls des Elektrons im Bohr-Modell des Wasserstoffatoms lässt sich anschaulich erklären. Er hat im Grundzustand den Wert $\hbar = h/(2\pi)$, wobei h die Planksche Konstante darstellt. Die Schrödinger-Gleichung der Quantenmechanik ergibt im Grundzustand eine kugelsymmetrische Wellenfunktion mit der Drehimpulsquantenzahl $L = 0$, d.h. der Bahndrehimpuls hat den Wert Null, im Widerspruch zum Bohr-Modell (siehe das Kapitel 6).

Das Elektron unterliegt dem Welle-Teilchen-Dualismus. Es besitzt je nach den Randbedingungen sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter. Dies wird bei der Beugung am Doppelspalt besonders deutlich. Ein Elektron, das klassisch betrachtet durch einen der Spalte fliegt, verhält sich sowohl als Welle als auch als Teilchen. Ordnet man es mit Hilfe von Röntgenstrahlung einem Spalt zu, verliert es seinen Wellencharakter und verhält sich wie ein Teilchen. Der Effekt übersteigt die Vorstellungskraft und sprengt die Grenzen der klassischen Physik (siehe das Kapitel 7).

Vakuumfluktuationen, d.h. Fluktuationen der überall vorhandenen Vakuumenergie, widersprechen der klassischen Vorstellung vom absolut leeren Raum. Nach der Quantenfeldtheorie entstehen im Vakuum permanent virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare, z.B. Elektronen und Positronen, die nach kurzer Zeit wieder zerstrahlen. Unter Vakuumpolarisation versteht man die Abschirmung der Elektronen durch virtuelle Positronen (siehe das Kapitel 8). Es stellt sich auch die Frage, wie bei der Paarbildung im leeren Raum elektrische Ladungen entstehen und wo sie nach der Paarvernichtung verbleiben.

Weitere interessante Phänomene, die mit dem Elektron in Verbindung stehen, sind z.B. der Tunneleffekt (siehe Kapitel 9), der Ferromagnetismus (siehe Kapitel 11), die Supraleitung (siehe Kapitel 12), das Fermigas in Weißen Zwergen (siehe Kapitel 13), der Compton-Effekt (siehe Kapitel 16) und der Photo-Effekt (siehe Kapitel 17).

Über die Dichteskala des Universums lässt sich möglicherweise der Durchmesser des Elektrons bestimmen. Die Dichteskala entspricht dabei einer Darstellung, bei der für verschiedene Elementarteilchen und Himmelskörper das Verhältnis der Dichte zur kritischen Dichte des Universums gegen das Verhältnis Durchmesser zur Planck-Länge aufgetragen wird. Für den Durchmesser des Elektrons ergeben sich unter bestimmten Voraussetzungen $2,4 \cdot 10^{-22}$ m (siehe das Kapitel 21). Über die Dichteskala folgt mit 10^{58} m auch eine grobe Abschätzung der Ausdehnung des Universums (siehe das Kapitel 22.4).

2 Daten des Elektrons

Die folgende Tabelle 2.1 zeigt wichtige Daten des Elektrons.

Eigenschaft	Symbol	Wert
Masse	m_0	$(9,10938356 \pm 0,00000011) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Ladung	$-e_0$	$-(1,6021766208 \pm 0,0000000098) \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Drehimpuls	$\hbar/2$	$\hbar = h/(2\pi)$, $h = \text{Planck-Konstante} = (6,626070040 \pm 0,000000081) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
magnetisches Moment	$-p_0$	$-(928,4764620 \pm 0,0000057) \cdot 10^{-26} \text{ J/T}^{1)}$ Anomalie ist berücksichtigt
$p_0 = \frac{e_0}{m_0} \frac{\hbar}{2} \frac{g}{2} = p_0^{(\text{NOR})} \frac{g}{2} \quad \text{mit } g = \text{exakter } g\text{-Faktor}$ $g = 2,00231930436182 \pm 0,000000000000052$ $\frac{g-2}{2} = \frac{p_0 - p_0^{(\text{NOR})}}{p_0^{(\text{NOR})}} = (1,15965218091 \pm 0,00000000026) \cdot 10^{-3} =$		
Anomalie des magnetischen Moments (durch die Theorie der Quantenelektrodynamik erklärt)		
$\gamma = \frac{p_0}{\hbar/2} = \frac{e_0}{m_0} \frac{g}{2} = \text{gyromagnetisches Verhältnis}$		
m_0 , e_0 , h , p_0 und g gemäß der Referenz "2014 CODATA recommended values", siehe https://physics.nist.gov		
Lebensdauer des Elektrons: stabiles Teilchen		
elektrisches Dipolmoment: bisher kein experimenteller Nachweis		
Durchmesser	D_0	unbekannt, möglicherweise $2,4 \cdot 10^{-22} \text{ m}$, siehe das Kapitel 21
klassischer Radius	r_0	$2,818 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
$r_0 = e_0^2 / (4 \pi \epsilon_0 m_0 c^2)$, $\epsilon_0 = \text{Influenzkonstante} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$ und $c = \text{Lichtgeschwindigkeit} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$		
1) $1 \text{ T} = 1 \text{ Tesla} = 1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ Js}/(\text{Cm}^2)$		
weitere Quellen [GERTHSEN] und https://de.wikipedia.org (Elektron, 21.05.2018)		

Tabelle 2.1 Daten des Elektrons

Das Elektron gehört gemäß dem Bild 2.1 als Elementarteilchen zu den Leptonen. Es bildet zusammen mit dem Up- und Down-Quark die Atome, d.h. die normale Materie. So besteht ein Proton aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark (uud), ein Neutron aus zwei Down-Quarks und einem Up-Quark (ddu). Die Bosonen vermitteln als Austauschteilchen die elektromagnetische Wechselwirkung (Photonen), die Kernkraft (Gluonen) und die schwache Wechselwirkung (Z-Boson und W-Bosonen). Eine Sonderrolle spielt das Higgs-Boson, das den Elementarteilchen ihre Masse verleiht. Das Graviton, das vermutete Austauschteilchen der Gravitation, kommt im Standardmodell nicht vor.



















Generation	Quarks		Leptonen		
1. Generation	 Up	 Down	 Elektron	 Elektron- Neutrino	
2. Generation	 Charm	 Strange	 Myon	 Myon- Neutrino	
3. Generation	 Top	 Bottom (Beauty)	 Tau	 Tau- Neutrino	
Bosonen	 Photon	 Gluon	 Z-Boson	  W-Bosonen	 Higgs

Bild 2.1 Elementarteilchen des Standardmodells

3 Punktteilchen oder nicht

Das Elektron und sein Antiteilchen das Positron zerstrahlen beim Zusammenstoß in zwei γ -Quanten der Wellenlänge λ , Paarvernichtung genannt (siehe Kapitel 10).

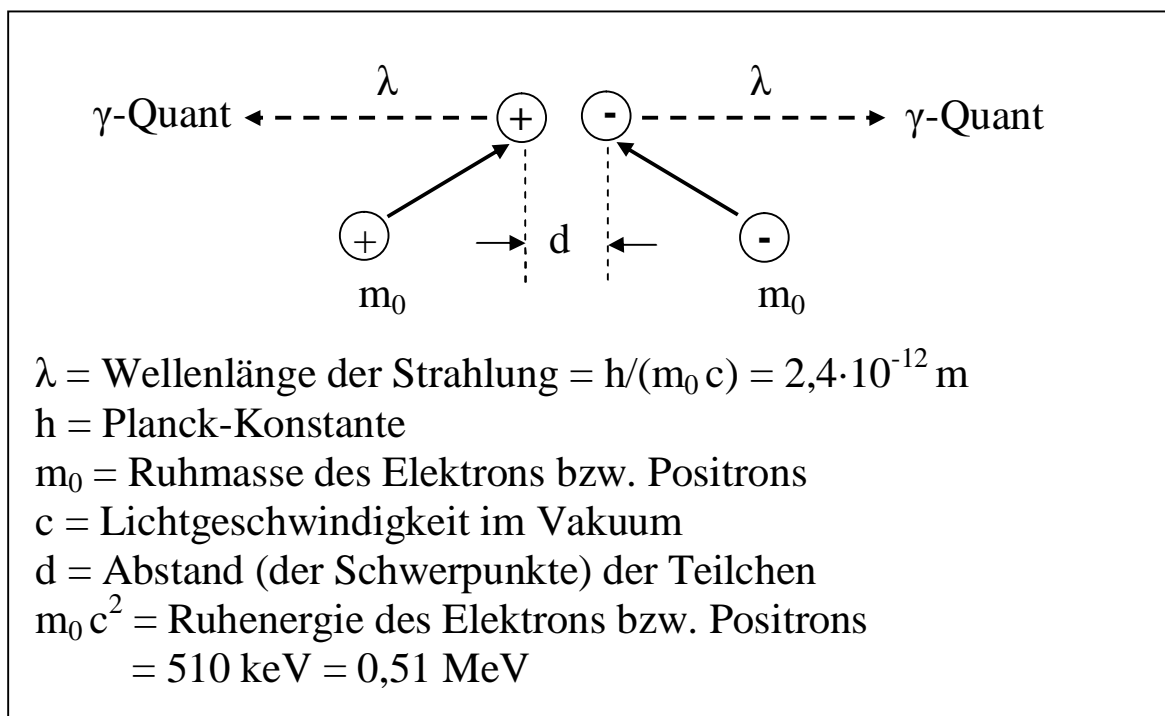


Bild 3.1 Paarvernichtung

Bei welchem Abstand zwischen Elektron und Positron erfolgt die Paarvernichtung? Als Punktteilchen wie im Standardmodell könnten sich beide sehr nahe kommen. Die Gravitationskraft und die Coulomb-Kraft (wegen der positiven und negativen Ladung) sind dabei anziehend, jeweils umgekehrt proportional zum Quadrat des Teilchenabstands.

$$K_G = G \frac{m_0^2}{d^2} \quad (3.1)$$

$$K_C = f \frac{e_0^2}{d^2} \quad \text{mit} \quad f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (3.2)$$

K_G	Gravitationskraft, N
G	Gravitationskonstante, Nm^2/kg^2 bzw. $\text{m}^3/(\text{kg s}^2)$
m_0	Ruhmasse des Elektrons bzw. Positrons, kg
d	Teilchenabstand, m
K_C	Coulomb-Kraft, N
e_0	Elementarladung, C
ε_0	Influenzkonstante, $\text{As}/(\text{Vm})$ bzw. $\text{C}^2/(\text{Nm}^2)$

Die Gravitationskraft ist allerdings bei gleichem Abstand gegen die Coulomb-Kraft vernachlässigbar. Gemäß den Gln. (3.1) und (3.2) folgt

$$\frac{K_C}{K_G} = \frac{f e_0^2 / d^2}{G m_0^2 / d^2} = \frac{f e_0^2}{G m_0^2} = 4,17 \cdot 10^{42} \quad (3.3)$$

Für kleine Abstände werden die Coulomb- und Gravitationskraft sehr groß, beim Teilchenabstand Null unendlich groß. Unendlich große Kräfte machen physikalisch keinen Sinn, d.h. die Gleichungen (3.1) und (3.2) verlieren für sehr kleine Abstände vermutlich ihre Gültigkeit. Die Paarvernichtung zeigt, dass sich das Elektron-Positron-Paar in zwei γ -Quanten umwandelt. Wie nahe sich dabei die Teilchen kommen, ist nicht bekannt.

Mit der Annahme, dass sich beide berühren, gilt $d = D_0$, wobei D_0 den Durchmesser des Elektrons bzw. des Positrons darstellt. Für diesen hypothetischen Fall kann man die Gl. (3.2) zumindest als Näherungsformel einsetzen. Mit $D_0 = 10^{-19}$ m, d.h. mit der aus Experimenten bekannten Obergrenze für die Ausdehnung des Elektrons, folgt $K_C = 2,3 \cdot 10^{10}$ N.

Wenn man als Abstand $D_0 = 10^{-25}$ m wählt, folgt die sehr große Kraft $K_C = 2,3 \cdot 10^{22}$ N, die näherungsweise der Anziehungskraft der Sonne auf die Erde entspricht (siehe die Tabelle 3.1). Man kann sich bei diesen enormen Kräften - selbst für Punktteilchen - kaum vorstellen, dass sich das Elektron und Positron auf einen Abstand von 10^{-25} m oder sogar weniger nähern.

Das Bohrsche Atommodell und die entsprechenden quantenmechanischen Berechnungen zeigen, dass die Gl. (3.2) auf der Längenskala von 10^{-10} m noch gültig ist (Bahnradius des Elektrons im Grundzustand des Wasserstoffatoms = $0,53 \cdot 10^{-10}$ m).

Erläuterungen	Kraft, N
H-Atom und Bohrsches Atommodell, Coulomb-Kraft zwischen dem Proton und Elektron im Grundzustand (Abstand = $0,53 \cdot 10^{-10}$ m)	$8,2 \cdot 10^{-8}$
Anziehungskraft der Erde auf einen Satelliten der Masse 1.000 kg in 500 km Höhe (Masse der Erde = $6 \cdot 10^{24}$ kg, Erdradius = 6.380 km)	$8,5 \cdot 10^3$
Anziehungskraft der Sonne (Masse = $2 \cdot 10^{30}$ kg, Radius = 696.000 km) auf einen Meteoriten der Masse 10.000 kg in 1.000 km Höhe	$2,8 \cdot 10^6$
Anziehungskraft der Erde auf den Mond (Masse des Mondes = $7,3 \cdot 10^{22}$ kg, mittlerer Abstand von der Erde = 384.000 km)	$2 \cdot 10^{20}$
Anziehungskraft der Sonne auf die Erde (mittlerer Abstand = $1,5 \cdot 10^8$ km)	$3,6 \cdot 10^{22}$

Tabelle 3.1 Kräfte

Würde man die Kraft $K_C = 2,3 \cdot 10^{10}$ N als eine an der Erdoberfläche wirksame Gewichtskraft interpretieren, ergäbe sich eine Masse von $M_C = K_C/g = 2,34 \cdot 10^9$ kg ($g = \text{Erdbeschleunigung} = 9,81 \text{ m/s}^2$) bzw. mit $K_C = 2,3 \cdot 10^{22}$ N eine Masse von $M_C = 2,34 \cdot 10^{21}$ kg. Die folgende Tabelle 3.2 zeigt die Größen K_C , M_C und die Massendichte ρ_0 des Elektrons für verschiedene Werte von D_0 .

D_0 , m	K_C , N	M_C , kg	Dichte ρ_0 , kg/m ³
10^{-19}	$2,3 \cdot 10^{10}$	$2,34 \cdot 10^9$	$1,74 \cdot 10^{27}$
10^{-25}	$2,3 \cdot 10^{22}$	$2,34 \cdot 10^{21}$	$1,74 \cdot 10^{45}$
10^{-35}	$2,3 \cdot 10^{42}$	$2,34 \cdot 10^{41}$	$1,74 \cdot 10^{75}$

$D_0 = \text{Durchmesser des Elektrons, } \rho_0 \text{ gemäß Gl. (3.4)}$

Tabelle 3.2 Kräfte und Massen

Das Elektron hätte als Punktteilchen eine unendlich große Dichte, was man ausschließen kann. Keine physikalische Theorie könnte diesen Zustand beschreiben. Stellt man sich das Elektron als Kugel mit dem Durchmesser D_0 vor, ergibt sich die Dichte zu

$$\rho_0 = \frac{6 m_0}{\pi D_0^3} \quad (3.4)$$

Mit $D_0 = 10^{-19}$ m folgt daraus $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{27} \text{ kg/m}^3$, mit $D_0 = 10^{-25}$ m $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{45} \text{ kg/m}^3$ und mit $D_0 = 10^{-35}$ m $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{75} \text{ kg/m}^3$, d.h. sehr hohe Dichtewerte. Die Tabelle 3.3 zeigt einige Vergleichswerte.

Erläuterungen	Dichte, kg/m^3
kritische Dichte des Universums $\rho_K = 3H_0^2/(8\pi G)$, $H_0 =$ Hubble-Konstante mit $74,2 \text{ km}/(\text{Mpc}\cdot\text{s}) = 2,41 \cdot 10^{-18} \text{ 1/s}$, $G =$ Gravitationskonstante	$1,04 \cdot 10^{-26}$
Wasser bei Normalbedingungen	$1,0 \cdot 10^3$
Erdkugel	$5,5 \cdot 10^3$
kugelförmig angenommenes Proton mit einem Durchmesser von $2,4 \cdot 10^{-15}$ m	$2,3 \cdot 10^{17}$
Dichte mit der Planck-Masse $M_P = 5,46 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$ und der Planck-Länge $L_P = 4,05 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ $\rho_P = \frac{6M_P}{\pi L_P^3} = \frac{6c^5}{\pi G^2 h}, \quad M_P = \sqrt{\frac{hc}{G}}, \quad L_P = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}}$	$1,57 \cdot 10^{96}$
beachte $\frac{\rho_P}{\rho_K} = \frac{1,57 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3}{1,04 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3} = 1,51 \cdot 10^{122}$	

Tabelle 3.3 Dichten

Welchem Erddurchmesser D_E würde die Dichte ρ_0 der Gl. (3.4) entsprechen? Es gilt dann die Beziehung

$$\rho_0 = \frac{6M_E}{\pi D_E^3} \quad \text{bzw.} \quad D_E = \sqrt[3]{\frac{6M_E}{\pi\rho_0}} \quad (3.5)$$

Mit der Erdmasse $M_E = 6 \cdot 10^{24}$ kg und $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{27}$ kg/m³ folgt ein Durchmesser von $D_E = 19$ cm und mit $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{45}$ kg/m³ von $D_E = 1,9 \cdot 10^{-7}$ m, d.h. eine Erde, die man sich kaum vorstellen kann.

Mit der Ruhmasse m_0 des Elektrons bzw. Positrons ergibt sich die Ruhenergie $m_0 c^2$ bzw. die Energiedichte η_0 zu

$$\eta_0 = \frac{m_0 c^2}{\pi D_0^3 / 6} = \rho_0 c^2 \quad (3.6)$$

Für $D_0 = 10^{-19}$ m, d.h. $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{27}$ kg/m³, folgt eine Energiedichte von $\eta_0 = 1,57 \cdot 10^{44}$ J/m³ und für $D_0 = 10^{-25}$ m, d.h. $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{45}$ kg/m³, von $\eta_0 = 1,57 \cdot 10^{62}$ J/m³. 1 L Wasser von 50 °C hat bei Normaldruck einen Wärmeinhalt von $1,36 \cdot 10^6$ J bzw. allgemein von $1,36 \cdot 10^9$ J/m³. Die Tabelle 3.4 zeigt nochmals die Massendichte, außerdem die Energie- und Ladungsdichte für verschiedene Durchmesser D_0 .

D_0 , m	Massendichte, kg/m ³	Energiedichte, J/m ³	Ladungsdichte, C/m ³
10^{-19}	$1,74 \cdot 10^{27}$	$1,57 \cdot 10^{44}$	$3,06 \cdot 10^{38}$
10^{-25}	$1,74 \cdot 10^{45}$	$1,57 \cdot 10^{62}$	$3,06 \cdot 10^{56}$
10^{-35}	$1,74 \cdot 10^{75}$	$1,57 \cdot 10^{92}$	$3,06 \cdot 10^{86}$

Ladungsdichte = $e_0 / (\pi \cdot D_0^3 / 6)$

Tabelle 3.4 Mögliche Dichtewerte des Elektrons

Zusammenfassung

Als Punktteilchen wie im Standardmodell der Teilchenphysik hätte das Elektron eine unendlich große Massen-, Energie- und Ladungsdichte, was man ausschließen kann. Denkt man sich das Elektron als Kugel mit einem Durchmesser von $D_0 = 10^{-19}$ m, wobei 10^{-19} m die experimentell nachgewiesene Obergrenze seiner Ausdehnung darstellt, folgt seine Dichte zu $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{27}$ kg/m³. Wäre die Ausdehnung wesentlich kleiner, z.B. $D_0 = 10^{-25}$ m, ergäbe sich eine Dichte von $\rho_0 = 1,74 \cdot 10^{45}$ kg/m³. Bereits eine Dichte von $1,74 \cdot 10^{27}$ kg/m³ übersteigt unsere Vorstellungskraft.

Bei einem Durchmesser des Elektrons von 10^{-19} m folgt die Energiedichte $\rho_0 c^2$ zu $1,57 \cdot 10^{44}$ J/m³ und für $D_0 = 10^{-25}$ m zu $1,57 \cdot 10^{62}$ J/m³. Zum Vergleich: Wasser enthält bei 50 °C und bei Normaldruck eine Wärmemenge von $1,36 \cdot 10^9$ J/m³. Für die Ladungsdichte des Elektrons folgt für $D_0 = 10^{-19}$ m $3,06 \cdot 10^{38}$ C/m³ und für $D_0 = 10^{-25}$ m $3,06 \cdot 10^{56}$ C/m³.

Nimmt man an, dass sich das Elektron und Positron bei der Paarvernichtung berühren, d.h. im Abstand D_0 miteinander in Wechselwirkung treten, folgt eine sehr hohe Coulomb-Kraft, nämlich für $D_0 = 10^{-19}$ m eine Kraft von $K_C = 2,3 \cdot 10^{10}$ N und für $D_0 = 10^{-25}$ m eine Kraft von $K_C = 2,3 \cdot 10^{22}$ N, was näherungsweise der Anziehungskraft der Sonne auf die Erde entspricht. Man muss bezweifeln, dass solche Kräfte bei der Paarvernichtung eine Rolle spielen.

Was das Elektron und sein Antiteilchen das Positron wirklich darstellen, ist nicht geklärt, offensichtlich keine Punktteilchen, obwohl das Standardmodell davon ausgeht. Allein die unendlich große Massen- und Ladungsdichte sprechen dagegen. Falls der Durchmesser des Elektrons $2,4 \cdot 10^{-22}$ m beträgt (siehe das Kapitel 21), wäre zumindest dieses Problem gelöst.

Quellen [CLOSE], [FRITZSCH] und [GERTHSEN]