

Die Physiker Kaufmann und Bucherer führten in den Jahren 1901 bis 1910 Experimente zur spezifischen Ladung von schnellen Elektronen durch. Sie verwendeten dazu ein Massenspektrometer, das wir später in Kap. 3.5 kennenlernen. Als Quelle für die Elektronen verwendeten sie einen β -Strahler.

Berechne aus der spezifischen Ladung jeweils die Masse der Elektronen und stelle die Werte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ($v/c = \text{Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit}$) dar.

Diese Beobachtung lies sich erklären durch die zunächst noch umstrittene Relativitätstheorie, die Einstein 1905 veröffentlicht hatte. Dort hatte er den nebenstehenden Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Masse von Teilchen postuliert (gefordert). Der Umrechnungsfaktor von m_0 zu m heißt **Lorentzfaktor**.

2.3 Relativistische Energie

Relativistische Massenzunahme bei hohen Geschwindigkeiten:

v/c	e/m in 10^{11} C/kg	m in 10^{-31} kg
0	1,76	
0,1	1,75	
0,3	1,68	
0,5	1,52	
0,7	1,26	
0,9	0,77	
0,95	0,55	

Die Masse eines Teilchens nimmt mit seiner Geschwindigkeit zu. Der Effekt wird aber erst bei hohen Geschwindigkeiten ($v > 0,1 c$) erkennbar. Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Masse wird beschrieben durch die Formel:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

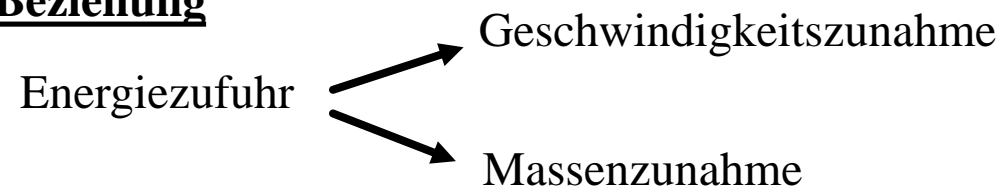
m_0 = Ruhemasse des Teilchens

c = Lichtgeschwindigkeit

Beim Beschleunigen nimmt also nicht nur die Geschwindigkeit, sondern auch die Masse eines Körpers zu. Für diese Massenzunahme wird ein Teil der zugeführten Energie verwendet. Mit unserer bisher beliebten Formel $E_{kin} = 1/2 m \cdot v^2$ können wir bei hohen Geschwindigkeiten deshalb nicht mehr rechnen, neue Rechentechniken werden nötig. Diese Formel ist wohl die berühmteste in der Physik überhaupt. Die Äquivalenz von Masse und Energie zählt zu den Grundaussagen der Relativitätstheorie und liefert die wissenschaftliche Basis für das Prinzip der Kernfusion.

Berechne die Ruheenergie einer Person (70 kg) und vergleiche mit der Energiemenge, die ein Westeuropäer pro Jahr verwendet (ca. 30 MWh).

Energie - Masse - Beziehung



Die Massenzunahme (also auch die Masse selbst) entspricht damit einer Energiemenge. Einstein postulierte dafür eine einfache Proportionalität: Der Proportionalitätsfaktor dafür ist gerade das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit, also $E = c^2 \cdot m$.

Einer Masse m entspricht die Gesamtenergie Sie wird für deren Erzeugung benötigt, bei deren Vernichtung wird sie frei.

Ruheenergie

Jedes Teilchen (jeder Körper) besitzt so allein aufgrund seiner Masse bereits eine Energie, auch wenn er sich nicht bewegt. Diese wird als Ruheenergie E_0 bezeichnet und lässt sich mit dieser Formel berechnen.

Die kinetische Energie eines Teilchens wird nun (anders als in der Mittelstufe) als Differenz seiner Gesamtenergie und seiner Ruheenergie berechnet. In der folgenden Aufgabe kannst Du dieses neue Verfahren gleich mal ausprobieren:

Berechne die kinetische Energie eines Elektrons, das sich mit 90% der Lichtgeschwindigkeit bewegt.

Kinetische Energie

Die Gesamtenergie eines Körpers setzt sich zusammen aus der Ruheenergie und der kinetischen Energie, also $E = E_0 + E_{kin}$, damit:

$$E_{kin} = E - E_0$$

wobei $E = m \cdot c^2$ und

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Training: Rechnen mit relativistischen Energien

Bei Erzeugung von Teilchenstrahlen ist die kinetische Energie in der Regel bekannt, da sie sich aus der Beschleunigungsspannung ergibt. Oft muss man dann aus der kinetischen Energie die Geschwindigkeit berechnen. Diese Aufgabe zeigt das Vorgehen dabei.

Berechne die Geschwindigkeit eines Elektrons mit der kinetischen Energie 1000 keV.

Gehe wie folgt vor:

- 1. Berechne die Gesamtenergie.***
- 2. Berechne die Masse.***
- 3. Die Geschwindigkeit berechnen wir, nachdem wir die Ergebnisse aus 1. und 2. verglichen haben.***

Das war schon etwas knifflig, vor allem im dritten Schritt. In dieser Aufgabe stecken aber alle üblichen Aufgabenstellungen.

Selbst-Check:

- Massenzunahme bei hoher Geschwindigkeit**
- Einsteinformel**
- Ruheenergie, Gesamtenergie, kin. Energie**

Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik eignet sich unter **Teilgebiet Relativitätstheorie - Spezielle Relativitätstheorie - Relativistische Energie Aufgaben** insbesondere die Aufgabe "Kinetische Energie von Elektronen" und „Geschwindigkeit aus Energie“.