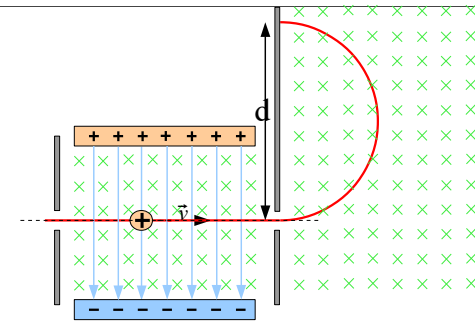


*Diese Beobachtung lässt sich erklären durch die zunächst noch umstrittene Relativitätstheorie, die Einstein 1905 veröffentlicht hatte. Dort hatte er den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Masse postuliert (gefordert/vorhergesagt). Der Zusammenhang gilt für alle Teilchen und Körper, nicht nur für Elektronen.*

**In der 8. Jgst. hast Du gelernt, dass zur doppelten Geschwindigkeit eines Körpers die vierfache kinetische Energie gehört  $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$ . Wie müssen wir diese Erkenntnis im Bereich sehr hoher Geschwindigkeiten korrigieren? (Lösung)**

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	

[illegible]

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

$m_0$  = Ruhemasse des Teilchens

## Konsequenzen der Massenzunahme

<p><i>Im Zyklotron sorgt dieser Effekt für erhebliche Probleme. Ein Problem ergibt sich aus dem vorherigen Abschnitt, ein anderes aus der Betrachtung der Formel für die Zyklotronfrequenz.</i></p> <p><b>Formuliere diese beiden Probleme. (Lösung)</b></p>	<p><b><u>Massenzunahme im Zyklotron</u></b></p> $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2t} = \frac{q \cdot B}{2 \pi \cdot m}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> <li>•</li> </ul>
<p>In ein homogenes Magnetfeld schießt man Elektronen senkrecht zur Richtung des Feldes ein. Sie beschreiben dort Kreisbahnen.</p> <p>a) Zeigen Sie, dass die Umlaufzeit T der Elektronen auf ihren Kreisbahnen nicht von ihrer Geschwindigkeit v abhängt, solange <math>v &lt; 0,1c</math> ist.</p> <p>b) Wie hängt die Umlaufzeit T von der Geschwindigkeit ab, wenn man den relativistischen Massenzuwachs der Elektronen berücksichtigen muss?</p> <p>c) Bei welcher Bahngeschwindigkeit der Elektronen ergibt sich gegenüber dem nichtrelativistischen Fall die 1,25-fache Umlaufdauer?</p> <p><i>Die Aufgabe („Relativistische Elektronen“) mit Lösungen findest Du auf Leifiphysik unter <b>Teilgebiet Relativitätstheorie – Spezielle Relativitätstheorie – Relativistische Masse und Impuls.</b></i></p>	
<p><b>Selbst-Check:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><i>Versuch von Kaufmann und Bucherer</i></b></li> <li>• <b><i>Massenzunahme in der Relativitätstheorie</i></b></li> <li>• <b><i>Synchro-Zyklotron</i></b></li> </ul>	<p>Aufgaben zum Linearbeschleuniger findest Du auf Leifiphysik unter <b>Teilgebiet Elektrizitätslehre – Bewegte Ladungen in Feldern – Geladene Teilchen im elektrischen Längsfeld Aufgaben</b>, solche zum Zyklotron in ... - <b>Geladene Teilchen im magnetischen Quersfeld Aufgaben.</b></p>

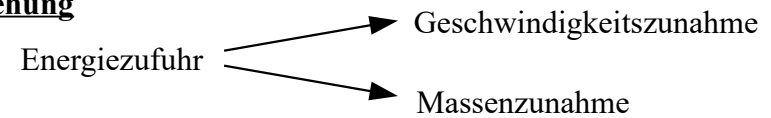
Im letzten Abschnitt haben wir gesehen, dass im Fall hoher Geschwindigkeiten die zugeführte Energie nicht nur zur Beschleunigung, sondern auch für die Massenzunahme verwendet wird. Dies wird von der klassischen Formel  $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$  nicht erfasst. Deshalb reicht es auch nicht aus, die neue Energie einfach mit der vergrößerten Masse zu berechnen. Wir benötigen eine neue Formel, die die Massenzunahme berücksichtigt.

**Berechne die Ruheenergie Deines Körpers. Vergleiche sie mit der Energiemenge, die ein Westeuropäer im Jahr verwendet (ca. 30 MWh). Anschließend berechnen wir gemeinsam die Ruheenergie eines Elektrons. (Lösung)**

Die kinetische Energie eines Teilchens wird nun neu definiert als Differenz seiner Energie (bei der aktuellen Geschwindigkeit) und seiner Ruheenergie.

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

### Energie – Masse – Beziehung



Der Massenzunahme, also auch der Masse selbst, entspricht eine Energiemenge. Einstein postulierte dafür eine einfache Proportionalität:  $E \sim m$ . Der Proportionalitätsfaktor hierfür ist gerade das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit  $\rightarrow E = c^2 \cdot m$

Einer Masse  $m$  entspricht die Gesamtenergie  $E = m \cdot c^2$ .  
Sie wird für deren Erzeugung benötigt. Bei deren Vernichtung wird sie frei.

### Ruheenergie

Jedes Teilchen (jeder Körper) besitzt allein auf Grund seiner Masse bereits eine Energie, auch wenn er sich gar nicht bewegt. Diese Energiemenge ist außerordentlich hoch. Sie wird als Ruheenergie  $E_0$  bezeichnet.

### Kinetische Energie

$$E_{kin} = E - E_0 \quad \text{wobei} \quad E = m \cdot c^2 \quad \text{und} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Bsp.:

<p>Bei Erzeugung von Teilchenstrahlen ist die kinetische Energie in der Regel bekannt, da sie sich aus der Beschleunigungsspannung ergibt. Oft muss man deshalb aus der kinetischen Energie die Geschwindigkeit berechnen.</p> <p><b>Berechne die Geschwindigkeit eines Elektrons mit der kinetischen Energie 800 keV. Gehe wie folgt vor:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. Berechne die Gesamtenergie.</b></li> <li><b>2. Berechne die Masse.</b></li> <li><b>3. Die Geschwindigkeit berechnen wir gemeinsam.</b></li> </ol> <p><b>(Lösung)</b></p> <p>Das war schon etwas knifflig, vor allem im dritten Schritt. In dieser Aufgabe stecken aber mehrere übliche Aufgabenstellungen. Aus gegebener Gesamtenergie kann man z.B. die Masse berechnen (nur Schritt 2.), etc.</p>	<p><b><u>Berechnung der Geschwindigkeit aus der kinetischen Energie</u></b></p>
<p><b>Selbst-Check:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Masse – Energie – Beziehung</b></li> <li>• <b>Ruheenergie und kinetische Energie</b></li> <li>• <b>Berechnung der Geschwindigkeit</b></li> </ul>	<p>Typische Aufgabenstellungen finden sich im Buch S.113/9, 10 und S.114/13,15 (jeweils Lösungen). Weitere Aufgaben auf Leifiphysik unter <b>Teilgebiet Relativitätstheorie – Spezielle Relativitätstheorie – Relativistische Energie Aufgaben.</b></p>