

**Bsp.:** Bei einem Röhrenbildschirm werden Elektronen mit  $U = 11 \text{ kV}$  beschleunigt. Berechne, wie schnell sie beim Auftreffen sind.<sup>1</sup> ( $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ )

$$E_{\text{pot}} = U \cdot Q = 11.000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,76 \cdot 10^{-15} \text{ J}^2$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v^2 = \frac{2}{m} \cdot E_{\text{kin}}^3$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{m} E_{\text{kin}}} = \sqrt{\frac{2}{9,11 \cdot 10^{-31}} \cdot 1,76 \cdot 10^{-15}} = \underline{62,2 \cdot 10^6 \text{ m/s}} \approx 20\% \text{ von } c!^4$$

**Bsp.:** In einem Massenspektrometer<sup>5</sup> sollen Protonen auf 1% von  $c$  gebracht werden. ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ) Wie groß muss  $U$  sein?<sup>6</sup>

$$U \cdot Q = \frac{mv^2}{2} \quad | :Q^7$$

$$U = \frac{mv^2}{2Q} \quad Q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; v = 0,01c = 0,01 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$U = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} (0,03 \cdot 10^8)^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 46969 \text{ V} \approx \underline{47 \text{ kV}}$$

Durchbruchfeldstärke: Ab dieser findet ein elektrischer Durchbruch statt (z.B. Blitzentladung in Luft). Bei Luft ca.  $30 \text{ kV/cm}$ . (Versuch Funkeninduktor<sup>8</sup>)

Beachte: Einheit E-Feld: bisher Newton/Coulomb, nun meist umgerechnet in Volt/Meter (weil  $V = J/C = N \cdot m/C \Rightarrow V/m = N/C$ )<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Ein Röhrenbildschirm ist ein alter Fernseher. Diese Aufgabe ist vergleichbar mit der Zeichnung mit den gelben und grünen Kugeln weiter oben. Die Elektronen sind die gelben Kugeln. Der Bildschirm ist dort, wo die grüne Kugel ist. Schau dir auch die ersten beiden Bilder auf [de.wikipedia.org/wiki/Kathodenstrahlröhre](https://de.wikipedia.org/wiki/Kathodenstrahlröhre) an.

Die Ladung eines Elektrons findet sich auf der ersten Seite dieses Kapitels:  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Das Minus lassen wir hier weg, weil die Richtung eindeutig ist.

<sup>2</sup> Die Elektronen haben also auf der linken Seite diese potentielle Energie. Dann werden sie nach rechts beschleunigt. Ihre potentielle Energie wird zu 100% in kinetische Energie (Bewegungsenergie) umgewandelt, weil alles im Vakuum ohne Reibung stattfand. Deswegen setzen wir in der letzten Zeile  $1,76 \cdot 10^{-15} \text{ J}$  auch für  $E_{\text{kin}}$  ein.

<sup>3</sup> Wir formen die Formel für die kinetische Energie auf die Geschwindigkeit  $v$  um, was ja gesucht ist.

<sup>4</sup>  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , die Lichtgeschwindigkeit. Bei so hohen Geschwindigkeiten müsste man genau genommen schon Effekte aus der Relativitätstheorie mitrechnen.

<sup>5</sup> Ein wichtiges Analysegerät für Chemiker.

<sup>6</sup> Die Rechnung ist ganz ähnlich zum vorigen Bsp., nur umgekehrt.

<sup>7</sup> Wir setzen  $E_{\text{pot}}$  und  $E_{\text{kin}}$  gleich, weil ja kinetische Energie zu 100% in potentielle umgewandelt wird.

<sup>8</sup> Siehe z.B. [youtube.com/watch?v=Z5KPojIrNIY](https://youtube.com/watch?v=Z5KPojIrNIY) oder ohne Funkeninduktor, aber noch größer: 0:49 - 1:36 von [youtube.com/watch?v=k8IXOnsvD80](https://youtube.com/watch?v=k8IXOnsvD80). In beiden Videos wird der Überschlag durch den Spitzeneffekt begünstigt, den wir beim Blitzableiter durchgenommen haben. Der Überschlag findet also schon bei weniger als  $30 \text{ kV/cm}$ . Wenn ein Pullover beim Ausziehen knistert, sind das auch rund  $3 \text{ kV/mm}$  ( $= 30 \text{ kV/cm}$ ).

Wenn es dich genauer interessiert, wie das passiert, kannst du [youtube.com/watch?v=UwrhF7y3pSQ](https://youtube.com/watch?v=UwrhF7y3pSQ) ansehen. Das greift aber vom Wissen schon etwas voraus.

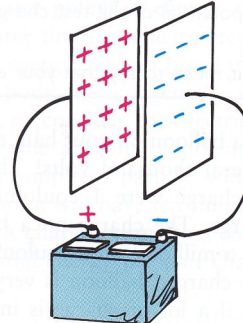
<sup>9</sup> Volt = Joule pro Coulomb, das haben wir eben gelernt. Von der Arbeit wissen wir, dass sie Kraft mal Weg ist, also ist Joule = Newton mal Meter. Wenn wir  $V = J/C = N \cdot m/C$  durch  $m$  dividieren, bekommen wir  $V/m = N/C$ .)

## Der Kondensator

Ein Kondensator kann (i.A. kleine Mengen) el. Energie speichern und schnell abgeben, z.B. beim Fotoblitz oder auch in Hybridautos

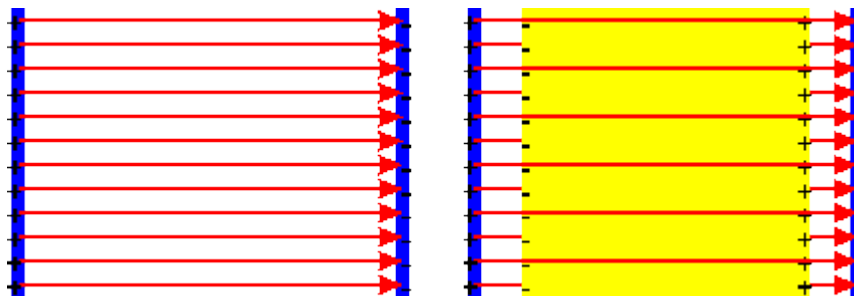
### Plattenkondensator:

Aufladen: Ladungen wandern durch Akku (oder andere Spannungsquelle) auf jeweils andere Seite und trennen sich.



Aufgeladener Kondensator (nun ohne Akku etc.): durch Vergrößern des Plattenabstands wird Arbeit verrichtet. → Spannung (=Energie/C) wird höher.<sup>10</sup>

Durch Einführen eines Isolators („Dielektrikum“) wird durch Influenz das el. Feld kleiner.<sup>11</sup>



→ Die Spannung<sup>12</sup> sinkt. D.h., ich kann in einen solchen Kondensator mehr Ladung Q unterbringen, um gleiches U zu bekommen.<sup>13</sup> Er hat also eine höhere „Kapazität“.

<sup>10</sup> Wenn man zwei Ladungen auseinanderzieht, haben wir gelernt, wird dabei Arbeit verrichtet. Diese erhöht die potentielle Energie. Die Formel für die Spannung lautet:  $U = E_{\text{pot}}/Q$ , das heißt Spannung ist Energie pro Ladung. Da die Ladung im Kondensator gleich bleibt, wird die Spannung höher.

Im Versuch: 1:14:49 - 1:16:07 von [youtube.com/watch?v=f3A5Uk2oDCw](https://youtube.com/watch?v=f3A5Uk2oDCw)

<sup>11</sup> Versuch: 0:00 - 1:09 von [youtube.com/watch?v=CB8otgdGu4w](https://youtube.com/watch?v=CB8otgdGu4w). Das mit der Influenz bitte oben, wo wir er durchgenommen haben, nachlesen. Im gelben Bereich entsteht ein Feld in die Gegenrichtung, dass das ursprüngliche Feld zum Teil aufhebt. Wir verwenden im Versuch ein Elektroskop zum Messen der Spannung und führen ein Buch als Dielektrikum ein wie auf folgender – etwas akademisch gehaltener – Seite gezeigt: [experimente.phys.ethz.ch/de/100/10003/20017/30111/](https://experimente.phys.ethz.ch/de/100/10003/20017/30111/) (Du musst nicht alles verstehen.)

<sup>12</sup> Die Einheit V/m für die Feldstärke zeigt uns: Die Spannung steigt mit der Feldstärke. Wenn die Feldstärke sinkt, sinkt auch die Spannung.

<sup>13</sup> Das ist gut, denn wir wollen in dem Kondensator möglichst viel Ladung rein bekommen, ohne dass die Spannung gleich arg in die Höhe schnell.

Definition Kapazität = die Ladungsmenge, die dem Kondensator die Spannung  $U$  verleiht<sup>14</sup>:  $C = \frac{Q}{U}$  Einheit: Farad (F)<sup>15</sup>

Große Einheit. Meist  $\mu\text{F}$  ( $10^{-6}$ ),  $\text{nF}$  ( $10^{-9}$ ),  $\text{pF}$  ( $10^{-12}$ )

Entladen durch leitende Verbindung. Schnelle Energieverfügbarkeit.<sup>16</sup>

Normale Bauformen: aufgewickelt und miniaturisiert<sup>17</sup>,  
z.B.:



Versuch: Laden und Entladen eines 0,1-F-Kondensators<sup>18</sup>

Bsp.: Ein Kondensator mit  $C = 680 \mu\text{F}$  wird auf 12 V aufgeladen.  
Welche Ladungsmenge fließt dabei?

$$C = Q/U \quad | \cdot U$$

$$Q = C \cdot U = 680 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = \underline{8,16 \cdot 10^{-3} \text{ C}}$$

Anm.: Für die in einem Kondensator gespeicherte Energie gilt:<sup>19</sup>

$$E = \frac{1}{2} Q \cdot U$$

<sup>14</sup> Nochmals: Es ist gut, wenn eine möglichst hohe Ladung  $Q$  bei niedriger Spannung  $U$  im Kondensator ist. Deswegen steht  $Q$  im Zähler und  $U$  im Nenner.

<sup>15</sup> Nach dem englischen Physiker Michael Faraday (1791-1867). Betonung auf der zweiten Silbe: Farad. Die Kondensatoren, die in der Elektronik eingesetzt werden, haben selten 1 F. Meist die angegebenen kleineren Einheiten mit den Vorsilben  $\mu$  = mikro (Millionstel),  $\text{n}$  = nano (Milliardstel),  $\text{p}$  = pico (Billionstel).

<sup>16</sup> z.B. für einen Fotoblitz, der ja nur Sekundenbruchteile brauchen soll. Im Video: [youtube.com/watch?v=BjnxMFlo6cU](https://www.youtube.com/watch?v=BjnxMFlo6cU) (evtl. nur 2:22 bis 2:39: Dort wird der Kondensator eines zerlegten Blitzes absichtlich mit einem Draht kurzgeschlossen.) Wir machen diesen Versuch mit einem 47- $\mu\text{F}$ -Kondensator, den wir auf 400 V aufladen, im Unterricht.

<sup>17</sup> Aus den Platten werden also Folien, die man aufwickeln kann und durch das Dielektrikum voneinander trennt. Deswegen sind viele Kondensatoren zylinderförmig. Siehe 2:05 - 2:23 vom Video [youtube.com/watch?v=HgQWEJ5R8sc](https://www.youtube.com/watch?v=HgQWEJ5R8sc). Im Unterricht sehen wir einen alten zerlegten Kondensator.

<sup>18</sup> Laden: Glühlampe 6V, 0,1A in Serie und Voltmeter parallel zum C. Entladen: statt Spannungsquelle Lampe einbauen. Ein ähnlicher Versuch: 0:00 - 1:39 vom Video [youtube.com/watch?v=sIa8IVDtRU](https://www.youtube.com/watch?v=sIa8IVDtRU)

<sup>19</sup> Weil die Spannung beim Entladen nicht konstant  $U$  ist, sondern von  $U$  auf 0 absinkt, ist die Spannung im Mittel  $U/2$ . Wir schreiben statt  $U = \frac{E_{\text{pot}}}{Q}$  also  $\frac{U}{2} = \frac{E_{\text{pot}}}{Q}$  und formen auf  $E_{\text{pot}}$  um, woraus sich diese Formel ergibt.

Berechnen wir die Energie des genannten 47- $\mu\text{F}$ -Kondensator bei 400 V: Dafür kombinieren wir die beiden Formeln  $C=Q/U \Rightarrow Q = C \cdot U$  und  $E = 0,5 \cdot Q \cdot U$  zu  $E = 0,5 \cdot C \cdot U \cdot U = 0,5 \cdot C \cdot U^2 = 0,5 \cdot 47 \cdot 10^{-6} \cdot 400^2 = 7,52 \text{ J}$ . Damit ist nicht mehr zu spaßen. Für einen elektrischen Weidezaun wäre das schon verboten.