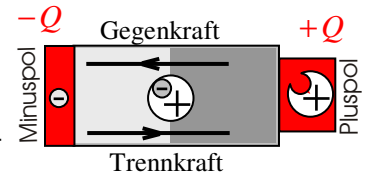


1) Der Stromkreis.

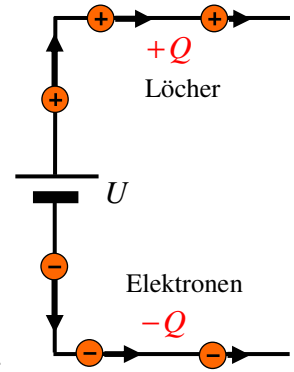
a) Die Spannungsquelle

In einer *Spannungsquelle* wird Arbeit  $W$  verrichtet, um Elektronen von Atomen abzunehmen. Auf der Minusseite hat man dann frei bewegliche *Elektronen* der Ladungsmenge  $-Q$  und auf der Plusseite frei bewegliche Fehlstellen = *Löcher*  $+Q$ . Zwischen diesen baut sich ein *elektrisches Feld* auf, welches *gegen* die Trennkraft arbeitet. Die Ladungstrennung *endet* mit dem Spannungswert  $U$ , sobald sich *Trennkraft* und *Gegenkraft* *ausgleichen*. Die beiden mit  $+Q$  bzw.  $-Q$  geladenen Polkappen der Spannungsquelle bilden einen *Kondensator*  $C$ . Bei z.B.  $C = 0,2\text{pF}$  (PicoFarad) und  $U = 100\text{V}$  wurden die Ladungen  $\pm Q = C \cdot U = \pm 0,2 \cdot 10^{-10}\text{C}$  unter dem Arbeitsaufwand  $W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = 1\text{nJ}$  auf die Polkappen gedrückt.



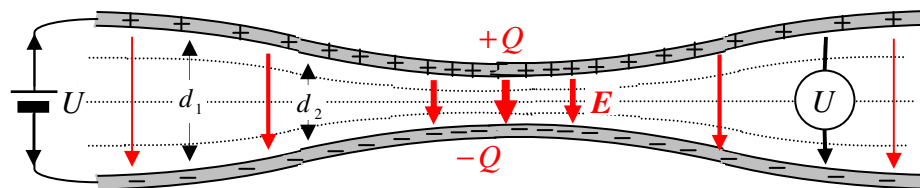
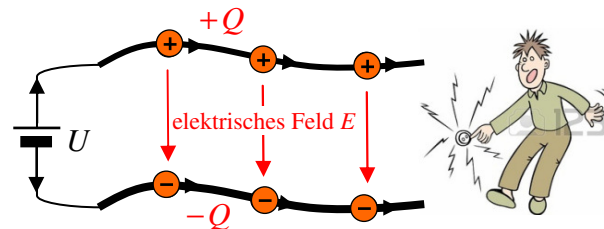
b) Anschließen von zwei Adern an die Spannungsquelle.

Nun werden zwei zunächst unverbundenen Adern an die Pole angeschlossen. Auch wenn die Adern runde Drähte sind, die keine Plattenform haben, so stellen sie doch einen weiteren *Kondensator* dar, der jetzt mit dem Polkappenkondensator *parallel* geschaltet ist. Dadurch vergrößert sich die Gesamtkapazität auf beispielsweise  $C = 1,2\text{pF}$ . Bei  $U = 100\text{V}$  sind dann auf Polkappen und Adern  $\pm Q = C \cdot U = \pm 12 \cdot 10^{-9}\text{C}$  unter dem Gesamtarbeitsaufwand  $W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = 6\text{nJ}$  aufgelassen. Die Adern sind gute Leiter. Haben sie z.B. den Ohmschen Widerstand  $R = 0,5\Omega$ , dann sind sie bereits nach  $t_H = R \cdot C \cdot \ln 2 = 0,35 \cdot 10^{-12}\text{s}$  zur Hälfte geladen. Die winzige Ladungsmenge  $\pm 12\text{nC}$  reicht, um binnen  $0,35\text{picoSek}$  auf der *gesamten* Aderlänge ein *elektrisches Feld* aufzubauen. Dabei liegt jeweils zwischen zwei Punkten der Adern die Spannung  $U$  der Spannungsquelle.



Egal, wo man die beiden Adern berührt, überall bekommt man einen Schlag.

Auch wenn die Adern frei herum liegen und sie unterschiedliche Abstände haben, so herrscht dennoch überall zwischen ihnen die Spannung  $U$  der Spannungsquelle.



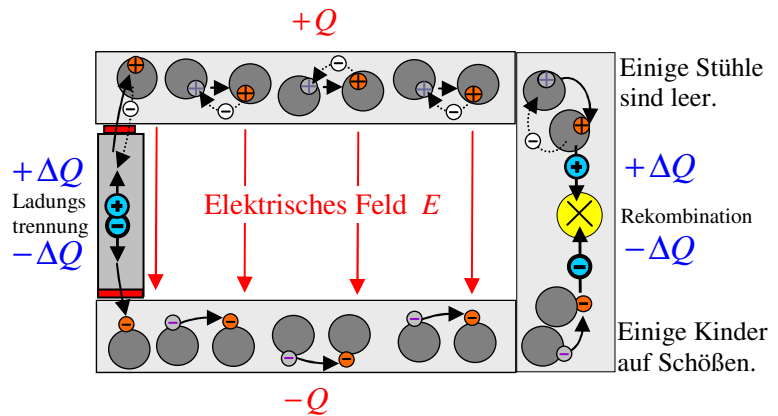
Warum?

An einer Engstelle kommen sich die getrennten Ladungen näher und ziehen sich somit stärker gegenseitig an. An der Engstelle kommt es deshalb zu einer Ladungsanhäufung. Dadurch vergrößert sich dort die elektrische Feldstärke  $E$ . Andererseits stoßen sich die angehäuften Ladungen an der Engstelle auf jeder Ader auch untereinander stärker ab. Also streben zwei Tendenzen zu einem Ausgleich.

Das Ergebnis: Die Feldstärke vergrößert sich gerade um so viel, wie der Aderabstand kleiner geworden ist. Feldstärke  $E$  und Abstand  $d$  sind antiproportional, sie sind also produktgleich. Das Produkt  $E \cdot d$  bleibt also an jeder Stelle gleich, egal, ob die Adern dort weit oder nah voneinander sind. Halbiert sich z.B.  $d$ , dann verdoppelt sich  $E$ . Nach Arbeitsblatt 3) ist das Produkt  $E \cdot d$  aber gleich der Spannung  $U$ , also gilt  $E \cdot d = U$ . Ladungsansammlung und Feldstärkenvergrößerung an der Engstelle sorgen also dafür, dass auch hier die Spannung zwischen den Adern den vollen Spannungswert der Spannungsquelle behält.

c) Der Stromkreis.

Wir wiederholen:  
Die Ladungen  $\pm Q$  auf den Polkappen und auf den Adern sorgen dafür, dass sich erstens die Spannungsquelle auf den festen Spannungswert  $U$  einpendelt und dass zweitens ein elektrisches Feld  $E$  zwischen den Adern existiert.



Wird nun zwischen die Enden der Adern z.B. eine Lampe als *Verbraucher* geschaltet, so

Der Stromkreis lässt sich ganz toll mit zwei von Kindern besetzten Stuhlreihen nachspielen. Zum Aufladen setzen sich einige Kinder auf die Schöbe rüber. Und dann geht's los.

rekombiniert dort ein winziger Teil  $+\Delta Q$  von  $+Q$  mit einem entsprechend winzigen Teil  $-\Delta Q$  von  $-Q$ . Weil die Ladungen  $+Q$  bzw.  $-Q$  dadurch aber betragsmäßig auf  $+Q - (+\Delta Q)$  bzw.  $-Q - (-\Delta Q)$  gemindert werden, überwiegt jetzt die Trennkraft der Spannungsquelle.

Binnen kürzester Zeit wird deshalb das Ladungsdefizit durch Nachladen ausgeglichen, sodass praktisch *sofort* wieder die vormaligen Ladungsmengen  $+Q$  und  $-Q$  auf den Adern sitzen.

Wir sehen, dass die Aufladung der Adern mit  $+Q$  bzw.  $-Q$  *gleich* geblieben ist.

Dennoch haben sich die Ladungsmengen  $+\Delta Q$  und  $-\Delta Q$  durch die Adern bewegt.

Bemerkung:  $C$ ,  $E$  und  $\pm Q$  wird "rot" geschrieben, weil es *statisch* ist und "Kraft" ausübt.  
 $+\Delta Q$  und  $I$  wird "blau" geschrieben, weil es sich *bewegt* bzw. *fließt*.

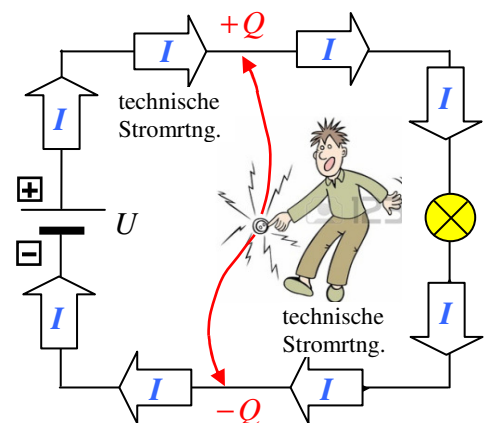
Wie groß ist die Arbeit  $\Delta W$ , die von  $\pm \Delta Q$  bei der Rekombination im Verbraucher abgegeben wird? Da die Spannung am Verbraucher durch die Aufladung der Adern mit  $\pm Q$  den vollen Spannungswert  $U$  der Spannungsquelle hat, gilt nach Arbeitsblatt 2)  $\Delta W = \Delta Q \cdot U$ . Es wird also diejenige Arbeit im Verbraucher zurückgegeben, welche bei der Ladungstrennung in der Spannungsquelle aufgenommen wurde.

d) Technische Stromrichtung und Stromkreis.

Die Bewegung der Ladungsmengen  $\pm \Delta Q$  bewirkt also *keine* Aufladung der Adern. Dieser Anteil lässt die Adern also neutral, denn jedes  $\pm \Delta Q$ , welches im Verbraucher rekombiniert, wird in der Spannungsquelle sofort wieder ersetzt.

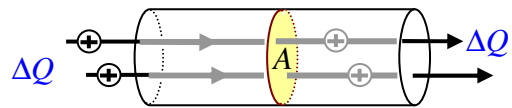
Meist beschreibt man die Bewegung von  $\pm \Delta Q$  durch den „technischen Strom“  $I$  mit (gedanklich) *nur* positiven Ladungsträgern. Die Löcherbewegung zählt dann *in* Richtung des technischen Stromes und die Elektronenbewegung zählt *gegen* die Richtung des technischen Stromes.

Insgesamt ergibt sich so für die Ladungsmenge  $\Delta Q$  des technischen Stromes eine *Kreisbewegung*, deshalb verwendet man den Begriff „Stromkreis“.



Doch aufgepasst: Der Begriff „Stromkreis“ kann irreführend sein: Im  $I$ -Bild hat man keine Aufladung, weil die Ladung dort *nur* im Kreis herum läuft. Weil man dem technischen Strom  $I$  aber nicht mehr ansieht, dass die bewegten Ladungen  $\pm \Delta Q$  nur Teile der Aderladungen  $\pm Q$  sind, besteht die Gefahr, die Aufladung der Adern komplett zu vergessen. Doch ohne die Aderaufladung  $\pm Q$  gäbe es weder das elektrische Feld  $E$  noch die Spannung  $U$  zwischen den Adern. Die Ladungen  $+\Delta Q$  und  $-\Delta Q$  würden im Verbraucher nicht aufeinander zu beschleunigt, sie könnten ihre Trennarbeit nicht zurückgeben. Auch würde man keinen Schlag bekommen, wenn man die Adern bei leuchtender Lampe berührt. - Das aber kann tödlich sein.

Fließt die Ladung  $\Delta Q$  während der Zeit  $\Delta t$  in ein Teilstück des Leiters hinein, so fließt eine gleich große Ladung auf der anderen Seite heraus. Ladung  $\Delta Q$  bzw. Strom  $I$  staut sich nicht und bewirkt auch keine Aufladung.



e) Elektrische Stromstärke  $I$ .

Die Stromstärke  $I$  ist die pro Zeit  $\Delta t$  durch den Leiterquerschnitt geflossene Ladungsmenge  $\Delta Q$ . Es gilt also  $I = \Delta Q / \Delta t$ . Die Maßeinheit der Stromstärke heißt *Ampere* A.

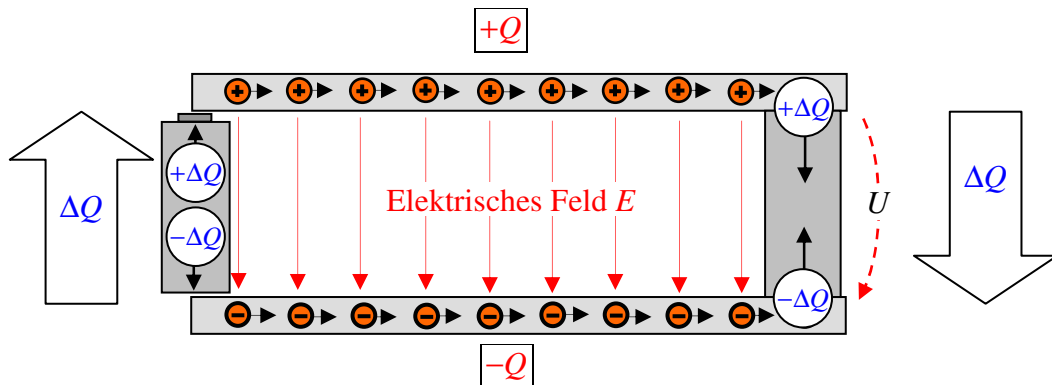
$\Delta Q$  wird in Coulomb gemessen,  $\Delta t$  wird in Sekunde gemessen.

Deshalb gilt  $Ampere = Coulomb / Sekunde$ .

Bemerkungen:

- a) Das Vorzeichen der Stromstärke zählt in Richtung der *positiven* Ladungsträger.
- b) Die Definition der Stromstärke ist *unabhängig* vom Leiterquerschnitt. Bei halber Querschnittsfläche und gleicher Stromstärke muss sich die Ladung daher doppelt so schnell bewegen, damit die gleiche Menge durch den Querschnitt läuft.
- c) 1 *Coulomb* entspricht  $6,24 \cdot 10^{18}$  Elementarladungen  $e$ . Bei der Stromstärke 1 A fließen daher  $6,24 \cdot 10^{18}$  Elektronen bzw. Löcher pro Sekunde durch den Leiterquerschnitt.

f) Elektrische Arbeit, elektrische Leistung.



Wenn die Ladungsmengen  $+\Delta Q$  und  $-\Delta Q$  im Verbraucher rekombinieren, geben sie ihre Trennarbeit  $\Delta W = \Delta Q \cdot U$  dabei zurückgeben. Erfolgt das in der Zeit  $\Delta t$ , so beträgt die Leistung  $P = \Delta W / \Delta t$ . Das lässt sich anders schreiben:

Einsetzen von  $\Delta W = \Delta Q \cdot U$  ergibt  $P = \Delta Q \cdot U / \Delta t$ . Faktoren vertauschen:  $P = U \cdot \Delta Q / \Delta t$ .

Beachten, dass  $\Delta Q / \Delta t = I$  gilt und Einsetzen: Ergebnis  $P = U \cdot I$ .

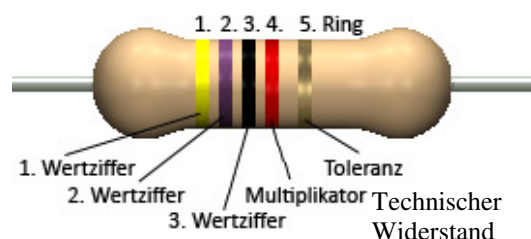
Also:  $Leistung = Spannung \times Stromstärke$ .

Die Maßeinheit für die Leistung ist *Watt* (Buchstabe  $W$ ).

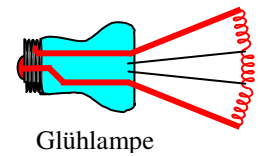
Aus  $P = U \cdot I$  folgt dann die Maßeinheitengleichung *Volt · Ampere = Watt* bzw.  $V \cdot A = W$ .

g) Das Ohmsche Gesetz

Ein Widerstand ist ein Verbraucher, in welchem die potentielle Energie der getrennten Ladungen in *Wärme* umgewandelt wird. Der Widerstand dient aber nicht nur als Elektroheizung, er ist ein wichtiges Bauelement in der Elektronik, denn mit seiner Hilfe lässt sich die Stromstärke steuern.

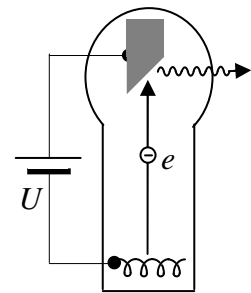


Auch die Glühwendel einer Glühlampe ist ein Ohmscher Widerstand. Hier wird die Energie als Wärme *und* als Licht zurückgegeben. Was geschieht im Widerstand?



Glühlampe

Das erkennt man sehr gut an der Röntgenröhre. Bei ihr werden Elektronen durch eine Hochspannung  $U$  beschleunigt. Mit hoher Geschwindigkeit schlagen sie dann auf ein Blech und werden dort abgebremst. Die Bewegungsenergie der Elektronen verwandelt sich dabei in Wärme und (Röntgen)Licht.



Röntgenröhre

Im technischen Widerstand, wie auch in der Glühwendel ist die Beschleunigungsspannung geringer. Noch wichtiger: Die „Rennstrecke“ wird permanent unterbrochen, so dass die Elektronen bzw. Löcher nur geringe Geschwindigkeiten erreichen. Bei der Abbremsung entsteht dadurch lediglich Wärmestrahlung und eventuell sichtbares Licht. - Permanente Abbremsung ist vergleichbar mit „Reibung“.

Aus der Mechanik wissen wir, dass die Reibungskraft  $F_R$  zur Geschwindigkeit  $v$  proportional ist. Bei doppelter Geschwindigkeit  $v$  ist  $F_R$  also doppelt so groß und man braucht die doppelte äußere Kraft  $F$  um  $F_R$  zu überwinden. Es gilt  $v = \frac{1}{\rho} \cdot F$ .

Dabei ist  $\rho$  der Reibungskoeffizient. Für größeres  $\rho$  wird  $v$  bei gleicher Kraft kleiner.

Im Ohmschen Widerstand entspricht die Geschwindigkeit  $v$  der Stromstärke  $I$ , also der Bewegung der Ladung  $\Delta Q$ . Die Antriebskraft  $F$ , welche die Reibungskraft  $F_R$  überwinden muss, entspricht hier der Kraft des elektrischen Feldes  $E$ . Dieses wird durch die Aufladung der Adern mit  $\pm Q$  erzeugt. Die Feldstärke  $E$  wiederum ist proportional zur Spannung  $U$ .

Das Ohmsche Gesetz ist also ein „Reibungsgesetz“, es lautet  $I = \frac{1}{R} \cdot U$

Die Stromstärke  $I$  ist proportional zur Spannung  $U$ . Doch  $I$  ist antiproportional zum Widerstandwert  $R$ : Je größer der Widerstand, desto kleiner die Stromstärke. (bei gleichem  $U$ )

Umstellen ergibt  $R = \frac{U}{I}$ . Daher gilt für die Maßeinheit  $\Omega = \text{Ohm}$  des Widerstandes  $\Omega = \frac{V}{A}$

### Aufgaben:

- 1) a) Ein Kraftwerk stellt  $U = 1000V$  zur Verfügung. Es ist hunderte von  $km$  vom Verbraucher entfernt. Widerstand und Kapazität der beiden Adern betragen  $R_A = 20\Omega$  und  $C = 40nF$ .  
Wie viel Zeit vergeht, bis der Verbraucher Leistung entnehmen kann?  
Wieviel Ldg.  $\pm Q$  muss das Kraftwerk zur Betriebsaufnahme auf die Adern „drücken“?  
Wie groß ist die Aufladearbeit  $W$ ?
- b) Der Verbraucherwiderstand beträgt  $R = 800\Omega$ . Berechne Stromstärke  $I$  und Leistung  $P$ .
- c) Wieviele Elektronen bzw. Löcher fließen beim Betrieb in einer *Minute* durch die Leitungen?
- 2) Eine Glühlampe mit  $P = 60W$  liegt an der Spannung  $U = 230V$ .  
Berechne die Stärke des durchfließenden Stromes  $I$ . Wie groß ist der Widerstand  $R$  der Lampe?

### Lösungen:

- 1) a) Nach  $t_H = R \cdot C \cdot \ln 2 = 0,555 \mu s$  sind die Adern mit  $Q = 40 \mu C$  durch die Ladearbeit  $W = 0,02J$  aufgeladen. Jetzt ist der Stromkreis betriebsbereit.
- b)  $R_{Ges} = 820\Omega$ ;  $I = U / R_{Ges} = 1,22 A$ ;  $P = U \cdot I = 1,22 kW$ .
- c) Die bewegte Ladung pro Minute ist  $\Delta Q = I \cdot \Delta t = 73,17 C$ .  
Das sind  $4,57 \cdot 10^{20}$  Elementarladungen.
- 2)  $I = P / U = 0,261 A$ .  $R = U / I = 881,7 \Omega$