

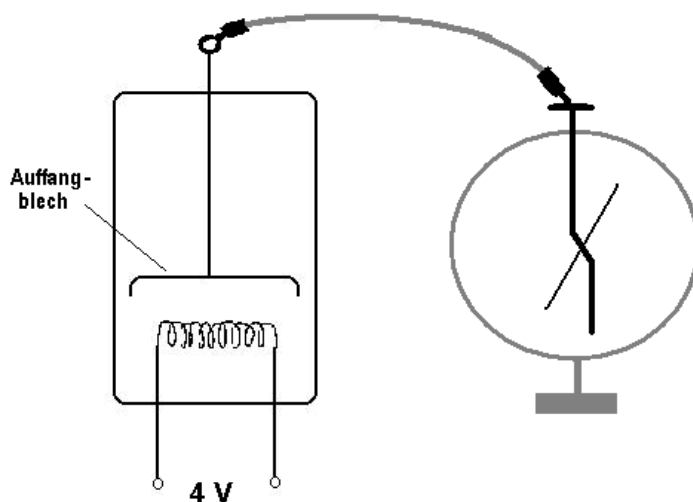
## Ein Weg von der Elektrostatik zur Definition der Stromstärke und der Spannung

---

Gliederung:

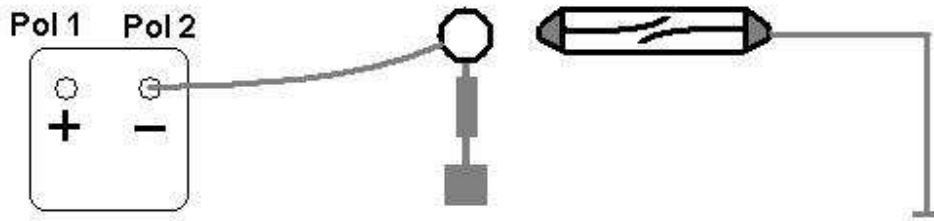
1. Einführungsversuche mit *geladenem* Kunststoff-/Glasstab (Bernstein = *Elektron*)  
Kurze geschichtliche Darstellung; Fazit: Existenz von positiver und negativer Ladung.
2. Vorstellung des Elektroskops, Ladung verbreiten sich in Metallen „selbstständig“.
3. Neutralisierung (Blitze, pendelnder Wattebausch)
4. Glühelktrischer Effekt: In Metallen sind negative Ladungen „vorinstalliert“. Name: Elektron;  
gleichzeitig: Ladungen wandern in Leitern: *Transport von Ladung = el. Strom*
5. Elektronen können als Kathodenstrahl sichtbar gemacht werden.
6. Modellversuch zum Kopierer (Xerografie); Kunststoffplatte, Mehl, Schreibkugel positiv laden
7. Influenzmaschine, Hochspannungsnetzgerät: Pole mit Glimmlampe unterscheiden
8. Ladungen nur auf Außenflächen: Elektroskop im geladenene Käfig und außerhalb des Käfigs
9. Modellbildung: Zwei bewegliche Ladungsarten oder nur eine
10. Ladungstransport mit Glimmlampe sichtbar machen, Hinführung zur Stromdefinition
11. Influenz
12. Galvanische Zelle
13. Elektrolyse und Definition der Stromstärke
14. Galvanisieren
15. Definition der Ladung
16. Alternative Definition der Stromstärke (Knallgas)
17. Definition der Spannung

- 
1. Nichtleiter können durch Reibung elektrisch aufgeladen werden, z.B. Kunststoffe mit einem (Katzen-) Fell negativ, Glas mit Seidentuch positiv.  
Versuche zeigen: Gleichartig geladene Körper stoßen sich ab, verschiedenartig geladene Körper ziehen sich an.
  2. Ladungen werden mit einem Elektroskop nachgewiesen, dessen Funktion auf der Abstoßung gleichartiger Ladungen beruht. Ladungen verteilen sich auf dem Elektroskop gleichmäßig und „von selbst“, Steg und Zeiger bestehen aus Metall. Auf Nichtleitern wie Kunststoff und Glas sind Ladungen unbeweglich.
  3. Neutralisation. Eine negative Ladung kann durch eine (gleich große) positive Ladung neutralisiert werden.  
Blitze oder ein pendelnder Wattebausch zwischen den Polen einer Influenzmaschine bewirken Ladungsausgleich bis zur Neutralisation.
  4. Glühelktrischer Effekt.  
Aufbau des Experiments: In einer Glühlampe ist über der Glühwendel ein Auffangblech angebracht.



Der Ausschlag eines positiv geladenen Elektroskops geht zurück, wenn die Glühlampe brennt, der Ausschlag eines negativ geladenen Elektroskops nicht. Erklärung: Aus dem heißen Glühdraht treten negative Ladungen aus und erreichen das Auffangblech. Von dort verteilen sie sich (von selbst) über das ganze System Auffangblech-Leitung-Elektroskop. Sie neutralisieren eine vorher positive Ladung auf dem Elektroskop. Sie lassen eine vorher negative Ladung auf dem Elektroskop unverändert negativ. Der Versuch beweist bzw. legt nahe, dass die Ladungsträger in Metallen negative Ladungsteilchen sind. Der Name für ein solches Teilchen ist "Elektron" (griechisch für Bernstein).

5. Experiment: Man kann die aus einem Glühdraht austretenden Elektronen in einer s.g. "Kathodenstrahlröhre" sichtbar machen. Man zieht die ausgetretenen Elektronen mit einer sehr großen positiven Ladung vom Glühdraht weg und formt die Elektronen zu einem Strahl. Diesen Strahl lässt man schräg auf einen fluoreszierenden Schirm fallen, der Schirm leuchtet überall dort, wo Elektronen auftreffen.  
Anwendung: Fernsehrohr.
  
6. Modellversuch zur Xerografie (Photokopieren)  
Eine Kunststoffplatte wird mit einer positiv geladenen Metallkugel „beschrieben“. Anschließend bestäubt man die Platte mit Mehl. Wenn man das Mehl anschließend wieder wegpustet, bleibt das Mehl dort haften, wo die Platte „beschrieben“ wurde.  
Erklärung: Die Platte ist an den Stellen, wo sie von der Kugel berührt wurde, positiv geladen worden. Pustet man den Mehlstaub auf die Platte, so werden einige winzig kleine Mehlstaubkörnchen dabei durch die gegenseitige Reibung negativ geladen (andere positiv, andere gar nicht). Die negativ geladenen Mehlstaubkörnchen bleiben dort durch die Anziehung hängen, wo die Platte positiv geladen ist.  
Bei einem Photokopierer wird über ein licht-elektrisches Verfahren das Papier der Kopie genau an den Stellen aufgeladen, wo das Original dunkel ist. Darauf wird geladener Tonerstaub gegeben, der überall dort haften bleibt, wo das Papier geladen ist, der Rest wird abgebürstet. Der hängengebliebene Toner wird erhitzt und dabei fixiert.
  
7. Ein (Hochspannungs-) Netzgerät oder auch eine Influenzmaschine haben jeweils zwei Pole, die sich mit Hilfe einer Glimmlampe nachweisen lassen. Versuchsaufbau:



Wenn die Kugel mit dem Minus-Pol verbunden ist, leuchtet die Glimmlampe an der zugewandten Seite auf, ist der Plus-Pol der Quelle mit der Kugel verbunden, leuchtet die abgewandte Seite der Glimmlampe auf.

Eine Glimmlampe kann also gleichzeitig als Nachweis für Stromfluss überhaupt wie auch als Nachweis für die Art des Pols benutzt werden.

8. Ladungen sitzen **außen** auf elektrisch leitfähigen Körpern, z.B. Metallen.  
Nachweis mit Faraday-Becher/Faraday-Käfig . Erklärung: Die Ladungsteilchen (positive wie negative, was immer man sich auch darunter vorstellt) stoßen sich gegenseitig ab und versuchen deshalb, den größten Abstand voneinander einzunehmen.

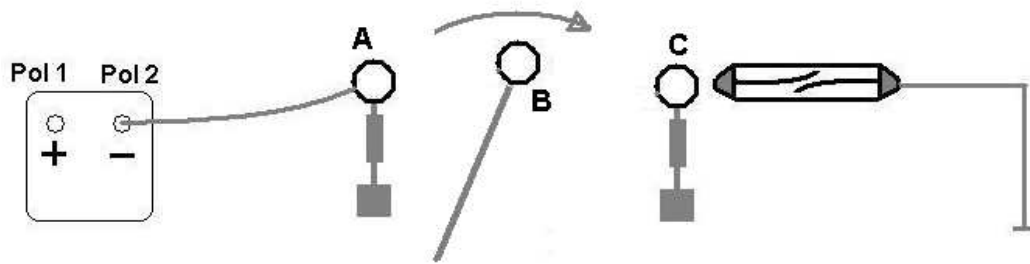
9. Modellbildung:  
Es ist kein Experiment bekannt, welches positive bewegliche Ladungen in Metallen nahelegen würde. Vermutung (bis auf Widerruf durch anderslautende Experimente): Nur die negativen Ladungsträger (Elektronen) sind beweglich, speziell in Metallen, positive Ladungen sind Ortsfest. Ab ca. 1900 bekannt: Protonen sind die Träger der positiven Ladung.  
Begriffe: Elektronenüberschuss, Elektronenmangel als positive Ladung.

(Es gibt ein Experiment, welches zeigt, dass die positiven Ladungen an die Atome gebunden sind: Wenn man nämlich die Glühkathode so stark heizt, dass Metallteilchen aus dem Draht geschleudert werden, was man daran erkennt, dass die Röhre von innen metallisch beschlägt, dann kann man die positive Ladung dieses Niederschlags feststellen. Die Röhre überlebt dieses Experiment u.U. nicht.)

Kontaktelektrizität. Sie lässt sich mit dem Modell so erklären, dass bei intensivem Kontakt zweier verschiedener Materialien (z.B. durch Reibung) das eine Material Elektronen aus der Oberfläche des anderen Materials stärker anzieht als umgekehrt. Elektronen springen dann überwiegend auf den Stoff über, der die größere sog. "Elektronenaffinität" besitzt. Die Materialien werden entgegengesetzt aufgeladen. In der Technik kann es dabei zu gefährlichen Aufladungen kommen, die durch Erdung verhindert werden müssen.

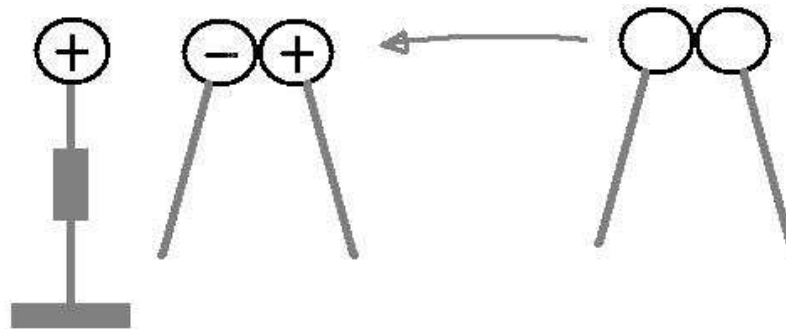
Beispiele für Kontaktelektrizität:  
Kunststoff/Fell - Glas/Seide - Benzin/Zapfhahn -  
Getreide/Trichter - Papier/Druckwalze

10. Ladungstransport mit Glimmlampe sichtbar machen.  
Der Versuch kann gleichzeitig benutzt werden, um das Ladungsmodell zur Anwendung zu bringen.



Mit Kugel B berührt man zunächst Kugel A, danach "transportiert" man sie zu Kugel C. Im Augenblick der Berührung leuchtet die Glimmlampe auf. Es ist also "Strom geflossen". "Strom fließen" ist ein gebräuchlicher, aber nicht sehr präziser Ausdruck. Unser Experiment zeigt, was er eigentlich im physikalischen Sinne bedeutet, dass nämlich eine **Ladung** transportiert wird. Man setzt gleich: **Elektrischer Strom = Transport von Ladung** In diesem Sinne fließt hier in diesem Experiment ein Strom, wenn die Kugel B von A nach C transportiert wird.

### 11. Influenz



- In einem el. Leiter: Zwei sich berührende neutrale Kugeln werden in die Nähe einer z.B. positiv geladenen dritten Kugel gebracht und dort, ohne diese Kugel zu berühren, voneinander getrennt. Anschließend sind beide vormals neutralen Kugeln geladen, und zwar entgegengesetzt. Erklärung: Die Ladung bewirkt auf den neutralen Kugeln eine Ladungstrennung aufgrund der Abstoßungskräfte bzw. Anziehungskräfte auf die jeweiligen beweglichen Ladungen.

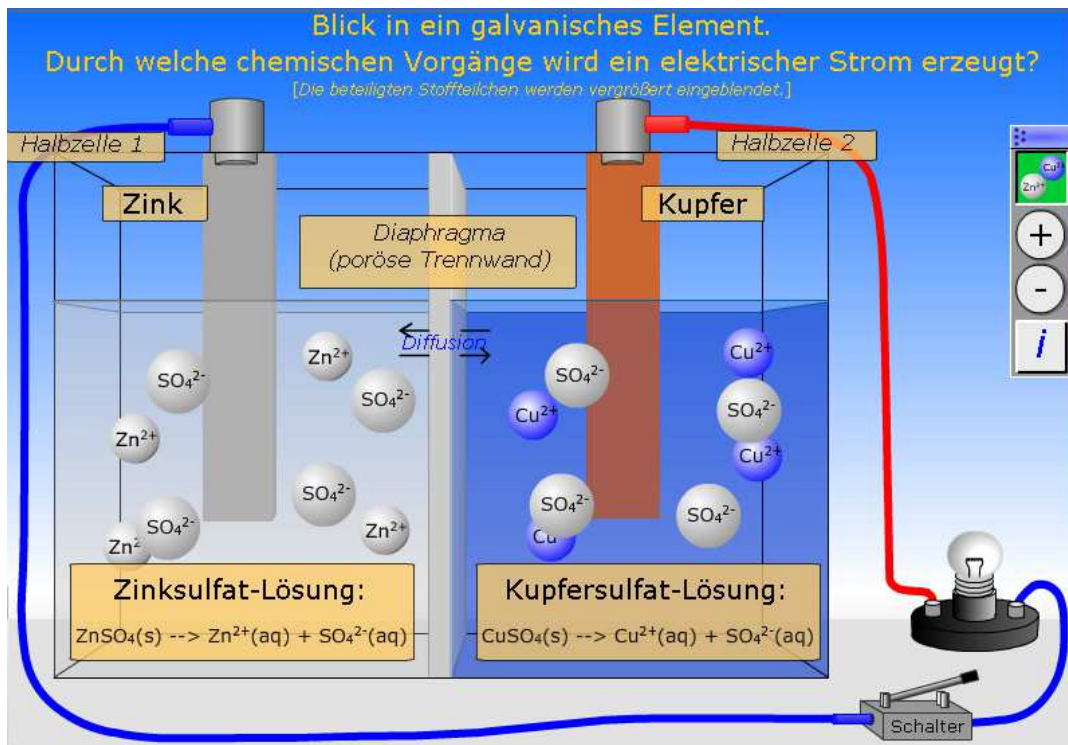
- In einem Nichtleiter: Ein Wasserstrahl wird von einem geladenen Kunststoffstab angezogen (ohne dass sie sich berühren!).

Erklärung: Der Kunststoffstab ist negativ geladen. In jedem Wassermolekül werden die Bahnen der Elektronen um die Atome aufgrund der Abstoßungskräfte etwas verformt, und zwar in Richtung von der äußeren Ladung weg. Der Schwerpunkt der negativen Ladung ist jetzt weiter von der äußeren Ladung entfernt als das (unveränderte) Zentrum der positiven Ladung. Jedes Wassermolekül wird stärker angezogen als abgestoßen. Deshalb wird auch der gesamte Wasserstrahl angezogen. Begründe: Mit einem positiv geladenen Stab würde man den Wasserstrahl ebenfalls anziehen. Man sagt, das Wassermoleküle ist zu einem Molekül-Dipol geworden.

-Unter elektrischer Influenz versteht man die Abstoßung bzw. Anziehung geladener Teilchen und damit eine Ladungsverschiebung in einem Körper aufgrund einer äußeren Ladung.

## 12. Galvanische Zelle (Batterie)

Wir betrachten eine Zink-Kupfer-Zelle: An der Zink-Elektrode gehen (sehr viele) Zinkatome als  $Zn^{2+}$  – Ionen in Lösung, dabei bleiben pro Ion zwei Elektronen in der Zink-Elektrode zurück, so dass sich dort ein (sehr großer) Überschuss an Elektronen bildet. In der rechten Halbzelle befinden sich Kupfer-Atome als  $Cu^{2+}$  – Ionen in der Kupfersulfatlösung. Die rechte Elektrode enthält (praktisch) keine überschüssige Elektronen. Verbindet man die beiden Elektroden über einen Verbraucher, findet ein Ausgleich des Elektronenüberschusses statt, indem Elektronen von der Zink-Elektrode zur rechten Elektrode fließen, es entsteht ein *elektrischer Strom*.



Quelle: <http://www.chemie-interaktiv.net/ff.htm#>

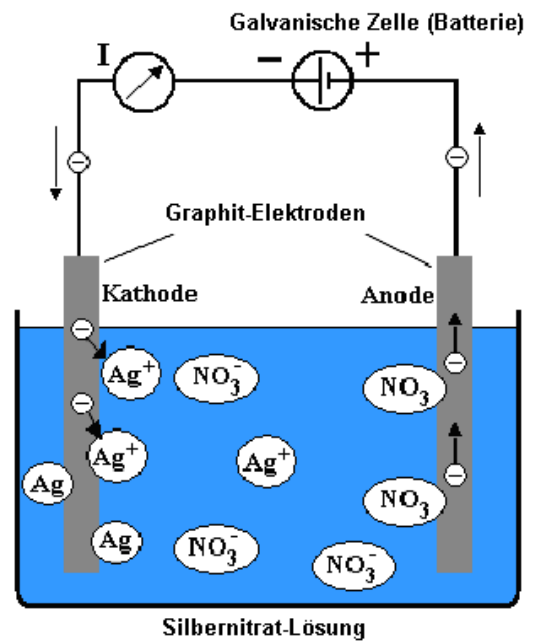
An der rechten Elektrode verbinden sich je zwei Elektronen mit einem  $Cu^{2+}$  – Ion aus der Lösung zu einem neutralen Kupfer-Atom, welches an der Elektrode haften bleibt, die deshalb im Laufe der Zeit schwerer und dicker wird. Weil die Lösung der rechten Halbzelle ständig  $Cu^{2+}$  – Ionen an die Elektrode abgibt, wird die Lösung selbst mit der Zeit negativ geladen, wodurch immer mehr verhindert wird, dass weitere  $Cu^{2+}$  – Ionen an die Elektrode gelangen können, denn die negativ geladene Lösung zieht die positiv geladenen  $Cu^{2+}$  – Ionen „zurück“. Die Funktion der galvanischen Zelle käme dabei zum Erliegen. In der Zink-Halbzelle wird die Lösung mit der Zeit immer stärker positiv geladen, weil immer mehr positiv geladene  $Zn^{2+}$  – Ionen in ihr enthalten sind. Wegen der Abstoßung gleicher Ladungsarten wird nun immer mehr verhindert, dass noch weitere  $Zn^{2+}$  – Ionen in Lösung gehen. Auch dieser Prozess würde die Funktion der galvanischen Zelle zum Erliegen bringen. Beide Aufladungen der Halbzellen müssen also verhindert werden. Dies erreicht man mit einer porösen Trennwand (Diaphragma), z.B. aus Ton. Nun diffundieren nämlich positive  $Zn^{2+}$  – Ionen aufgrund der elektrischen Anziehungskräfte aus der Zink-Halbzelle in die negativ geladene Kupfer-Halbzelle, und umgekehrt negative  $SO_4^{2-}$  – Ionen aus der Kupfer-Halbzelle in die positiv geladene Zink-Halbzelle und neutralisieren die Aufladungen. Die Batterie ist „leer“, wenn sich die Zink-Elektrode aufgelöst hat.

### 13. Elektrolyse

Eine galvanische Zelle funktioniert „von allein“. Für die Elektrolyse benötigt man jedoch eine Stromquelle, z.B. eine galvanische Zelle (Batterie). Die mit dem Minus-Pol der Batterie verbundene Elektrode des Elektrolyten heißt *Kathode*, die mit dem Plus-Pol verbundenen Elektrode heißt *Anode*. An der Kathode verbinden sich  $\text{Ag}^+$  – Ionen mit den aus dem Minus-Pol der Batterie kommenden Elektronen zu neutralen Silber-Atomen und bilden mit der Zeit einen Überzug an der Kathode.

$\text{NO}_3^-$  – Ionen wandern zur Anode und geben dort das überzählige Elektron ab, welches zum Plus-Pol der Batterie wandert.

Es gilt: Für jedes Elektron, welches an der Kathode von einem  $\text{Ag}^+$  – Ion aufgenommen wird, wird an der Anode ein Elektron abgegeben.



Und: Für jedes Elektron, welches den Minus-Pol der Batterie verlässt, wird die Kathode um ein Atom Silber schwerer. Die Anzahl der Elektronen ist gleich der Anzahl der abgelagerten Silber-Atome und folglich proportional zur Masse des abgelagerten Silbers. Weil sich die *Stromstärke* aus der Anzahl der Elektronen pro Zeit ergibt, kann die Elektrolyse folgendermaßen zur Festlegung der Stromstärke benutzt werden (1898):

Ein Strom hat die Stärke 1 Ampère (1 A), wenn in einer Silbernitrat-Lösung pro 1 Sekunde die Menge von 1,118 mg Silber abgeschieden wird.

Weil man Massen sehr genau bestimmen konnte, konnten mit dieser Definition auch Strom-Messgeräte sehr genau geeicht werden.

(Die Erklärung, warum gerade die Menge 1,118 mg gewählt wurde, bleibt dem Oberstufenunterricht vorbehalten.)

14. Galvanisieren ist Elektrolyse im technischen Maßstab. Bei der Elektrolyse unter Punkt 13 lagert sich nämlich das Silber als dünner und sehr reiner Belag auf der Kathode ab. Wenn man als Kathode einen Metallrohling benutzt, z.B. einen Löffel aus Stahl, und als Anode ein Silberblech, kann man auf diese Weise eine Versilberung des Löffels erreichen. Mit anderen Lösungen und Materialien erhält man weitere Veredelungen.

### 15. Ladungsdefinition und Ladungsmessung.

Wir haben in Punkt 13 formuliert *Stromstärke = Anzahl der Elektronen pro Zeit* .

Eine Anzahl von Elektronen bedeutet eine *Ladungsmenge*. Deshalb definieren wir

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Ladungsmenge}}{\text{Zeit}} ; \text{ mit Symbolen: } I = \frac{Q}{t} ; ,$$

und umgekehrt: *Ladung = Stromstärke · Zeit* bzw.  $Q = I \cdot t$  .

Die Einheit der Ladung ist das „Coulomb“ (zu Ehren eines Physikers):  $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ As}$

Bemerkung: Ausgehend von unserem Elektronen-Ladungsmodell wäre es natürlich naheliegend, die Ladung eines Elektrons, die s.g. Elementarladung als Einheit zu verwenden. Die Elementarladung war allerdings vor 1900 noch gar nicht bekannt. Sie wurde erst 1910 von Millikan entdeckt bzw. gemessen.

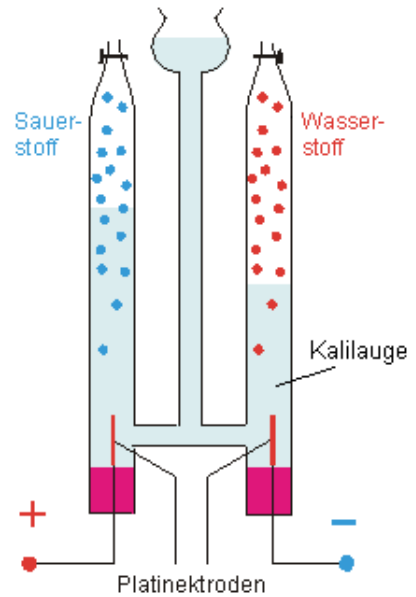
Die Elementarladung ist so winzig klein, dass sie als Einheit für viele Anwendungen außerdem nicht praktikabel wäre. In der Oberstufe wird sie gemessen:  $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Das ist ca. Zehnmilliarden mal Einmilliarden mal weniger als 1 Coulomb !!

#### 16. Alternative Definition der Stromstärke

Im "Wasszersetzungsapparat" wird dem Wasser Kalilauge zugesetzt. Wenn ein Strom durch die Lösung fließt, werden Wassermoleküle aufgebrochen. An der Anode bilden sich Sauerstoffbläschen, an der Kathode Wasserstoffbläschen. Die Mischung beider Gase ergibt das hochexplosive Knallgas.

Diesen Vorgang benutzt man nun zur Definition der Ladungsmenge bzw. der Stromstärke, weil auch hier die Anzahl der in den Zuleitungen geflossenen Ladungen (also auch die Anzahl der geflossenen Elektronen) proportional zu der entstandenen Gesamtmenge bzw. Gesamtvolumen Knallgas ist. Definition:

Ein Strom hat die Stärke 1 Ampère (1 A),  
wenn er pro 1 Sekunde  
das Volumen  $0,19 \text{ cm}^3$  Knallgas erzeugt.



17. Die Spannung

Betrieht man ein Glühbirnchen mit verschiedenen Spannungen, so leuchtet es bei einer höheren Spannung heller und wird heißer, es wird also mehr Energie geliefert. Wie lautet der Zusammenhang zwischen Spannung und Energie?

In einer Versuchsreihe wandeln wir bei verschiedenen Spannungen elektrische Energie in Hubenergie (Lageenergie) um. Gleichzeitig messen wir die Stromstärke und mit einer Stoppuhr die benötigte Zeit.

Benutzt wird eine regelbare Spannungsquelle (U) für Gleichstrom.

V.Nr.	U (V)	I (mA)	t (s)	E (J)	$U_b$ berechnet	$\frac{U_b}{U}$ (%)
1	4.0	10	58	1	1.7	43
2	6.0	10.5	37	1	2.6	43
3	8.0	11	27	1	3.4	43
4	10.0	11.5	19	1	4.6	46

Erklärungen zur Tabelle:

Spalte 2: Eingestellter Spannungswert

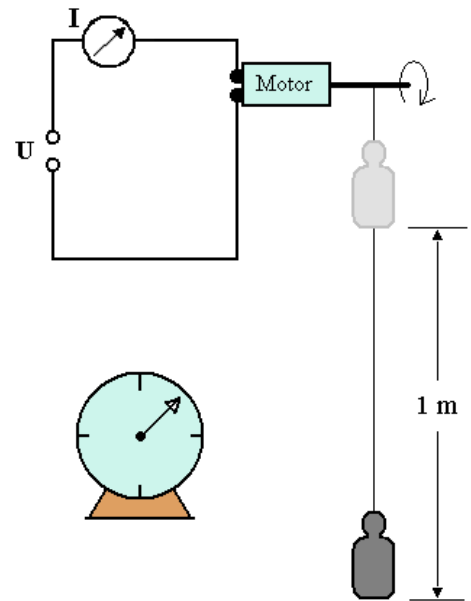
Spalte 3: Stromwert, während das Gewicht hochgezogen wird

Spalte 4: die Zeit, um eine Masse von 100 g um 1m anzuheben

Spalte 5: die Energie, um eine Masse von 100 g um 1m anzuheben

Spalte 6: die berechnete Spannung (s.u.)

Spalte 7: der prozentuale Anteil der berechneten Spannung an der eingestellten Spannung



Mit der Spannung drückt man aus, wieviel Energie pro Ladungsportion von der Stromquelle bereitgestellt wird. Theoretisch wäre also  $Spannung = \frac{Energie\ für\ ein\ Elektron}{Ladung\ des\ Elektrons}$ . Weil man aber

am einzelnen Elektron nicht messen kann, benutzt man die Auswirkung z.B. in einem Motor. Jedes Elektron wandelt seine Energie im Motor in ein „Stück“ Hubenergie um. Milliarden von Elektronen bewirken schließlich die Hubenergie  $E_{Hub} = 1 N \cdot 1 m = 1 Nm = 1 J$ . Man definiert

$$\text{weiter: } Spannung = \frac{\text{vom Motor umgewandelte Energie}}{\text{gesamte geflossene Ladung}} = \frac{\text{Hubenergie (+ Wärmeenergie)}}{\text{Stromstärke} \cdot \text{Zeit}}$$

Bei einem idealen Motor würde keine Wärmeenergie entstehen. Bei einem realen Motor gibt es immer elektrische und mechanische Reibungswärme, die nicht direkt gemessen werden kann und in die Umwelt „verlorengeht“.

Wir können jetzt die Spannung aus den Tabellenwerten berechnen, z.B. für die 1. Zeile:

$$U_{\text{berechn.}} = \frac{1 J}{0.01 A \cdot 58 s} = 1.7 \frac{J}{A \cdot s} = 1.7 V \quad . \text{ Es ist also } 1 V = 1 \frac{J}{A \cdot s} .$$

Bei einem idealen Motor würden die Spannungswerte aus der 2. und 6. Spalte übereinstimmen. Bei dem vorliegenden Motor werden ca. 57% der Spannung für Reibungsenergie aufgewendet und ca. 43% für die Hubarbeit.