Roter Faden Physik

https://roter-faden-physik.de/

Elektrostatische Felder

10. Auflage

Elektrische Ladung, Elektrisches Feld, Kondensator

Mit Aufgaben und Lösungen

von

Dr. Ortwin Fromm

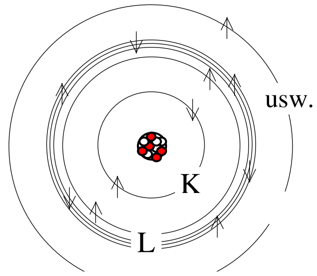
Evangelische Schule Frohnau, Berlin

© Copyright, Ortwin Fromm. fromm@ev-frohnau.de
http://www.ev-frohnau.de/faecherprojekte/physik/roter-faden-physik/

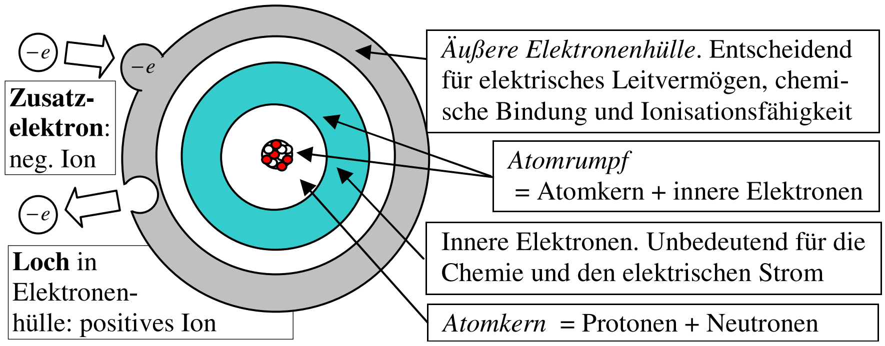
A) Atom, Ion: Elektrische Ladung, bewegliche Ladungsträger.

Körper sind aus Atomen aufgebaut. Ein Atom besteht aus einem elektrisch *positiv* geladenen Kern und einer elektrisch *negativ* geladenen Elektronenhülle. Der Atomkern erhält seine positive Ladung von den *Protonen*. Protonen und Elektronen besitzen *exakt* den gleichen Ladungswert, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen. Dieser Ladungswert heißt e = *Elementarladung*. Ungleichnamige Ladungen ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab. Ein „nackter“ Atomkern zieht daher so viele freie Elektronen an, bis die Ladung ausgeglichen ist und ein nach außen *neutrales* Atom entsteht. Die Anziehung von Kern und Hülle sorgt für den *Zusammenhalt* des Atoms, die gegenseitige Abstoßung der Elektronen innerhalb der Hülle sorgt für das *Volumen* des Atoms.

Doch diese Abstoßung allein würde *nur* dazu ausreichen, dass sich die Elektronen in einer winzigen, strukturlosen Kugelschale um den Kern legen. Das vergleichweise *riesige* Volumen der Atome beruht auf der *Schalenstruktur* der Elektronenhülle und den Besetzungsregeln. Beides sind Folgen der Quantenmechanik. Die Schalen beinhalten jeweils eine gewisse Anzahl von Orbitalen (Bahnen) leicht unterschiedlicher Energie und jedes Orbital darf maximal doppelt mit Elektronen von unterschiedlichem Spin besetzt werden.

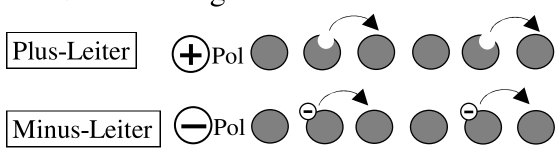


Die Elektronen der inneren Schalen sind für die Chemie und die Elektrizität von untergeordneter Bedeutung. Deshalb die Aufteilung in „Atomrumpf“, bestehend aus Kern und inneren Elektronen und „äußere Elektronen“, relevant für Chemie und Elektrizität.



Atome können ionisiert werden: Ein *negatives Ion* entsteht durch Anlagerung eines zusätzlichen Elektrons. Dieses ist meist locker gebunden und springt daher leicht zum Nachbaratom.
Ein *positives Ion* entsteht durch Entfernung eines Elektrons aus der Hülle. Dadurch entsteht ein *Loch*, welches ebenso mobil ist, wie das Zusatzelektron des negativen Ions. Bei der Lochwanderung rückt ein Elektron aus der Nachbarschaft nach, wodurch das Loch dann dort hin gelangt.
Daraus ergibt sich, welche beweglichen Ladungsträger die Stromleitung im Metalldraht bewirken:

In dem Draht am Pluspol transportieren bewegliche Löcher den elektrischen Strom.
In dem Draht am Minuspol transportieren bewegliche Elektronen den elektrischen Strom.



Zusammenfassung Kapitel A)
1) *Atom*: Das Atom ist elektrisch neutral, weshalb die enorme elektr. Kraft meist nicht zu Tage tritt.
2) *Ionisation*: Bei einfacher Minus- bzw. Plus- Ionisation hat die Elektronenhülle ein zusätzliches Elektron bzw. ein Loch. Beide ermöglichen elektrische Leitung.
3) *Ladungsträger der Stromleitung*: Auf den Minusleiter(draht) drückt der Minuspol der Batterie frei bewegliche Elektronen. Also erfolgt der Stromfluss auf dem Minusleiter durch Minusteilchen.
4) Vom Plusleiter zieht der Pluspol Elektronen ab, so dass frei bewegliche Löcher zurückbleiben. Also erfolgt der Stromfluss auf dem Plusleiter durch Plusteilchen.
Die Vorwärtsbewegung der Löcher kommt durch Elektronen*rück*sprunge zustande.

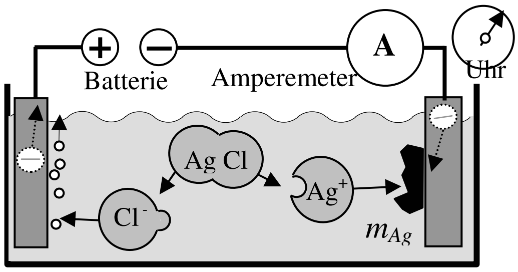
B) Die elektrische Ladung Q, elektrische Leitung.

1) Jede elektrische Ladung setzt sich aus einer Anzahl von Elementarladungen e zusammen.
Elektronen bzw. Protonen tragen *eine negative* bzw. *eine positive* Elementarladung e.
Freie Bruchteile der Elementarladung gibt es nicht. Auf Grund dessen tragen nicht nur Ionen, sondern sämtliche Körper ausschließlich *ganzzahlige* Vielfache der Elementarladung.
Dies wurde 1910 von *Millikan* an Öltröpfchen experimentell nachgewiesen.

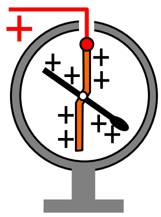
2) Größe und Maßeinheit der elektrischen Ladung.
Die elektrische Ladung wird mit Q oder q bezeichnet. Ihre Maßeinheit ist das *Coulomb*.
Heutzutage lässt sich das Coulomb über die darin enthaltenen Elementarladungen e definieren:
Es gilt $\boxed{1C = 6{,}241 \cdot 10^{18} e}$ bzw. $\boxed{1e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} C}$.

Größenvorstellung: $64g$ Kupfer bestehen aus $\approx 6 \cdot 10^{23}$ (Avogadrozahl) Cu-Atomen. Nimmt man ca. jedem hunderttausendsten Atom ein Elektron ab, so ist das Kupferstück mit $1C$ pos. geladen.

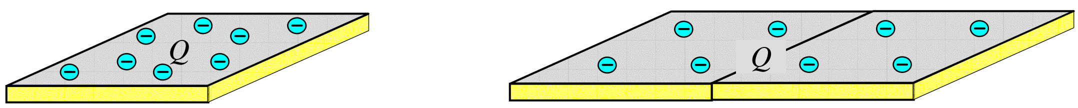
3) Elektrolytische Ladungsmessung nach Faraday.
Durch Stromfluss wird eine Silberchlorid-Lösung zersetzt. Die Menge des abgeschiedenen elementaren Silbers ist ein Maß für die geflossene Ladungsmenge. $1{,}118\,mg$ Silber entspechen einem Coulomb.



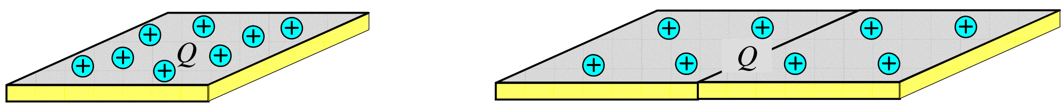
4) Qualitativer Ladungsnachweis durch das Elektroskop.
In einem Metallgehäuse befindet sich eine *feste* senkrechte Metallstange und ein *fast* mittig gelagerter, *beweglicher* Metallzeiger, der im ungeladenen Zustand mit der schweren Seite nach unten fällt. Wird die Stange positiv *oder* negativ aufgeladen, so verteilt sich die Ladung auf Stange *und* Zeiger. Die Abstoßung der gleichnamigen Ladung hebt den Zeiger. Der Ausschlag ist dann ein Maß für die aufgebrachte Ladung.



5) Geladene Metallplatten. Flächenladungsdichte σ.
Bringt man eine positive oder negative Ladungsmenge Q auf eine *Metall*platte auf, so verteilen sich die einzelnen Ladungsträger wegen ihrer Beweglichkeit und gegenseitigen Abstoßung *gleichmäßig* auf der *Oberfläche*, das Innere bleibt somit *neutral*. Deshalb betrachtet man die (Ober) *Flächen-Ladungsdichte* σ (sigma) als *Ladung* pro *Fläche* $\sigma = Q / A$.
Verdoppelung der Flächengröße halbiert die Ladungsdichte.
Bei negativer Aufladung werden zusätzliche Elektronen aufgebracht. Wegen ihrer Beweglichkeit im Metall suchen sie maximalen Abstand. Bei positiver Aufladung werden Elektronen abgenommen. Dadurch werden etliche Metallatome positiv ionisiert. Die fehlenden Elektronen stellen *Löcher* in den Elektronenhüllen dar. Löcher kann man als „positive Elektronen" ansehen, da sie die gleiche Beweglichkeit und gleiche gegenseitige Abstoßung wie Elektronen haben. Auf Grund dessen verteilt sich die aufgebrachte positive Ladung genauso gleichmäßig wie die negative.

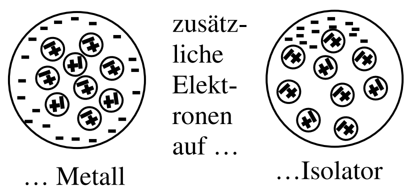


Bei negativer Aufladung werden zusätzliche Elektronen aufgebracht. Wegen ihrer Beweglichkeit und gegenseitigen Abstoßung verteilt sich die Zusatzladung gleichmäßig,

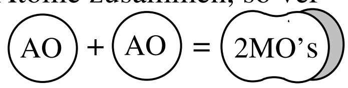


Bei positiver Aufladung werden Elektronen abgenommen. Es entstehen Löcher, die sich wie „positive Elektronen" benehmen. Das führt ebenfalls zu gleichmäßiger Ladungsverterteilung.

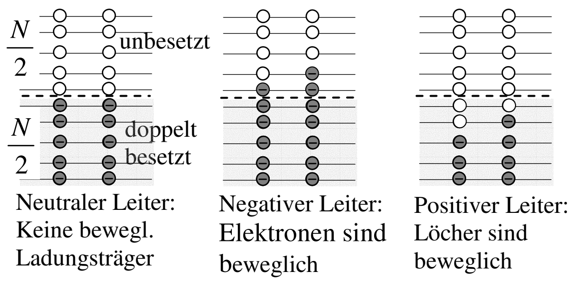
6) Zusatzladung auf Isolatoren.
Im Metall verteilen sich die frei beweglichen Ladungsträger auf der *Oberfläche*. Beim Isolator verbleiben die zusätzlichen Elektronen bzw. Löcher an ihrer Einbringungsstelle. Im Inneren herrscht jeweils Neutralität.



7) <u>Elektrische Leitung im Metalldraht, Stromkreis, energetische Betrachtung.</u>
Die Elektronenhülle der Atome besteht aus Schalen. Die K-Schale beinhaltet nur *ein* Orbital. Alle anderen Schalen sind aus *mehreren* Orbitalen aufgebaut. Die Orbitale können maximal *doppelt* besetzt werden. Nun betrachten wir *zwei* chemisch *einwertige* Metallatome, deren äußerste Orbitale also nur *einfach* besetzt sind. Bringt man diese Atome zusammen, so verschmelzen die beiden Atomorbitale (AO's) zu *zwei* neuartigen *Molekülorbitalen* (MO's), die sich über *beide* Atome erstrecken.



Die beiden Molekülorbitale haben unterschiedliche Energien und auch sie können jeweils maximal *doppelt* besetzt werden. Wird das energieärmere doppelt besetzt, so kommt es zur chemischen Bildung und man zeichnet den Bindungsstrich. Ein Metalldraht besteht aus sehr vielen Metallatomen, doch das Prinzip bleibt das gleiche: Die vormaligen AO's verschmelzen zu „Molekülorbitalen" unterschiedlicher Energie, welche sich nun über den *gesamten* Festkörper erstrecken. Die Menge aller dieser Orbitale heißt nicht mehr „Schale", sondern „Band". Beim Molekül aus zwei Atomen beinhaltet das „Band" zwei MO's und eins, also die Hälfte, ist doppelt besetzt. Beim Festkörper aus N Atomen beinhaltet das Band N „Molekülorbitale" und $N/2$ davon sind doppelt besetzt. Aus der Chemie weiß man, dass sich die beiden Elektronen in doppelt besetzten Orbitalen gegenseitig *blockieren*. So ist es auch im Festkörper: Im neutralen Metalldraht sind die unteren $N/2$ Niveaus doppelt besetzt und die Elektronen blockieren sich dort. Die Leitfähigkeit in diesem Zustand „eingefroren". Werden die beiden Drähte des zweiadrigen Kabels nun an den Plus- bzw. Minuspol einer Batterie angeschlossen, so *müssen* die zusätzlichen Elektronen auf dem Minusdraht in Orbitale energetisch *oberhalb* der vormaligen Besetzungsgrenze, während auf dem Plusdraht Löcher energetisch *unter* der vormaligen Besetzungsgrenze verbleiben. Dadurch ergibt sich außer dem Ladungs-, auch ein Energieunterschied. Elektronensprung gibt es auch bei der *optischen* Atomanregung. Doch dabei verbleibt das angeregte Elektron *in* seinem Atom und rekombiniert dort auch wieder. Die Batterie hingegen bewirkt Elektronensprünge zwischen *delokalisierten* „Molekülorbitalen". In diesen über den gesamten Draht ausgebreiteten Orbitalen überwinden die winzigen Elektronen und Löcher beim Stromfluss leicht makroskopische Distanzen.

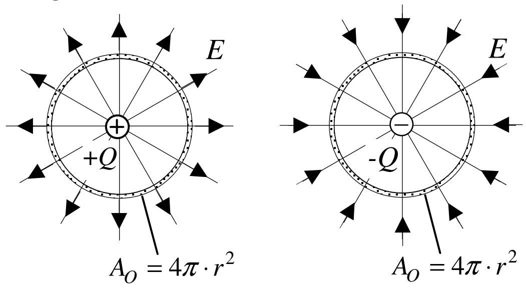


Energetisches Bild der Orbitale im Metall

Zusammenfassung Kapitel B)
1) *Elektrische Ladung*: Alle elektrischen Ladungen sind Vielfache der Elementarladung *e*.
2) *Ladungsverteilung*: Zusätzliche Elektronen, wie auch Löcher sind frei beweglich und verteilen sich auf der Metalloberfläche gleichmäßig. Zur Beschreibung verwendet man die Ladungsdichte σ.
3) *Elektrische Leitung*, *Stromkreis*: Ohne Batterieanschluss sind die Elektronen blockiert. Der Anschluss bewirkt Ladungstrennung und Energieaufnahme durch Anregung analog der Elektronenanregung im Atom **sowie** freie Beweglichkeit der räumlich *getrennten* Elektronen und Löcher auf den beiden Leitern. Die Rekombination erfolgt im Verbraucher unter Energieabgabe.

C) Elektrische Ladung und elektrisches Feld

1) <u>Coulomb-Gesetz: Quadratisches Entfernungsgesetz</u>
Eine punktförmige Masse ist von einem radialen Gravitationsfeld umgeben. Entsprechend ist eine punktförmige elektrische Ladung von einem radialen elektrischen Feld umgeben. Die *Dichte* der Feldlinien steht wieder für die *Feldstärke*. Analog zur Gravitation verschwinden Feldlinien nicht von alleine. Deswegen bleibt die von einer Ladung ausgehende *Anzahl* von Feldlinien konstant und die Feldlinien müssen immer größer werdende Kugeloberflächen durchdringen. Da deren Flächeninhalt aber mit r^2 *zu*nimmt, nimmt die Feldstärke mit r^2 *ab*. In der Elektrizität gibt zwei Ladungsarten, Plus und Minus. Eine positive Probeladung wird von $+Q$ abgestoßen und von $-Q$ angezogen. Da die

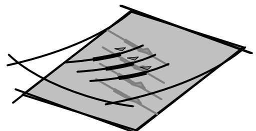


Feldlinienrichtung nach der Kraftrichtung auf eine *positive* Probeladung definiert ist, laufen die Feldlinien aus $+Q$ *heraus* und in $-Q$ *hinein*.
Nach dem Gesagten, enthält sowohl die Feldformel von Newton als auch die von Coulomb den Faktor $1/r^2$. Aber während die Gravitationskonstante γ der Newtonformel im Zähler steht, steht die elektrische Feldkonstante ε_0 der Coulombformel im Nenner. Desweiteren kommt die Ursache der quadratischen Feldabschwächung, nämlich die mit $4\pi r^2$ größer werdende Oberfläche der Kugelschale, in der Coulombformel unmittelbar zum Ausdruck.

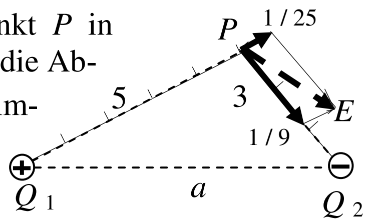
Vergleich der Newtonschen und Coulombschen Feldformel: $\boxed{G=\gamma\frac{M}{r^2}}$ $\boxed{E=\frac{1}{\varepsilon_0}\cdot\frac{Q}{4\pi\cdot r^2}}$.
Das Vorzeichen von Q wurde hier nicht berücksichtigt.
Für die elektrische Feldkonstante gilt. $\boxed{\varepsilon_0=8{,}85\cdot10^{-12}C^2/J\,m}$.

<u>Zahlenvergleich</u>:
Bei Einsetzen von M in kg und r in m erhält man G in m/s^2 gem. $G=6{,}673\cdot10^{-11}\cdot M/r^2$
Bei Einsetzen von Q in C und r in m erhält man E in N/C gem. $E=8{,}99\cdot10^9\cdot Q/r^2$.
Ergebnis: Das elektrische Feld hat zwar die gleiche Entfernungsabhängigkeit wie die Gravitation, doch in Standardmaßeinheiten berechnet, ist das elektrische Feld etwa 10^{20} mal so stark wie die Gravitation. Das macht die Elektrizität für die Energieübertragung so attraktiv, zumal sie ohne Ladungstrennung durch Dynamomaschine, Batterie, usw. *ungefährlich* im Atom versteckt ist.

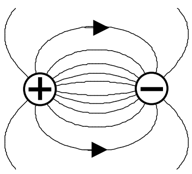
2) <u>Überlagerungsprinzip = Superpositionsprinzip.</u>
Felder verschiedener Ladungen *beeinflussen* sich *nicht*, sie *überlagern* sich nur. Die *vektorielle* Addition führt zu *scheinbarer* Feldlinienverbiegung.

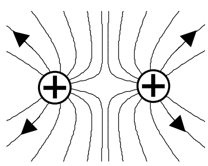


3) <u>Feldstärke zweier Punktladungen, zeichnerische Konstruktion eines Dipolfeldes</u>
Zeichne die beiden Punktladungen im Abstand a. Wähle einen Punkt P in welchem die Überlagerungsfeldstärke bestimmt werden soll. Miss die Abstände $\overline{PQ_1}$ und $\overline{PQ_2}$ und berechne die reziproken Quadrate. Bestimme so die beiden Teilfeldstärken. Setze entsprechend lange Vektorpfeile in P an. Vektoraddition ergibt dann die in P herrschende Gesamtfeldstärke $\vec{E}$. Mit dieser Methode lassen sich alle Überlagerungen konstruieren.

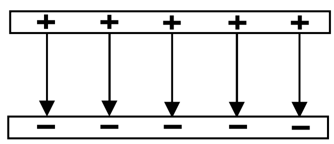


4) <u>Spezielle Überlagerungsfelder.</u>

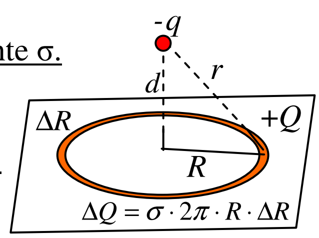

Dipolfeld (anziehend)

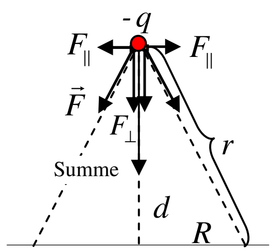

Dipolfeld (abstoßend)

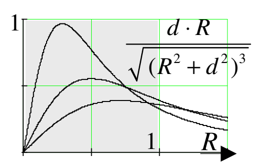
Durch die *Vektoraddition* <u>scheinen</u> sich die Feldlinien zu „*verbiegen*".


Homogenes Feld

5) <u>Feldstärke E einer großen Platte der Ladungsdichte σ.</u>
Ist die Ladung $+Q$ gleichmäßig auf einem Blech verteilt, so erfährt $-q$ (s.Abb.) die Kraft aller Teilringe mit $\Delta Q=\sigma\cdot2\pi\cdot R\cdot\Delta R$. Die $F_{\|}$-Komponenten heben sich auf. Wegen $F_\perp/F=d/r$ ist die Anziehungskraft eines Ringes dann $\Delta F=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q\cdot\sigma\cdot2\pi\cdot R\cdot\Delta R}{r^2}\cdot\frac{d}{r}$. Mit $r=(R^2+d^2)^{1/2}$ folgt $\Delta F=\frac{1}{2\varepsilon_0}\frac{q\cdot\sigma\cdot d\cdot R}{\left(R^2+d^2\right)^{3/2}}\Delta R$. Die Kraft aller Ringe erhält man durch Summation, bzw. den Flächeninhalt unter nebenstehenden Kurven.

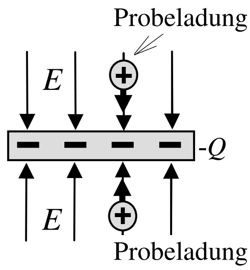






Anfangs ist die Ringfläche klein, anschließend wird die Entfernung groß und die Kraft klein. Erstaunlicherweise ist der Flächeninhalt, unabhängig vom Abstand d, immer gleich $\underline{\underline{1}}$. Damit folgt $F = q \cdot \sigma / 2\varepsilon_0$. Wegen

$E = F/q$ wird daraus oberhalb und unterhalb der Platte $\boxed{E = \dfrac{Q}{2\varepsilon_0 A} = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}}$.



Die Feldlinien der (unendlichen) ebenen Platte verlaufen demnach ungeschwächt von den homogen verteilten Plattenladungen parallel bis ins Unendliche.

6) <u>Elektrische Feldstärke zwischen zwei *unterschiedlich* geladenen Platten: Platten*kondensator*</u>

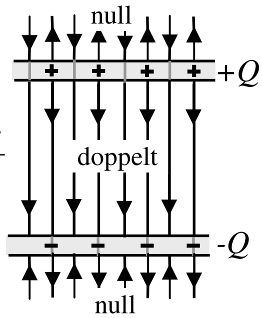
Zwei „unendlich" große Platten seien entgegengesetzt gleich geladen. Pro Flächeneinheit A tragen sie die Ladung $\pm Q = \pm\sigma \cdot A$. Beide Platten sind dann jeweils von oben *und* unten mit homogenen Feldern umgeben, die sich störungsfrei überlagern. Obwohl beide Felder überall vorhanden sind, hat man als Ergebnis der Überlagerung *außerhalb* der Platten doch die Feldstärke *null*, also einen feldfreien Raum.

Zwischen den Platten gilt Verdoppelung: $\boxed{E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0} = \dfrac{Q}{\varepsilon_0 \cdot A}}$

$$E = \frac{\sigma - \sigma}{2\varepsilon_0} = 0$$

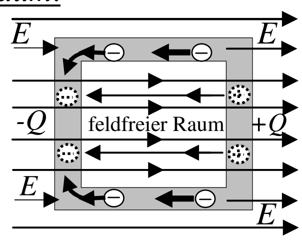
$$E = \frac{\sigma + \sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma - \sigma}{2\varepsilon_0} = 0$$



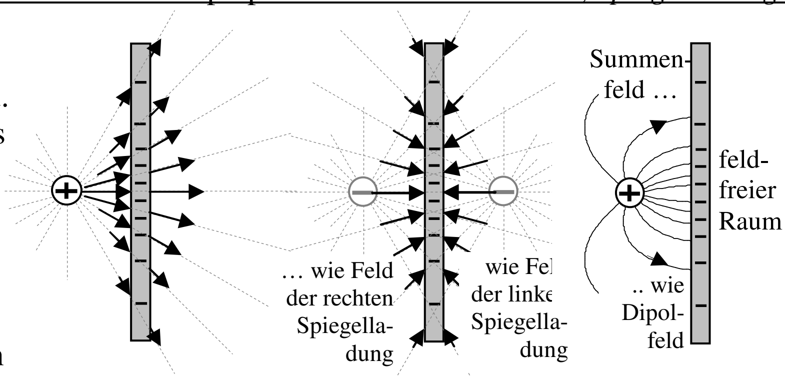
7) <u>Faradayscher Käfig = Superposition mit Sekundärfeld ergibt *feldfreien Raum*.</u>

Wird ein Metallrahmen in ein elektrisches Feld der Stärke E eingebracht, so zieht E die Elektronen in den Schenkeln oben und unten nach links. Dadurch wird der linke Schenkel negativ und der rechte positiv aufgeladen. Nach C6) entsteht dadurch zwischen den Schenkeln ein begrenztes homogenes, dem Originalfeld *entgegen* gerichtetes, Sekundärfeld. Die Superposition von Originalfeld und Sekundärfeld bringt dann im Inneren des Käfigs einen *feldfreien* Raum. So werden Räume oder Kabelinneres feldfrei gehalten.



8) <u>*Abschirmung* eine Ladung durch Metallblech = Superposition mit Sekundärfeld, *Spiegelladung*.</u>

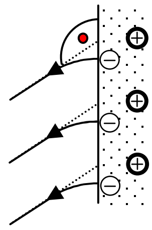
Links: Eine ⊕ -Ladung steht vor einem neutralen Metallblech. Die Feldlinien laufen schräg darauf zu. Dadurch werden ⊖ -Ladungen des Bleches zur Mitte verschoben.
Mitte: Die ⊖ - Ladungen erzeugen ein Sekundärfeld, das rechts so aussieht, als würde es von einer linken *Spiegelladung* erzeugt und links so aussieht, als würde es von einer rechten *Spiegelladung* erzeugt.



Rechts: Die Überlagerung des ursprünglichen Feldes mit dem durch *Influenz* entstandenen Sekundärfeld ergibt links ein halbes Dipolfeld und rechts einen *feldfreien* Raum.
Die vor dem Blech stehende Ladung wird also durch das Blech a*bgeschirmt*.

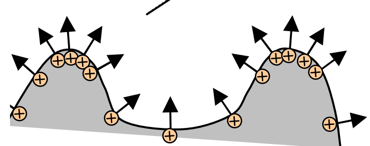
9) <u>Influenz auf Metalloberfläche: Senkrechter Feldlinienverlauf.</u>

Influenz = *Beeinflussung* einer Ladungsverteilung durch ein elektrisches Feld: Treffen Feldlinien E schräg auf eine Metalloberfläche, so ist die senkrechte Komponente $E_\perp$ wirkungslos, während $E_\parallel$ die beweglichen Ladungsträger so weit verschiebt, bis die Feldlinien des Summenfeldes von Original- und Sekundärfeld *senkrecht* auf der Oberfläche stehen.



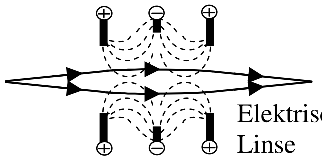
10) <u>Felder über gekrümmten Flächen.</u>

Die Ladung konzentriert sich in Bereichen starker Flächenkrümmung. Deshalb besteht hier eine große Feldliniendichte und damit eine große Feldstärke. *Technische Anwendung*: Blitzableiterspitze, Feldemissionsmikroskopie.



11) Technische Anwendungen

Die Anziehungs- bzw. Abstoßungskraft wird technisch genutzt: Lackieren, Rauchgasreinigung, Ionenantrieb von Raketen, Elektrostatische Linsen im Elektronenmikroskop.



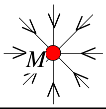
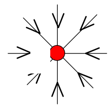
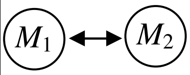
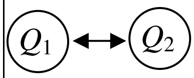
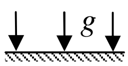
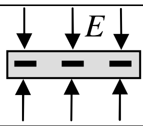
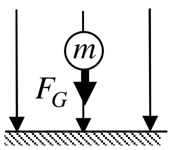
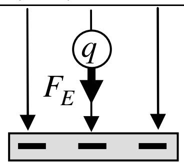
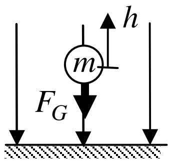
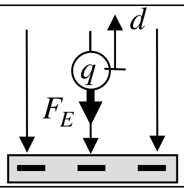
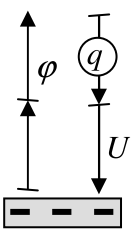
Elektrische Linse

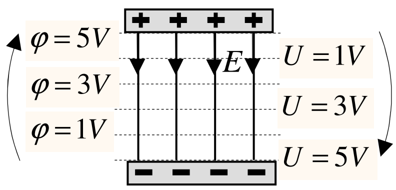
Zusammenfassung Kapitel C)

1) *Elektrisches Feld einer Punktladung*: Die Feldlinien verlaufen radial bis ins Unendliche. Die Richtung bestimmt sich aus der Kraftrichtung auf eine *pos.* Probeladung. Wie in der Gravitation gilt hier das quadratische Abstandsgesetz. Elektr. ist ca. 10^{20} mal stärker als Gravitation.
2) *Überlagerungsfelder*: Das Superpositionsprizip erklärt die Feldformen von Dipol und ausgedehnter Blechplatte. Hier gilt $E = Q/2\varepsilon_0 A$.
3) *Plattenkondensator*: Er besteht aus zwei „gegengleich“ aufgeladene Metallplatten. Im Inneren herrscht Feldverdopplung mit $E = Q/\varepsilon_0 A$. Das Äußere ist feldfrei.
4) *Influenz* und *Abschirmung*: Influenz ist Ladungsverschiebung durch Feldeinwirkung. Influenz erklärt den feldfreien Raum im Faradayschen Käfig und die Abschirmung einer Ldg. durch eine Metallplatte

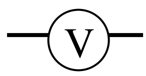
D) Kraft, Arbeit, Potential, Spannung, Kondensator: Formel und Eigenschaften.

1) Vergleich: Gravitation / Elektrostatik

	Gravitation	Elektrostatik	Maßeinh
Feldstärke eines Punktes	 $G = \gamma \cdot \frac{M}{r^2}$	 $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$	N/kg bzw. N/C
Kraft zwischen zwei Punkten	 $F_G = \gamma \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}$	 $F_E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	Newton
Homogenes Feld	 Feldstärke G = Ortsfaktor = Buchstabe g	 $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{Q}{2\varepsilon_0 A}$	N/kg bzw. N/C
Kraft im homogenen Feld	 $F_G = m \cdot g$	 $F_E = q \cdot E$	Newton
Arbeit bzw. potentielle Energie im homogenen Feld	 $w = m \cdot g \cdot h$	 $w = q \cdot E \cdot d$	Joule
Potential $\varphi = w_{pot}/\ldots$	$\varphi = \frac{w}{m} = g \cdot h$ Maßeinh $\frac{J}{kg}$	Potential aufgenommene Energie pro Ldg. $\varphi = \frac{w}{q} = E \cdot d$	$Volt = \frac{J}{C}$
Für U und φ gelten die gleichen Formeln nur die Zählrichtung ist umgekehrt	„Spannung“ wird für die Gravitation nicht definiert.	 Spannung U = abgegebene Energie pro Ldg.: $\boxed{U = \frac{w}{q} = E \cdot d}$	$Volt = \frac{J}{C}$

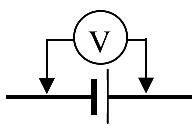


Potential φ und Spannung U



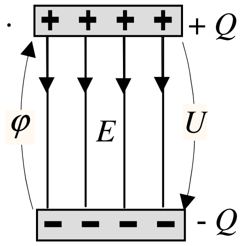
Schaltzeichen des Voltmeters

Innenwiderstand möglichst groß $\to \infty$



Parallelschaltung zur Spannungsmessung

E) Der Kondensator



1) Kapazität. Aufladung der Platten mit $\pm Q$ erbringt die Feldstärke $E = Q/\varepsilon_0 A$. Wegen $U = E \cdot d$ sieht man, dass die Spannung $U = Q \cdot d/\varepsilon_0 A$ proportional zur Ladung Q ist. Im Umkehrschluss ist dann auch Q proportional zu U: Umstellen ergibt $\boxed{Q = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \cdot U}$. Diese Formel zeigt, dass dass Plattenpaar nicht nur ein *Feld*speicher, sondern auch ein *Ladungs*speicher ist. Der Prop-faktor $\boxed{C = \varepsilon_0 A/d}$ heißt *Kapazität* des Kondensators. $C = \varepsilon_0 A/d$ ist die *baubedingte* Formel der Kapazität. Einsetzen von C in obige Gleichung ergibt die *Kondensatorformel* $\boxed{Q = C \cdot U}$.
Auflösen nach C liefert die *Messformel* für die Kapazität. $\boxed{C = Q/U}$.
Diese Formel liefert mit $\boxed{F = C/V}$ auch die Maßeinheit *Farad* der Kapazität:.

2) Kraft zwischen den Kondensatorplatten ausgedrückt in U. Experimentelle ε_0-Bestimmung.
Die Anziehungskraft zwischen zwei gleich großen *Punkt*ladungen $\pm Q$ beträgt nach dem Coulombschen Kraftgesetz $F = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 \cdot r^2}$. Mit welcher Kraft ziehen sich die mit $\pm Q$ geladenen Kondensator*platten* an? Aus $W = F \cdot d$ und $W = ½\, C \cdot U^2$ ergibt sich $\boxed{F = \frac{\varepsilon_0 AU^2}{2d^2}}$.
Diese Gleichung dient zur experimentellen ε_0-Bestimmung.

3) Veränderung des Plattenabstandes d eines Kondensators mit fester Flächengröße A.
Ein Plattenkondensator mit Plattenabstand d und Kapazität $C = \varepsilon_0 \cdot A/d$ sei an eine Spannungsquelle U angeschlossen, sodass die Ladung Q auffließt. Daraus ergeben sich Feldstärke $E = U/d$ und Feldenergie $W = ½\, QU$. Nun wird der Plattenabstand z.B. auf den Wert $3 \cdot d$ vergrößert. Gesucht sind die Werte von Q, C, U, W und E nach der Abstandsvergrößerung.
Die Änderung des Plattenabstandes erbringt je nach Situation unterschiedliche Ergebnisse.

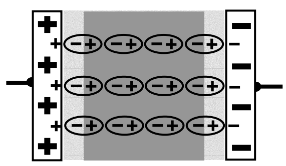
a) Veränderung des Plattenabstandes bei *abgeklemmter* Spannungsquelle.
Die Ladungen $\pm Q$ können jetzt weder auf- noch abfließen, deshalb bleibt Q *konstant*.

	Konst=Q	Abstand	Kapazität	Spannung	Energie	Feldstärke
vorher	Q	d	C	U	W	E
nachher	Q	$3 \cdot d$	$C/3$	$3U$	$3W$	E
	konstant		antiprop.	prop.	prop.	konstant

b) Veränderung des Plattenabstandes bei *angeschlossener* Spannungsquelle.
Die Batterie erzwingt *Spannungsgleichheit*. Die Feldstärke $E = U/d$ nimmt mit d ab.

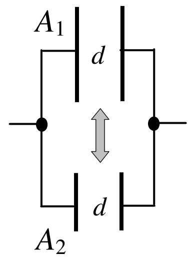
	Q	Abstand	Kapazität	Spannung	Energie	Feldstärke
vorher	Q	d	C	U	W	E
nachher	$Q/3$	$3d$	$C/3$	U	$W/3$	$E/3$
	antiprop.		antiprop.	konstant	antiprop	antiprop.

4) Einbringen eines Dielektrikums zwischen die Platten
Isolatormaterial polarisiert sich im elektrischen Feld. Im Inneren hebt sich die Wirkung auf. An den Rändern bilden sich Ladungshäute, wodurch bei gleicher anliegender Spannung weitere Ladungen auf die Platten gezogen werden. Dadurch vergrößert sich das Verhältnis Q/U und somit die Kapazität. Der Vergrößerungsfaktor heißt relative Dielektrizitätskonstante ε_r.
Glas: $\varepsilon_r = 2$, für Keramik und Oxydhäute.: $\varepsilon_r \approx 10^4$. Mit Dielektrikum gilt: $\boxed{C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot A/d}$.



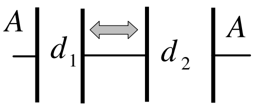
5) Parallelschaltung von Kondensatoren.

Zur Bestimmung der Gesamtkapazität zweier parallel geschalteter Kondensatoren betrachten wir einfachheitshalber beide Kondensatoren mit gleichem Plattenabstand d und unterschiedlicher Plattengröße. Man kann die beiden Plattenpaare dann gedanklich zusammen schieben und erhält *einen* Kondensator mit der Fläche $A = A_1 + A_2$ und damit der Kapazität $C = \varepsilon_0 \cdot A / d = \varepsilon_0 \cdot (A_1 + A_2)/d = C_1 + C_2$. Daher gilt $C_{Parallel} = \underline{\underline{C_1 + C_2}}$



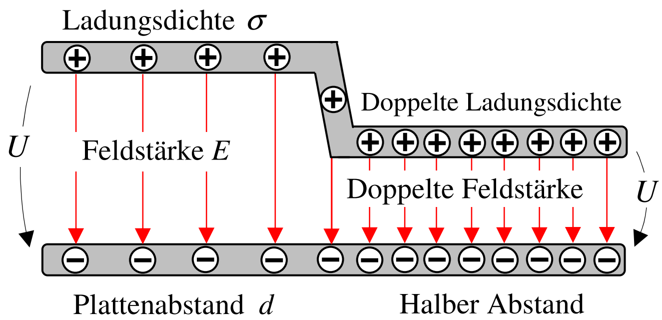
6) Reihenschaltung von Kondensatoren

Zur Bestimmung der Gesamtkapazität zweier in Reihe geschalteter Kondensatoren betrachten wir einfachheitshalber beide Kondensatoren mit gleicher Plattengröße A und unterschiedlichem Plattenabständen. Die beiden mittleren Platten kann man gedanklich zusammenschieben und das gemeinsame Blech dann seitlich herausziehen. Dadurch erhält man *einen* Kondensator mit dem Plattenabstand $d = d_1 + d_2$ .Aus $d_1 = \dfrac{\varepsilon_0 \cdot A}{C_1}$ und $d_2 = \dfrac{\varepsilon_0 \cdot A}{C_2}$ folgt $\dfrac{1}{C_{Reihe}} = \dfrac{d}{\varepsilon_0 \cdot A} = \dfrac{d_1}{\varepsilon_0 \cdot A} + \dfrac{d_2}{\varepsilon_0 \cdot A} = \dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2}$



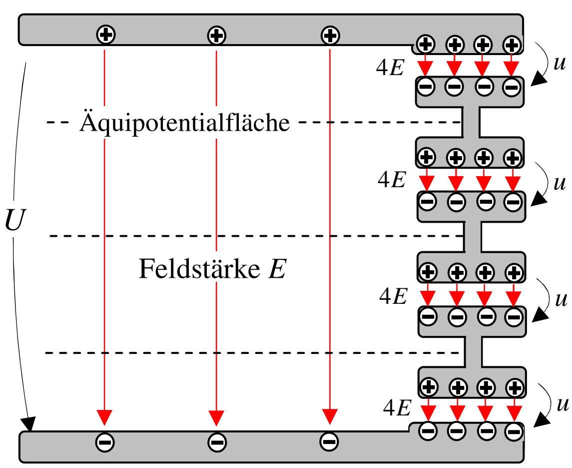
7) Feldstärke, Ladungsdichte und Spannung am geknickten Kondensator.

Im Kondensator sind die Ladungsdichte σ und die Feldstärke E durch $E = \sigma / \varepsilon_0$ verbunden. Bis auf den Proportionalitätsfaktor $1/\varepsilon_0$ sind E und σ also gleich. Dem entspricht, dass „von jeder Ladungsportion eine Feldlinie ausgeht“. Wie verteilt sich die Ladung im *geknickten* Kondensator, dessen Plattenabstand rechts halb so groß ist wie links? Die beweglichen Plus- und Minusladungen folgen ihrer gegenseitigen Anziehung und wandern in den Bereich des kleineren Plattenabstandes. Wandert jedoch alle Ladungen dorthin, so wäre die linke Seite feldfrei. Dann könnte man dort eine Probeladung q *ohne* Arbeit von der Unterplatte zur Oberplatte verschieben, um sie anschließend rechts unter Energieabgabe zurück fallen zu lassen. Man hätte ein *Perpetuum mobile*, das geht nicht. Also müssen links gerade so viele Ladungen verbleiben, damit die Probeladung beim Überführen dort genauso viel Energie aufnimmt, wie sie rechts wieder abgibt. Das zeigen auch die Formeln: Die Feldstärke wird nämlich durch $E = \varphi / d$ bzw. $E = U / d$ gesteuert: Potential bzw. Spannung zwischen den Platten müssen aber an *jeder* Stelle *gleich groß* sein. D.h., im rechten Bereich, mit $d/2$, muss die Feldstärke *doppelt* so groß sein wie im linken. Damit ist auch die Ladungsdichte rechts doppelt so groß wie links.



8) Besondere Anordnung von Kondensatoren.

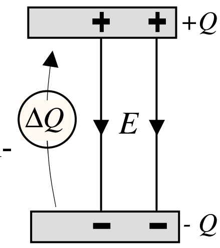
Die Abb. zeigt zwei geladene Metallplatten, die durch drei neutrale ⌶ - förmige Metallstücke überbrückt werden. Durch Influenz erfolgt in den ⌶- Stücken Ladungstrennung, so dass eine Reihenschaltung von vier kleinen Kondensatoren entsteht. Die Summe der vier kleinen Plattenabstände in der Abb. ist gleich einem Viertel des großen Plattenabstandes. Da nur die Leerräume zählen, ist die Feldstärke nach 6) in diesen Zwischenräumen viermal so groß wie zwischen den ursprünglichen Platten. Dadurch stimmt auch die Summe der Teilspannungen $4 \cdot u$ mit der Spannung U überein.



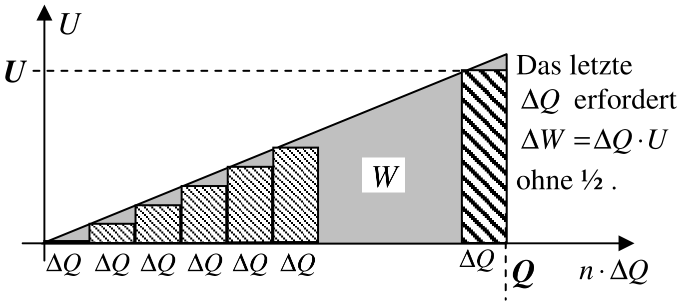
Zusammenfassung Kapitel D)

1) *Elektrische Kraft*: Es gibt große Analogien zwischen Gravitation und Elektrik. So ist die Kraft auch hier prop. zu Feldstärke und Kennzahl des Probekörpers. Für eine Punktladung folgt daraus das Coulombsche Kraftgesetz. Im Kondensator ergibt sich ein homogenes Kraftfeld.
2) *Arbeit*: Sie wird mit einer pos. Probeldg definiert. Wieder gilt "äußere Kraft $\times$ innerer Weg".
3) *Potential* und *Spannung*: Beide Größen folgen den *gleichen* Formeln und haben die Maßeinh. *Volt*. Potential = verrichtete Arbeit bzw. potentielle Energie pro Probeladung: $\varphi = w/q$.
   Spannung = zurückgegebene Arbeit pro Probeladung: $U = w/q$.
   Der Unterschied zwischen φ und U ist die Zählrichtung. U und E sind verbunden durch $U = E \cdot d$.
4) *Kondensator*: Hier gilt E prop. Q. Mit $U = E \cdot d$ wird daraus: U prop. Q. Umkehrung: Kondensator = Ladungsspeicher. Er speichert eine zu U prop. Ladung Q. Prop-faktor = Kapazität C.
5) Einbringen eines *Dielektrikums* vergrößert die Kapazität.
6) Je nach Anschlussart beeinflusst die Änderung der Plattenabstandes die Größen unterschiedlich.
7) Zwischen verformten Platten herrscht an *jeder* Stelle die *gleiche* Spannung U, wodurch sich Feldstärke und Ladungsdichte an den Engstellen vergrößern.

F) Aufladung eines Kondensators, Feldenergie.



1) Ladearbeit: Nur wenn die Aufladung der Platten $\pm 1e$ betragen soll, erfolgt sie schlagartig. Jede größere Ladungsmenge $\pm Q$ fließt zwangsläufig *schrittweise* auf. Für die Rechnung zerlegt man Q daher in Teilladungen ΔQ und überführt diese einzeln. Das erste ΔQ erfordert keine Arbeit, denn noch sind die Platten ungeladen und es gilt $E = 0$. Nach n Schritten beträgt die Plattenladung $Q = n\Delta Q$. Dadurch wachsen die Feldstärke $E = Q/\varepsilon_0 A$, sowie die Spannung $U = E \cdot d$ proportional mit der Schrittzahl an. Für die folgenden ΔQ's wird die Arbeit $\Delta W = U \cdot \Delta Q$ daher immer größer. Die gesamte Ladearbeit ergibt sich wieder als Flächeninhalt eines Arbeitsdiagramms. Auf der y-Achse wird jetzt die Spannung U aufgetragen, die für das jeweilige ΔQ gilt. Auf der x-Achse wird die Ladung $Q = n \cdot \Delta Q$ notiert, welche bereits aufgebracht wurde. Der Flächeninhalt eines Rechteckes beträgt dann $\Delta Q \cdot U$. Mit $U = \Delta W / \Delta Q$ wird daraus $\Delta Q \cdot U = \cancel{\Delta Q} \cdot \Delta W / \cancel{\Delta Q} = \Delta W$, also die Ladearbeit für den $(n+1)$-ten Schritt. Alle Rechtecke zusammen ergeben ein Dreieck. Der Flächeninhalt des Dreieckes stellt somit die gesuchte Arbeit dar. Es folgt: $W = ½\, Q \cdot U$. Mit Hilfe der Kondensatorformel $Q = C \cdot U$ lässt sich das umschreiben:



$\boxed{W = ½\, Q \cdot U}$. $Q = C \cdot U$ einsetzen: $\boxed{W = ½\, C \cdot U^2}$. $U = Q/C$ einsetzen: $\boxed{W = ½\, Q^2 / C}$

Merke: Für den letzten Ladeschritt ist die Arbeit $\Delta W = \Delta Q \cdot U$ (ohne ½) erforderlich.

2) Feldenergie, Energiedichte des Feldes

Die Ladearbeit wird zu *potentieller Energie* der getrennten Ladungen $\pm Q$.

Es gibt aber noch eine *andere Interpretation* für den Verbleib der Ladearbeit:
Ausgangpunkt ist die Formel $W = ½\, Q^2 / C$ für die Ladearbeit.
Mit $C = \varepsilon_0 A / d$ wird daraus $W = ½\, Q^2\, d / \varepsilon_0 A$. Je mehr Ladung auf den Platten, desto höher die Feldstärke, es gilt $E = Q/\varepsilon_0 \cdot A$. Umstellung ergibt $Q = \varepsilon_0 \cdot A \cdot E$. Setzt man dies ein, so folgt

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\varepsilon_0 \cdot A \cdot E)^2 \cdot d}{\varepsilon_0 A} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_0^2 \cdot A^2 \cdot E^2 \cdot d}{\varepsilon_0 A} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot \underbrace{A \cdot d}_{V}.$$

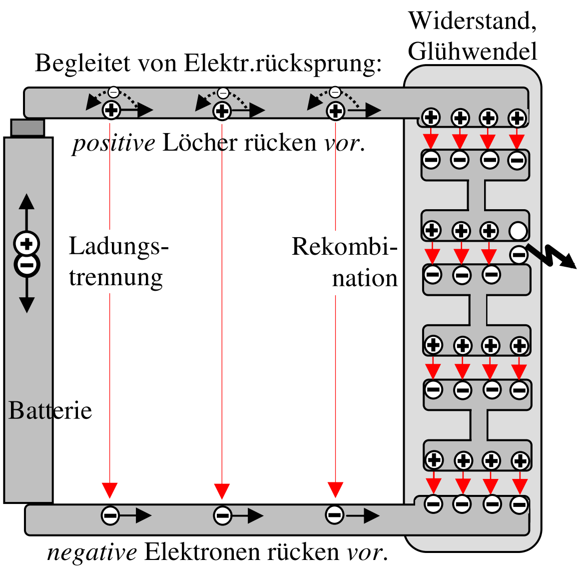
Das Produkt aus Plattenfläche A und Plattenabstand d ist gerade gleich dem Volumen V des felderfüllten Raumes zwischen den Platten. Damit folgt: $W = ½ \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot V$.

Interpretation: Die Ladearbeit steckt im Feld, denn W ist in dieser Form nur noch von der Feldstärke E und dem Volumen des felderfüllten Raumes abhängig.

Division durch V liefert dann die *Energiedichte* des elektrischen Feldes $\boxed{W/V = ½\ \varepsilon_0\ E^2}$.

Zusammenfassung Kapitel E)
1) *Ladearbeit*: Die Arbeit zur Aufladung eines Kondensators mit $\pm Q$ kann man *nicht* in einem Schritt berechnen, da U mit zunehmender Aufladung steigt. Für die erste Teilladung ΔQ ist keine Arbeit erforderlich. Die letzte Teilladung erfordert $\Delta W = \Delta Q \cdot U$. Im Mittel ergibt sich $W = ½\ Q \cdot U$.
2) *Feldenergie*: Die Ladearbeit wird zu potentieller Energie. Je nach Interpretation sitzt diese in den getrennten Ladungen $\pm Q$ oder das elektrische Feld selbst ist Träger dieser Energie.

G) Stromkreis.



Der Begriff des Stromkreises führt zu einer Reihe von **Irrtümern**. Von renommierten Autoren liest man sinngemäß, dass die unverbundenen Leiter zwar geladen seien, dass sie aber im geschlossenen Stromkreis durch die Driftbewegung der Elektronen neutralisiert würden. Das ist falsch: Wegen $E = \sigma / \varepsilon_0$ gehen Feld und Ladung Hand in Hand: Wären die Leiter beim Stromfluss neutral, so wäre E dort null und man könnte die Leiter berühren *ohne* einen Schlag zu bekommen. Auch ein parallel geschalteter Widerstand würde *keinen* Strom führen. Auch reicht die Driftbewegung nicht, die elektrische *Energie* zu transportieren, zumal W_{kin} in den driftenden Elektronen verbleibt.

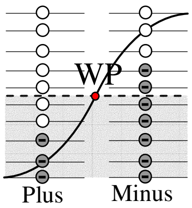
Tatsächlich bewegen sich im Minusleiter die negativen Elektronen und im Plusleiter die positiven Löcher ***parallel*** zueinander von der Batterie zum Widerstand. In der Batterie wird durch *Ladungstrennung* Energie aufgenommen, welche im Widerstand durch *Rekombination* wieder frei wird. Die Löcherwanderung wird von Elektronenrücksprüngen auf einem energetisch tieferen Niveau bewirkt.

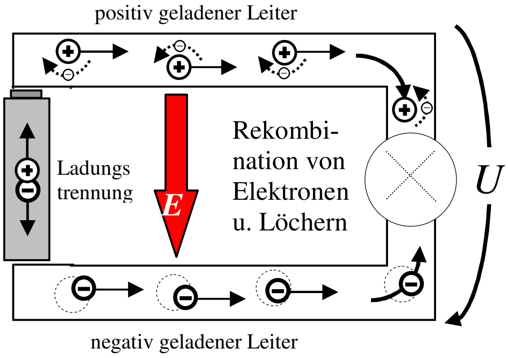
Ein Widerstand ist ein schlechter Leiter. Wir stellen uns vor, dass gut leitendes Material immer wieder durch kleine Höhlen unterbrochen wird. Die Batteriespannung fällt dann über die Summe der winzigen Höhlen ab, wodurch dort enorme Feldstärken entstehen, welche Ladungsübersprung, Rekombination und Energiefreisetzung bewirken. Die Orte dieses Geschehens sind zufällig. Die Rekombination schwächt die Ladung am Höhlenrand. Diese Abschwächung überträgt sich durch Influenz blitzschnell bis auf die Leiter, so dass die Feldstärke der Batterie dann das Gegenfeld zwischen den Leitern übersteigt. Durch erneute Ladungstrennung stellt die Batterie die alte Feldstärke wieder her. Durch fortwährendes Rekombinieren und *Nachladen* entsteht ein *Stromfluss*, der im Minus- bzw. im Plusleiter von Elektronen bzw. Löchern getragen wird. Bzgl. der *technischen Stromrichtung* bildet sich so ein *geschlossener Stromkreis* mit *gleicher* Stromstärke an *jeder* Stelle.

Elektrische Leistung.

Auch die beiden Drähte des Stromkabels stellen einen *Kondensator* dar. Um sie für den Stromfluss mit freien Elektronen und Löcher *auszustatten*, ist *zunächst* die *Ladearbeit* $W = ½\ Q \cdot U$ zu verrichten. Bei der Rekombination wird Energie frei. Die *Nachladearbeit* entspricht aber dem letzten „Streifen“ auf S.10 und benötigt daher die Arbeit $\Delta W = \Delta Q \cdot U$ (ohne ½). Die pro Zeit Δt verrichtete Arbeit ist die *Leistung* P. Also gilt $P = \Delta W / \Delta t = \Delta Q \cdot U / \Delta t$. Da U wegen jeweils sofortigem Nachladen praktisch konstant bleibt, folgt $P = U \cdot \Delta Q / \Delta t = U \cdot I$, denn $I = \Delta Q / \Delta t$. Also $\boxed{P = U \cdot I}$

Die drei Bilder vom Stromkreis.

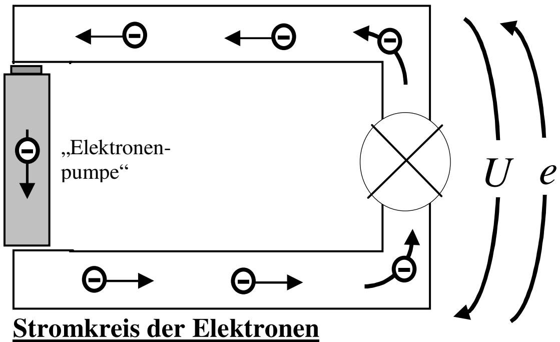




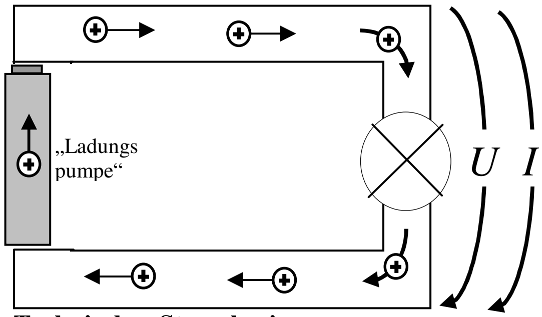
1) <u>Parallele Bewegung von Löchern und Elektronen</u> durch den Plus- und. Minusleiter von der Batterie zum Widerstand: Die Elektronen, welche die elektrische Leitung bewirken, besetzen ein halb gefülltes Energieband (s.S.4) . Sofern sie sich nicht blockieren, bewegen sie sich quasi frei. Doch je nach Lage im Band reagieren sie unterschiedlich auf äußere Kräfte. Deshalb schreibt man ihnen eine „effektive“ Masse zu. Ist diese Masse groß, so reagieren sie träge, andernfalls flink. Die effektive Masse ergibt sich aus dem *Kehrwert* der *Krümmung* der oben ins Band eingezeichneten Kurve. Am Wendepunkt ist die Krümmung null und die effektive Masse somit unendlich, hier herrscht Stillstand. Auf dem Minusleiter haben die freien Elektronen positive Krümmung und bewegen sich normal. Für die Löcher auf dem Plusleiter ist die Krümmung negativ. Deshalb reagieren sie wie „positive Elektronen“ auf die äußere Kraft.

2) <u>Elektronen laufen im Kreis herum</u>: Die Batterie wirkt als „Elektronenpumpe“.
Die in der Pumpe aufgenommene kinetische Energie wird im Verbraucher wieder abgegeben.

3) <u>Technische Stromrichtung</u>: Gedanklich positiv geladene Ladungsträger laufen im Kreis herum.



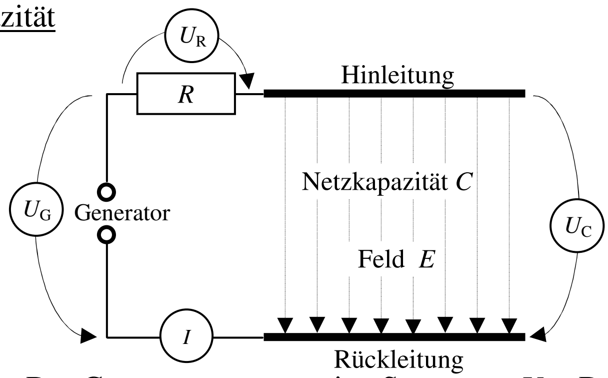
<u>Stromkreis der Elektronen</u>



<u>Technischer Stromkreis</u>

	Parallelbewegung von Löchern und Elektronen	Stromkreis der Elektronen	Technischer Stromkreis
Richtig	Das Modell ist richtig. Die Löchervorwärtsbewegung erfolgt durch Elektronenrücksprung auf energetisch niedrigerem Niveau.	Wertet man den Elektronenrücksprung im Plus- und die Elektronenvorwärtsbewegung im Minusleiter als gleichartig, so hat man insgesamt eine Elektronenkreisbewegung.	Hier wird weder nach dem Leitungsmechanismus, noch nach dem Mechanismus des Energietransports gefragt. Die Stromrichtung orientiert sich ausschließlich am Begriff der *positiven* Probeladung, wie sie bei der Def. der Feldstärkerichtung festgesetzt wird. Diese Probeladung bewegt sich dann durch die Leiter vom Plus- zum Minuspol.
Falsch	--------------------------	1) Der positive und negative Leiter ist während des Stromflusses neutral. 2) Energietransport erfogt mittels kinetischer Energie.	
Vorteilhaft	1) Erklärt die pos. und neg. Aufladung der Leiter auch während des Stromflusses. 2) Erklärt der Energietransport im Stromkreis.	Einfache bildliche Veranschaulichung.	Die Technische Stromrichtung gibt allg. Orientierung. Sie wird z.B. auch im Magnetismus bei der „Rechten-Hand-Regel“ angewandt. Weil der techn Strom *mit* der Spannung verläuft, ergibt sich das „richtige“ Ohmsche Gesetz $U = R \cdot I$
Nachteilig	Gilt als kompliziert.	<u>Nachteil</u>: 1) Technische Stromrtchg erforderlich, um das „falsche“ Ohmsche Gesetz $U = -R \cdot I$ zu vermeiden. 2) Energietransport ist nicht erklärbar.	Erklärt keine Details.

9) <u>Feldaufbau im (Berliner) Stromnetz, Netzkapazität</u>

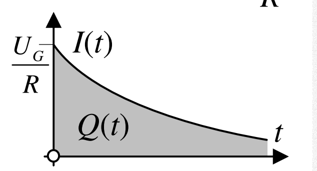


Der *Energie*transport vom Kraftwerk zum Verbraucher erfolgt nach dem gleichen Prinzip, wie der Energietransport beim „Massekreislauf“ im Gravitationsfeld. Doch während das Gravitationsfeld zum Anheben und zum Gewinn potentieller Energie einer z.B. Wassermasse bereits vorhanden ist, muss das entsprechende elektrische Feld erst hergestellt werden. Dieser Feldaufbau (primäre Ladungstrennung) soll jetzt im Detail betrachtet werden. Der Generator erzeugt eine Spannung U_G. Das *offene* Leitungsnetz kann man als zwei sich gegenüberstehende „Metallplatten“ interpretieren. Es besitzt auf Grund dessen eine gewisse Kapazität *C*. Nach der Formel $Q = C \cdot U_G$ fließen deshalb entsprechende Ladungsmengen auf die Leitungen und erzeugen das erwünschte Feld. Die Ladungen würden schlagartig auffließen, wenn die ohmschen Widerstände R des Leitungssystems und der Generatorwicklung diesen Vorgang nicht behindern würden. Nach Kirchhoff gilt $U_G = U_R + U_C$. Nun wird $U_R = R \cdot I$ und $Q = C \cdot U_C$ eingesetzt: $U_G = R \cdot I + Q / C$.

LK

Diese Gleichung wird nach t abgeleitet. Weil $U_G = const$ sein soll und $\dot{Q} = I$ gilt, erhält man $\dot{I}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} I(t)$. Gesucht ist also eine Zeitfunktion, deren Ableitung sich bis auf den Vorfaktor selbst ergibt. Die Probe zeigt, dass dies von $I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$ erfüllt wird. Dabei ist I_0 die noch unbekannte Anfangsstromstärke. Sie wird so bestimmt, dass die insgesamt aufgeflossene Ladung $Q = C \cdot U_G$ beträgt: $C \cdot U_G \overset{!}{=} I_0 \cdot \int_0^\infty e^{-\frac{t}{RC}} dt = I_0 \cdot (-RC) \cdot \left[e^{-\frac{t}{RC}} \right]_0^\infty = I_0 \cdot RC \;\Rightarrow\; I_0 = \frac{U_G}{R}$.

Der Feldaufbau erfolgt also durch den Ladestrom $I(t) = \frac{U_G}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$.



Der innere Widerstand R_i der Leitungen und Generatorwicklungen soll zur Vermeidung von Verlusten sehr klein sein. Dann aber gibt es beim Feldaufbau, vor der eigentlichen Betriebsaufnahme, einen gewaltigen Stromstoß. Ohne Schutzmaßnahmen würde eine überschnelle primäre Ladungstrennung den Generator zerstören.
In der Mittelstufe lernt man, dass Strom nur fließt, wenn der Stromkreis *geschlossen* ist.
Der Ladestrom der primären Ladungstrennung fließt aber in das *offene Netz*. Er lädt den „Netzkondensator“ auf und bereitet so den anschließenden Energietransport im geschlossenen Stromfluss vor. – Auch am offenen Netz kann man sich einen Schlag holen.

H) Aufgaben

1) Erkläre die Ladungsmessung nach Faraday und die Ladungsmessung mittels des Elektroskops.
2) Wieviel Ladung Q muss auf ein kreisförmiges Kupferblech mit 40cm Durchmesser und 1mm Dicke *aufgebracht* werden, um die abstoßende Feldstärke $E = 5\,N/C$ zu erzeugen? Jedem wievielten Cu-Atom muss dazu ein Elektron abgenommen werden? Welche Raumteile um das Blech herum sind dann felderfüllt? $\rho_{Cu} = 8930\,kg/m^3$; rel. Atommasse: A_{Cu} = 63,55 kg/kmol ; Avogadrozahl = $6{,}02 \cdot 10^{26}$ Teilchen/kmol. Bei Halbleiterdotierungen wird etwa über jedes 10^6 Atom ein beweglicher Ldgtr. eingebracht. Vergleiche.
3) Wie groß ist die Feldstärke E einer Punktladung $Q_1 = 1C$ im Abstand $r = 1m$? Wie groß ist die Kraft auf eine zweite Punktladung $Q_2 = 1C$ dort? Welche Kantenlänge hat ein Wasserwürfel gleicher Gewichtskraft?
4) Erläutere die Feldfreiheit innerhalb eines Metallrahmens. (Faradayscher Käfig)
5) Erläutere, inwiefern ein elektrisches Feld durch ein Metallblech abgeschirmt werden kann.
6) Erkläre die Bedeutung der Influenz am Beispiel einer Metallplatte mit schräg auflaufenden Feldlinien.
7) Konstruiere den Feldstärkevektor zweier gegengleicher Punktladungen im Abstand $a = 6LE$ an einem Punkt P, welcher 5 bzw. 3 LE's von den Ladungen entfernt ist.
8) Berechne die Kraft F, welche ein el. Feld der Stärke $E = 3\ N/C$ auf eine Probeladung $\Delta Q = 1mC$ ausübt.
9) Erläutere zwei Methoden der Ldgstrennung bzw. die beiden Arten von Spannungsquellen und begründe das jeweilige Auftreten des Faktors ½ in der Formel für Kraft und Feldenergie.
10) Zum Feldaufbau braucht das Berliner Niederspannungsnetz $\pm Q \approx \pm 8C$ Primärladung. Wie lange würde die Aufladung mit einem konstanten Ladestrom von 1000A dauern?
11) Erläutere die Doppelfunktion der Batterie als Spannungs- und Stromquelle. Überlege, ob der Transport elektrischer Energie auch ohne Ladungstrennung (primäre Ladungsbewegung) möglich ist.
12) Beurteile die Aussagen: a) Spannung ist der Antrieb für den Strom b) Beim Trennen geladener Platten erzeugt man Spannung. c) Ein Wasserkreislauf ist eine gute Veranschaulichung des Stromkreises.
13) Erkläre die Funktionsweise einer einfachen Batterie. Begründe den festen Spannungswert einer Batterie.
14) Gib die Definition des Potentials φ und der Spannung U an. Begründe, warum φ und U unterschiedliche Zählrichtungen haben. Im Ohmschen Widerstand sind Strom und Spannung „in Phase". Erkläre dies.
15) An ein Potentiometer der Baulänge $l = 30cm$ wird die Spannung $U = 20V$ gelegt.
Es fließt ein Strom von $I = 2A$. Welche Teilspannung greift man an der Stelle $x = 9cm$ ab?
16) Es gibt die beiden Energieausdrücke $W = Q\ U$ und $W = ½\ Q\ U$. Erläutere den Unterschied.
17) Erläutere, was ein Kondensator ist und inwiefern er Ladung, Feld und Energie speichern kann.
18) Zwei parallele sich gegenüberstehende Metallplatten haben jeweils 20cm Länge und 5cm Breite.
Ihr Abstand beträgt $d = 4mm$. Sie werden mit $\pm Q = \pm 1nC$ aufgeladen. a) Berechne σ , E und $W_{el\,Feld}$.
Wie ändern sich σ , E und $W_{el\,Feld}$ wenn d bzw. $\pm Q$ verdoppelt wird? b) abgeklemmt c) angeschlossen
19) Erläutere den Antrieb der Ladungsträger im Stromkreis.
Begründe, warum dies *genau genommen* nicht die Spannung ist, auch wenn man das gerne sagt.
20) Eine Gewitterwolke befindet sich in $d = 800m$ über der Erdoberfläche. Sie ist $A \approx 10^5\,m^2$ groß. Zwischen Wolke und Erde herrscht eine Feldstärke $E = 3000\ V/m$. Wie groß ist die Spannung zwischen Wolke und Erde? Wie groß sind Ladung und Energie? Wie ändert sich U, wenn die Wolke auf 1600m aufsteigt?
21) <u>Spannungswaage</u>: Zwei Platten von je $900cm^2$ im Abstand 4 mm üben bei einer angelegten Spannung von $5kV$ eine Kraft von $0{,}61N$ aufeinander aus. Bestimme aus diesen Messdaten den Wert von ε_0 .
22) Der Kondensator eines Blitzgerätes hat $C = 0{,}5mF$. Wieviel Energie speichert er bei 500V ?
Wie groß ist die Lichtleistung, wenn in 2 ms 20% der Energie in Licht umgesetzt wird?
23) Berechne die Plattengröße für einen Kondensator mit $C = 40\,pF$ und $d = 0{,}3mm$ unter Verwendung von Glimmer ($\varepsilon_r = 6$) . Erkläre, inwiefern das Dielektrikum die Kapazität beeinflusst.
24) Eine Zweidrahtleitung der Länge l mit Leiterabstand s und Leiterdurchmesser d hat die Kapazität $C = \pi \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot l / \ln(2s/d)$. Das Berliner Netz ist $l = 216\,000\,km$ lang. Wegen der Isolierung gilt $s = 1{,}2d$ und $\varepsilon_r = 1{,}4$. Berechne die Gesamtkapazität. Wieviel Ladung nimmt das Netz bei $U = 230V$ auf?
25) Die Platten eines Demonstrationskondensators haben $A = 0{,}25m^2$ und den Abstand $d = 0{,}2mm$.
Man legt 220V an. a) Wie groß ist die Kapazität? b) Wieviel Ladung befindet sich auf jeder Platte?
c) Wie groß ist die Feldstärke zwischen den Platten? d) Wieviel Energie ist in dem Feld enthalten?
26) Die Platten des Kondensators aus Aufgabe 25)werden auf $d_2 = 1mm$ auseinander gezogen. Wie ändern sich Spannung und Ladung, wenn a) die Spannungsquelle angeschlossen bleibt?
b) die Spannungsquelle vor dem Auseinanderziehen abgeklemmt wird ?

27) Berechne die max und min Kap, die sich aus $C_1 = 1\mu F$; $C_2 = 2\mu F$; $C_3 = 4\mu F$; $C_4 = 8\mu F$ bilden lässt.

28) Welche Gesamtkapazitäten lassen sich aus vier gleichen Kondensatoren von $2\,\mu F$ zusammenschalten?

29) Ein Kondensator $C_1 = 0{,}3\mu F$ ist mit $Q = 6\mu C$ geladen.

a) Wie groß sind Spannung und Energieinhalt an C_1?

b) C_1 wird nun mit einem *un*geladenen Kondensator $C_2 = 0{,}5\mu F$ parallel geschaltet, ohne dass dabei Ladung verloren geht. Wie groß ist die Gesamtkapazität C und welche Spannung liegt nun an?

c) Wieviel Ladungen und Energien enthalten die beiden Kondensatoren jeweils einzeln und in Summe?

d) Wo ist die Energiedifferenz im Vergleich zu Aufgabe a) geblieben?

I) Lösungen

1) Siehe B3) und B4)

2) $E = Q/(2\varepsilon_0 \cdot A) \Rightarrow Q = E \cdot 2\varepsilon_0 \cdot A = E \cdot 2\varepsilon_0 \cdot (d/2)^2 \cdot \pi = 5 \cdot (N/C) \cdot 2 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot \pi \cdot (C/V \cdot m) \cdot 0{,}2^2 \pi \cdot m^2$
$= 1{,}112 \cdot 10^{-11} (N \cdot C \cdot m^2 / C \cdot V \cdot m) = 1{,}112 \cdot 10^{-11} (N \cdot m \cdot C / C \cdot V) = 1{,}112 \cdot 10^{-11} (J \cdot C / J) = \underline{\underline{1{,}112 \cdot 10^{-11} C}}$.

Das $\hat{=}\; n_e = Q/e = 6{,}95 \cdot 10^7$ Elektronen. Das Blech hat die Masse $m = V \cdot \rho = 1{,}12\,kg$ und enthält damit die Stoffmenge $n = m / A_{Cu} = 1{,}12\,kg/(63{,}55\,kg/kmol) = 0{,}0177\,kmol$. Das ergibt $n_{kmol} \cdot N_A = 1{,}063 \cdot 10^{25}$ Kupferatome. Daher muss jedem $1{,}063 \cdot 10^{25} / 6{,}95 \cdot 10^7 = \underline{\underline{1{,}529 \cdot 10^{17}}}$ -tem Kupferatom ein Elektron abgenommen werden. Feld: Ober- und unterhalb (Nahbereich) der Platte homogenes Feld. Das Blechinnere ist feldfrei.

3) $E = Q_1 / 4\pi\varepsilon_0 r^2 = 8{,}992 \cdot 10^9\, N/C$; $F = Q_1 \cdot Q_2 / 4\pi\varepsilon_0 r^2 = 8{,}992 \cdot 10^9\, N$.
Kantenlänge des entsprechenden Wasserwürfels:
$F_G = g \cdot m = g \cdot V \cdot \rho = g \cdot k^3 \cdot \rho \Rightarrow k = \sqrt[3]{F_G / g \cdot \rho} = \sqrt[3]{8{,}992 \cdot 10^9\, N/(9{,}81\,m/s^2) \cdot 1000\,kg/m^3} = \underline{\underline{97{,}14\,m}}$

4) Siehe C7).

5) Von der Ladung geht, unbeeinflusst vom Blech, ein Radialfeld bis ins Unendliche aus. Dieses zieht im Metallblech eine Ladungsverteilung umgekehrter Polarität in den Bereich des Lotfußpunktes. Diese Ladungsverteilung erzeugt ihrerseits ein Feld vor *und* hinter dem Blech. Die Überlagerung von Original- und Sekundärfeld liefert hinter dem Blech den Wert null und vor dem Blech ein halbes Dipolfeld.

6) Influenz = *Beeinflussung* einer Ladungsverteilung durch ein elektrisches Feld: Trifft ein Feld schräg auf eine Metalloberfläche, so bewirkt die senkrechte Komponente $E_\perp$ (bei mäßiger Feldstärke) nichts. $E_\parallel$ hingegen verschiebt die beweglichen Ladungsträger so weit, bis die Überlagerung von Original- und Sekundärfeld *senkrecht* auf der Oberfläche stehen. Elektr. Feldlinien stehen also *stets* $\perp$ auf der Metalloberfläche.

7) Siehe C3)

8) $F = \Delta Q \cdot E = 1 \cdot 10^{-3} C \cdot 3N/C = 3mN$

9) *Spannungsquelle* sind Vorrichtungen, welche ein elektrisches Feld erzeugen.
<u>1. Möglichkeit</u>: Bereits geladene Platten werden auseinander gezogen, bzw. räumlich *getrennt*. (Gewitter, Hemd ausziehen..) Dadurch wird der felderfüllte Raum und somit die Spannung vergrößert. Faktor ½ :
Die bewegte (z.B. obere) Platte wird nur durch ein *Halb*feld geführt, denn oberhalb besteht feldfreier Raum.
<u>2. Möglichkeit</u>: Die Ladungstrennung zwischen feststehende Platten wird portionsweise vollzogen. (Normale Batterie, …)Die erste Teilladung wird kräftefrei überführt. Bei der letzten Teilladung sind Feld und Gegenkraft voll ausgebildet. Der Mittelwert liefert daher den Faktor ½.

10) Der Feldaufbau dauert in diesem Modell $t = Q/I = 8ms$.

11) Erst Spannungsquelle zum Feldaufbau, dann Stromquelle zum Energietransport im Stromkreis.

12) a) Spannung ist keine *Kraft*, sondern rückgebbare *Arbeit* pro Ladung. <u>Trotzdem</u>: Wegen $U = E \cdot d = F \cdot d / q$ ist U zur Kraft prop. Daher kann man U auch als *Antrieb* für I ansehen. b) Man erzeugt einen größeren felderfüllten Raum, <u>trotzdem</u>: Wegen $U = E \cdot d$ wächst mit d auch die Spannung. c) schlecht!

13) Siehe Internet. Die Batteriespng ist hier durch das Dissoziationsvermögen der Komponenten limitiert.

14) φ = potentielle Energie / Ladung, welche bei einer Bewegung der Probeldg durch das *Feld* von Minus nach Plus gewonnen wird. *U* = *Spannung* = Arbeit / Ladung, welche bei einer Bewegung von *q* durch das *Feld* von Plus nach Minus an einem Verbraucher verrichtet werden könnte. Daher sind die Zählrichtungen unterschiedlich. Der Ohmsche Widerstand ist ein *Verbraucher*. In ihm fließt der Strom *in* der Richtung der Spannung. Daher sagt man. „Strom und Spannung sind am Ohmsche Widerstand in Phase".

15) $U_x = x \cdot U / l = 6V$. Die Stromstärke spielt beim *Spannung*steiler keine Rolle. (Doch siehe Belastbarkeit)

16) Siehe F)

17) Ein Kondensator besteht aus zwei, gegeneinander isolierten Metallstücken (Platten, Drähten, ..).
Der Plattenkondensator hat die baubedingte Kapazität $C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot A/d$. Klemmt man die Pole an eine Spannungsquelle, so fließt die Ladung $Q = C \cdot U$ auf , welche zwischen den Platten das Feld $E = Q / \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot A = = Q \cdot d / C$ mit der Feldenergie $W = ½\, Q\, U$ erzeugt. Nach Abklemmen bleiben U, Q und W erhalten.

18) a) $\sigma = 0{,}1 \mu C/m^2 ; E = 11299\, J/Cm ; W_{Feld} = 22{,}6nJ$. b,c) Siehe E3)

19) Der Antrieb der Ladungsträger erfolgt *nicht* durch die Spannung, sondern durch den Überschuss der Trennkraft der Batterie nach der Rekombuination im Verbraucher: „Ohne Stromentnahme kein Strom."

20) $C = \varepsilon_0 \cdot A/d = 1{,}1\,pF ; U = E \cdot d = 2{,}4\,MV ; Q = C \cdot U = 2{,}655\,mC ; W = ½ QU = 3{,}186\,kJ$. U verdoppelt sich.

21) Aus $F = \frac{C \cdot U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d} \cdot \frac{U^2}{2d} \Rightarrow \varepsilon_0 = \frac{2Fd^2}{AU^2} = 8,676 \cdot 10^{-12} \frac{N \cdot m^2}{m^2 \cdot V^2}$, $\frac{N \cdot m^2}{m^2 \cdot V^2} = \frac{N \cdot m}{m \cdot V^2} = \frac{J}{m \cdot V^2} = \frac{C \cdot V}{m \cdot V^2} = \frac{C}{m \cdot V}$.

22) $W = 0,5C \cdot U^2 = 62,5J$; $P = W / \Delta t = 31,25kW$. 20% davon sind $6,25kW$.

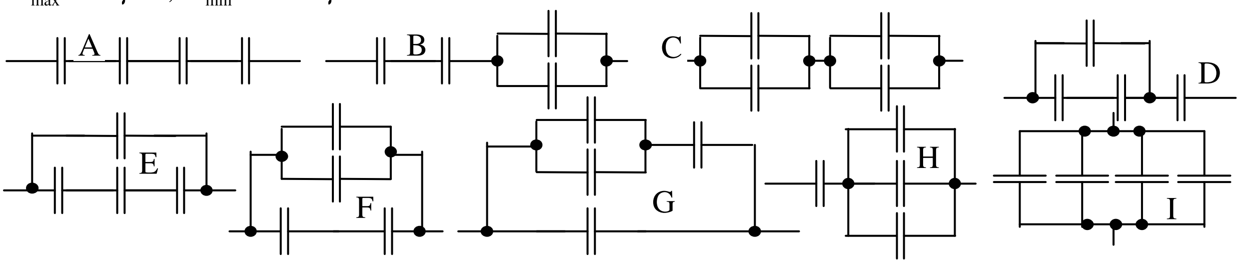
23) Es gilt $A = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = \frac{40 \cdot 10^{-12} F \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} m}{6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} C / Vm} = 2,26 \cdot 10^{-4} \frac{(C/V) \cdot m}{C/(Vm)} = 2,26 \cdot 10^{-4} m^2 = 2,26 cm^2$. ε_r Siehe 5b)

24) $C = \pi \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot l / \ln(2 \cdot 1,2) \approx 9,6mF \Rightarrow Q = C \cdot U \approx 2,2C$

25) a) $C = 11,06nF$ b) $Q = 2,434 \mu As$ c) $E = 1,1MV/m$ d) $W = 267,7 \mu J$

26) $C_2 = 2,212nF$ a) $U_2 = U$; $Q_2 = C_2 \cdot U_2 = 487,75nC$ b) $Q_2 = Q$ $U_2 = Q_2 / C_2 = 1100V$.

27) $C_{\max} = 15 \mu F$, $C_{\min} = 8/15\ \mu F$.

28) 

$C_A = \frac{1}{2} \mu F; C_B = \frac{4}{5} \mu F; C_C = 2 \mu F; C_D = \frac{6}{5} \mu F; C_E = \frac{8}{3} \mu F; C_F = 5 \mu F; C_G = \frac{10}{3} \mu F; C_H = \frac{3}{2} \mu F; C_I = 8 \mu F$

29) a) $U = 20V$; $W = 60 \mu J$ b) $C = 0,8 \mu F$; $U = Q / C = 7,5V$

c) $Q_1 = 2,25 \mu C$; $Q_2 = 3,75 \mu C$; $W_1 = 8,438 \mu J$; $W_2 = 14,063 \mu J$

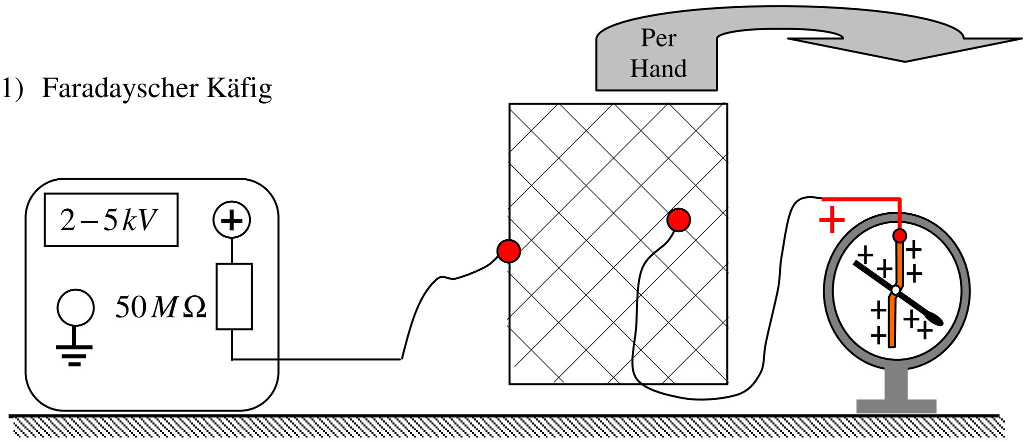
d) $W_1 + W_2 = 22,5 \mu J$, $37,5 \mu J$ gehen dem elektrischen Feld also verloren.

Diese Energie ist in dem Umladestrom enthalten, denn die Ladung schwingt so lange zwischen den beiden Kondensatoren hin und her, bis der Ohm'sche Widerstand der Leitungen die Schwingung abklingen lässt. Die verlorene Energie geht letztlich in Wärme über.

J) **Versuche**

10) Feldlinienbilder

11) Faradayscher Käfig



12) Arbeit am Kondensator
  a) Plattentrennung und das Gesetz $W = ½\, QU$
  b) „Ladung schaufeln“ und das Gesetz $W = QU$

13) Einbringen eines Dielektrikums

14) Zusammenschalten von Kondensatoren und Kapazitätsmessung