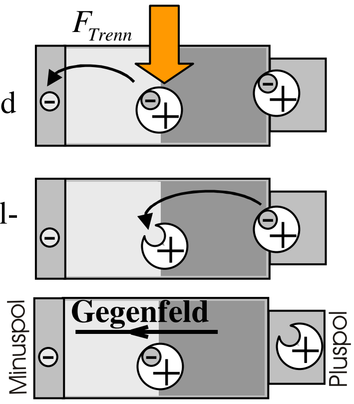
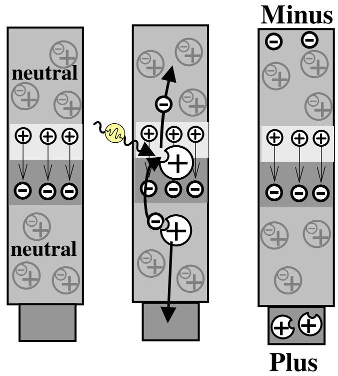
41) Spannungsquelle.



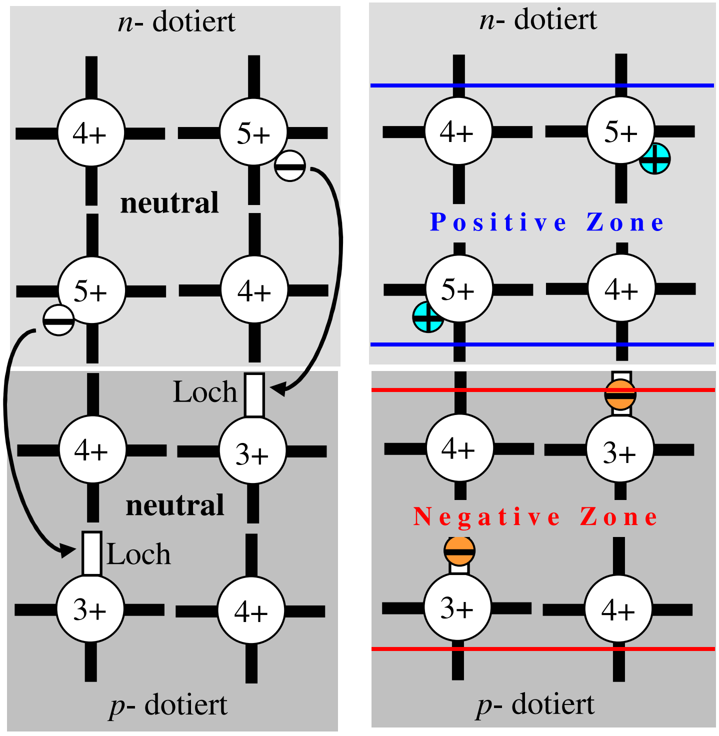
Eine Spannungsquelle ist eine Vorrichtung zur *Ladungstrennung* mittels äußerer Kraft (Trennkraft). Die Kraft kann *mechanisch* sein, wie bei der Influenzmaschine. Sie kann *chemisch* sein, wie bei Batterie und Akku. Sie kann *magnetisch* sein, wie beim Dynamo, bzw. großtechnisch beim Generator. Jedesmal trennt die äußere Kraft jeweils *ein* Elektron aus der äußeren Schale eines Atoms ab, sodass dort eine Fehlstelle zurückbleibt. Die Fehlstelle heißt „Loch". Durch eine Vorrichtung können die freigesetzten Elektronen in der Abb. nur nach links. Dort entsteht dann der Bereich des Elektronenüberschusses, also der <u>Minuspol</u>. Das Loch wird von einem Elektron eines Atoms auf der rechten Seite aufgefüllt. Dadurch entsteht dort der Bereich des Elektronenmangels, also der <u>Pluspol</u>. Zwischen den getrennten Ladungen baut sich schrittweise ein *Gegenfeld* auf. Die Ladungstrennung *endet*, wenn die Kraft des Gegenfeldes den Wert der Trennkraft erreicht hat. Deshalb besitzt jede Spannungsquelle, je nach verwendeter Trennkraft, einen festen Spannungswert, z.B. die Batteriezelle 1,5 Volt.

42) Die Solarzelle als Musterbeispiel einer Spannungsquelle



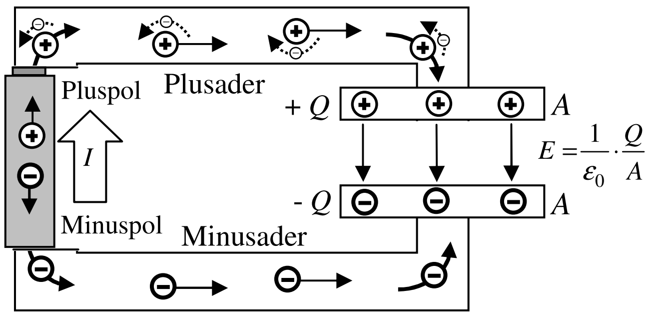
Die Solarzelle besteht aus einem Kristall, in dessen Mitte eine *Plus*-und *Minus*ladungs**kette** *fest* eingebauten sind. Das erreicht man durch <u>Dotierung</u> (siehe unten). Die Ladungsketten stellen die „Platten" eines *Kondensators* dar, zwischen denen ein elektrisches *Feld* besteht, während ober- und unterhalb *Feldfreiheit* herrscht. Werden die Kristallatome *zwischen* den Ketten mit Sonnenlicht bestrahlt, so löst jedes einzelne Lichtteilchen = Photon *ein* Elektron aus einem Atom heraus. Dadurch bleibt dort ein Loch zurück. Im Allgemeinen fällt das Elektron sofort wieder in sein Loch zurück. Doch durch die Feldkraft des Kondensators wird das abgelöste Elektron durch die Pluskette *hindurch* in den feldfreien Raum dahinter (in der Abb. nach oben) katapultiert, wo es liegen bleibt. Desweiteren zieht die Feldkraft ein Elektron aus einem Atom hinter der Minuskette (in der Abb. von unten) in das Loch. Durch weitere Lichteinstrahlung und Ladungstrennung entsteht letztlich oben der Minus- und unten der Pluspol.
Die elektrische **Spannung** zwischen den Polen der Solarzelle ergibt sich aus $U = W / Q$.
Nach dem „Eins-zu-Eins-Prinzip" löst jedes Photon genau *ein* Elektron aus. Deshalb gilt für die vom Photon bewegte Ladung $Q = e$. Die Größe der Energie W des Photons hat *Albert Einstein* ermittelt. Er erkannte, dass das Photon zwar einerseits ein echtes Teilchen ist, dass es aber andererseits als Elementarteilchen *keine wirkliche Identität* hat, weil es von den anderen Photonen des gleichen Lichtstromes, selbst wenn diese wegen Dunkelheit momentan garnicht vorhanden sind, nicht zu unterscheiden ist. Daher hat ein Photon einerseits die *individuellen* Teilcheneigenschaften *Masse* und *Impuls*, aber andererseits auch die *kollektive* Eigenschaft des gesamten Lichtstromes, nämlich die *Lichtfarbe*. Der Lichtstrom insgesamt ist eine elektromagnetische Welle und die Farbe des Lichtes entspricht der Wellen*frequenz*.
Einstein hat erkannt, dass die *Energie* das „Scharnier" zwischen den individuellen und kollektiven Eigenschaften ist. Die Energie des *einzelnen* Photons ist zur Farbfrequenz des *gesamten* Lichtstromes (aus welchem es stammt) proportional. Es gilt $W = h \cdot f$. Die Proportionalitätskonstante $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\,Js$ ist eine Naturkonstante, sie heißt „*Plancksches Wirkungsquantum*". Grünes Licht hat z.B. die Frequenz $f = 5{,}6 \cdot 10^{14}\,Hz$. Damit hat jedes einzelne Photon aus einem grünen Lichtstrahl die Energie $W = 3{,}7 \cdot 10^{-19}\,J$. Die mit grünem Licht bestrahlte Solarzelle liefert daher die Spannung $U = 3{,}7 \cdot 10^{-19}\,J / 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,C \approx \underline{\underline{2{,}3\,V}}$.

Wie wird der Kondensator in den Kristall eingebaut, wie entstehen die beiden Ladungsketten?



Der Kondensator im Kristall.
Man nimmt zwei Kristalle aus z.B. **4**-wertigem Silizium. Der eine Kristall wird *n*-dotiert, d.h., einige **Si**-Atome werden durch **5**-wertige **Ph**osphoratome ersetzt. Da aber nur vier Elektronen für die *Bindungen* gebraucht werden, ist jeweils *ein* Elektron *frei*. Der andere **Si**-Kristall wird *p*-dotiert, d.h., einige **Si**-Atome werden durch **3**-wertige **Bor-**Atome ersetzt. Da aber vier Bindungen *benötigt* werden, entsteht ein Bindungs*loch*. Da *neutrale* **Si**Atome einmal durch *neutrale* **Ph-** und das anderemal durch *neutrale* **B-**Atome ersetzt wurden, bleiben beide Kristallteile *neutral*. Nun werden die Teile *zusammengelegt*. Die freien Elektronen aus dem Grenzbereich des *n*-Kristalls wandern dann in die Löcher des Grenzbereiches des *p*-Kristalls. Dadurch *verliert* der *n*-Kristall Elektronen und erhält eine positive Grenzzone. Der *p*-Kristall nimmt Elektronen auf und erhält eine negative Grenzzone. Damit ist der Kondensator fertig.

43) Aufladen eines Kondensators.

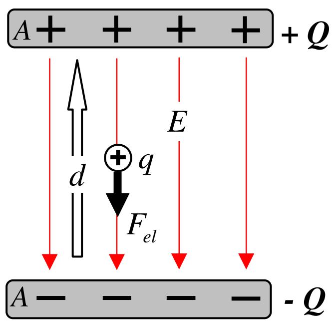


Die nichtangeschlossene Spannungsquelle lädt ihre Pole soweit auf, bis die Gegenkraft der getrennten Ladungen die Trennkraft der Spannungsquelle *kompensiert*.

Als „Kondensator“ bezeichnet man eine Anordnung von zwei einander gegenüberstehenden Metallplatten.

Werden die Platten nun über Zuleitungen (Adern) mit den Polen der Spannungsquelle verbunden, so verteilen sich die Elektronen auf der Minusseite und die Löcher auf der Plusseite durch ihre jeweils gegenseitige Abstoßung bis auf die Kondensatorplatten. Dadurch wird aber die Gegenkraft zwischen den Polen geringer als die Trennkraft der Spannungsquelle. Infolgedessen erfolgt *erneute* Ladungstrennung bis das Kräftegleichgewicht wieder hergestellt ist und überall der Spannungswert *U* der Spannungsquelle vorliegt. Die erneute Ladungstrennung entspricht dem Ladestrom *I*.

44) Spannung, Feldstärke und Kapazität am Kondensator.



In Abschnitt 33) wurde gezeigt, dass zwischen den mit $\pm Q$ geladenen Kondensatorplatten die Feldstärke $E = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{A}$ herrscht. Jetzt wird eine kleine Probeladung $+q$ in das Feld eingebracht. Sie erfährt die Kraft $F_{el} = q \cdot E$ nach unten in der Abb. Will man die Probeladung nun die gesamte Wegstrecke d *gegen* die Feldkraft von der unteren bis zur oberen Platte bewegen, so ist für die „kleine“ Ladung q die „kleine“ Arbeit $w = F_{el} \cdot d$ zu verrichten. Einsetzen ergibt $w = q \cdot E \cdot d$. Teilen durch q ergibt $w / q = E \cdot d$. Vom Expander-Sportgerät wissen wir aber, dass das Verhältnis von *Arbeit* zu *Ladung* stets gleich *Spannung* U ist, denn es ist egal, ob man ein oder drei Bänder auf die Wunschlänge bringt. Deshalb ergibt sich die wichtige Gleichung $\boxed{U = E \cdot d}$.

Einsetzen von $E = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{A}$ ergibt $U = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot d}{A}$. Umstellung nach Q ergibt $Q = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d} \cdot U$.

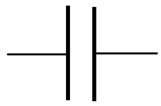
Die letzte Formel lässt folgendermaßen interpretieren:
Ordnet man zwei Platten des Flächeninhaltes A parallel zueinander im Abstand d an und verbindet diese Anordnung mit den Polen einer Spannungsquelle der Spannung U, so sorgt der Ladestrom dafür, dass die Ladungsmengen $\pm Q$ auf die Platten fließen.

Dabei gilt $Q = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d} \cdot U$. Weil der Ausdruck $C = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d}$ *nur* von der Geometrie der Plattenanordnung abhängt, nennt man ihn „Kapazität“ C. Damit gilt $Q = C \cdot U$. Die Umstellung $C = Q / U$ zeigt, dass die „Kapazität“ gleich dem Ladevermögen pro Spannung ist.

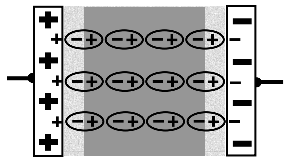
Beispiel: Laden sich die Platten bei $U = 20V$ mit $\pm Q = 5\,\mu C$ auf, so ist die Kapazität dieser Anordnung $C = 5\,\mu C / 20V = 2{,}5 \cdot 10^{-7}\, C/V$.

Kondensatoren sind Ladungsspeicher ohne Zeitverzögerung. Die Ladung folgt sofort der anliegenden Spannung. Deswegen sind Kondensatoren wesentliche Bauteile in jeder elektronischen Schaltung. Wegen ihrer Bedeutung erhält die Maßeinheit der Kapazität eine eigene Bezeichnung: Es gilt $\text{Coulomb} / \text{Volt} = \text{Farad}$ bzw. $C/V = F$. Der obige Kondensator hat also die Kapazität $C = 2{,}5 \cdot 10^{-7} F = 250 \cdot 10^{-9} F = 250\, nF$.

45) Das Schaltzeichen des Kondensator ist …..

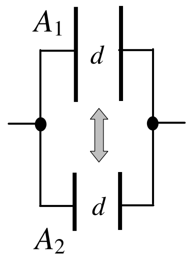


46) Dielektrikums zwischen den Kondensatorplatten



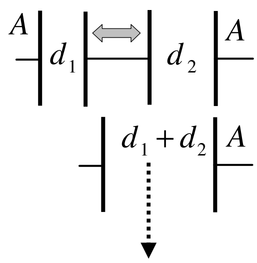
Isolatormaterial polarisiert sich im elektrischen Feld. Im Inneren hebt sich die Wirkung auf. An den Rändern bilden sich Ladungshäute, wodurch bei gleicher anliegender Spannung weitere Ladungen auf die Platten gezogen werden. Dadurch vergrößert sich das Verhältnis Q/U und somit die Kapazität. Der Vergrößerungsfaktor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

47) Parallelschaltung von Kondensatoren.



Zur Bestimmung der Gesamtkapazität zweier *parallel* geschalteter Kondensatoren betrachten wir einfachheitshalber beide Kondensatoren mit gleichem Plattenabstand d aber unterschiedlichen Plattengrößen. Man kann die beiden Plattenpaare dann gedanklich zusammenschieben und erhält *einen* Kondensator mit der Fläche $A = A_1 + A_2$. Für die Gesamtkapazität gilt dann $C_{\|} = \varepsilon_0 \cdot A / d = \varepsilon_0 \cdot (A_1 + A_2) / d$. Daraus folgt $\boxed{C_{\|} = C_1 + C_2}$

48) 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 $d = d_1 + d_2$. Es gilt (1) $C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d_1}$, (2) $C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d_1}$ und

(3) $C_{Reihe} = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d_1 + d_2}$. Aus (1) bzw. (2) folgt $d_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{C_1}$ bzw. $d_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{C_2}$. Einsetzen in (3) ergibt

$C_{Reihe} = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d_1 + d_2} = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{\varepsilon_0 \cdot A / C_1 + \varepsilon_0 \cdot A / C_2} = \frac{\cancel{\varepsilon_0 \cdot A}}{\cancel{\varepsilon_0 \cdot A} \cdot \left(1/C_1 + 1/C_2\right)}$. Also $\boxed{\frac{1}{C_{Reihe}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$

Aufgaben

1) Benenne, was man unter einer Spannungsquelle versteht.
2) Erkläre das Prinzip der Ladungstrennung in der Spannungsquelle.
3) Erkläre, warum die Ladungstrennung in einer nicht angeschlossenen Spannungsquelle nach einer (sehr) kurzen Zeit endet.
4) Erkläre, warum jede Spannungsquelle einen festen Spannungswert liefert.
5) Erläutere, warum die beiden Ladungsketten in einer Solarzelle ein „Mikrokondensator" sind.
6) Trifft ein (ausreichend energiereiches) Photon ein Atom, so erfolgt Ladungstrennung und Rekombination. Benenne, im welchem Raumbereich der Solarzelle die Rekombination ausbleibt.
7) Erkläre die Funktion des „Mikrokondensator" in der Solarzelle.
8) Ein Photon ist ein Lichtteilchen mit den individuellen Eigenschaften Masse und Impuls. Benenne, warum das Photon *auch* eine kollektive Eigenschaft des gesamten Lichtstromes besitzt, welchem es angehört. Welche Eigenschaft des Lichtstromes ist dies?
9) Wie lautet die Energieformel für ein einzelnes Photon.
10) Wie lässt sich daraus die Spannung U der Solarzelle ermitteln?
11) Stelle dar, wie durch Dotierung zweier Teilkristalle der „Mikrokondensator" konstruiert wird.
12) Ein Kondensator wird an eine Spannungsquelle angeschlossen. Erkläre, warum nach einer (sehr) kurzen Ladezeit zwischen den Kondensatorplatten dieselbe Spannung liegt, wie zwischen den Polen der Spannungsquelle.
13) Ein Kondensator sei mit $\pm Q$ geladenen und dann von der Spannungsquelle abgeklemmt. Den Spannungswert hat man versäumt aufzuschreiben.
    a) Überlege, warum die getrennten Ladungen auf den Platten verbleiben.
    b) Gib die Feldstärke zwischen den geladenen Platten an.
    c) Begründe, wieso man mithilfe einer Probeladung und mithilfe der Formel $U = E \cdot d$ die unbekannte Spannung U rechnerisch ermitteln kann.
    d) Da man die Spannung U aus der Ladung Q herleiten kann, kann man auch umgekehrt von U auf Q schließen.
    Erkläre in diesem Zusammenhang den Begriff der Kapazität eines Kondensators.
14) Erkläre und skizziere, wie das Einbringen eines Dielektrikums zwischen die Kondensatorplatten die Kapazität beeinflusst.
15) Der Kondensator eines Blitzgerätes hat $C = 0{,}5\,mF$. Wieviel Ladung speichert er bei $500V$?
16) Berechne die Plattengröße für einen Kondensator mit $C = 40\,pF$ und $d = 0{,}3\,mm$ unter Verwendung von Glimmer ($\varepsilon_r = 6$). Erkläre, wie das Dielektrikum die Kapazität beeinflusst.
17) An die Platten eines Kondensators mit $A = 0{,}25\,m^2$, $\varepsilon_r = 1$ und $d = 0{,}2\,mm$ wird eine Spannung von $U = 220V$ angelegt.
    a) Berechne die Kapazität C.
    b) Wieviel Ladung $\pm Q$ fließt auf?
    c) Wie groß ist die Feldstärke E zwischen den Platten?
    d) Wie muss der Plattenabstand d geändert werden, damit nur die halbe Ladung auffließt?
    e) Wie muss ε_r verändert werden, damit die doppelte Ladung auffließt.
18) Bei *Widerständen* gilt für Parallel- und Reihenschaltung $R_{Reihe} = R_1 + R_2$ und $\frac{1}{R_{\|}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.
    Vergleiche dies mit den entsprechenden Formeln beim Kondensator.
19) Zwei luftgefüllten Kondensatoren mit $d_1 = 2mm$, $A_1 = (8\,cm)^2$ und $d_2 = 1mm$, $A_2 = (6\,cm)^2$ werden einmal parallel und einmal in Reihe geschaltet. Berechne die Gesamtkapazitäten.
20) Der Plattenabstand d_2 von C_2 in Aufg. 19) wird so geändert, dass die Gesamtkapazität in Reihenschaltung anschließend $C = 10{,}2\,pF$ beträgt. Auf welchen Abstand d_2 wurden die Platten von C_2 eingestellt?