Disclaimer *Dies Dokument ist bei weitem noch nicht vollständig und soll vielmehr eine Anregung für alle sein, konstruktive Kritik zu üben (bitte an 9versley@...) oder selber Artikel hierfür zu schreiben, entweder in normalem ASCII-Text oder LaTeX, die Bilder am besten als EPS-Dateien.*

1 Das Ohmsche Gesetz

Das Verhältnis zwischen der angelegten Spannung (U) und dem fliessenden Strom (I) nennt man Widerstand. Er wird in Ohm (Ω) gemessen und wird meist mit dem Buchstaben R bezeichnet.

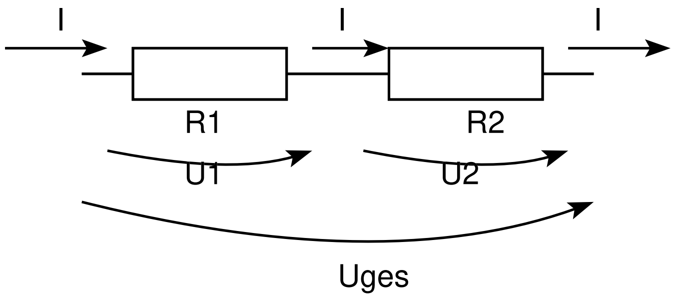
$$R = \frac{U}{I}$$

oder genauso

$$U = R \cdot I$$

2 Die Kirchhoffschen Regeln

2.1 Widerstände nebeneinander und hintereinander



Hat man in einer Schaltung zwei Widerstände in Reihe (hintereinander), so durchfliesst sie derselbe Strom. Die Spannung, die an ihnen anliegt, teilt sich auf die beiden Widerstände auf:

$$U_{ges} = U_1 + U_2$$

Deswegen kann man auch die Werte der einzelnen Widerstände zu einem gesamten Widerstand addieren:

$$R_{ges} = \frac{U_{ges}}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2$$

Hat man in einer Schaltung zwei Widerstände parallel (nebeneinander), so liegt an ihnen dieselbe Spannung an, und die Ströme teilen sich auf:

$$I_{ges} = I_1 + I_2$$

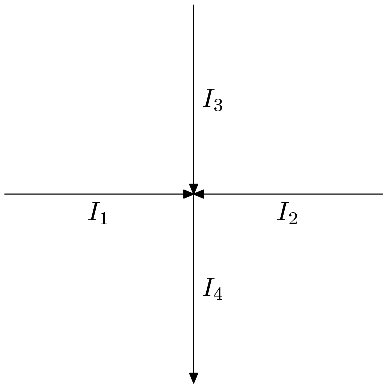
Für den gesamten Widerstand rechnet man:

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{I_{ges}}{U} = \frac{I_1 + I_2}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Oder, nach R_{ges} aufgelöst

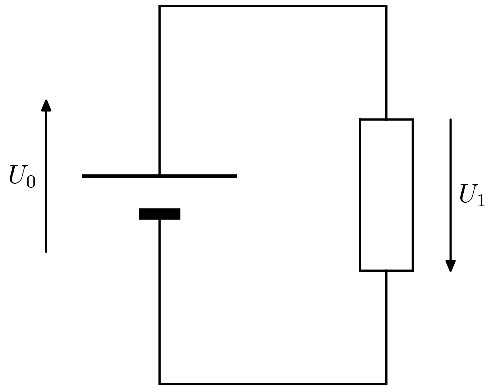
$$R_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

2.2 die Maschen- und Knotenregel



$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

Die Knotenregel Die Elektronen, die in ein Stück Draht (im Folgenden Knoten genannt) hineinkommen, müssen aus diesem Stück Draht auch wieder hinaus. Das heißt, die Summe der Ströme, die in einen Knoten hineingehen muss gleich der Summe der Ströme, die aus diesem Knoten herauskommen sein. Wenn man den Strömen, die hineingehen ein positives Vorzeichen gibt und denen, die herausgehen ein negatives Vorzeichen, so kann man das auch einfach so in eine Formel fassen, dass die Summe aller Ströme an diesem Knoten 0 sein muss.



Die Maschenregel

$$U_0 + U_1 = 0$$

Wenn man sich in einer Schaltung einen Weg denkt, der an demselben Punkt aufhört, an dem er anfängt, dann muss die Summe aller Spannungen auf diesem Weg gleich 0 sein.

3 Wechselspannung

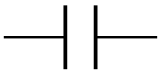
Wenn die Spannung nicht gleich bleibt, sondern sich periodisch ändert, so spricht man von einer Wechselspannung. Gibt man dabei nicht an, welche Form diese periodische Änderung hat, so meint man meist eine Funktion der Form

$$U(t) = U_0 * \cos(2\pi f \cdot t)$$

wobei f die Frequenz ist. U_0 nennt man dann die *Spitzenspannung*. Die Spannung, die man angibt, wenn man eine Wechselspannung beschreibt, ist allerdings die *effektive Spannung*. Sie ist abhängig von der Spannungsfunktion. Bei einer sinusförmigen Spannungsfunktion ist die Effektivspannung $U_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$.

Zuweilen findet man dann auch statt $2\pi f$ den Buchstaben ω (klein-Omega), der die *Kreisfrequenz* beschreibt, statt der „Umdrehungen pro Sekunde“ die „Radian pro Sekunde“ Manchmal benutzt man statt der Sinusfunktion auch die komplexe Exponentialfunktion $e^{2\pi f \cdot t \cdot i} = \cos(2\pi f \cdot t) + i \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$ und betrachtet dann nur den realen Anteil. (siehe unten)

4 Der Kondensator



Ein Kondensator speichert eine bestimmte Ladung. Diese Ladung ist proportional zur Spannung, die an ihm anliegt, d.h. wenn ein Kondensator bei $1V$ n Elektronen festhält, hält er, wenn man an ihn $2V$ anlegt, $2n$ Elektronen fest. Die Kennzahl, die angibt, wieviel Ladung (gemessen in Coulomb, 1 Ampere ist ein Coulomb pro Sekunde, wird meist mit dem Buchstaben Q bezeichnet) ein Kondensator pro Volt festhält, nennt man die *Kapazität* des Kondensators.

$$C = \frac{Q}{U} \Leftrightarrow U = \frac{Q}{C} \Leftrightarrow Q = U \cdot C$$

Der Strom, der durch den Kondensator fliesst, ist die Änderung der festgehaltenen Ladung. Wenn man ihn bekommen will, muss man die erste Ableitung der Funktion, die die Spannung beschreibt mit der Kapazität multiplizieren. (Wenn die Spannung gleichbleibt, fliesst einfach kein Strom durch den Kondensator).

$$I(t) = Q'(t) = U'(t) \cdot C$$

Hat man eine Wechselspannung mit $U(t) = e^{2\pi f \cdot t \cdot i}$, so kann man den Strom wie folgt bestimmen:

$$U'(t) = i \cdot 2\pi f \cdot e^{2\pi f \cdot t \cdot i} = i \cdot 2\pi f \cdot U(t)$$

und damit für den Strom I_c des Kondensators:

$$I_c(t) = U'(t) \cdot C = i \cdot 2\pi f \cdot U(t) \cdot c$$

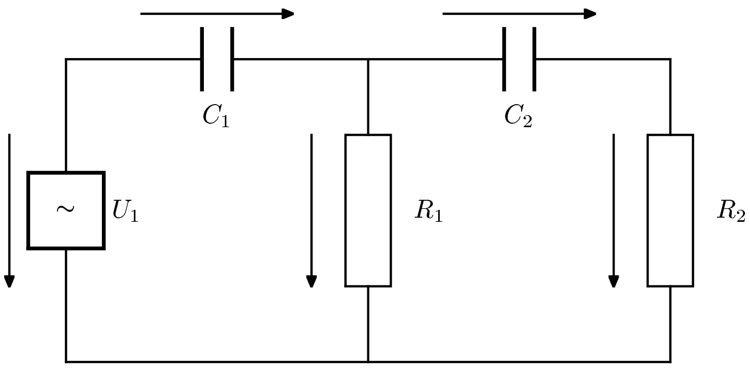
Man kann sogar den „Widerstand“ des Kondensators bestimmen:

$$X_c = \frac{U(t)}{I_c(t)} = \frac{U(t)}{2\pi f i U(t) \cdot C} = \frac{1}{2\pi f i \cdot C} = \frac{-i}{2\pi f C}$$

Dieser Widerstand ist nicht wirklich ein Widerstand im Sinne des Ohmschen Gesetzes, da der Strom nicht proportional zur jeweiligen Spannung ist, sondern um 90^o versetzt *TODO: schicken Funktionsgraphen von U und I.* Man spricht dann von *Impedanz*

Allerdings ist der Absolutwert des Widerstandes gleich dem Verhältnis zwischen effektiver Spannung und effektivem Strom. Man spricht hier von einem *Scheinwiderstand*. Wenn man ohmsche Widerstände und Kondensatoren in einer Schaltung hat, dann kann man Widerstände und (komplexe) Scheinwiderstände addieren und hat danach einen (komplexen) Widerstand. Das Argument (siehe M1-Skript) dieses Widerstandes nennt man φ; der Cosinus dieses Argumentes gibt das Verhältnis zwischen dem Strom, der in Phase mit der Spannung fliesst und dem gesamten fliessende Strom an.

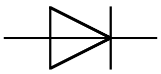
5 Ein Beispiel für die Kirchhoffschen Regeln



Nehmen wir einmal an, die Wechselspannungsquelle sei der Eingang unserer Schaltung und wir wollen die Impedanz, an dem sie liegt (man würde diese dann Eingangsimpedanz oder Eingangswiderstand nennen), errechnen. Diese ist (da wir Kondensatoren in unserer Schaltung haben) frequenzabhängig.

- Wir fangen nun ganz hinten an mit $X_{C2R2} = X_2 + R_2 = \frac{-i}{\omega C_2} + R_2$.
- Zu den beiden parallel liegt nun der Widerstand R_2: $X_{C2R2R1} = \frac{X_{C2R2}+R1}{X_{C2R2}\cdot R_1}$
- Schliesslich liegt dieser Zweig der Schaltung in Reihe mit C_1, so dass wir am Ende rechnen: $X_{Eingang} = X_{C2R2R2} + \frac{-i}{\omega C_1}$

6 Die Diode



Eine Diode ist (vereinfacht gesprochen) ein Bauteil, das den Strom nur in einer Richtung durchlässt. In der „falschen“ Richtung kommt gar kein Strom hindurch, in der „richtigen“ Richtung gibt es einen Spannungsabfall von etwa 0,7 V (ist von der Diodenart abhängig). *(TODO: Gleichrichter, Kapazität der Diode, Zener-Diode)*

7 Leiter, Halbleiter und Isolatoren

Dieser Abschnitt stammt von Michel Messerschmitt. Dank und Kritik an ihn unter 9messers@...

Materie aus elektrochemischer Sicht Jeder feste Stoff besteht aus einem Verbund von Atomen oder Molekülen. An den Verbindungen zwischen den Atomen (für Chemiker: wir betrachten hier nur Elektronenbindungen) sind nur die Valenzelektronen (also die Elektronen in der äußersten Schale) beteiligt. Normalerweise sind alle Valenzelektronen an irgendeiner Bindung beteiligt, so das keins „übrig“ ist. Der Stoff ist also elektrisch neutral (weder positiv noch negativ geladen). Legt man an einen Stoff (z.B. einen Kupferdraht) eine Spannung an, so kann es passieren, das einige Elektronen sich von ihren Atom lösen und in Richtung des Pluspols wandern (an dem ja ständig ein Elektronenmangel herrscht). Dadurch entstehen allerdings Löcher im Atomverband, an dem Elektronen fehlen - diese Löcher sind also positiv geladene Stellen. Und andere Elektronen versuchen dann natürlich die Lücke zu füllen und hinterlassen selber Löcher, ... Und siehe, es fließt ein Strom !!

Betrachtet man das ganze aus einer anderen Perspektive, kann man auch sagen, das sich die Valenzelektronen im elektrisch neutralen Zustand auf einem bestimmten Energieniveau, dem Valenzband, befinden. durch das Anlegen einer Spannung an den Leiter, oops zuviel verraten, an das Material wird Energie zugeführt, wodurch einige Elektronen auf ein höheres Energieniveau, das Leitungsband, gebracht werden, das ihnen erlaubt, sich vom Atom wegzubewegen. Band ist dabei nur ein anderer Begriff für Energieniveau, der deshalb Sinn macht, weil diese Bänder keine exakten Energiewerte sondern eher kleine Energie-Intervalle darstellen (z.B. 0 eV - 3 eV statt exakt 1,5 eV).

Und warum diese komische Sichtweise? Jetzt kann man die verschieden Stoffe nämlich ganz leicht einteilen:

- Bei den *Leitern* liegen Valenzband und Leitungsband ganz dicht zusammen oder überlappen sich sogar. Dadurch sind praktisch immer einige Elektronen im Leitungsband auch ohne das man viel tun muss. Legt man eine Spannung an, kann der Strom gleich fließen, dies nennt man auch Eigenleitfähigkeit.

- Bei den *Isolatoren hingegen* ist der Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband so hoch, das die Elektronen keine Möglichkeit haben in das Valenzband zu gelangen, es sei denn man wendet wahnsinnig viel Energie auf. Zum Beispiel ist Luft normalerweise ein Isolator (Luft an der Steckdose leitet zum Glück nicht). Ein Blitz, der immerhin ein paar Millionen Volt Spannung hat schafft es trotzdem Luft leitend zu machen, da er den Elektronen genug Energie liefert.

- Die *Halbleiter* hingegen liegen dazwischen. Da zwischen Valenzband und Leitungsband ein gewisser Abstand besteht sind sie erstmal nicht leitfähig. Allerdings benötigen sie auch nur sehr wenig Energie, um einige Elektronen ins Leitungsband zu bringen und somit leitend zu werden. In der Regel genügt bereits Zimmertemperatur (auch Wärme ist ja Energiezufuhr), um einen Halbleiter dazu zu bringen, Strom zu leiten. Allerdings ist die Eigenleitfähigkeit deutlich geringer als bei ëchtenLeitern (nein, nicht die zum drauf rumklettern!!!). Ach ja, an Halbleitern haben wir hauptsächlich Elemente der 4. Hauptgruppe des Periodensystems zur Auswahl, wie Silizium und Germanium.

Dotierung Da wir aber möglichst gut leitende Halbleiter haben wollen, versuchen wir also die Leitfähigkeit künstlich zu erhöhen. Da sich die Eigenleitfähigkeit nicht verändern läßt, die ist ja nun mal materialabhängig, versucht man stattdessen ein bißchen ßusätzlicheLeitfähigkeit zu schaffen. Somit wären wir beim Thema *Dotierung* angelangt. Dabei werden in den Halbleiterverbund einige andere Atome eingebracht, die mehr oder weniger Valenzelektronen als der Halbleiter selber besitzen. ACHTUNG: Das Material dann immer noch elektrische neutral (denn jedes Atom ist neutral), aber es gibt einige Elektronen zuviel oder zuwenig. Das bedeutet, daß entweder enige Elektronen nicht an den Bindungen zwischen den Elektronen beteiligt sind (sozusagen die Singles unter den Elektronen) oder im anderen Fall, daß es ein paar Bindungen zu wenig gibt, da bei den Fremdatomen hierfür die Elektronen fehlen (dadurch bricht das Material aber nicht gleich auseinander, da es ja sehr viele Atome gibt und nur einige wenige Bindungen fehlen). Durch diesen Überschuß bzw. Mangel an Elektronen erhöht sich jetzt die Leitfähigkeit. Dieses mehr an Leitfähigkeit nennt man auch Störstellenleitfähigkeit.

Haben wir als Halbleiter zum Beispiel Silizium (Si, 4 Valenzelektronen) und streuen da ein paar Antimon-Atome (Sb, 5 Valenzelektronen) rein, dann haben wir also einige Elektronen zuviel (eins pro Antimon-Atom). Da diese zusätzlichen Elektronen sich bei Zimmertemperatur meistens im Leitungsband aufhalten, steigt dadurch die Leitfähigkeit. Insgesamt haben wir also einige negative Ladungen (die Elektronen) mehr im Leitungsband, deshalb sprich man auch von n-dotierten Halbleitern (n wie negativ). WICHTIG: Dies heißt nicht, daß der Halbleiter jetzt negativ geladen ist (der ist immer noch elektrisch neutral). Außerdem heißt das, daß es mehr Elektronen als Löcher gibt, deshalb nennt man bei n-Halbleitern die Elektronen auch Majoritätsträger und die Löcher Minoritätsträger.

Bei p-dotierten Halbleitern (p wie positiv) ist es genau umgekehrt, hier sind Atome mit 3 Valenzelektronen, z.B. Indium (In) in das Silizium reingemischt worden, so daß ein paar Elektronen fehlen. Oder anders ausgedrückt: Wir haben ein paar Löcher übrig. Den genauso wie man Elektronen als negative Ladungsträger ansehen kann, kann man auch die Löcher (die Stellen, wo Elektronen für die Atom-Bindungen fehlen) als positive Ladungsträger ansehen(ich finde es zwar etwas krank, Löcher als Ladungsträger aufzufassen, aber so ist das nun mal). Also haben wir ein paar positive Ladungsträger mehr im Leitungsband und die Leitfähigkeit steigt ebenfalls. Diesmal sind die Löcher die Majoritätsträger und die Elektronen die Minoritätsträger. Die Leitfähigkeit steigt hierbei übrigens dadurch, daß die Valenzelektronen nicht mehr bis zum Leitungsband hoch müssen, sondern nur zu dem niedrigeren Band der zusätzlichen Löcher.

erstellt von Michel Messerschmidt, 27.4.2000 Kommentare, Ergänzungen, Fehler, ... mailto:9messers@informatik.uni-hamburg.de

8 pn-Übergang, Dioden

Dieser Abschnitt stammt von Michel Messerschmitt, vielen Dank an ihn

Dioden selbstgebastelt So jetzt spielen wir ein bißchen Lego und verbinden einen p-Halbleiter und einen n-Halbleiter miteinander, und schon haben wir den pn-Übergang. Interessant ist vor allem die Grenzschicht, wo der p-Halbleiter und der n-Halbleiter aneinanderstossen. Zwar ist das ganze elektrisch immer noch neutral, aber aus der Sichtweise eines vollständigen Atomverbunds sind auf der einen Seite einige Elektronen übrig (n-Halbleiter), die an keiner Bindung teilnehmen und auf der anderen warten ein paar Löcher (p-Halbleiter), so das dort Bindungen fehlen.

Da jeder der beiden Halbleiter einen möglichst perfekten Atomverbund haben möchte, in dem keine Bindungen fehlen, beginnen die Elektronen und Löcher jeweils in das andere Material zu wandern, um dort fehlende Bindungen aufzubauen, bzw. überzählige Elektronen zu neutralisieren, so daß der den Atomverbund vervollständigt wird. Also wandern negative Ladungen (Elektronen) vom n-Halbleiter in den p-Halbleiter und positive Ladungen (Löcher) vom p-Halbleiter in den n-Halbleiter.

Da das ganze vorher elektrisch neutral war und jetzt Ladungen wandern, entsteht also eine Ladungsverteilung: Der p-Halbleiter wird negativ (!) geladen, da hier Elektronen hinzukommen, und der n-Halbleiter wird positiv geladen.

Spannungen in der Diode Und wenn man so eine Ladungsverteilung hat, dann heißt das, daß zwischen den beiden Halbleitern eine Spannung entsteht. (wer's genau wissen will: jede Ladung entspricht einem elektrischen Potential; das des p-Halbleiters ist negativ und das des n-Halbleiters ist positiv, also haben wir eine Potentialdifferenz, eine Potentialdifferenz ist aber eine Spannung) Diese Spannung nennt man Diffusionsspannung, da die Elektronen und Löcher ja in den jeweils anderen Halbleiter diffundieren (wenn man nicht ständig „wandern" sagen will). Je mehr Elektronen und Löcher also über die Grenze wandern, um den Atomverbund zu vervollständigen, desto größer wird die Diffusionsspannung zwischen den beiden Halbleitern (da dadurch ja die Ladungen auf beiden Seite zunehmen).

Was passiert aber, wenn an irgendeinen Leiter eine Spannung angelegt wird ? Durch die Spannung wirkt eine Kraft auf die Ladungsträger, die diese dazu bringt, die Ladungsunterschiede auszugleichen. Jetzt wird es etwas verdreht, denn das geschieht auch bei unserem pn-Übergang. Das heißt, das als Folge der Diffusionsspannung eine Kraft auf die Elektronen wirkt, die diese wieder zurück in den n-Halbleiter treibt. Allerdings sind die Elektronen dort schon an Bindungen zwischen den Atomen beteiligt und diese Bindungen sind viel stärker als die elektrische Kraft. Somit bleiben die Elektronen, die schon im p-Halbleiter angekommen sind auch dort, aber Elektronen, die noch auf dem Weg sind, werden langsamer und bleiben bei höherer Spannung ganz im n-Halbleiter (für Löcher gilt das ganze in die andere Richtung).

Also wirkt die Diffusionsspannung genau dem Betreben der Elektronen und Löcher entgegen, den Atomverbund zu vervollständigen, was bewirkt, das sich die beiden Halbleiter immer langsamer aufladen und irgendwann keine weitere aufladung stattfindet, da die Diffusionsspannung keine weiteren Elektronen oder Löcher „herüberlässt".

Damit das etwas verständlicher wird, schauen wir uns mal den zeitlichen Ablauf an: Wenn ein p-Halbleiter und ein n-Halbleiter miteinander in Kontakt gebracht werden, lädt sich der p-Halbleiter negativ und der n-Halbleiter positiv auf, da sie ihre Bindungselektronen vervollständigen wollen. Durch die dabei entstehende Diffusionsspannnung wird das Aufladen der beiden Halbleiter immer schwächer bis es zum Stillstand kommt. In diesem Gleichgewicht ist das Bestreben der Ladungsträger, den Atomverbund zu vervollständigen genau gleich so groß wie die Diffusionsspannung, die von den unterschiedlich geladenen Halbleitern erzeugt wird. Den Rest seiner Lebenszeit verbringt der pn-Übergang in diesem Gleichgewichtszustand, wenn er nicht von außen gestört wird.

Was lernen wir daraus?

- In einem pn-Übergang herrscht immer eine Spannung, nämlich die Diffusionsspannung !!!
- Der n-Halbleiter ist positiv geladen und der p-Halbleiter ist negativ geladen.

Interessant ($\Leftrightarrow$ komplizierter) wird es aber, wenn wir an den pn-Übergang eine Spannung anlegen. Dann haben wir nämlich eine *Diode*. Eine Diode ist eigentlich ein recht einfaches Bauteil. Man legt eine Spannung an, und es gibt zwei Möglichkeiten: entweder läßt die Diode den Strom durch oder nicht.

Untersuchen wir das mal genauer:

- Legen wir den Minuspol an den p-Halbleiter (negativ geladen) und den Pluspol an den n-Halbleiter (positiv geladen), so verstärkt die äußere Spannnung die Diffusionspannung und abgesehen von einer stärkeren Kraft auf die Elektronen tut sich nichts - die Diode sperrt den Strom. Ganz genau betrachtet passiert folgendes: Die Elektronen im p-Halbleiter sind ja fest gebunden und rühren sich daher nicht, egal wie groß die Kraft ist (naja, mit großen Spannungen kann man auch Elektronen aus den Bindungen lösen, das nennt man dann Durchbruch, weil dann doch ein Strom fließt und die Diode Schrott ist). Und die Elektronen im n-Halbleiter bewegen sich in Richtung Pluspol der Spannungsquelle, entfernen sich also von der Grenzschicht. Ebenso entfernen sich die Löcher im p-Leiter von der Grenzschicht (die zieht's zu mminuspol der Spannungsquelle) und somit bleibt niemand übrig, der für einen Strom über die Grenzschicht hinweg sorgen könnte.

- Legen wir nun den Minuspol an den n-Halbleiter und den Pluspol an den p-Halbleiter, so können wir einen netten Strom vom Plus- zum Minuspol beobachten, wenn die angelegt Spannung größer als die Diffusionsspannung ist. Warum ? Da die äußere Spannung entgegengesetzt der Diffusionsspannung wirkt (der Minuspol liegt am positiv geladenen n-Halbleiter!), wird die Diffusionsspannung von der äußeren Spannung neutralisiert. Also hindert auch nichts mehr die Elektronen daran in Richtung p-Halbleiter und weiter Richtung Pluspol zu wandern (und umgekehrt für die Löcher). Und da vom Minuspol genug Elektronen wieder zum n-Halbleiter gelangen, gibt es auch keine Nachschubprobleme und der Strom kommt ins fliessen.