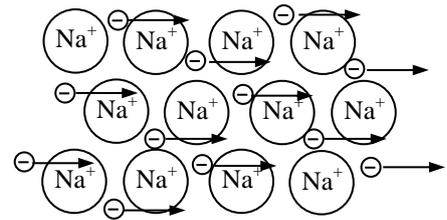


## 3.2. Gleichstromkreise

### 3.2.1. Ladungstransport in Materie

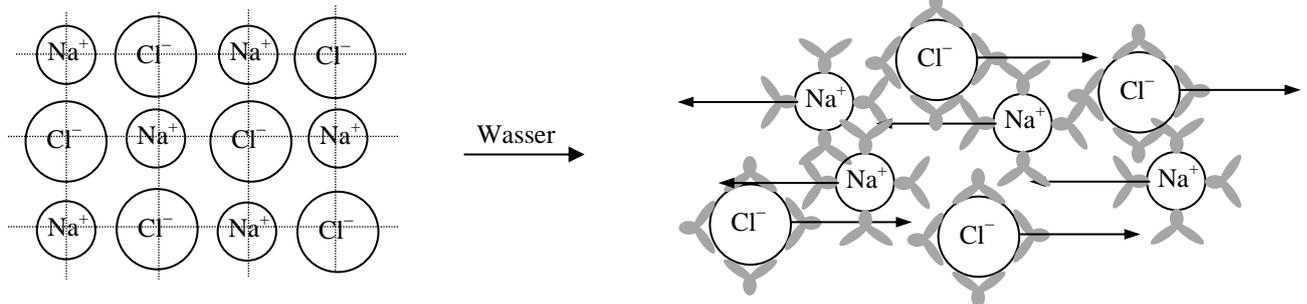
#### 3.2.1.1. Ladungstransport in Metallen

In einem **Metall** werden die positiv geladenen Metallkationen durch **elektrische Anziehung** durch das Elektronengas aus frei beweglichen negativ geladenen Elektronen zusammengehalten. Da das Elektronengas fließen kann, **leiten** Metalle den elektrischen Strom.



#### 3.2.1.2. Ladungstransport in Salzen

In **Salzen** (dazu gehören chemisch gesehen alle Steine und Mineralien) bilden positive Metallkationen und negative Nichtmetallanionen ein durch elektrische Anziehung zusammengehaltenes **Kristallgitter**. Beispiel Kochsalz Natriumchlorid  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ . Da alle Ionen fest auf ihren Gitterplätzen sitzen, sind Salze im festen Zustand **Nichtleiter (Isolatoren)**.



Salze lösen sich in **Wasser**, weil die Wassermoleküle ebenfalls **elektrische Teilladungen** besitzen, mit denen sie die Ionen aus ihrem Gitter reißen und forttragen können. Infolge der frei beweglichen Ionen **leiten Salzlösungen** ebenfalls den elektrischen Strom. Die **elektrische Reizleitung** von **Nervenimpulsen** in Gehirn und Nervensystem benötigt daher eine ausreichende Konzentration von Natrium- und Kaliumionen in Nervenzellen und Gewebeflüssigkeit. Das Gewicht von **Batterien** beruht ebenfalls zum größten Teil auf der **Salzlösung**, die für den **Ladungstransport** innerhalb der Batterie notwendig ist.

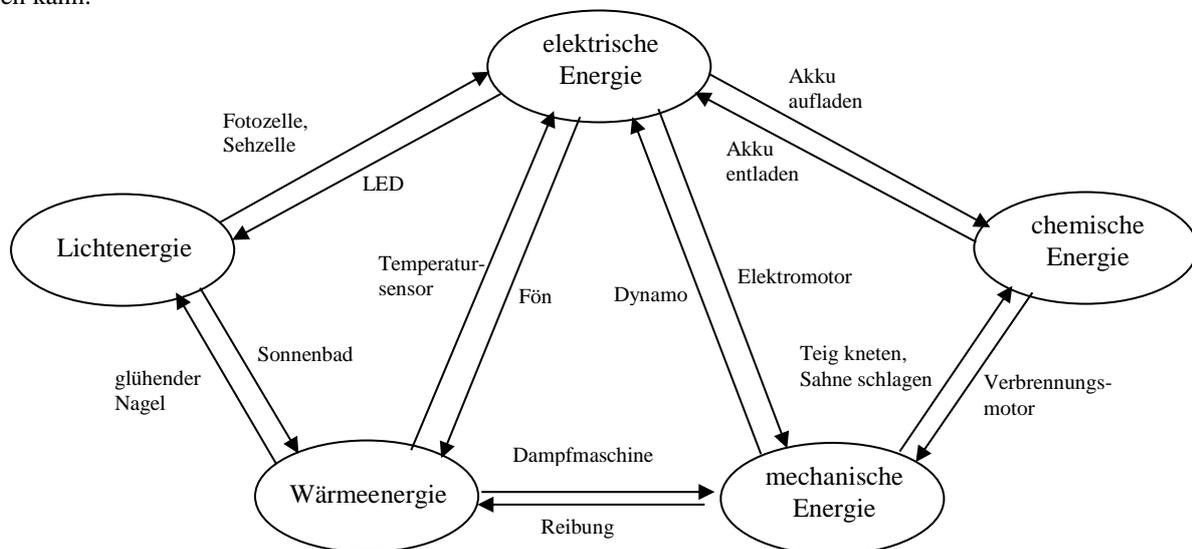
Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 1

### 3.2.2. Die Stromstärke

Die **elektrische Stromstärke I (Intensity)** =  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  = **transportierte Ladung pro Zeit** hat die Einheit **Ampère A** =  $\frac{\text{C}}{\text{s}}$  (*André*

*Marie Ampère 1775 – 1836*). Im **SI-System** ist das Ampère eine **Basiseinheit** und das Coulomb  $\text{C} = \text{A} \cdot \text{s}$  die davon abgeleitete Einheit. Man misst die Stromstärke mit einem **Ampèremeter**, welches die elektrische Energie des Stroms in Bewegungs- oder Lichtenergie der Anzeige umwandelt.

Elektrische Ströme transportieren **elektrische Energie**, die auf vielfältige Weise in andere Energieformen umgewandelt werden kann:



Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 2

### 3.2.3. Die Spannung

Elektrische Energie in Form von **getrennten Ladungen** wird in **Kondensatoren** gespeichert. Die gespeicherte **elektrische Arbeit**  $\Delta W = U \cdot \Delta Q$  ist proportional zur gespeicherten **Ladungsmenge**  $\Delta Q$ . Der Proportionalitätsfaktor ist die

$$\text{Spannung } U = \frac{\Delta W}{\Delta Q} = \text{Arbeitsvermögen pro Ladung.}$$

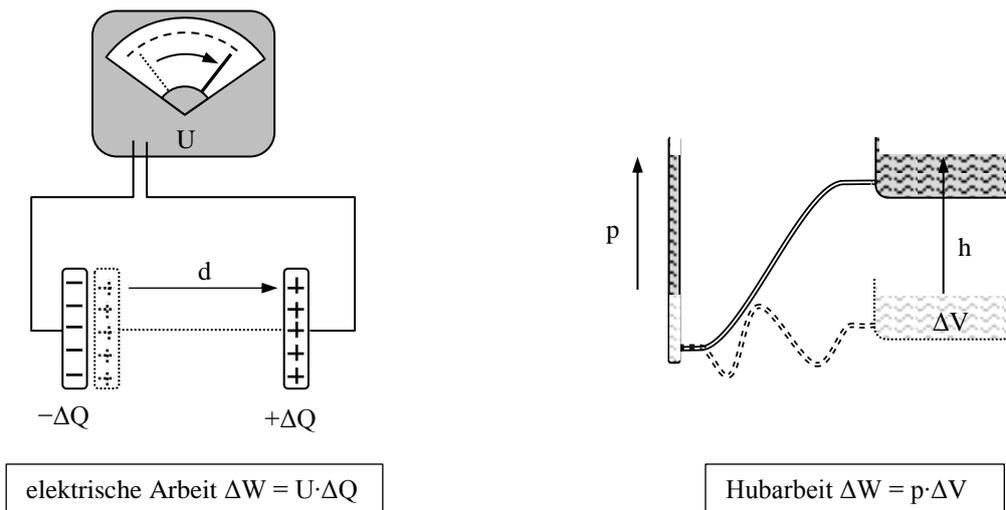
Die Spannung wird in der SI-Einheit **Volt V** angegeben und mit einem **Voltmeter** gemessen. Ein Voltmeter ist in Wirklichkeit nur ein **Ampèremeter mit sehr großem Innenwiderstand und angepasster Skala**. Es nutzt die Tatsache, dass die elektrische Arbeit des abfließenden Stromes proportional zum gespeicherten Arbeitsvermögen, d.h. zur Spannung ist.

Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 3

### 3.2.4. Die elektrische Arbeit

Die Spannung bzw. das Arbeitsvermögen der Ladung erhöht sich, wenn man die Platten eines Kondensators gegen ihre elektrische Anziehungskraft auseinanderzieht und dabei **Arbeit an der Ladung** verrichtet. Die Steigerung der **Spannung U** durch Auseinanderziehen der **Ladungen**  $\pm \Delta Q$  gegen die **Coulomb-Kraft** entspricht der Steigerung des hydrostatischen **Druckes**  $p = \rho \cdot g \cdot h$  durch Anheben bzw. Hochpumpen des **Volumens**  $\Delta V$  einer Flüssigkeit mit der Dichte  $\rho$  gegen die **Gravitationskraft**.

Die **gespeicherte Hubarbeit**  $E_{\text{pot}} = \Delta m \cdot g \cdot h = \rho \cdot \Delta V \cdot g \cdot h = p \cdot \Delta V$  entspricht der **gespeicherten elektrischen Arbeit**  $\Delta W = U \cdot \Delta V$  mit der **Spannung U** als (**Ladungs**)**druck**  $p$  und der **Ladung**  $\Delta Q$  als (**Ladungs**)**volumen**  $\Delta V$ :



Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 4

### 3.2.5. Die elektrische Leistung

Die **elektrische Leistung P** (*Power*) ist definiert als **geleistete Arbeit**  $\Delta W$  **pro Zeitabschnitt**  $\Delta t$  und berechnet sich zu

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{U \cdot \Delta Q}{\Delta t} = U \cdot I$$

$$\text{Leistung} = \text{Spannung mal Stromstärke}$$

Ihre **SI-Einheit** ist das **Watt W**  $= \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{V} \cdot \text{A}$ . Die **elektrische Arbeit** wird häufig in  $\text{J} = \text{W} \cdot \text{s}$  (**Wattsekunden**) oder noch häufiger in **KWh (Kilowattstunden)** angegeben.

Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 5

### 3.2.6. Der Widerstand

Bei den meisten Stoffen ist der hindurchfließende Strom  $I$  proportional zur angelegten Spannung  $U$ . Der Proportionalitätsfaktor ist der

$$\text{ohmsche Widerstand } R = \frac{U}{I} \text{ (Resistance)}$$

mit der Einheit  $\text{Ohm } \Omega = \frac{\text{V}}{\text{A}}$  (Georg Simon Ohm 1789 - 1854).

Der Kehrwert  $\frac{1}{R}$  des Widerstandes ist der **Leitwert**.

Je kleiner die **Dichte und Beweglichkeit der Ladungsträger**, je schmaler der zu überwindende **Querschnitt** und je größer die zurückzulegende **Strecke** ist, desto kleiner ist der Leitwert und desto größer ist der Widerstand dieser Strecke:

Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 6



Leiter ist leer, lang, dünn  
 $\Rightarrow U$  groß,  $I$  klein  $\Rightarrow R$  groß



Leiter ist voll, kurz, dick  
 $\Rightarrow U$  klein,  $I$  groß  $\Rightarrow R$  klein

### 3.2.7. Der Stromkreis

Ein gleichmäßiger Strom kann nur fließen, wenn

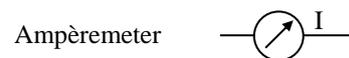
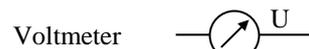
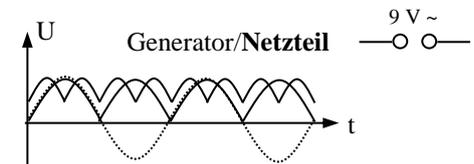
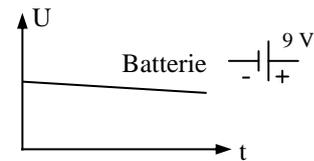
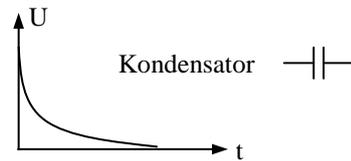
1. ein **geschlossener Stromkreis** vorliegt, denn ansonsten würden sich die Ladungsträger am Ende der Leitung **aufstauen**.
2. eine **Spannungsversorgung** angeschlossen ist, die die Ladungsträger dauerhaft in Bewegung setzt.

Ein **Kondensator** liefert keine Gleichspannung, weil die Spannung beim Entladen schnell abfällt.

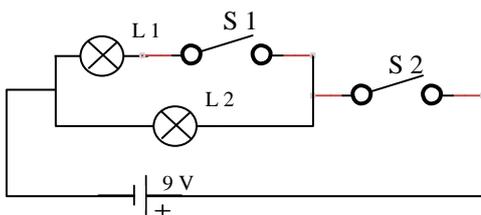
Gut geeignet sind **Batterien**, welche mittels einer langsam ablaufenden **Redoxreaktion** über lange Zeit sehr konstante Spannungen liefern können.

**Netzgeräte** sind sehr praktisch, weil man sie einfach an das Stromnetz anschließen kann. Dieses liefert aber infolge der **Drehbewegung der Generatoren** im Kraftwerk eine **Wechselspannung**, bei der sich die Stromrichtung ständig umkehrt. Diese Wechselspannung wird im Netzgerät nur unvollkommen **gleichgerichtet und geglättet**.

Die Bewegung der Ladungsträger wird durch die **Widerstände** sowohl der Spannungsversorgung selbst als auch der **Verbraucher** gebremst. Verbraucher können **Elektromotoren, Heizungen, Akkulader** oder **Leuchtelemente** sein. Zum Aufbau von Stromkreisen verwendet man **Schaltzskizzen** mit den nebenstehenden **Schaltensymbolen**.



Beispiel für eine logische Schaltung mit Schalttabelle:



S 1	S 2	L 1	L 2
an	an	an	an
an	aus	aus	aus
aus	an	aus	an
aus	aus	aus	aus

Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 7 - 11

### 3.2.8. Die Reihenschaltung

Die Spannungen addieren sich:

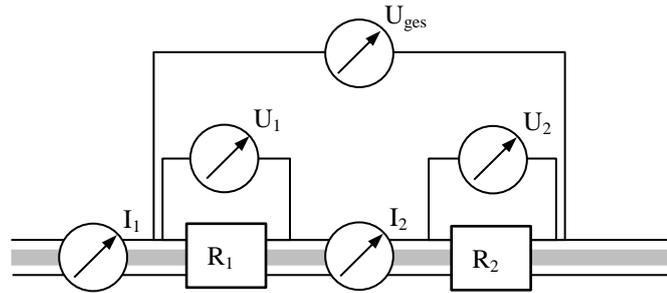
$$U_1 + U_2 = U_{\text{ges}}$$

Die Ströme sind in beiden Abschnitten gleich:

$$I_1 = I_2 = I_{\text{ges}}$$

Die Widerstände addieren sich:

$$\Rightarrow \frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_{\text{ges}}}{I_{\text{ges}}} \Rightarrow \mathbf{R_1 + R_2 = R_{\text{ges}}}$$



Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 12 - 14

### 3.2.9. Die Parallelschaltung

Die Ströme addieren sich:

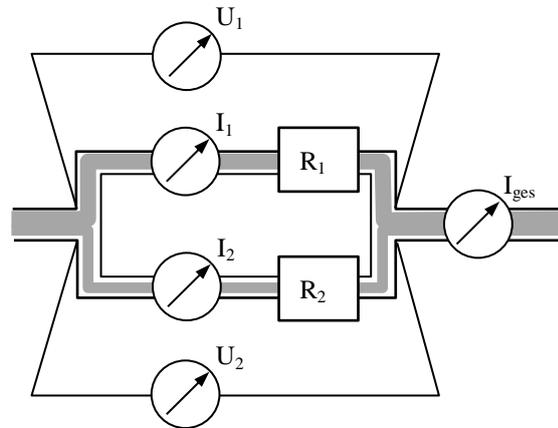
$$I_1 + I_2 = I_{\text{ges}}$$

Die Spannungen sind in beiden Zweigen gleich:

$$U_1 = U_2 = U_{\text{ges}}$$

Die Leitwerte addieren sich:

$$\Rightarrow \frac{I_1}{U_1} + \frac{I_2}{U_2} = \frac{I_{\text{ges}}}{U_{\text{ges}}} \Rightarrow \mathbf{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{\text{ges}}}}$$

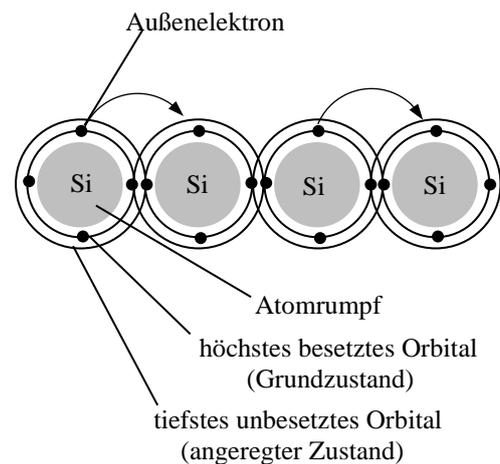


Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 15 - 18

### 3.2.10. Halbleiter

#### 3.2.10.1. Silizium-Halbleiter

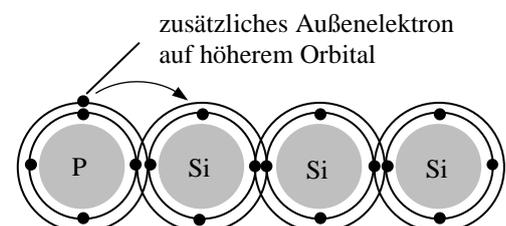
Halbleiter wie **Silizium**  $_{14}\text{Si}$  stehen in der Diagonale des Periodensystems zwischen Metallen und Nichtmetallen. Sie bilden **Atomgitter**, in denen die Bindungselektronen der Elektronenpaarbindungen in festen **Molekülorbitalen** lokalisiert sind. Die stabilste Modifikation des Siliziums z.B. hat die **Diamantstruktur**, welche auch in Quarz  $\text{SiO}_2$  und Eis  $\text{H}_2\text{O}$  auftritt. Der Metallcharakter äußert sich darin, dass die (sowohl bindenden als auch nichtbindenden) Außenelektronen nur noch schwach an den Atomrumpf gebunden sind und **bei Anregung durch Wärme oder Licht in ein freies Orbital des eigenen oder benachbarten Atoms** springen können. Im zweiten Fall findet ein **Ladungstransport** statt: Daher wird die sehr schwache Leitfähigkeit des Silicium durch Wärme oder Licht erhöht, worauf die Funktion von **Wärme- oder Fotosensoren** beruht.



#### 3.2.10.2. Dotierte Halbleiter

Reines Silizium hat ähnlich wie destilliertes Wasser nur eine sehr geringe Leitfähigkeit, die aber bei kleinsten Verunreinigungen sprunghaft ansteigt. Die kontrollierte Zugabe von Fremdatomen zur Verbesserung der Leitfähigkeit heißt **Dotierung**.

Bei der **n-(negativ)-Dotierung** werden wenige Atome mit zusätzlichen Außenelektronen wie z.B. **Phosphor**  $_{15}\text{P}$  in das Gitter eingebaut. Die überschüssigen Außenelektronen besetzen energetisch



höherliegende Orbitale und lassen sich **ohne Anregung** leichter verschieben als die Außenelektronen der Si-Atome.

Bei der **p-(positiv)-Dotierung** werden Atome mit weniger Außenelektronen wie z.B. **Aluminium**  $_{13}\text{Al}$  in das Gitter verwendet. Sie haben **Lücken** in den höchsten besetzten Orbitalen, die von den Außenelektronen der benachbarten Si-Atome **ohne Anregung** leicht besetzt werden können.

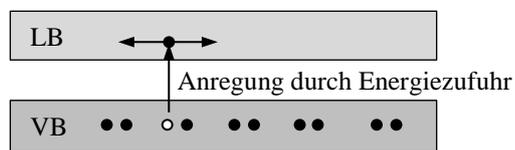
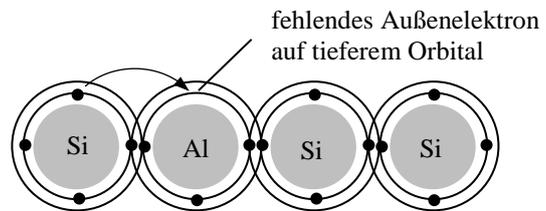
In beiden Fällen wird die Leitfähigkeit je nach Konzentration der Fremdatome stark erhöht. Um die **Gitterstruktur** nicht zu sehr zu stören, kann nur eine **geringe Konzentration** von Fremdatomen eingebaut werden, so dass die Leitfähigkeit immer deutlich unter derjenigen der Metalle liegt.

### 3.2.10.3. Bändermodell

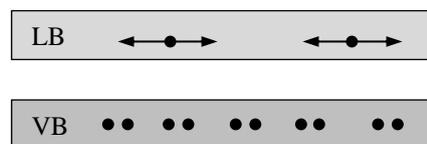
Die Atomorbitale eines Si-Atoms überlappen nicht nur mit ihren unmittelbaren vier Nachbarn, sondern bei genauerer Betrachtung auch mit weiter entfernt liegenden Atomen zu vielen eng beieinander liegenden Energiezuständen, dem **Valenzband (VB)** des Kristalls.

Im Grundzustand bzw. ohne Energiezufuhr befinden sich die Elektronen in diesem Valenzband und sind an ein Atom gebunden.

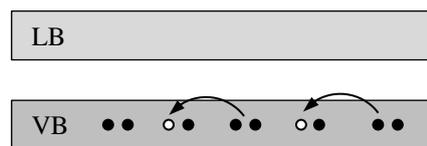
Bei Energiezufuhr springen sie in unbesetzte, energetisch höherliegende Orbitale, die zum **Leiterband (LB)** überlappen und freie Bewegung ermöglichen.



undotierter Si-Halbleiter



n-dotierter Halbleiter



p-dotierter Halbleiter

**Der Ladungstransport erfolgt bei n-Dotierung durch Elektronen im Leiterband und bei p-Dotierung durch Löcher im Valenzband**

Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 19 a) – d)

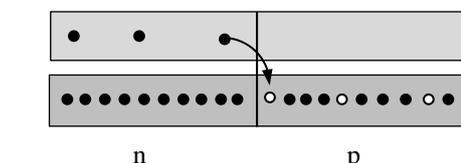
## 3.2.11. Dioden

### 3.2.11.1. Aufbau

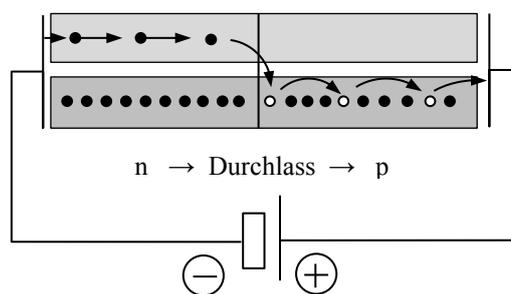
Kombiniert man einen n-Halbleiter mit einem p-Halbleiter, so „fallen“ die leitenden Elektronen des n-Leiterbandes in die Löcher des benachbarten p-Valenzbandes. In der „verarmten“ **Grenzschicht** ist dann kein Ladungstransport möglich.

### 3.2.11.2. Durchlass

Liefert man von der n-Seite die fehlenden Elektronen im Leiterband nach und saugt auf der p-Seite die überschüssigen Elektronen aus den Löchern des Valenzbandes ab, so verbessert sich die Leitfähigkeit schlagartig: **Die Diode lässt den Strom durch.**



n p

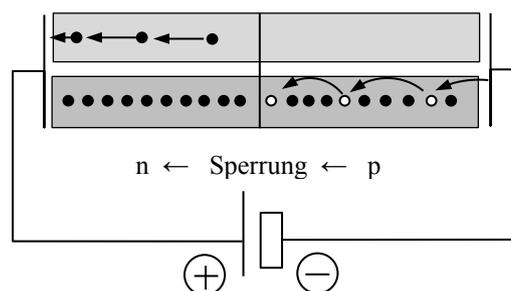


n → Durchlass → p

### 3.2.11.3. Sperrung

Bei umgekehrter Polung werden auf der n-Seite noch mehr Elektronen abgesaugt und auf der p-Seite noch mehr Löcher verstopft: Die Grenzschicht verarmt immer mehr und die Leitfähigkeit sinkt: **Die Diode sperrt den Strom.**

Eine solche **Diode** aus einem p- und einem n-dotierten Halbleiter wirkt als **Stromventil**: In n-p-Richtung werden Elektronen durchgelassen, in p-n-Richtung werden sie aufgehalten.

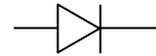


n ← Sperrung ← p

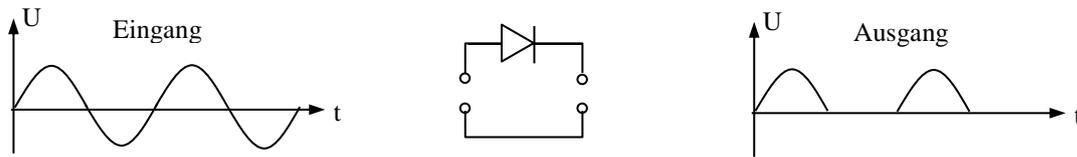
Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 19 e) und f)

### 3.2.11.4. Gleichrichterschaltung

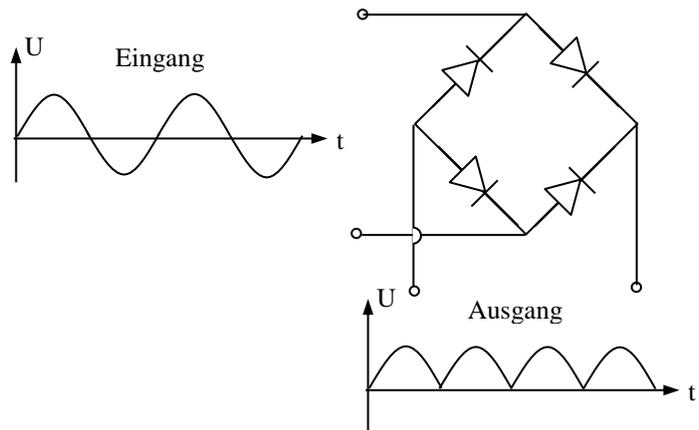
Das **Schaltzeichen** der Diode ist ein **Pfeil in Durchlassrichtung der technischen Stromrichtung**:



Schaltet man eine einfache Diode zwischen die Pole einer Wechselspannung, so werden die positiven Halbperioden durchgelassen und die negativen Halbperioden gesperrt:



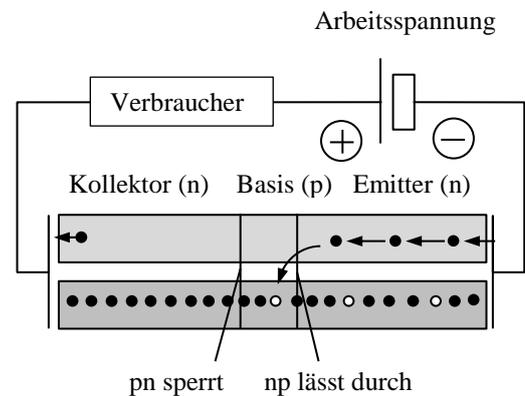
Um auch die negativen Halbperioden nutzen zu können, müssen sie mit der nebenstehenden **Gleichrichterschaltung** zum Gegenpol umgeleitet werden:



### 3.2.12. Transistoren

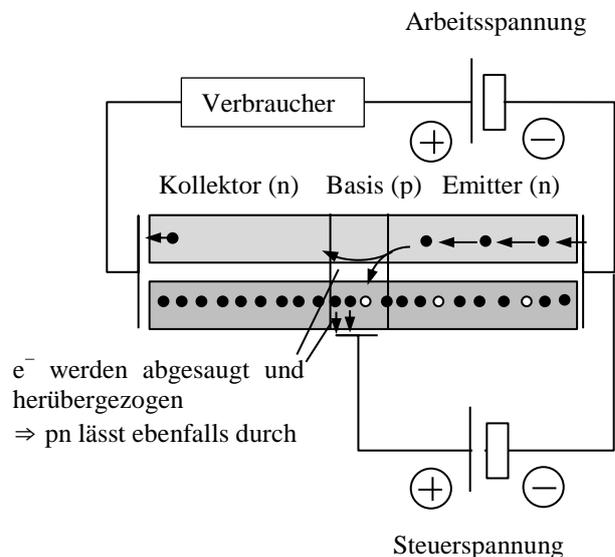
**npn-Transistoren** oder **Trioden** bestehen aus zwei n-dotierten Schichten, zwischen denen eine sehr dünne Schicht p-dotiert ist. Die beiden n-Schichten dienen als **Regelwiderstand** im **Arbeitsstromkreis**, wobei der **Emitter** am **Minuspol** und der **Kollektor** am **Pluspol** angeschlossen sind. Die Stromstärke bzw. der Leitwert werden über die Spannung des **Steuerstromkreises** geregelt. Dieser ist mit dem Pluspol an der p-dotierten dünnen Basis und mit dem Minuspol wieder am Emitter angeschlossen.

In diesem Zustand lässt die n-p-Grenze den Strom durch und die p-n-Grenze sperrt.



Legt man nun eine geringe **Steuerspannung** an, so werden die wenigen, die Löcher verstopfenden Elektronen aus der dünnen Sperrschicht in der Basis abgesaugt und die Elektronen aus dem Leiterband des Emitters werden **über die dünne Sperrschicht hinweg** in das leere Leiterband des Kollektors gezogen. Die Sperrschicht wird dadurch auch im Kollektor beseitigt und der Arbeitsstrom kann fließen.

Die Stromstärke im **Arbeitskreis** ist **proportional** zur Steuerspannung, so dass der Transistor als **Verstärker** z.B. in **Sendern** und **Empfängern** von **Mobiltelefonen** verwendet werden kann.



Übungen: Aufgaben zu Gleichstromkreisen Nr. 20