

# GRUNDLAGEN DER ELEKTRONIK

<b>GRUNDLAGEN DER ELEKTRONIK.....</b>	<b>1</b>
Verwendete Symbole:.....	6
Literaturliste Elektronik:.....	8
Software Elektrotechnik/Elektronik.....	8
Simulationsprogramme (im Fach Technik erstellt):.....	9
Allgemeine Simulationsprogramme:.....	9
<b>Allgemeine Hinweise zur Arbeit.....</b>	<b>11</b>
<b>ERARBEITUNGS-TEIL.....</b>	<b>12</b>
Anforderungen an das Netzgerät:.....	12
Bewertungskriterien:.....	12
Platine:.....	12
Gesamtes Netzgerät:.....	12
<b>Funktionen und Baugruppen des Netzgeräts:.....</b>	<b>14</b>
<b>1. Funktion: Transformieren der Eingangsspannung.....</b>	<b>14</b>
Experimentieren mit dem Transistor:.....	15
1. Idealer Transformator:.....	15
2. Realer Transformator:.....	18
Ergebnis:.....	18
<b>2. Funktion: Gleichrichten der Sekundärspannung.....</b>	<b>19</b>
Ergebnis:.....	25
<b>3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung.....</b>	<b>27</b>
Ermitteln des zeitlichen Verlaufs von Spannung und Strom.....	28
Glättung von pulsierendem Gleichstrom (Rechteck):.....	30
Wirkung des Glättungskondensators bei pulsierender Gleichspannung (Netzfrequenz):.....	32
Ergebnis:.....	33
<b>4. Funktion: Stabilisieren der Ausgangsspannung.....</b>	<b>34</b>
Stabilisieren mit Z-Dioden.....	34
Stabilisierung gegen Schwankungen der Eingangsspannung:.....	34
Stabilisierung bei unterschiedlicher Belastung am Ausgang:.....	37
Ergebnis:.....	40
Der Transistor.....	40
Erarbeiten der Funktionsweise des Transistors, Füllstandsanzeige:.....	41
Kennlinien des Transistors.....	44
Spannung am Ausgang des Transistors:.....	46
Schaltungen mit dem Transistor, Signalumkehr:.....	47
Schaltungen mit dem Transistor, Darlingtonsschaltung:.....	50
Schaltungen mit dem Transistor, Signalumkehr mit der Darlington-Schaltung:.....	52
Leistung beim Transistor.....	54
Innenwiderstand des Transistors:.....	57
Schaltungen mit dem Transistor, Kollektorschaltung:.....	59
Spannungsstabilisierung mit der Kollektorschaltung.....	62
Spannungsstabilisierung mit Kollektorschaltung und Z-Diode:.....	63
Ergebnis:.....	65
<b>5. Funktion: Sichern des Netzgeräts gegen Kurzschlüsse.....</b>	<b>67</b>

Schmelzsicherungen:.....	67
Elektronische Sicherungen:.....	67
Kurzschluss–Sicherung mit Kaltleiter:.....	67
Kurzschluss–Sicherung mit Transistor:.....	67
Kurzschluss–Sicherung mit Thyristor:.....	70
Ergebnis:.....	70

## ÜBUNGS– UND VERTIEFUNGS–TEIL.....72

<b>1. Funktion: Transformieren der Eingangsspannung.....72</b>
Berechnung von Transformatoren:.....72
Berechnung eines Transformators mit einem Widerstand als Last:.....72
<b>2. Funktion: Gleichrichten der Sekundärspannung.....74</b>
Allgemeines, Erweiterungen:.....74
Gleichstrommotor:.....74
Dioden–Kennlinie aufnehmen mit dem Oszillographen:.....74
Spannungen an der Diode im Gleichstromkreis:.....74
Unterschiede der Oszillogramme der Wechselspannung und der pulsierenden Gleichspannung (Einweg–gleichrichtung):.....75
@ Noch eine Schaltung, die von der Wechselspannung beide Halbwellen nutzt:.....76
@ Pneumatische Analogie der Einweg–Gleichrichtung:.....77
@ Verschiedene Darstellungsweisen von Schaltungen:.....83
@ Unmögliche Stromwege bei der Graetz–Schaltung:.....83
@ Pneumatische Analogie der Brücken–Gleichrichterschaltung:.....84
@ Analysieren von Schaltungen:.....90
Berechnung von Gleichrichterschaltungen:.....92
Berechnung einer Einweg–Gleichrichterschaltung mit ohmscher Last:.....92
Berechnungsbeispiel:.....95
Berechnung einer Brücken–Gleichrichterschaltung mit ohmscher Last:.....97
Berechnungsbeispiel:.....99
Praxis: Messen von Gleichrichterschaltungen, Fehlersuche:.....101
Erweiterung: Leuchtdioden (LEDs):.....104
Berechnung des erforderlichen Vorwiderstands für eine LED:.....104
<b>3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung.....105</b>
Allgemeines:.....105
Influenz als Ursache des Kondensatoreffekts:.....105
Lade– und Entladevorgang beim Kondensator:.....108
Zeitkonstante beim Auf– und Entladen eines Kondensators:.....113
Pneumatische Analogien:.....115
@ Pneumatische Analogie der Einweggleichrichtung mit Glättung:.....115
@ Pneumatische Analogie der Brückengleichrichtung mit Glättung:.....120
Untersuchen von Gleichrichterschaltungen mit Glättung:.....125
@ Experimentieren mit der Einweg–Gleichrichterschaltung mit Glättung:.....125
@ Experimentieren mit der Brücken–Gleichrichterschaltung mit Glättung:.....126
Berechnung von Gleichrichterschaltungen mit Glättung:.....127
Berechnung einer Einweg–Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator:.....127
Schaltung ohne Belastung:.....128
Schaltung mit Belastung:.....128
Berechnungsbeispiel:.....129
Berechnung einer Brücken–Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator:.....132
Schaltung ohne Belastung:.....133
Schaltung mit Belastung:.....133
Berechnungsbeispiel:.....134
<b>4. Funktion: Stabilisieren der Ausgangsspannung.....136</b>
Stabilisieren mit Z–Dioden:.....136
Arbeitspunktbestimmung mittels Kennlinien bei unterschiedlicher Eingangsspannung:.....136
Arbeitspunktbestimmung mittels Kennlinien bei unterschiedlicher Last:.....136

Reihenschaltung von Z-Dioden:.....	141
Temperaturabhängigkeit von Z-Dioden, Temperaturkompensation:.....	142
@ Analysieren von Schaltungen:.....	145
Berechnung der Vorwiderstände für Z-Dioden:.....	146
Stabilisierungsschaltung ohne Lastwiderstand:.....	146
Stabilisierungsschaltung mit konstantem Lastwiderstand:.....	148
Stabilisierungsschaltung für Experimentiernetzgerät: sich stark verändernder Lastwiderstand:.....	149
Der Transistor.....	152
Funktionsweise des Transistors:.....	152
Ströme bei der Füllstandsanzeige:.....	152
Pneumatische Analogie des Transistors: .....	152
Schaltungen mit dem Transistor, Pneumatische Analogien:.....	154
@ Emitterschaltung mit Basisvorwiderstand:.....	154
@ Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler:.....	155
Schaltungen mit dem Transistor, Signalumkehr:.....	157
@ Lösungsvorschläge zum Problem: Anzeige des leeren Tanks:.....	157
Zweistufige Schaltung mit Signalumkehr:.....	160
Schaltungen mit dem Transistor, Darlingtonsschaltung:.....	161
Stromverstärkung bei der Darlington-Schaltung:.....	161
Berechnen der Stromverstärkung bei der Darlingtonsschaltung.....	162
Schaltungen mit dem Transistor: Signalumkehr, 2 Eingänge bei der Emitterschaltung:.....	163
Schaltungen mit dem Transistor: Kollektorschaltung:.....	164
Pneumatische Analogie:.....	164
@ Schaltungsvergleich: .....	165
Berechnung der Kollektorschaltung mit Z-Diode:.....	166
Berechnungsbeispiel 1:.....	168
Berechnungsbeispiel 2:.....	170
<b>5. Funktion: Sichern des Netzgeräts gegen Kurzschlüsse.....</b>	<b>173</b>
Schmelzsicherungen, Gerätesicherungen.....	173
Kurzschluss-Sicherung mit Thyristor:.....	174
Berechnung des vollständigen Netzgeräts:.....	177
Liste der benötigten Bauteile:.....	183
<b>SYSTEMATISCHER TEIL.....</b>	<b>184</b>
<b>Begriff: Elektronik.....</b>	<b>184</b>
<b>Materialien der Elektronik.....</b>	<b>185</b>
<b>Umgang mit den Digital-Messinstrumenten:.....</b>	<b>193</b>
<b>Ohmsche Widerstände.....</b>	<b>199</b>
Festwiderstände:.....	199
Nennwert des Widerstands, Toleranz:.....	199
ICE-Widerstandsnormreihen:.....	200
Belastbarkeit von Widerständen:.....	202
Veränderbare Widerstände: Potentiometer und Trimmer.....	202
Die Kennlinie eines ohmschen Widerstandes:.....	203
Anwendungen von ohmschen Widerständen:.....	205
<b>Heißleiter (NTC-Widerstände).....</b>	<b>205</b>
Allgemeines:.....	205
Analoge Darstellung:.....	205
Die Kennlinie eines Heißleiters:.....	206
Anwendungen von Heißleitern:.....	206
Fremderwärmung: .....	206
Eigenerwärmung: .....	207
<b>Kaltleiter (PTC-Widerstände).....</b>	<b>208</b>

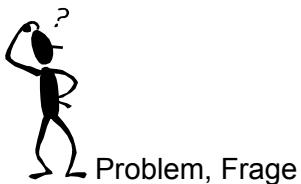
Allgemeines:.....	208
Analoge Darstellung:.....	208
Die Kennlinie eines Kaltleiters:.....	208
Anwendungen von Kaltleitern:.....	209
Fremderwärmung: .....	209
Eigenerwärmung: .....	210
<b>Fotowiderstände (LDR–Widerstände).....</b>	<b>211</b>
Allgemeines:.....	211
Schaltbild und analoge Darstellung:.....	211
Die Kennlinie eines Fotowiderstandes:.....	212
Anwendungen:.....	212
<b>Ermitteln des Arbeitspunktes mit Kennlinien.....</b>	<b>214</b>
Bei Reihenschaltung:.....	214
Kennlinien bei Parallelschaltung:.....	218
<b>Dioden.....</b>	<b>220</b>
Name/Begriff: .....	220
Geschichtliches: .....	220
Allgemeines: Funktionsweise und Aufbau von Dioden.....	221
Kennlinie der Diode.....	225
Anwendungen von Dioden.....	226
<b>Leuchtdioden.....</b>	<b>229</b>
Allgemeines: Funktionsweise und Aufbau.....	229
Bauarten und Eigenschaften:.....	230
Anwendungen:.....	230
<b>Z–Dioden.....</b>	<b>232</b>
Allgemeines: Name, Funktionsweise und Aufbau.....	232
Aufbau und Funktionsweise:.....	232
Kennlinien von Z–Dioden.....	234
Bauarten und Eigenschaften:.....	235
Bezeichnungsschema für Z–Dioden:.....	235
Temperaturabhängigkeit:.....	236
Anwendungen:.....	237
<b>Transistoren.....</b>	<b>238</b>
Allgemeines: Geschichtliches, Name, Pneumatische Analogie.....	238
Geschichtliches:.....	238
Name:.....	238
Pneumatische Analogie.....	238
Aufbau und Wirkungsweise von bipolaren Transistoren:.....	239
Bauarten und Eigenschaften.....	242
Transistor–Grundschaltungen:.....	244
Emitterschaltung:.....	245
Emitterschaltung mit Basisvorwiderstand: .....	245
Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler: .....	245
Darlingtonsschaltung:.....	246
Mehrstufige Schaltungen:.....	247
Kollektorschaltung:.....	248
Leistung beim Transistor:.....	249
Leistungshyperbel:.....	249
Kühlung von Transistoren:.....	251
Betriebsarten des Transistors: .....	254
Transistor als Schalter.....	254
Transistor als Verstärker.....	255
Anwendungen:.....	257
Emitterschaltung:.....	257
Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik:.....	257

Verstärkertechnik:.....	261
Kollektorschaltung:.....	262

## Einleitung

### Verwendete Symbole:

- Schaltung aufbauen



Problem, Frage



Idee, Lösung eines Problems, Erklärung

-  Kennlinien aufnehmen  Messen

 Analysieren  Experimentieren, Untersuchen

- genau beobachten, untersuchen



Notieren, Zeichnen, Ausfüllen

- Vorsicht!, Sicherheitsregeln beachten

 Information

- in der Literatur nachschauen



siehe (in einem anderen Teil)

 Computerprogramm nutzen

 Vertiefungsstoff



### Literaturliste Elektronik:

Jean Pütz, Einführung in die Elektronik, Fischer Taschenbuchverlag, 1974, Bd. 6273

Joseph Glagla, Gert Lindner, Wege in die Elektronik, Otto Maier Verlag, Ravensburg, 1980

Heinz Meister, Elektrotechnische Grundlagen der Elektronik (Elektronik 1), Vogel Verlag, 1977

Klaus Beuth, Bauelemente der Elektronik (Elektronik 2), Vogel Verlag, 1977

Klaus Beuth, Wolfgang Schmusch, Grundschatungen der Elektronik (Elektronik 3), Vogel Verlag, 1976

Hübscher, Klaue, Pflüger, Appelt, Elektrotechnik, Grundstufe, Westermann Schulbuchverlag, 1984

Müller, Hörnemann, Hübscher, Jagla, Larisch, Pauly, Elektrotechnik, Fachstufe 1 und 2, Energietechnik, Westermann Schulbuchverlag, 1987

Paul Heymann, Hermann Sauerwein (Hrsg), Elektrotechnik, Energietechnik, Kieser Verlag, Neusäß, 1998.

### Software Elektrotechnik/Elektronik

B. Kainka, Einführung in die Elektronik, Franzis-Verlag, München, CD-ROM (Grundlagen, Gesetze, Halbleiter, Transistor-Verstärker, Oszillatoren, Operationsverstärker, HF-Technik), z.T. mit Bauelement- und Schaltungssimulationen.

Herbert Bernstein, PC-Elektronik Labor, Band 1, PC-gestützter Elektronik-Lehrgang mit interaktiver Lernsoftware für alle Elektro- und Elektronikberufe (Buch + CD: Einführung in die Simulation; Spannung, Strom und Widerstand; Kondensator; Spulen, Transformatoren, Relais und Lautsprecher; Zusammengesetzte Wechselstromkreise; CAD-Programm für Schalt- und Stromlaufplanerstellung); arbeitet mit Electronics Workbench.

Herbert Bernstein, PC-Elektronik Labor, Band 2, PC-gestützter Elektronik-Lehrgang mit interaktiver Lernsoftware für alle Elektro- und Elektronikberufe (Buch + CD: Halbleiterphysik und Dioden; Praktische Anwendungen von Dioden; Grundlagen und Grundschatungen des Transistors; Praktische Schaltungstechnik mit Transistoren; Schaltungen mit Feldeffekttransistoren und MOSFETs); arbeitet mit Electronics Workbench.

Herbert Bernstein, PC-Elektronik Labor, Band 3, PC-gestützter Elektronik-Lehrgang mit interaktiver Lernsoftware für alle Elektro- und Elektronikberufe (Buch + CD: Grundlagen analoger Schaltungstechnik; Schaltungstechnik mit Operationsverstärkern; Signalgeneratoren, Oszillatoren und Zeitglieder; Schaltungen mit dem Zeitgeberbaustein 555; Aktive Filterschaltungen); arbeitet mit Electronics Workbench.

Herbert Bernstein, PC-Elektronik Labor, Band 4, PC-gestützter Elektronik-Lehrgang mit interaktiver Lernsoftware für alle Elektro- und Elektronikberufe (Buch + CD: Grundlagen der Digitaltechnik; Praktischer Entwurf von digitalen Schaltnetzen; Speicher- und Kippschaltungen; Frequenzteiler, Zähler und Schieberegister; Funktionsschaltungen in TTL- und CMOS-Technik); arbeitet mit Electronics Workbench.

## Simulationsprogramme (im Fach Technik erstellt):

**Widerstände im Gleichstromkreis:** Der Widerstand als Materialeigenschaft: Vorgänge im Inneren des Materials, Widerstand von Metalldrähten; Der Widerstand als Bauelement: Der einzelne Widerstand im Gleichstromkreis, Spezialfall: sehr kleine Widerstände (Kurzschluss); Pneumatische Analogien: Einfacher Widerstand, Reihenschaltung, Parallelschaltung; Grundschaltungen: Reihenschaltung, Parallelschaltung, Spannungsteiler mit Lastwiderstand, Brückenschaltung (mit und ohne Lastwiderstand); Anwendungen: Brückenschaltung zur Widerstandsmessung (Nullbrücke), Brückenschaltung zur Temperaturmessung (Ausschlagbrücke).

**Sonderwiderstände: LDR, NTC, PTC:** LDR (Fotowiderstand): Einblick in das Halbleitermaterial, Versuchsschaltungen: LDR-Typen: RPY60, RPY62; Praktische Anwendung: Einschalten eines Relais über einen Fotowiderstand; NTC (Heißleiter): Einblick in das Halbleitermaterial, Analogie, Versuchsschaltungen (Fremdwärme, Eigenwärme): NTC-Typen: M861, K274; Praktische Anwendungen: Fremderwärmung: Temperaturmessung; Eigenwärmung: Einschaltverzögerung eines Relais. PTC (Kaltleiter): Einblick in das Halbleitermaterial, Analogie, Versuchsschaltungen (Fremdwärme, Eigenwärmung): PTC-Typen: P270-E1, B59995; Praktische Anwendungen: Fremderwärmung: Ölstandskontrolle; Eigenerwärmung: Kurzschlussicherung)

**Der Kondensator an Gleichspannung:** Der Plattenkondensator Pneumatische Analogien: Der Einzelkondensator, Die Reihenschaltung von Kondensatoren, Die Parallelschaltung von Kondensatoren Die RC-Schaltungen: Die RC-Schaltung, Reihenschaltung, Parallelschaltung

**Die Diode:** Der Aufbau der Diode: Der n–Leiter, der p–Leiter, der pn–Übergang, die Leuchtdiode (LED), Herstellung einer Diode Pneumatische Analogien: Die Diode mit Vorwiderstand, Einweggleichrichtung mit Glättung, Brückengleichrichtung mit Glättung Die Diode als Bauelement: Diodentypen: 1N4001, 1N5400, 1N4148, LED–rot, LED–grün. Grundschaltungen: Die Diode mit Vorwiderstand, Einweggleichrichtung (mit oder ohne Glättung), Brückengleichrichtung (mit oder ohne Glättung)

**Der bipolare Transistor:** Vorgänge im Transistorkristall; Pneumatische Analogie zum Transistor; Der Transistor als Bauelement: Transistortypen: BC 548, BD 135; Transistor–Grundschaltungen: Emitterschaltungen: mit Basisvorwiderstand, mit Basisspannungsteiler, mit Basisvorwiderstand und Basisspannungsteiler; Kollektorschaltungen: mit Basisvorwiderstand, mit Basisspannungsteiler, mit Basisvorwiderstand und Basisspannungsteiler.

## **Schalten, Verstärken und Speichern mit Transistoren:**

Schalten: eines Widerstands, von Kondensator mit Widerstand, von Spule mit Widerstand, von Spule mit Freilaufdiode und Widerstand.

Verstärken: Emitterschaltung: Dreiecksignal, Sinussignal, Musiksignal; Kollektorschaltung: Dreiecksignal, Sinussignal, Musiksignal

Speichern: Flip-Flop-Schaltung (diskret aufgebaut)

## Allgemeine Simulationsprogramme:

Crocodile Clips ist ein für die Schule konstruiertes Simulationsprogramm, mit dessen Hilfe am Bildschirm einfache Elektronikschaltungen (analog und digital) erstellt und simuliert werden können. Die Werte, die bei der Simulation ausgegeben werden, sind nicht immer realistisch.

Electronics Workbench ist ein allgemeines Simulationsprogramm, mit dessen Hilfe (fast) beliebige Schaltungen der analogen und digitalen Elektronik am Bildschirm erstellt und deren Verhalten simuliert werden können.

## Allgemeine Hinweise zur Arbeit

Diese Unterlagen sind so konzipiert, dass Sie im Prinzip allein mit ihnen arbeiten können. Das Prinzip heißt also: **Selbsttätigkeit, Selbststeuerung des Lernens und Eigenverantwortung des Lernens**. Sie bestimmen den Umfang und die Intensität Ihrer Auseinandersetzung mit den einzelnen Themen, wobei es selbstverständlich ist, dass Sie jederzeit fragen können. Arbeiten Sie weitgehend mit Ihren Kommilitonen/innen zusammen – wenn Sie nicht weiterkommen, wenden Sie sich an mich.

Bei **Problemlösungsaufgaben** sollten Sie aber auf jeden Fall versuchen, die Aufgabe zunächst selbstständig zu bearbeiten. Finden Sie nicht sofort eine Lösung, sollten Sie sie nicht gleich nachschauen, sondern besser versuchen, durch Nachfragen oder gezielte Anregungen (z.B. durch mich) doch noch selbst auf eine mögliche Lösung zu kommen.

Die Phasen der eigenverantwortlichen Arbeit werden zwischendurch immer wieder abgelöst durch Phasen, in denen im gesamten Plenum Ergebnisse ausgetauscht, Fragen und Probleme besprochen und zusätzliche Informationen gegeben werden können.

Die Unterlagen sind so angelegt, dass Sie im Prinzip alle Informationen und Hinweise finden, die Sie benötigen. **Geben Sie sich erst dann zufrieden, wenn Sie selbst das sichere Gefühl haben, alles restlos verstanden zu haben!**

Die Reihenfolge der Kapitel richtet sich nach der schrittweisen Erarbeitung der einzelnen Baugruppen, die für das Netzgerät notwendig sind. Einer Phase des ersten Kennenlernens, einer einführenden Problemstellung und grundlegenden Erarbeitung eines Bauelements folgt dann ein Abschnitt, in dem es um eine systematischere Darstellung und Erweiterung geht. Diese Erweiterungen auf andere Anwendungen und Schaltungen werden vorgenommen, um für die schulische Arbeit eine möglichst breite Basis zu schaffen. Damit im Zusammenhang steht auch, dass nicht nur elektronische Bauelemente und rein elektronische Schaltungen erarbeitet werden, sondern auch Bauelemente aus der Elektrotechnik, wie z.B. Transformator, Motor, Kondensator.

Es ist zwar grundsätzlich möglich, die einzelnen Kapitel in beliebigen Reihenfolgen abzuarbeiten, dennoch bauen sie in gewisser Weise aufeinander auf, da zunächst Bauelemente und Schaltungen erarbeitet werden, die später dann wieder verwendet werden. Es empfiehlt sich daher schon, die vorgegebene Reihenfolge der Kapitel einigermaßen einzuhalten. Wie Sie aber innerhalb der einzelnen Kapitel vorgehen – ob Sie zuerst eine geschichtliche Hinführung, eine praktische Messaufgabe oder zunächst eine Problemlösungsaufgabe bevorzugen, ob Sie zunächst mit einem Elektronik–Programm am Computer oder mit dem Baukasten arbeiten wollen, können Sie selbst bestimmen.

## ERARBEITUNGS-TEIL

### Anforderungen an das Netzgerät:

- Gleichspannung, kontinuierlich einstellbar von 0 bis 12 Volt (freies Experimentieren, Kennlinien von Bauelementen aufnehmen)
- Feste Gleichspannung von 5 Volt (Anwendungen in der Digitaltechnik)
- Ausgangsstromstärke von 1 A über den gesamten Spannungsbereich (um auch leistungsstärkere Bauelemente betreiben zu können)
- Die Ausgangsspannungen sollen stabilisiert sein (stabile Spannung über einen weiten Belastungsbereich)
- Das Netzgerät soll eine elektronische Kurzschluss–Sicherung besitzen.

**Da das Netzgerät nicht VDE–geprüft ist, darf es nur privat benutzt werden!**

### Bewertungskriterien:

#### **Platine:**

- **Layout** (richtiges, sauber gezeichnetes Layout, unterschiedliche Strichstärken)
- **Bestückung** (richtige Abstände der Bauelemente zur Platine; Bohrlochabstände korrekt)
- **Lötstellen** (saubere Lötstellen)

#### **Gesamtes Netzgerät:**

- **Funktion** (sauberes Einstellen der veränderlichen Spannung (0 – 15V) und der 5V–Festspannung; korrekte Einstellung der Kurzschluss–Stromstärke (1 A); Kühlkörper mit Leistungstransistor außen am Gehäuse; richtige Größe des Kühlkörpers)
- **Sicherheit** (2-poliger Ein–Ausschalter; Isolieren der blanken 230V–Anschlüsse; keine Kontakte der Platine zum Gehäuse; feste Verbindung der Steckschuhe auf den Lötnägeln; bei Metallgehäuse: Erden des Gehäuses und des Trafos; Zugentlastung des Netzkabels, bei Metallgehäuse Schukostecker am Netzkabel; Primärsicherung im Gehäuse (nicht auf der Platine))
- **Verkabelung** innerhalb des Gehäuses (saubere Verbindung der Kabel mit den Steckschuhen; richtige Wahl der Kabelquerschnitte; saubere Verlegung der Kabel (verbinden?))
- **Bedienelemente** (ständig benutzte Bedienelemente an der Front, Sicherungen an der Rückseite; übersichtliche Anordnung; verschiedene Farben für Plus– und Minusbuchse; Drehknopf am Potentiometer)

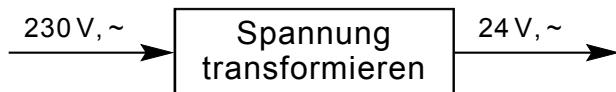


## FUNKTIONEN UND BAUGRUPPEN DES NETZGERÄTS:

Das Netzgerät besteht grundsätzlich aus mehreren Baugruppen, die unterschiedliche Funktionen zu erfüllen haben. Diese Baugruppen sollen hier in ihrer Funktion und ihrer Konstruktion Schritt für Schritt erarbeitet werden.

### 1. Funktion: Transformieren der Eingangsspannung

Da es am Netz betrieben werden soll, muss zunächst die Netzspannung von 230 V~ auf die erforderliche Spannung herunter transformiert werden. Diese Funktion übernimmt ein Transformator.



Wenn Sie nicht mehr genau wissen, wie ein Transformator funktioniert und wie er aufgebaut ist, dann informieren Sie sich darüber in der entsprechenden Literatur (siehe Literaturliste, Simulationsprogramme).

Bei diesen Verstehens-Prozessen kommt es darauf an, dass Sie sich in Ihrem Kopf eine möglichst genaue Vorstellung von dem machen, was in dem Bauteil vor sich geht und was dieses Verhalten verursacht (wenn Sie ein eher visueller Lerntyp sind). Lernen Sie dagegen eher kinästhetisch-handlungsorientiert, dann könnte es Ihnen vielleicht helfen, wenn Sie versuchen, als „Strom“ das Magnetfeld der Primärwicklung hervorzurufen und dieses Magnetfeld auch innerlich zu spüren. Dann können sie als „wechselndes Magnetfeld der Primärspule“ unmittelbar auf die Elektronen der Sekundärspule einwirken und dort eine Spannung und damit einen Strom verursachen. Notieren Sie sich Ihre Erklärungen so genau wie möglich, da Sie diese später für den Unterricht wieder brauchen. Vielleicht ist es auch notwendig, dass Sie sich noch einmal über die grundlegenden Begriffe der Ladung, der Spannung (Gleichspannung, Wechselspannung), der Stromarten (Gleichstrom, Wechselstrom) der Stromstärke, des Widerstands, des Magnetfelds und der Kraftwirkungen im Magnetfeld vergewissern müssen. Tun Sie dies unbedingt, wenn Sie Verständnislücken erkennen.

Vielleicht ist es für Sie hilfreich, wenn Sie sich eine **Wirkungskette** aufstellen: das sich ändernde Magnetfeld in der Primärspule → .....

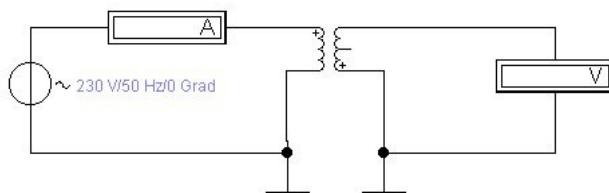
## Experimentieren mit dem Transformator:

### 1. Idealer Transformator:

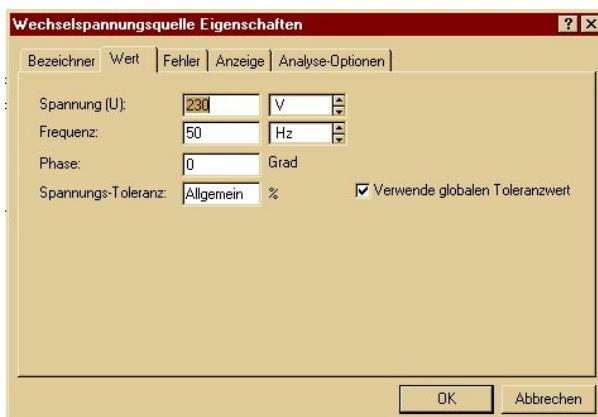
Arbeiten Sie im Folgenden mit dem Simulationsprogramm Electronics Workbench (EWB).



Starten Sie das Programm und bauen Sie folgende Schaltung auf dem Bildschirm auf:



Den Wert der Spannung der Spannungsquelle können Sie folgendermaßen verändern:  
Klicken Sie mit der rechten Maustaste auf die Wechselspannungsquelle. Damit öffnet sich eine Box, bei der Sie oben die Auswahl Bauteileigenschaften finden. Wenn Sie die anklicken, dann öffnet sich eine Dialogbox, in der Sie alle Werte der Spannungsquelle verändern können. Geben Sie 230 V ein:



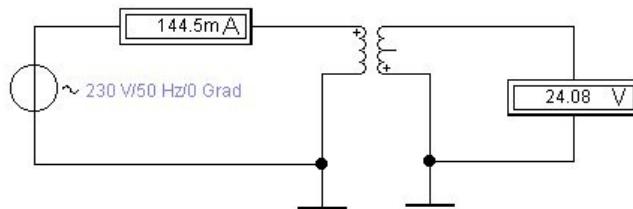
Entsprechend stellen Sie die Eigenschaften der Messinstrumente ein: Rechter Mausklick auf das Ampermeter, Bauteileigenschaften wählen und dann für die Stromart AC (alternating current) eingeben; entsprechend verfahren Sie beim Voltmeter:



Beim Transformator haben Sie die Möglichkeit, die Bauteileigenschaften bei „Standard“ (default) auf „ideal“ zu stellen oder einen realen Trafo auszuwählen. Stellen Sie die Bauteileigenschaften zunächst auf ideal. Um die Simulation zu starten, stellen Sie den Schalter rechts oben am Bildschirm mit der Maus auf 1.

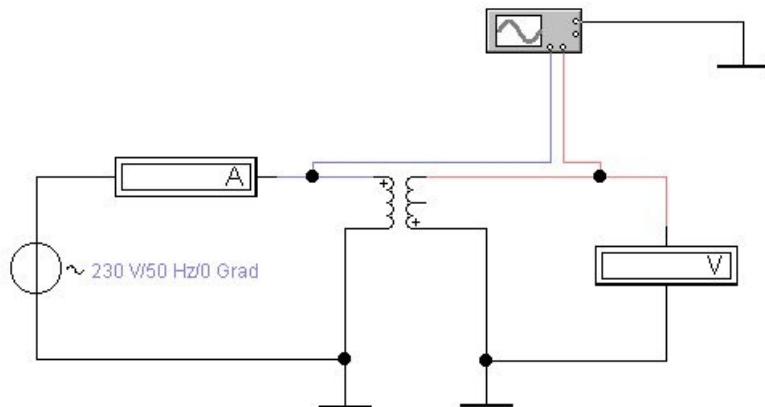


Finden Sie als erstes heraus, welches Übersetzungsverhältnis der Trafo haben muss, damit sich auf der Sekundärseite 24 V einstellen.

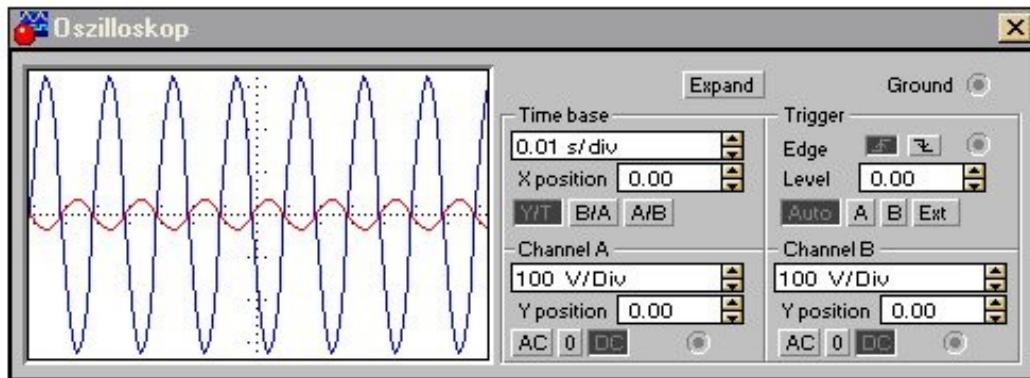


Sie sehen am Trafo an der Primär- und Sekundärseite je ein kleines „Plus“. Dies informiert Sie über den Wicklungssinn der beiden Spulen.

Um sich die Auswirkungen dieser Wicklung anzuschauen, schließen Sie ein Oszilloskop an:



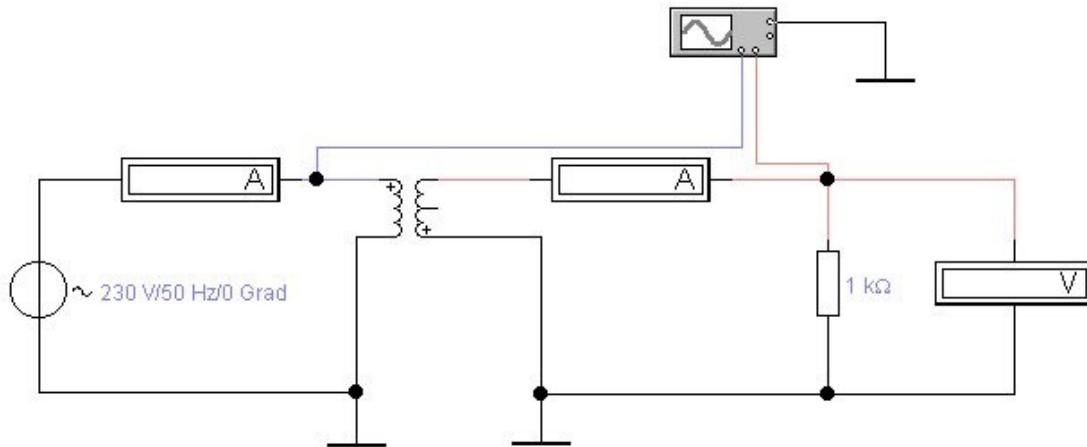
Da es sich bei diesem Oszilloskop um ein Zweikanaloszilloskop handelt, kann man mit ihm zwei Oszillogramme gleichzeitig aufnehmen. Um diese aber auf dem Bildschirm besser unterscheiden zu können, kann man unter EWB die Farben für die beiden Kanäle einstellen. Gehen Sie folgendermaßen vor: Klicken Sie mit der rechten Maustaste auf die entsprechende Leitung. Damit öffnet sich eine kleine Box, in der Sie „Leitungs–Eigenschaften“ wählen. In der sich nun öffnenden Dialogbox können Sie jetzt die Farbe der angeklickten Leitung einstellen. Wählen Sie für den Kanal 1 blau und für Kanal 2 rot. Wenn Sie jetzt die Simulation starten, werden Sie das Oszillogramm noch nicht sehen können. Dazu müssen Sie das Oszilloskop mit einem Doppelklick „öffnen“ und dann dort die passenden Parameter einstellen.



An diesem Oszillogramm sieht man sehr schön die unterschiedlich hohe Spannung der Primär- (blau) und der Sekundärsplele (rot). Außerdem ist zu erkennen, welchen Wicklungssinn dieser Trafo hat: die beiden Oszillogramme sind um  $90^\circ$  phasenverschoben, d.h. sekundärseitig wird eine Spannung induziert, die genau entgegen der Spannung auf der Primärseite schwingt. Es gibt Transformatoren, bei denen die Spannungen phasengleich sind.

**E Experimentieren:** Jetzt können Sie untersuchen, wie sich der **Trafo** bei **unterschiedlichen Belastungen** verhält.

Ergänzen Sie dazu die Schaltung folgendermaßen:



**i** Wenn Sie sich den Widerstand aus der Bibliothek geholt haben, können Sie ihn folgendermaßen drehen: Markieren Sie ihn, indem Sie ihn mit der linken Maustaste anklicken (dann ist er rot), dann drücken Sie <Strg + R>, damit wird das Bauteil gedreht (R steht für Rotieren).



Notieren Sie sich die Sekundärwerte (Spannung und Stromstärke) für: 1 kOhm, 100 Ohm, 10 Ohm und 1 Ohm. Die Bauteilwerte für den Widerstand ändern Sie ganz einfach durch: rechten Mausklick auf das Bauteil, Bauteil-Eigenschaften, Ändern des Widerstandswertes.

## 2. Realer Transformator:

Die Spannungs- und Stromwerte, die Sie beim idealen Transformator aufgenommen haben, entsprechen nicht den realen Gegebenheiten von Transformatoren. Um diese zu simulieren, müssen die Bauteil-Parameter entsprechend geändert werden. Klicken Sie mit der rechten Maustaste auf den Trafo, wählen Sie Bauteileigenschaften und wählen Sie dann den Trafo-Typ: pq4–10 aus.



Finden Sie als erstes wieder heraus, welches Übersetzungsverhältnis der Trafo haben muss, damit sich auf der Sekundärseite 24 V einstellen.

Stellen Sie jetzt nacheinander wieder die Widerstandswerte 1 kOhm, 100 Ohm, 10 Ohm und 1 Ohm ein und notieren Sie sich die Spannungs- und Stromwerte.

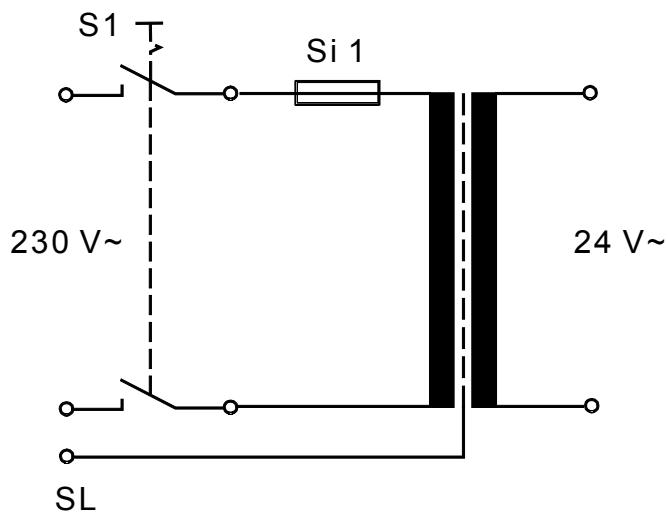
Machen Sie sich klar, woher diese Unterschiede kommen. Denken Sie dabei an Ihre Kenntnisse über das Verhalten von Spannungsquellen bei Kurzschluss.



Sie können auch das (im Fach Technik erstellte) Simulationsprogramm **Widerstände im Gleichstromkreis** dafür zu Rate ziehen.

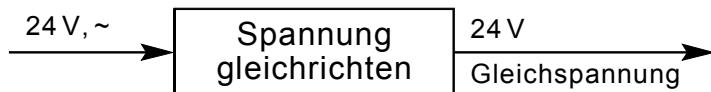
### Ergebnis:

Die Realisierung der ersten Funktion – Transformieren der Netzspannung – hat zu folgender Schaltung geführt:

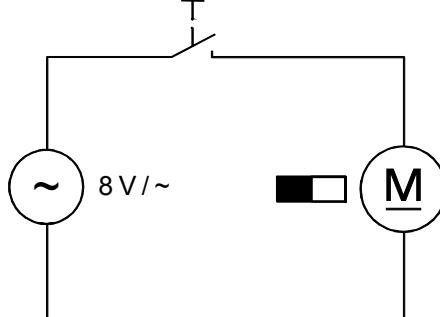


## 2. Funktion: Gleichrichten der Sekundärspannung

Am Ausgang des Transformators entsteht eine Wechselspannung in der Größe der durch das Übersetzungsverhältnis eingestellten Sekundärspannung. Für manche Anwendungen reicht dies bereits aus. Da wir aber bei unserem Netzgerät eine Gleichspannung am Ausgang brauchen, muss als Nächstes aus der Wechselspannung eine Gleichspannung geformt werden.



- Sicherheit beim Experimentieren:** Eine Diode darf niemals allein an eine Spannungsquelle angeschlossen werden, da sie sonst zerstört würde! Dioden müssen immer mit einem Vorwiderstand als Schutz oder einem anderen Bauelement in Reihe geschaltet werden! (Ausnahme: Aufnahme der Kennlinie)
- Schließen Sie einen Gleichstrommotor für 8 V (mit Erregung durch Permanentmagnet) an eine Wechselspannungsquelle (8 V) an und schließen Sie den Schalter.



- Beobachten Sie genau, was passiert!



Notieren Sie sich Ihre Beobachtungen.

Wie würden Sie dieses Verhalten erklären? Besprechen Sie sich mit Ihren Kommilitonen/innen! Schreiben Sie sich Ihre Überlegungen genau auf!



Bei diesen Verstehens-Prozessen kommt es darauf an, dass Sie sich in Ihrem Kopf eine möglichst genaue Vorstellung von dem machen, was in dem Motor vor sich geht und was dieses Verhalten verursacht (wenn Sie ein eher visueller Lerntyp sind). Lernen Sie dagegen eher kinästhetisch-handlungsorientiert, dann könnte es Ihnen vielleicht helfen, wenn Sie versuchen, als „Strom“ den Anker/Läufer des Motors entsprechend zu bewegen. Notieren Sie sich Ihre Erklärungen so genau wie möglich, da Sie diese später für den Unterricht wieder brauchen. Vielleicht ist es auch notwendig, dass Sie sich noch einmal über die grundlegenden Begriffe

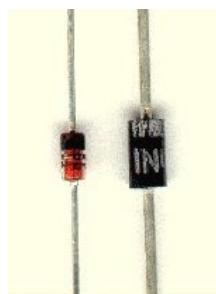
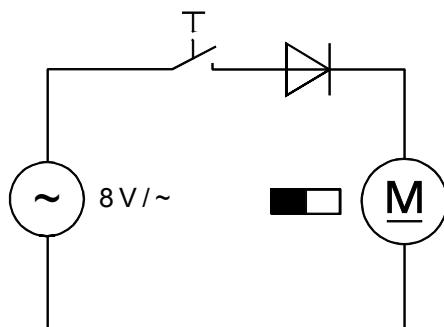
der Ladung, der Spannung (Gleichspannung, Wechselspannung), der Stromarten (Gleichstrom, Wechselstrom) der Stromstärke, des Widerstands, des Magnetfelds und der Kraftwirkungen im Magnetfeld vergewissern müssen. Tun Sie dies unbedingt, wenn Sie Verständnislücken erkennen.

- Wenn Sie nicht mehr genau wissen, wie ein Gleichstrommotor funktioniert, dann informieren Sie sich in der entsprechenden Literatur.



**Vertiefungsstoff:** Übungs– und Vertiefungs–Teil: Gleichstrommotor.

- Jetzt schalten Sie in den obigen Stromkreis eine Diode ein:



In diesem Schaltplan ist die Diode als Schaltsymbol eingezeichnet. Die Bauelemente sehen real so aus wie auf dem nebenstehenden Bild:

Die linke Diode hat die Bezeichnung 1N4148 und ist eine Universaldiode, die rechte hat die Bezeichnung 1N4007 und hat eine größere Leistung. Wichtig ist der Ring am oberen Ende des Bauelements, der mit dem Querstrich im Schaltsymbol übereinstimmt.

- Beobachten Sie genau, was passiert! Nehmen Sie die Diode aus der Schaltung heraus und bauen Sie sie umgekehrt wieder ein. Was ändert sich?



Notieren Sie sich Ihre Beobachtungen.

Wie würden Sie dieses Verhalten erklären? Besprechen Sie sich mit Ihren Kommilitonen/innen! Schreiben Sie sich Ihre Überlegungen genau auf!

  
Geben Sie sich nicht zufrieden, bevor Sie nicht alles ganz genau verstanden haben! Achten Sie bei der Ausarbeitung Ihrer Erklärung darauf, ob Sie eher ein visueller oder ein kinästhetisch-handlungsorientierter Lerntyp sind. Nutzen Sie dafür alle Informationsquellen, die Ihnen zur Verfügung stehen. Arbeiten Sie auch mit den Simulationsprogrammen, z.B. dem Programm: **Die Diode**, das im Fach Technik erstellt wurde. In dieses Programm ist eine pneumatische Analogie zur Diode eingearbeitet, die ein erstes Vorverständnis für die Diodenfunktion liefern kann.



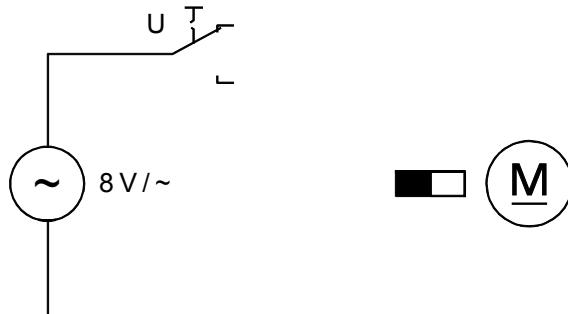
**Problem, Aufgabe:** Bei manchen Spannungsquellen ist nicht eindeutig ersichtlich, welches der Plus- und welches der Minuspol ist (z.B. fischertechnik-Netzgerät, 4,5V-Batterie). Mit einer Anordnung aus Lämpchen und Diode lassen sich in einem solchen Fall die Pole eindeutig bestimmen. Dazu müssen Sie lediglich wissen, wo bei der Diode Plus und wo Minus angeschlossen werden muss, damit sie in Durchlassrichtung geschaltet ist. Finden Sie eine Lösung?



Notieren Sie sich Ihre Lösung.



**Problem, Aufgabe:** Erfinden Sie eine Schaltung für eine Rechts–Links–Steuerung eines Gleichstrom–Motors. Gegeben ist folgende Situation:



Ein Gleichstrommotor soll an einer **Wechselspannungsquelle** betrieben werden. Mit dem Umschalter U soll es möglich sein, den Motor von Rechts– auf Linkslauf umzuschalten.



Notieren Sie sich Ihre Lösung.

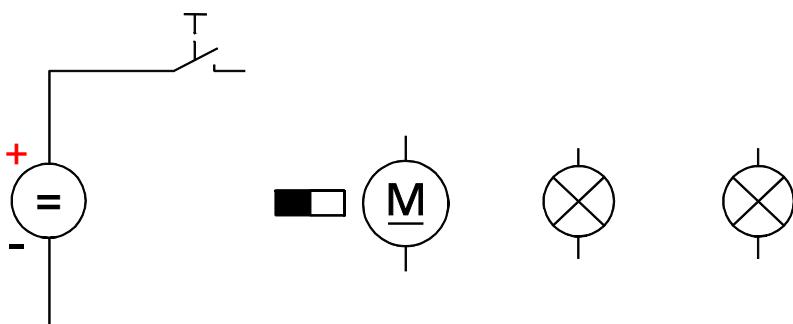


Beschreiben Sie möglichst genau, wie die Schaltung funktioniert. Zeichnen Sie sich die Schaltung in ihren verschiedenen Betriebszuständen auf, d.h. tragen Sie jeweils die Stromwege für die beiden Betriebszustände ein.

Wenn Sie während Ihres Problemlösungsprozesses Schaltungen entworfen haben, die die Funktion nicht oder nicht vollständig erfüllt haben, notieren Sie sich diese ebenfalls und beschreiben Sie möglichst genau, weshalb sie nicht funktionieren. Dies ist für Ihre spätere Arbeit im Klassenzimmer sehr wichtig!



**Problem, Aufgabe:** Erfinden Sie eine optische Drehrichtungsanzeige für einen Gleichstrommotor. Gegeben ist folgende Situation:



Ein Gleichstrommotor soll an einer **Gleichspannungsquelle** betrieben werden. Je nach Anschluss an die Quelle läuft der Motor im Rechts- oder Linkslauf. Es soll eine Schaltung gefunden werden, die über 2 Lämpchen anzeigt, wann der Motor rechts und wann er links dreht.



Notieren Sie sich Ihre Lösung.



Beschreiben Sie möglichst genau, wie die Schaltung funktioniert. Zeichnen Sie sich die Schaltung in ihren verschiedenen Betriebszuständen auf, d.h. tragen Sie jeweils die Stromwege für die beiden Betriebszustände ein.

Wenn Sie während Ihres Problemlösungsprozesses Schaltungen entworfen haben, die die Funktion nicht oder nicht vollständig erfüllt haben, notieren Sie sich diese ebenfalls und beschreiben Sie möglichst genau, weshalb sie nicht funktionieren. Dies ist für Ihre spätere Arbeit im Klassenzimmer sehr wichtig!



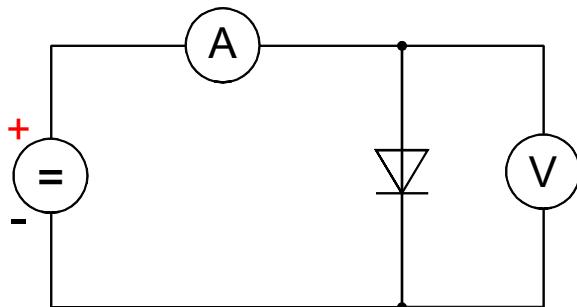
**Kennlinie einer Diode:** Sie sollen als nächstes die Kennlinie einer Diode messtechnisch aufnehmen. Verwenden Sie eine Diode des Typs 1N400x (1N4001, 1N4002 .... 1N4007), da diese Typen eine größere Strombelastbarkeit haben.



Wenn Sie nicht wissen, was eine Kennlinie ist und wofür man sie braucht, informieren Sie sich in dem Abschnitt „Systematischer Teil“ über Kennlinien.



Bauen Sie dafür folgende **Mess-Schaltung** auf:



Die Spannung am Netzgerät lässt sich kontinuierlich einstellen. Benutzen Sie für eine genaue Spannungseinstellung an der Diode aber ein separates Spannungs-Messinstrument.



Messen Sie aus Sicherheitsgründen „von oben nach unten“, d.h. beginnen Sie mit einer Spannung von etwa 1 V an der Diode, lesen Sie schnell den Strom ab und schalten Sie dann die Spannung ab, damit sich die Diode wieder abkühlen kann. Dann vermindern Sie bitte die Spannung in 0,1 V-Abständen nach unten, also 0,9V, 0,8V, ....



Wenn Sie nicht mehr genau wissen, wie man Spannung und Stromstärke mit den zur Verfügung stehenden Digital-Messinstrumenten misst, dann informieren Sie sich vorher im Systematischen Teil.



Notieren Sie Ihre Messwerte in einer Tabelle. Errechnen Sie aus den ermittelten Spannungs- und Stromwerten die jeweiligen „Bahnwiderstände“ der Diode für die verschiedenen Messpunkte.

Haben Sie alle Werte bis Null ermittelt, drehen Sie die Diode um und messen wieder. Dieses Mal können Sie in 1V-Abständen messen.



Ergänzen Sie die Messwerte in der Tabelle.



**Zeichnen** Sie auf Millimeter-Papier ein I-U-Diagramm, die sogenannte Kennlinie der Diode auf. Da die Kennlinie das Verhalten des Bauelements zeigt, versuchen Sie, dieses Verhalten aus der Kennlinie abzulesen und zu beschreiben. Beschreiben Sie den Durchlassbereich und den Sperrbereich getrennt.



Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit Dioden-Kennlinien aus der Literatur.



Aufnahme der **Dioden-Kennlinie** mit einem **Oszillographen**: Ein Oszillograph (oder Oszilloskop) ist ein Messgerät, mit dem man sich zeitlich ändernde Spannungen nicht nur als

Mittelwerte, sondern in ihrem genauen zeitlichen Verlauf darstellen kann.  Eine ausführliche Beschreibung der Arbeitsweise eines Oszilloskops und der Arbeit damit finden Sie in: Jean Pütz, Einführung in die Elektronik, Fischer Taschenbuchverlag, 1974, Bd. 6273.

Um eine Kennlinie zu schreiben, muss man die Spannung an der Diode und den durch sie fließenden Strom zu jedem Zeitpunkt messtechnisch ermitteln und auf dem Schirm darstellen. Dies bekommt man, indem man an eine Reihenschaltung von Diode und Widerstand verwendet, wobei an der Diode die Spannung und am Widerstand der fließende Strom (über die an ihm abfallende Spannung) aufgenommen wird. Diese beiden Werte müssen jetzt noch auf die beiden Achsen (x, y) des Schirms gegeben werden.



**Vertiefungsstoff:** Übungs- und Vertiefungs-Teil: Kennlinie mit dem Oszillographen aufnehmen



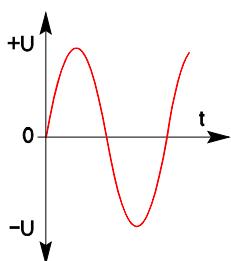
Zurück zum Gleichstrommotor an Wechselspannung: Wenn der Motor an Wechselspannung betrieben werden konnte heißt das, dass die Diode aus Wechselspannung Gleichspannung „gemacht“ haben muss. Sie muss also so ähnlich funktionieren wie ein **Ventil**, nur

für elektrische Spannungen und Ströme. In dem Simulationsprogramm „Die Diode“ ist eine pneumatische Analogie eingebaut, die ein Vorverständnis dieser Ventil-Funktion darstellt.



**Frage:** Wie sieht diese Gleichspannung und dieser Gleichstrom aus, den die Diode erzeugt hat?

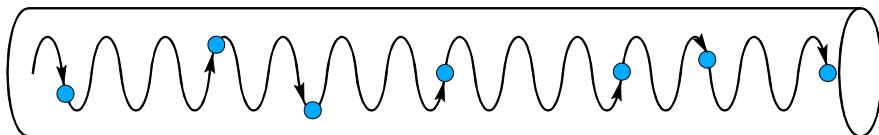
Vergewissern Sie sich zuvor über Ihre Kenntnisse der Wechselspannung und des Wechselstroms. Z.B: Was bedeutet Effektivwert der Spannung oder des Stroms? Wenn Sie ein Oszillogramm einer solchen Wechselspannung sehen:



Was bedeutet diese Darstellung? Machen Sie sich klar: Wie verläuft in diesem Fall die elektrische Leitung? Wie ist die Bewegung der Elektronen in dieser Leitung?



Präsentiert man Schülern solche Diagramme, verstehen viele das in der Weise, dass die Elektronen sich so in der Leitung bewegen:



Es ist ganz wichtig, dass man solche relativ abstrakten Darstellungen wieder auf die Ebene der konkreten Vorstellung und Bewegung herunter holt! Mit SchülernInnen lassen sich solche Vorgänge sehr schön in der Form von „Funktionsspielen“ klären.



**Aufzeichnen:** Überlegen Sie zuerst, wie diese gleichgerichtete Spannung aussehen muss; zeichnen Sie sie auf. Dann können Sie entweder ein Oszillogramm davon „schreiben“ (an einer konkreten Schaltung) oder mit EWB simulieren (siehe auch: Herbert Bernstein, PC-Elektronik Labor, Band 2, S. 92). Diese Spannung ist eine Gleichspannung, weil sie nur in eine Richtung wirkt, da sie aber nicht konstant ist und ständig auf und ab pulst, nennt man sie: **pulsierende Gleichspannung**.

Machen Sie sich wieder klar, was das für die Bewegung der Ladungsträger in der Leitung bedeutet: wie bewegen sie sich?



**Vertiefungsstoff:** Unterschiede der Oszillogramme der Wechselspannung und der pulsierenden Gleichspannung: „Übungs– und Vertiefungsstoff; 2. Funktion: Gleichrichten der Sekundärspannung. Wie kommt die unterschiedliche Höhe der beiden Spannungen zustande?



Im Übungs– und Vertiefungsteil ist eine pneumatische Analogie für die Einweg-Gleichrichtung dargestellt. Analysieren Sie den dargestellten Prozess möglichst genau. Interpretieren Sie dazu auch die beigefügten Zeitdiagramme. Sie können auch das Simulationsprogramm „Die Diode“ verwenden und damit die Einweg–Gleichrichtung ausführlich untersuchen.



Eine solche Schaltung mit einer einzelnen Diode im Wechselstromkreis ist die einfachste Form einer **Gleichrichter–Schaltung**. Sie hat allerdings den Nachteil, dass eine Hälfte der ursprünglichen Spannung verloren geht: die wirksame Spannung nach der Gleichrichtung ist nur noch die Hälfte!





Überlegen Sie sich eine Schaltung, die diesen Nachteil vermeidet. Sie müsste also beide Halbwellen der ursprünglichen Wechselspannung als Gleichspannung nutzen! Machen Sie sich klar, dass diese Aufgabe nicht mit einer einzelnen Diode gelöst werden kann, sondern mehrere Dioden erfordert.

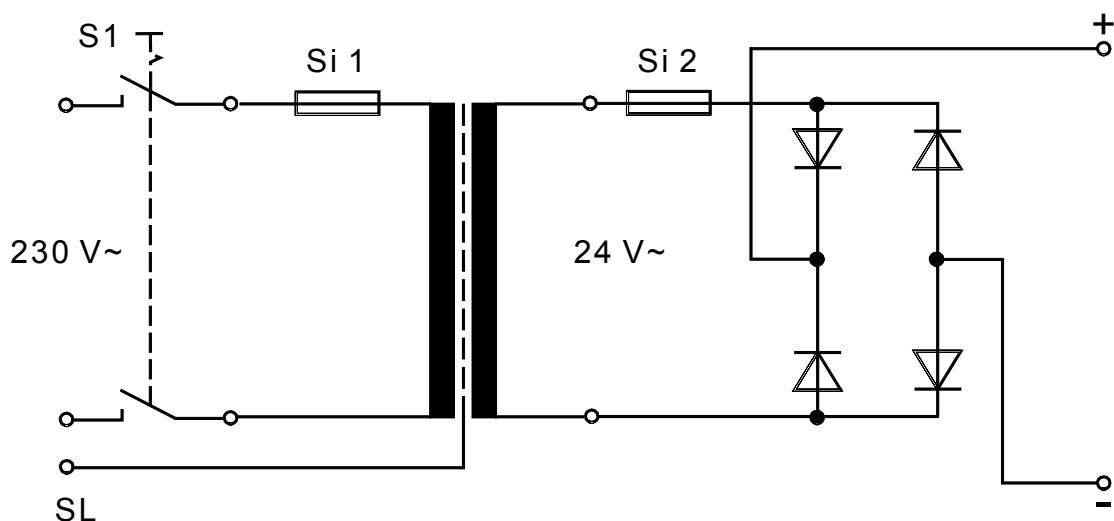
Achten Sie beim Entwickeln der Schaltung darauf, dass Sie nicht Dioden allein im Kreis haben, also ohne „Verbraucher“ betreiben. Dies würde sie sofort zerstören! Prüfen Sie, ob es für Sie besser ist, die Schaltung direkt mit dem Baukasten oder zuerst auf dem Papier zu entwickeln. Wenn Sie nicht sicher sind, ob Ihre Lösung der gesuchten Schaltung entspricht, oszillografieren Sie Ihre Lösung. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Ihrer Kommilitonen/Innen

Wenn Sie die Schaltung gefunden haben, zeichnen Sie sie exakt und möglichst übersichtlich auf. Zeichnen Sie sich für die beiden Möglichkeiten – positive und negative Halbwelle der Wechselspannung – die Stromwege in die Schaltung ein.

@ Im Übungs- und Vertiefungsteil ist eine pneumatische Analogie für die Brücken-Gleichrichtung dargestellt. Analysieren Sie den dargestellten Prozess möglichst genau. Interpretieren Sie dazu auch die beigefügten Zeitdiagramme. Sie können auch das Simulationsprogramm „Die Diode“ verwenden und damit die Brücken-Gleichrichtung ausführlich untersuchen.

### Ergebnis:

Die Realisierung der zweiten Funktion – Gleichrichten der Sekundärspannung – führt zu folgender Schaltung des Netzgerätes:





### 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung

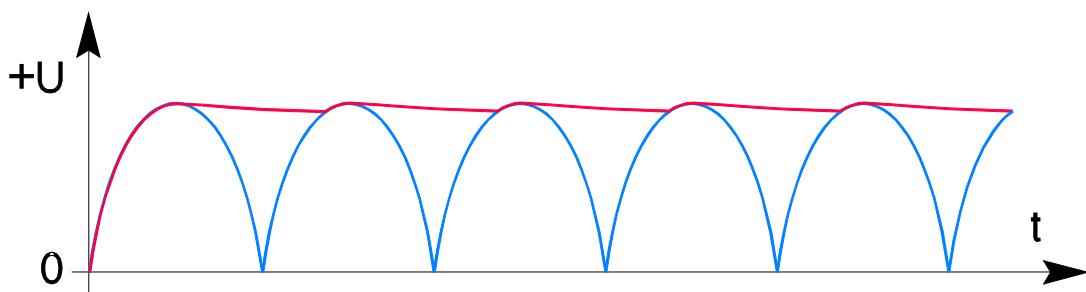
Eine pulsierende Gleichspannung ist zwar eine Gleichspannung, aber für viele Anwendungen benötigt man eine Gleichspannung, die sich in ihrer Größe nicht verändert, also eine „glatte Gleichspannung“.

Beispiele: Wenn z.B. eine Kennlinie aufgenommen werden soll, muss das Netzgerät eine Spannung abgeben, die sich in ihrer Größe nicht verändert. In der Verstärkertechnik benötigt man zur Versorgung der Schaltungen eine glatte Gleichspannung, da jede Änderung von Spannung und Stromstärke als Signal „verstanden“ und entsprechend verstärkt wird („Netzbrumm“).

Die bis jetzt gewonnene pulsierende Gleichspannung muss also in einem nächsten Schritt in eine glatte Gleichspannung umgeformt werden:



Um so etwas realisieren zu können, müssen die Lücken der pulsierenden Gleichspannung mit Ladung „aufgefüllt“ werden. Dies könnte im Ergebnis etwa so aussehen:



Die pulsierende Gleichspannung ist hier blau, die geglättete rot dargestellt.

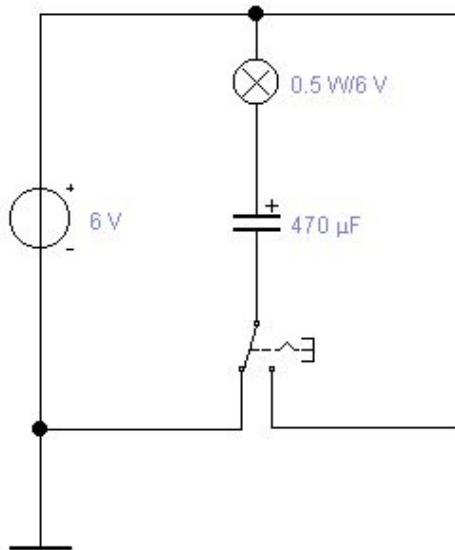
Um diese Lücken auffüllen zu können, muss man einen Ladungsspeicher einsetzen, der Ladung aufnehmen und wieder abgeben kann. Ein solcher Ladungsspeicher ist der **Kondensator**. Ein Kondensator besteht – kurz gesagt – aus zwei (relativ großflächigen, aber sehr dünnen) Metallplatten (besser: Metallfolien), die sich in kurzer Entfernung gegenüber stehen. Die beiden Platten dürfen dabei keinen elektrischen Kontakt miteinander haben, dürfen sich also nicht berühren. Sie werden im Gegenteil sogar durch sehr gut isolierende Zwischenschichten (Dielektrikum) voneinander getrennt.

Achten Sie beim Aufbau der folgenden Schaltung besonders darauf, Plus- und Minuspol der Spannungsquelle korrekt anzuschließen, da der hier verwendete Kondensator ein so genannter Elektrolytkondensator ist, der einen Plus- und einen Minuspol besitzt. Wird er falsch an Spannung angeschlossen, dann kann er zerstört werden!



**Einschub:** Überlegen Sie: Durch welche kleine (Schaltungs-)Maßnahme könnten Sie den Elko (Abkürzung für Elektrolytkondensator) vor einem falschen Anschließen an die Spannungsquelle schützen?

- Bauen Sie folgende Schaltung auf:



- Wenn Sie den Schalter hin und her kippen: Was beobachten Sie?



Das Aufleuchten des Lämpchens zeigt Ihnen an, dass in dieser Schaltung offensichtlich kurzzeitig ein Strom fließt. Nun entsteht dadurch aber ein Problem, denn bereits in der Grundschule lernt man, dass in einem nicht geschlossenen Stromkreis kein Strom fließen kann!

Einige werden sich jetzt sofort an die Erklärungen aus den Physikbüchern erinnern, in denen von Ladungsspeicherung beim Kondensator die Rede ist. Aber damit ist noch nicht geklärt, wie trotz des offenen Stromkreises (beim Kondensator sind die beiden Platten gegeneinander isoliert!) hier ein Strom fließen kann! Geben Sie sich nicht mit oberflächlichen Erklärungen zufrieden! **Verschärfung des Problems:** Würde in dieser Schaltung auch dann ein (wenn auch sehr kleiner) Strom fließen, wenn man den Kondensator aus der Schaltung herausnehmen würde? Wenn ja, unter welchen Bedingungen?



Sie können Ihre Erklärungen ergänzen durch: Übungs- und Vertiefungsteil, 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung, Influenz als Ursache des Kondensatoreffekts.

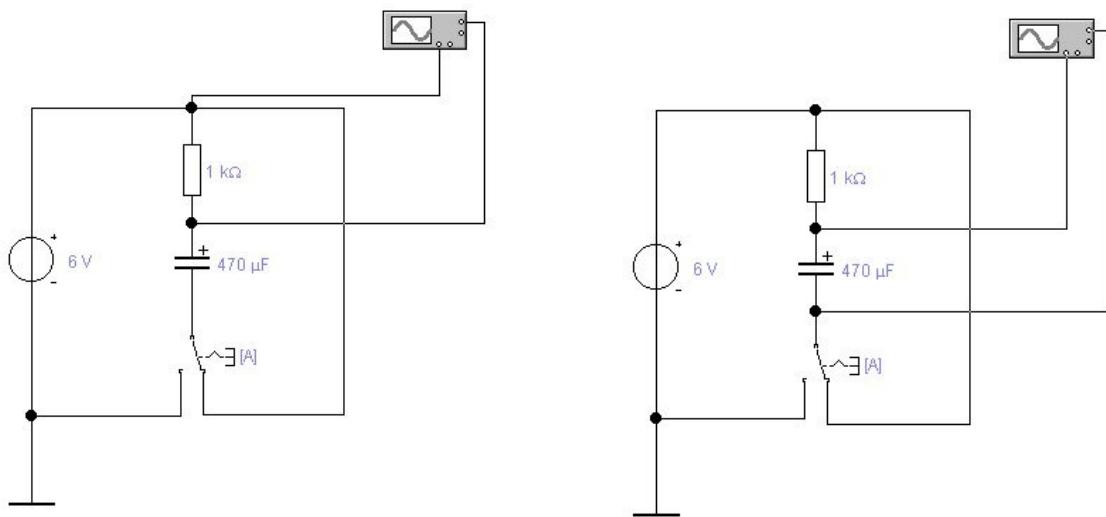


In dem Simulationsprogramm **Der Kondensator an Gleichspannung** ist eine pneumatische Analogie eingebaut, die ein gutes **Vorverständnis** des Kondensators ermöglicht.

### Ermitteln des zeitlichen Verlaufs von Spannung und Strom

Oben hatten Sie gesehen, dass in der Schaltung in beiden Schalterstellungen kurzzeitig ein Strom fließt. Aber: wie sieht der **zeitliche Verlauf** dieses Stroms aus?

- Bauen Sie dazu folgende Schaltung auf:



Oszillografieren Sie den zeitlichen Verlauf des Stroms (über dem Widerstand) und der Spannung (über dem Kondensator). . Notieren Sie sich Ihr Ergebnis.



Überlegen Sie, wie dieser Verlauf von Strom und Spannung am Kondensator zustande kommt. Welche Prozesse sind dafür verantwortlich, dass sich genau diese Form ergibt und nicht irgend eine andere?

K

Sie können dazu auch die Abbildungen im Übungs- und Vertiefungsteil, 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung, „Lade- und Entladevorgang beim Kondensator“ zu Rate ziehen.



Mit dem Simulationsprogramm **Der Kondensator an Gleichspannung** können Sie den Lade- und Entladevorgang des Kondensators mit verschiedenen Bauteilwerten simulieren und sich die Ergebnisse in Ruhe anschauen.

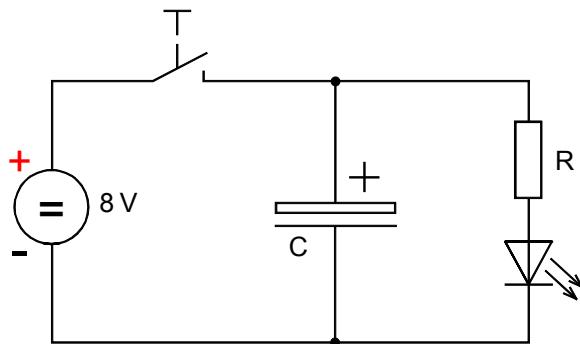


**Vertiefungsstoff:** Da sich beim Lade- und Entladevorgang des Kondensators Spannung und Stromstärke kontinuierlich ändern, kann man erwarten, dass der Kondensator keinen feststehenden (ohmschen) Widerstand besitzt. Ermitteln Sie ein Diagramm, welches den zeitlichen Verlauf dieses Widerandes beim Ladevorgang zeigt. Sie können dafür die Abbildungen „Übungs- und Vertiefungsteil; 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung; Lade- und Entladevorgang beim Kondensator“ benutzen.

Beschreiben Sie das Widerstandsverhalten des Kondensators beim Aufladen.

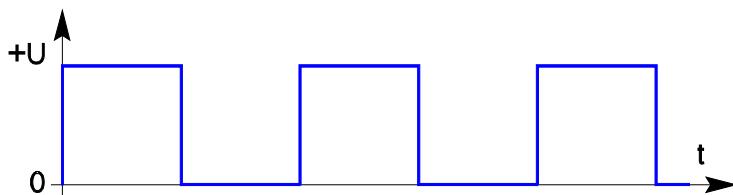
### Glättung von pulsierendem Gleichstrom (Rechteck):

- Um die Wirkungsweise eines Glättungskondensators kennen zu lernen, bauen Sie bitte folgende Schaltung auf:



Um mit dieser Schaltung arbeiten zu können, müssen Sie zuerst den erforderlichen Vorwiderstand  $R$  berechnen. Gehen Sie dabei davon aus, dass der Flussstrom der LED bei 20 mA liegt. Wählen Sie aus der E12-Normreihe den passenden Wert aus.

- E Experimentier-Aufgabe:** Sie selbst erzeugen mit Hilfe des Tasters eine rechteckige Gleichspannung, indem Sie den Taster eine gewisse Zeit schließen und dieselbe Zeit öffnen. Diese Rechteckspannung sollte also folgende Form haben:

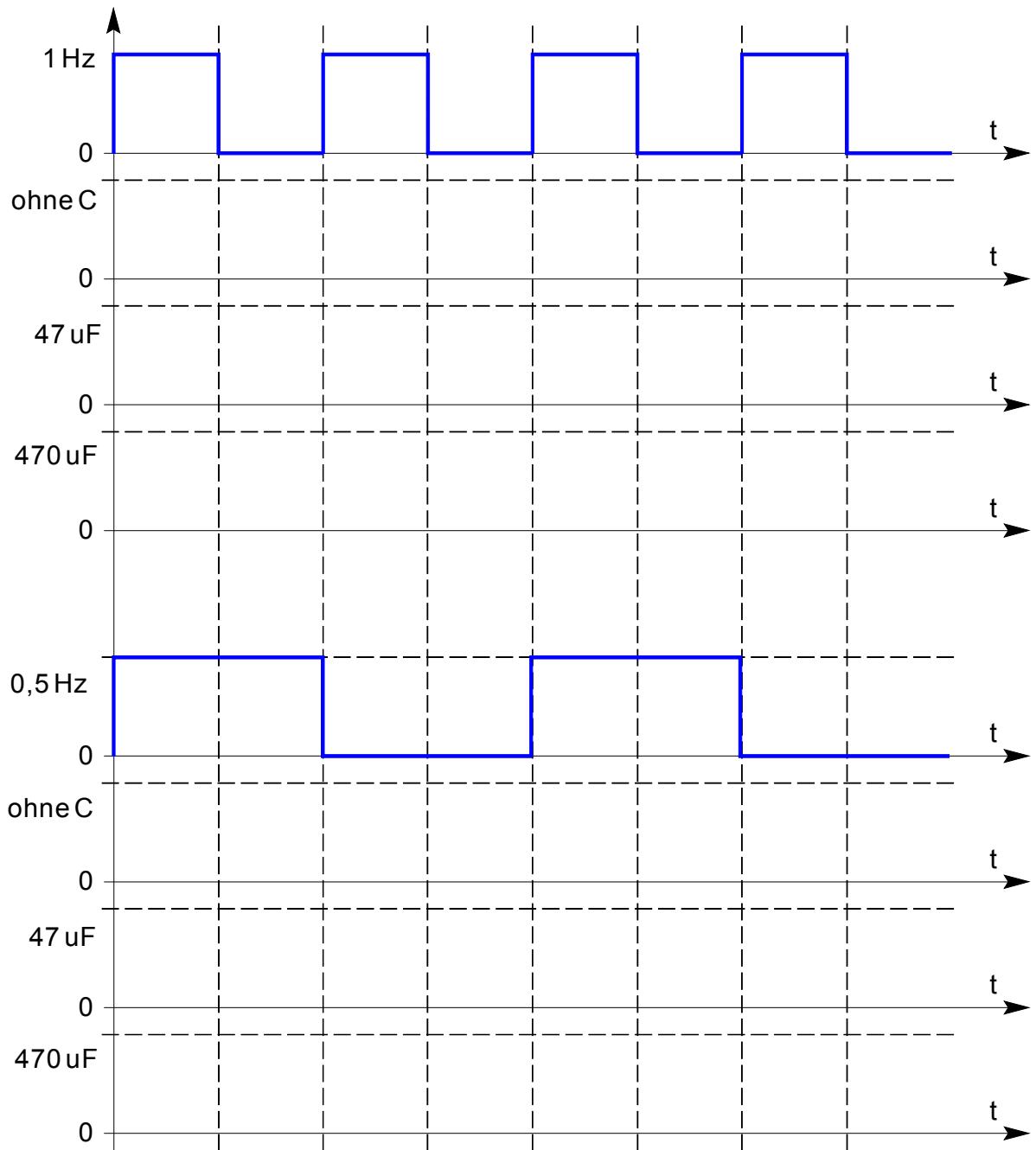


Sie tasten mit zwei unterschiedlichen Frequenzen: mit 1 Hz und mit 0,5 Hz. Überlegen Sie genau, was das bedeutet und welche Zeiten Sie einhalten müssen.

Führen Sie das zunächst durch mit der Schaltung ohne Kondensator. Dann setzen Sie einen Kondensator mit  $47\mu F$  ein und tasten in den beiden Frequenzen. Danach tauschen Sie den Kondensator durch einen mit  $470\mu F$  und tasten wieder mit beiden Frequenzen.

- Was beobachten Sie an der Leuchtdiode?

- Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit denen Ihrer Kommilitonen/Innen. Tragen Sie Ihre Beobachtungen in das folgende Diagramm ein. Überlegen Sie, wie die Kurven genau aussehen, die beim Auffüllen der Lücken durch den Kondensator entstehen.



Machen Sie sich klar, was genau in der Schaltung vor sich geht. Zeichnen Sie die verschiedenen Stromwege für den geschlossenen und den geöffneten Schalter in die Schaltung ein.

Welcher der beiden Merksätze stimmt Ihrer Meinung nach?

Je höher die Frequenz, desto kleiner kann der Glättungskondensator sein.

Je höher die Frequenz, desto größer muss der Glättungskondensator sein.



Was würde passieren, wenn man bei der obigen Schaltung die Reihenschaltung von LED und Vorwiderstand durch ein Lämpchen ersetzen würde?

Überlegen Sie zuerst, bevor Sie es ausprobieren!

Machen Sie sich ganz klar, wie dieses Ergebnis zustande kommt. Besprechen Sie sich mit ihren Kommilitonen/Innen. Versuchen Sie, den Unterschied der Ergebnisse (LED mit Vorwiderstand – Lämpchen) in einem Diagramm darzustellen.

**i** Diese Ergebnisse sind wichtig für die Dimensionierung des Glättungskondensators für unser Netzgerät. Dabei kann man den Einfluss der Frequenz leider nicht nutzen, da ja die Netzfrequenz fest steht, aber die Größe des entnommenen Stromes spielt für die Dimensionierung des Kondensators eine wichtige Rolle. Versuchen Sie, eine Merkregel dafür aufzustellen:

**Je mehr Strom der Schaltung entnommen werden soll, desto**

**muss der Glättungskondensator sein.**

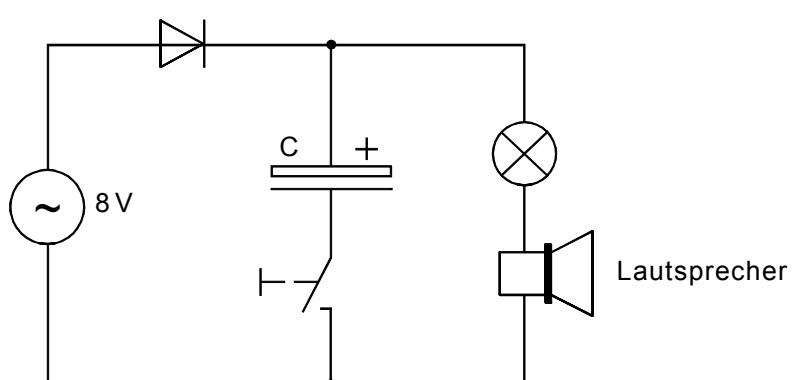
### Wirkung des Glättungskondensators bei pulsierender Gleichspannung (Netzfrequenz)



Bevor Sie die folgende Schaltung aufbauen und durch Drücken des Tasters ausprobieren, was geschieht, überlegen Sie zuerst, was wohl passieren wird. Ohne Drücken des Tasters: Wird das Lämpchen leuchten? Werden Sie am Lautsprecher etwas feststellen können? Wenn Sie jetzt in Gedanken den Taster schließen: Was wird am Lämpchen geschehen, wird es heller, dunkler oder bleibt es gleich? Und was wird sich beim Lautsprecher zeigen: wird er lauter, leiser oder gibt es keine Veränderung?

Wenn Sie nicht (mehr) genau wissen, wie ein Lautsprecher aufgebaut ist und wie er funktioniert, informieren Sie sich in der entsprechenden Literatur.

Bauen Sie folgende Schaltung auf:



- Beobachten Sie genau, was am Lämpchen und was am Lautsprecher passiert, wenn der Taster gedrückt und wenn er offen ist.



Versuchen Sie, Ihre Beobachtungen zu erklären. Wie kommen diese Veränderungen zustande?

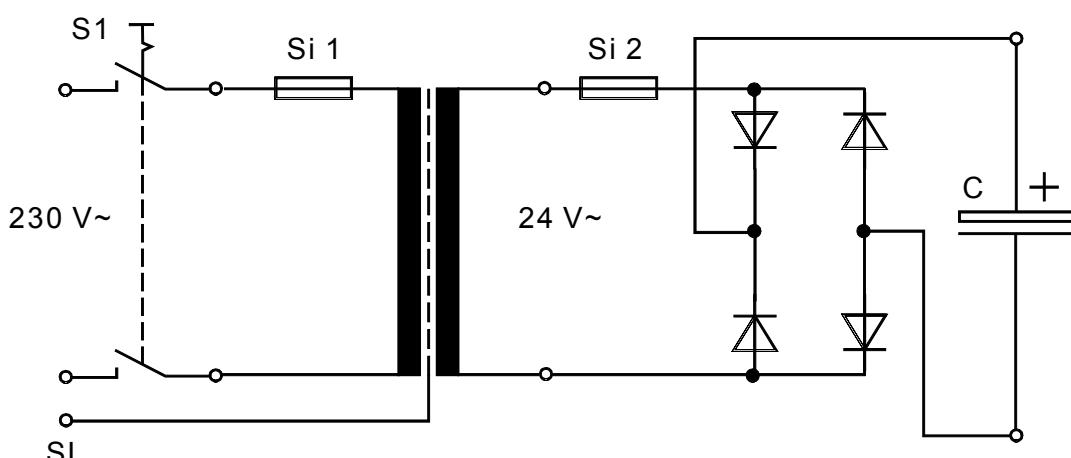
Zeichnen Sie ein Diagramm, das die unterschiedlichen Reaktionen von Lämpchen und Lautsprecher mit und ohne Kondensator deutlich macht.

- @** Im Übungs- und Vertiefungsteil ist eine pneumatische Analogie für die Einweg-Gleichrichtung mit Glättung dargestellt. Analysieren Sie den dargestellten Prozess möglichst genau. Interpretieren Sie dazu auch die beigefügten Zeitdiagramme. Wenn Sie sich den Prozess in Sperrrichtung genau ansehen, werden Sie bemerken, dass dabei über der Diode eine sehr hohe Sperrspannung entsteht, höher als die Betriebsspannung. Überlegen Sie genau, wie das zustande kommt. Sie können auch das Simulationsprogramm „Die Diode“ verwenden und damit die Einweg-Gleichrichtung mit Glättung ausführlich untersuchen.

- @** Im Übungs- und Vertiefungsteil ist eine pneumatische Analogie für die Brücken-Gleichrichtung mit Glättung dargestellt. Analysieren Sie den dargestellten Prozess möglichst genau. Interpretieren Sie dazu auch die beigefügten Zeitdiagramme. Überlegen Sie genau, weshalb bei der Brückenschaltung diese hohe Sperrspannung an den Dioden nicht entsteht. Sie können auch das Simulationsprogramm „Die Diode“ verwenden und damit die Brücken-Gleichrichtung mit Glättung ausführlich untersuchen.

### Ergebnis:

Die Realisierung der dritten Funktion – Glätten der Sekundärspannung – führt zu folgender Schaltung des Netzgerätes:



## 4. Funktion: Stabilisieren der Ausgangsspannung

Für anspruchslose Anwendungen reicht ein Netzgerät mit Gleichrichterbrücke und Glättungskondensator bereits aus.

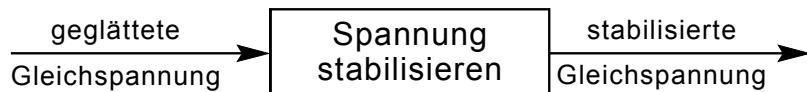
**Problem:** Wenn man Spannungsquellen belastet, dann verändert sich ihre Ausgangsspannung. Der Grund dafür liegt in dem Vorhandensein eines Innenwiderstandes. Je größer dieser Innenwiderstand der Quelle ist, desto stärker schwankt ihre Ausgangsspannung bei Belastung. Bei einem Netzgerät, das ja an dem öffentlichen Stromnetz betrieben wird, können zusätzlich noch Schwankungen und Störungen im Netz selbst auftreten, die dann natürlich auch die Ausgangsspannung des Netzgerätes beeinflussen.



In dem Simulationsprogramm **Widerstände im Gleichstromkreis** können Sie diesen Zusammenhang zwischen Innenwiderstand und Ausgangsspannung einer Spannungsquelle ausführlich untersuchen.

Solche Schwankungen sind aber bei vielen Anwendungen unerwünscht, weshalb es notwendig ist, die Ausgangsspannung des Netzgerätes zu stabilisieren und zwar sowohl gegenüber Schwankungen am Eingang, also vom Netz kommend, als auch gegenüber Schwankungen durch unterschiedlich starke Belastung am Ausgang.

Die geglättete Gleichspannung muss also in einem nächsten Schritt gegenüber solchen Schwankungen stabilisiert werden.

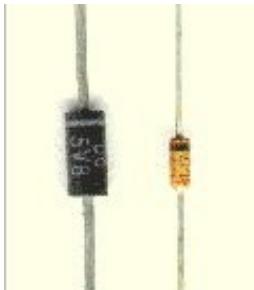


### Stabilisieren mit Z–Dioden

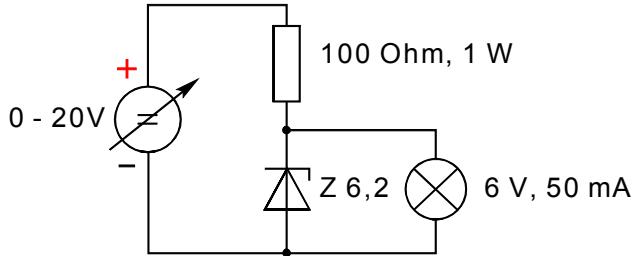
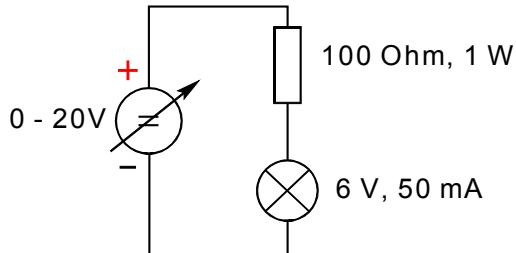
#### **Stabilisierung gegen Schwankungen der Eingangsspannung:**



Bauen Sie folgende Schaltungen (parallel) mit dem Elektronik–Baukasten auf. Achten Sie dabei darauf, dass Sie die Diode mit der Aufschrift „6V2“ verwenden



und diese in Sperrrichtung einbauen, so wie es der Schaltplan zeigt.



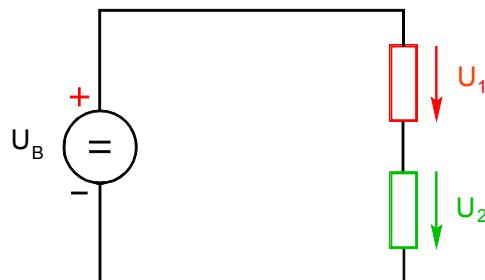
Drehen Sie vorsichtig die Spannung am Netzgerät hoch und beobachten Sie dabei die Lämpchen. Drehen Sie die Spannung nur so hoch, dass kein Lämpchen „durchbrennt“.

- Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit denen Ihrer Kommilitonen/Innen. Überlegen Sie: Welche Eigenschaften muss eine solche Diode haben, um die Spannung auf einem bestimmten Wert (nahezu) konstant halten zu können?

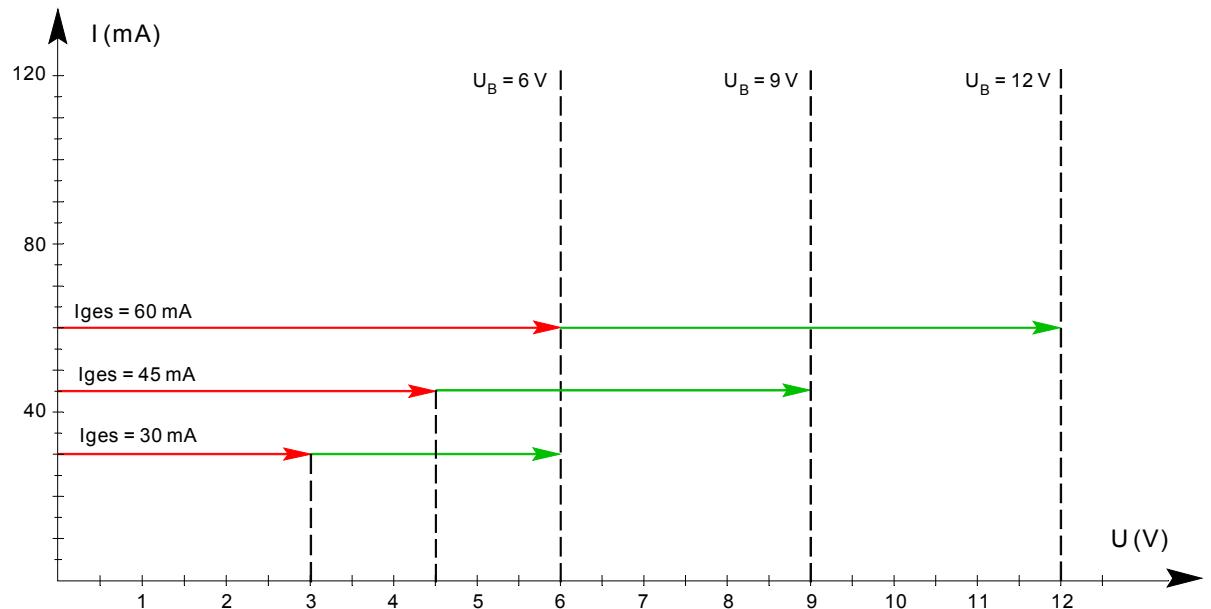


Erinnern Sie sich: Auch „normale“ Dioden haben solche stabilisierenden Eigenschaften, allerdings nur in Durchlassrichtung: Wenn man bei einer Reihenschaltung von Diode und Widerstand kontinuierlich die Spannung erhöht, bleibt nach Überwindung der Schleusenspannung die Durchlassspannung an der Diode nahezu konstant. Deshalb darf bei Berechnungen vereinfachend die Durchlassspannung von Siliziumdioden mit 0,7 V angenommen werden. Allerdings stabilisieren diese Dioden nur bei 0,7 V.

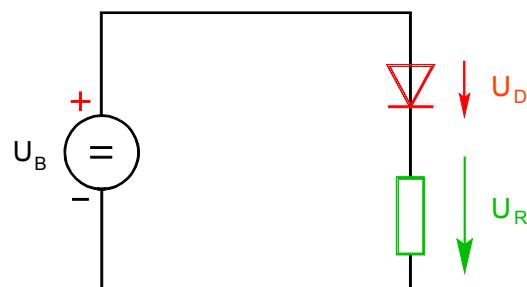
Der **Effekt der Spannungsstabilisierung** lässt sich auch an einer "normalen" Diode zeigen, wenn man sie in Durchlassrichtung betreibt. Dazu zunächst folgende Schaltung:



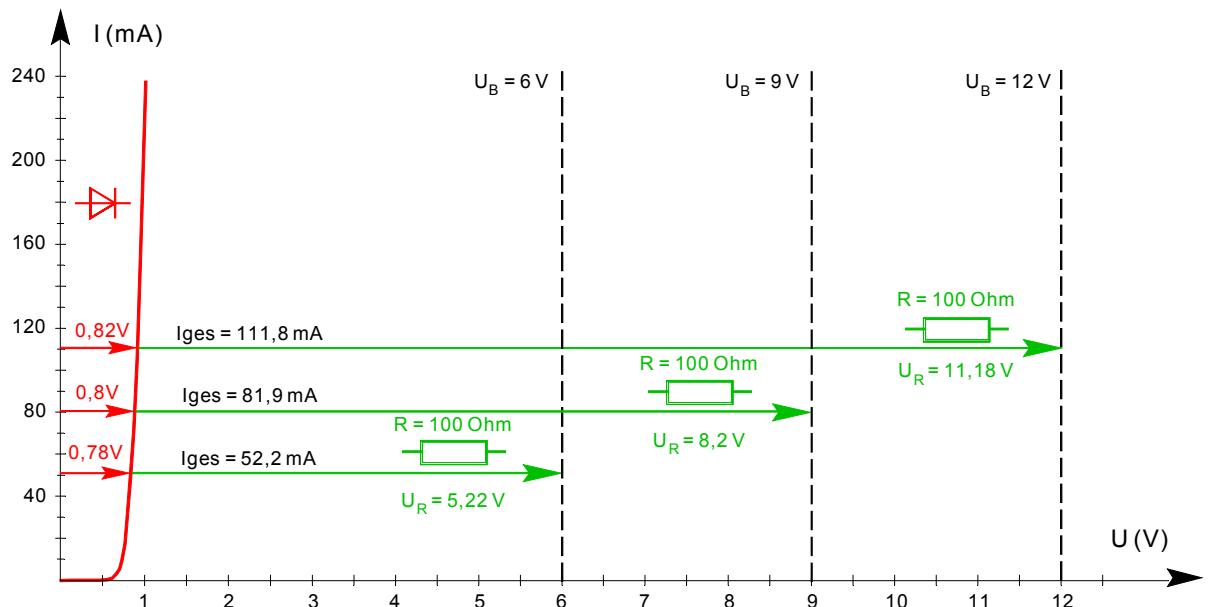
Erhöht man bei einer Reihenschaltung zweier Widerstände (hier je  $100 \Omega$ ) die Betriebsspannung ( $6 \text{ V}$ ,  $\rightarrow 9 \text{ V}$ ,  $\rightarrow 12 \text{ V}$ ), so steigen die Teilspannungen an den beiden Widerständen entsprechend an, das Spannungsverhältnis zwischen ihnen bleibt aber. Diese Verhältnisse werden durch das folgende Diagramm anschaulich dargestellt.



Ersetzt man einen der Widerstände (hier  $R_1$ ) aber durch eine Diode,

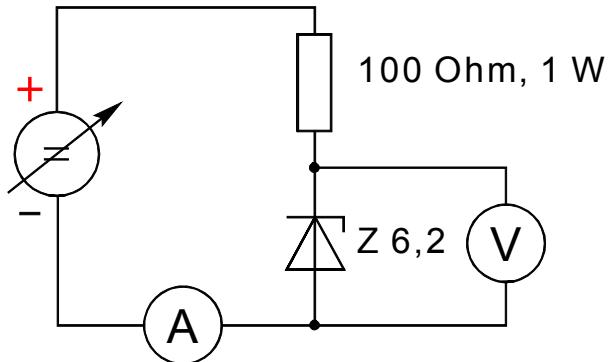


so wird die Aufteilung der Spannungen durch die Dioden-Kennlinie bestimmt.



Wie man dem Diagramm leicht entnehmen kann, ändert sich bei gleicher Erhöhung der Betriebsspannung jetzt die Teilspannung an der Diode nur geringfügig, den größten Teil der Spannungserhöhung nimmt der Widerstand auf.

 **Kennlinie aufnehmen:** Um die Arbeitsweise einer Z-Diode genauer kennen zu lernen, nehmen Sie jetzt ihre Kennlinie auf. Verwenden Sie dazu folgende Schaltung:



Achten Sie bitte darauf, dass Sie die Stromstärke durch die Z-Diode nicht größer als 65 mA machen, messen Sie deshalb am besten „von oben nach unten“, d.h. stellen Sie die Spannung am Netzgerät zuerst so ein, dass der maximale Strom von 65 mA fließt und lesen Sie die dazugehörige Spannung ab. Dann vermindern Sie die Spannung Schritt für Schritt.



Notieren Sie Ihre Messwerte in einer Tabelle. Errechnen Sie aus den ermittelten Spannungs- und Stromwerten die jeweiligen „Bahnwiderstände“ der Z-Diode für die verschiedenen Messpunkte.  
Haben Sie alle Werte bis Null ermittelt, drehen Sie die Diode um und messen die Durchlassrichtung (siehe Messung Diode). Ergänzen Sie die Messwerte in der Tabelle.

 **Zeichnen** Sie auf Millimeter-Papier die Kennlinie der Z-Diode auf (Durchlass- und Sperrbereich). Da die Kennlinie das Verhalten des Bauelements zeigt, versuchen Sie, dieses Verhalten aus der Kennlinie abzulesen und zu beschreiben und mit Ihren Beobachtungen des einleitenden Versuchs in Verbindung zu bringen.

Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit Z-Dioden-Kennlinien aus der Literatur.



**Vertiefungsstoff:** Die stabilisierende Eigenschaft der Z-Diode lässt sich sehr schön mit der Methode der „Arbeitspunktbestimmung mit Kennlinien“ zeigen.



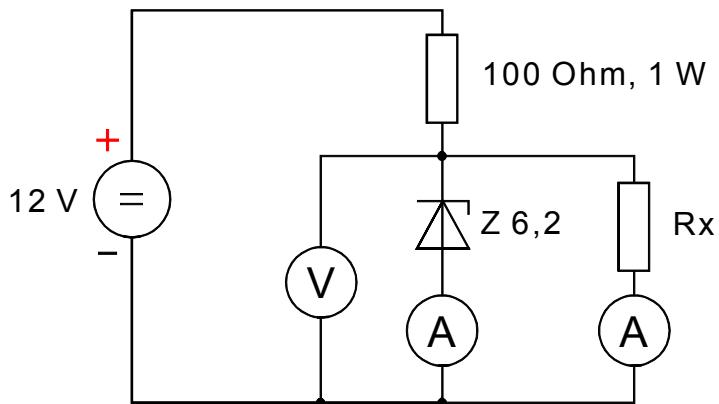
Siehe dazu: „Übungs- und Vertiefungsteil; 4. Funktion: Stabilisierung der Ausgangsspannung; Arbeitspunktbestimmung mittels Kennlinien“.

### **Stabilisierung bei unterschiedlicher Belastung am Ausgang:**

Die Versuche und Überlegungen haben geklärt, auf welche Weise mit Z-Dioden Schwankungen der Eingangsspannung (Versorgungsspannung) stabilisiert werden können. Noch unklar ist jedoch, ob Z-Dioden auch in der Lage sind, Schwankungen der Ausgangsspan-

nung durch unterschiedliche Belastung des Netzgeräts zu stabilisieren. Dies soll jetzt untersucht werden.

Wir gehen dabei von der Z-Dioden-Schaltung mit Vorwiderstand aus und setzen unterschiedlich große Widerstände  $R_x$  als Last ein.



Messen Sie

- die Spannung  $U_Z$  über der Z-Diode
- Die Stromstärke  $I_Z$  durch die Z-Diode
- die Stromstärke  $I_L$  durch den Lastwiderstand  $R_x$

mit folgenden **Werten von  $R_x$ :**

ohne  $R_x$  (d.h. offene Leitung, unendlich großer Widerstand),  $10 \text{ k}\Omega$ ,  $4,7 \text{ k}\Omega$ ,  $1 \text{ k}\Omega$ ,  $820 \Omega$ ,  $470 \Omega$ ,  $330 \Omega$ ,  $220 \Omega$ ,  $100 \Omega$ ,  $82 \Omega$ .



Notieren Sie Ihre Messwerte in einer Tabelle:

	ohne	$10 \text{ k}\Omega$	$4,7 \text{ k}\Omega$	$1 \text{ k}\Omega$	$820 \Omega$	$470 \Omega$	$330 \Omega$	$220 \Omega$	$100 \Omega$	$82 \Omega$
$I_Z (\text{mA})$										
$I_L (\text{mA})$										
$I_{\text{ges}}$										
$U_Z (\text{V})$										

### Aufgaben:

- Ergänzen Sie jeweils die Gesamtstromstärke für jeden Belastungsfall
- Untersuchen Sie, wie sich die beiden Stromstärken  $I_Z$  und  $I_L$  in der Tendenz bei steigender Belastung verhalten und wie die Gesamtstromstärke

- Ziehen Sie daraus Schlüsse über die Strombelastung der Z–Diode bei unterschiedlichen Belastungen am Ausgang
- Untersuchen Sie, wie sich die Z–Spannung bei steigender Belastung verhält. Geben Sie die Grenze an, bei welcher die Stabilisierung aussetzt. Geben Sie den Belastungsbereich an, innerhalb dessen die Z–Diode gut stabilisiert.



**Vertiefungsstoff:** Die stabilisierende Eigenschaft der Z–Diode bei unterschiedlicher Last lässt sich auch mit der Methode der „Arbeitspunktbestimmung mit Kennlinien“ zeigen.

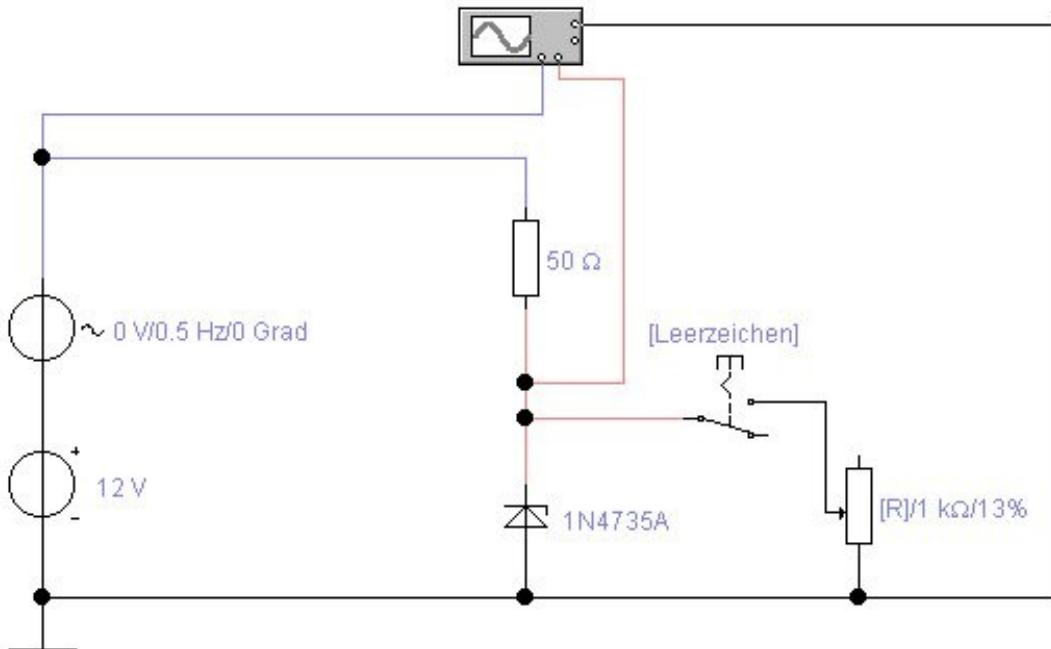


Siehe dazu: „Übungs– und Vertiefungsteil; 4. Funktion: Stabilisierung der Ausgangsspannung; Arbeitspunktbestimmung mittels Kennlinien“.



**E Experimentieren, Untersuchen:** Bauen Sie mit EWB die folgende Schaltung auf, mit der Sie sowohl die Stabilisierung von Schwankungen der Eingangsspannung als auch unterschiedliche Belastung des Ausgangs simulieren können. Untersuchen Sie

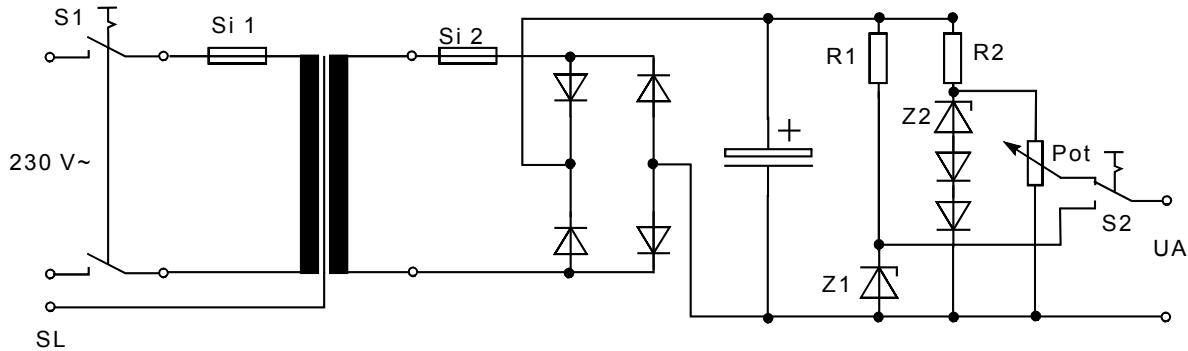
- bis zu welcher Größe der Schwankung der Eingangsspannung die Z–Diode stabilisiert
- bis zu welchem Widerstandswert des Lastwiderstandes die Z–Diode stabilisiert.



Untersuchen Sie diese beiden Bedingungen getrennt. Erhöhen Sie die Spannung der Wechselspannungsquelle Schritt für Schritt. Stellen Sie die Schrittweite beim Potentiometer auf 1%, damit Sie die Stabilisierungsgrenze genau bestimmen können.

## Ergebnis:

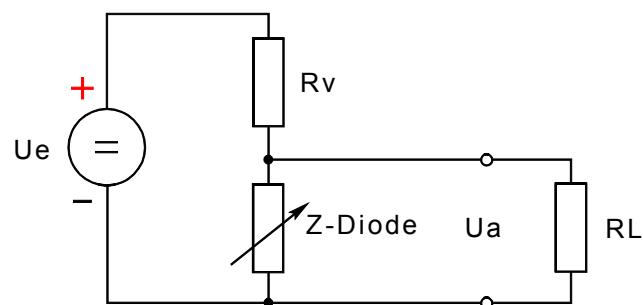
Die Realisierung der vierten Funktion – Stabilisieren der Sekundärspannung – führt zu folgender Schaltung des Netzgerätes:



**Zur Erläuterung:** Die Schaltung zeigt **zwei Stabilisierungszweige**: einen mit R1 und der Z-Diode Z1 und einen mit R2 und der Z-Diode Z2, der noch zwei „normale“ Dioden in Reihe geschaltet sind. Die beiden Zweige entsprechen der eingangs aufgestellten Forderung, dass das Netzgerät sowohl eine kontinuierlich einstellbare Spannung als auch eine Festspannung von 5 Volt (für Anwendungen der Digitaltechnik) haben soll. Der Zweig 1 (R1 und Z1) ist für die Festspannung von 5 Volt vorgesehen, der Zweig 2 stabilisiert die einstellbare Spannung, die von 0 bis 15 Volt reichen soll. Das **Einstellen der Ausgangsspannung** geschieht mit dem Potentiometer (Pot), das die stabilisierte Spannung abnimmt und an den Ausgang weiter gibt. Mit dem Schalter S2 kann man zwischen den beiden Spannungen umschalten (von der Festspannung auf die einstellbare). Die beiden Z-Diode Z2 in Reihe geschalteten Dioden dienen der Temperaturstabilisierung. Für die Z-Diode Z1 benötigt man dies nicht, für die Z-Diode Z2 ist es aber vorteilhaft. Allerdings benötigt man dafür nur eine Diode, die zweite ist bereits für die Temperaturstabilisierung des Leistungstransistors vorgesehen, der noch eingefügt werden muss.

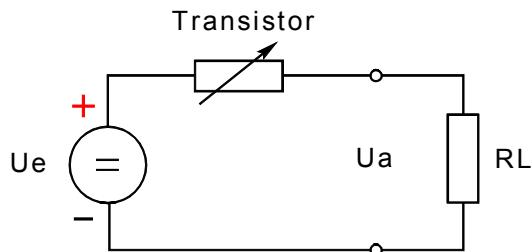
## Der Transistor

Das wesentliche Merkmal einer Spannungsstabilisierung mit Z-Diode besteht darin, dass die Z-Diode parallel zum Lastwiderstand liegt und Spannungsschwankungen durch eine entsprechende Stromänderung wieder ausgleicht (Parallelstabilisierung). Im ungünstigsten Fall, also im Leerlauf, muss von der Z-Diode der gesamte Strom und damit die gesamte Leistung aufgenommen werden. Deshalb verwendet man diese Form der Stabilisierung nur bei kleinen Leistungen und nahezu konstanten Belastungen am Ausgang.



Für höhere Leistungen verwendet man eine spezielle Transistorschaltung, die auf dem Prinzip der Serienstabilisierung beruht. Dies garantiert eine bessere Stabilisierung und eröffnet

gleichzeitig die Möglichkeit, ohne großen Aufwand zusätzlich eine Kurzschluss-Sicherung zu integrieren. Das Prinzip dieser Schaltung zeigt folgendes Bild.

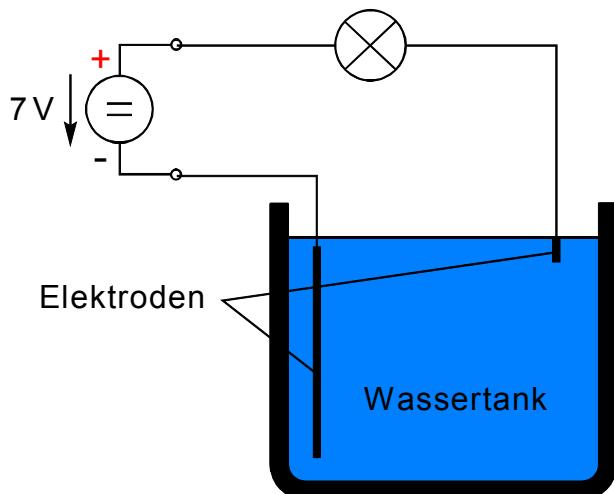


Um diese Form der Stabilisierung realisieren zu können, muss aber zunächst die Funktionsweise des Transistors erarbeitet werden.

### Erarbeiten der Funktionsweise des Transistors, Füllstandsanzeige:

**Aufgabe:** Der Füllstand in einem großen Wassertank soll elektrisch angezeigt werden, d.h. beim Füllen soll das Leuchten eines Lämpchens anzeigen, dass der Tank voll ist. Ein erster Ansatz führt zu folgender Schaltung:

- Bauen Sie die Schaltung auf und testen Sie sie.



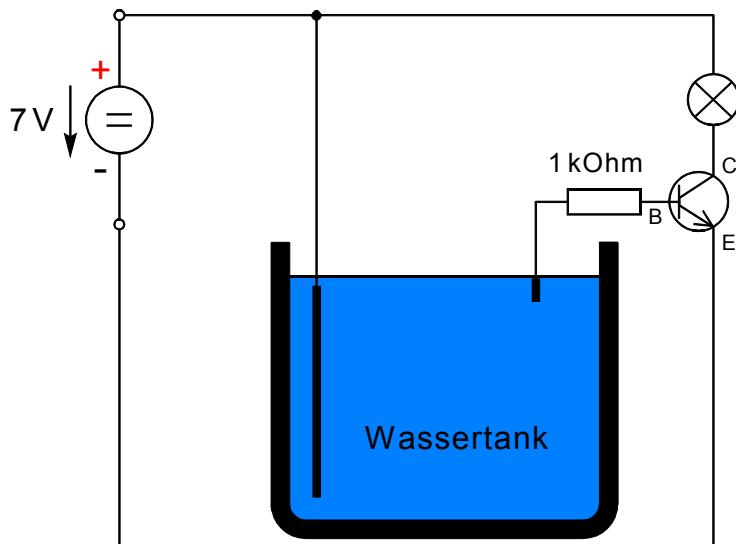
Machen Sie sich zuerst klar, wie diese Schaltung gedacht ist. Könnte sie denn überhaupt funktionieren? Wenn ja, warum leuchtet dann das Lämpchen nicht?



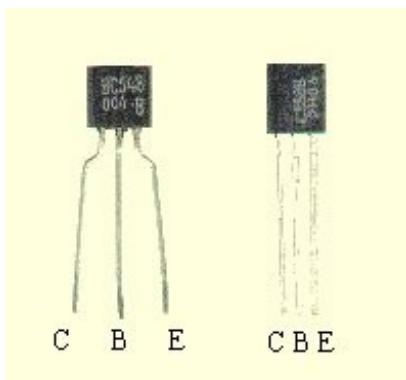
Welche Möglichkeiten gibt es, diese Schaltung zum Funktionieren zu bringen? Versuchen Sie, mehrere Lösungen zu finden. Probieren Sie diese Lösungen aus, wenn die Bauteile bzw. die Möglichkeiten dafür vorhanden sind.

Versuchen Sie, eine Lösung zu finden, bei der das Lämpchen hell leuchtet, wenn der Tank voll ist.

- Bauen Sie folgende Schaltung auf und testen Sie sie.



Bei dieser Schaltung wird das erste Mal ein Transistor verwendet. Transistoren sind Bauelemente, die 3 Anschlüsse haben, die mit C, B und E bezeichnet werden. Die Bedeutung dieser Buchstaben wird später erläutert. Verwenden Sie bitte den Transistor mit der Aufschrift BC548 und folgendem Aussehen:



Die Abbildung zeigt gleichzeitig noch, wie die Anschlussdrähte des Transistors belegt sind: Wenn Sie auf die flache Seite des Transistors schauen, dann gilt die obige Bezeichnung.

**E Experimentieren, Untersuchen:** Untersuchen Sie die Funktionsweise der Schaltung, indem Sie eine der Elektroden aus dem Wasser ziehen (dies simuliert einen nicht gefüllten Tank) und sie wieder eintauchen (gefüllter Tank). **Vermeiden Sie, dass sich die beiden Elektroden im Wasser direkt berühren.**



Notieren Sie sich Ihre Beobachtungen.

- Messen:** Um sich Klarheit über die Verhältnisse in der Schaltung zu verschaffen, messen Sie die Stromstärke in der Leitung, die über die Wasserstrecke führt und in der Leitung, in der das Lämpchen liegt. Was fällt Ihnen auf? Messen Sie auch direkt den Widerstand der Wasserstrecke mit dem Ohmmeter. Welchen Widerstand hat die Wasserstrecke?



Wie „schafft“ es der Transistor, trotz eines so kleinen „Strömkens“ durch die Wasserstrecke das Lämpchen voll leuchten zu lassen?

Zeichnen Sie sich möglichst anschaulich die unterschiedlichen Stromstärken in die Schaltung ein.

## K

Zur Kontrolle: „Übungs– und Vertiefungsteil; 4. Funktion: Stabilisierung der Ausgangsspannung; Funktionsweise des Transistors; Ströme bei der Füllstandsanzeige.



Um ein Vorverständnis für dieses Verhalten zu bekommen, schauen Sie sich die Analogie der Transistorfunktion: Übungs– und Vertiefungsteil; 4. Funktion: Stabilisierung der Ausgangsspannung; Funktionsweise des Transistors; Pneumatische Analogie des Transistors.



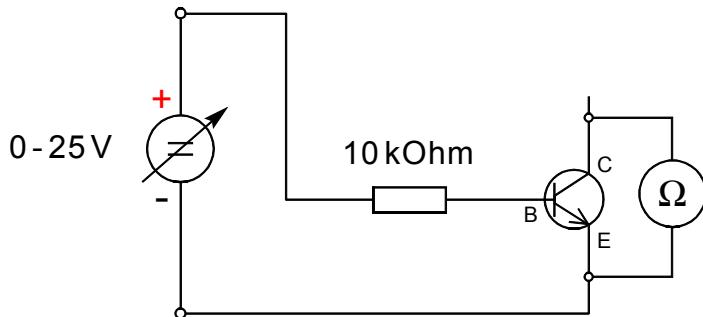
Wenn Sie sich ein genaueres Bild vom inneren Aufbau und der Wirkungsweise des Transistors machen wollen: Systematischer Teil; Transistoren; Aufbau und Wirkungsweise von bipolaren Transistoren.



**Vertiefungsstoff:** Die Veränderung des inneren Widerstands beim Transistor in Abhängigkeit von der Größe des Basisstroms lässt sich auch messtechnisch erfassen und zeigen.



Um diese Veränderung messtechnisch sichtbar zu machen, bauen Sie folgende kleine Schaltung auf:



Wenn Sie nicht genau wissen, wie man mit dem Messinstrument den Widerstand direkt misst: „Systematischer Teil; Umgang mit den Digital–Messinstrumenten; Widerstandsmessung.“

Wichtig ist, dass Sie den Kollektor C offen lassen und die veränderliche Spannung nur zwischen Basis und Emitter anschließen. Durch die Erhöhung der Basis–Emitter–Spannung er-

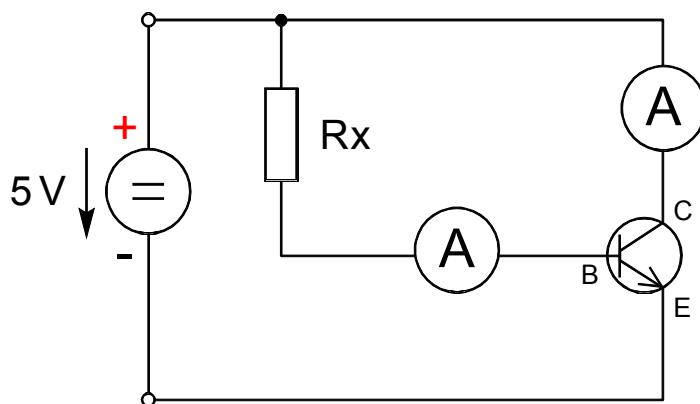
höhen Sie den Basisstrom  $I_B$ , der den inneren Widerstand des Transistors verkleinert, was Sie mit dem Ohmmeter messen und anzeigen können.

**Ergebnis:** Bei diesem Versuch sehen Sie direkt, wie durch den Basisstrom der innere Widerstand des Transistors verändert wird → **Transistor als steuerbarer Widerstand**.

## Kennlinien des Transistors



**Kennlinie aufnehmen:** Transistoren haben, da sie mehr als zwei Anschlüsse besitzen, mehrere Kennlinien, die jeweils ein bestimmtes Verhalten kennzeichnen. Was bei der Füllstandsanzeige als erstes in die Augen fällt, ist der extrem unterschiedlich große Strom im Basiskreis (Steuerstrom) und im Kollektor–Emitter–Kreis (Laststrom). Die Beziehung dieser beiden Ströme wird in der so genannten **Stromsteuer–Kennlinie** dargestellt. Diese Kennlinie nehmen Sie jetzt messtechnisch auf. Verwenden Sie dazu folgende Schaltung:



Verwenden Sie den Transistor BC548. Für  $R_x$  setzen Sie nacheinander folgende Werte ein: 4,7 kΩ, 10 kΩ, 22 kΩ, 47 kΩ, 100 kΩ. Messen Sie jeweils die Basisstromstärke  $I_B$  und die Kollektorstromstärke  $I_C$ .



Sie sollten den Widerstand auf keinen Fall kleiner als 4,7 kΩ machen, da sonst die maximale Kollektorstromstärke  $I_C$  dieses Transistors weit überschritten wird!



Notieren Sie Ihre Messwerte in einer Tabelle.



**Zeichnen** Sie auf Millimeter–Papier die Stromsteuer–Kennlinie auf.



**Information:** Aus dieser Kennlinie lässt sich die sogenannte Stromverstärkung des Transistors ermitteln. Unter Stromverstärkung wird das Verhältnis des Kollektor– zum Basisstrom bezeichnet:

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

Wichtig ist, dass man sich klar macht, was in diesem Zusammenhang der Begriff „**Verstärkung**“ bedeutet: Es bedeutet **nicht**, dass der Transistor sozusagen ein kleines Strömmchen zu einem großen Strom „aufblasen“ kann, das würde auch unter Energieerhaltungsgesichtspunkten gar nicht gehen. Gemeint ist damit, dass in Abhängigkeit von einem sehr kleinen Strom ( $I_B$  als Steuerstrom) der innere Widerstand des Transistors so verändert wird, dass sich am Ausgang ein sehr großer Strom ergibt (Laststrom  $I_C$ ). Selbstverständlich wird die Energie dafür von der Spannungsquelle geliefert!

Selbstverständlich wird in einer Transistorschaltung die Größe des Laststroms nicht nur von diesem Stromverstärkfaktor, sondern auch noch von der Ausgangsbeschaltung des Transistors bestimmt: Liegt im Lastkreis des Transistors ein großer Widerstand, dann fließt dort natürlich auch nur ein kleiner Strom  $I_C$ . Das bedeutet, dass der Stromverstärkfaktor  $B$  die maximale Größe des Ausgangsstroms  $I_C$  in Abhängigkeit vom Eingangsstrom  $I_B$  angibt, also ohne Lastwiderstand. Deshalb wird diese Kennlinie auch ohne Lastwiderstand aufgenommen.

### **Ende Information.**

**Aufgabe:** Bestimmen Sie im mittleren Bereich der Stromsteuer-Kennlinie den Stromverstärkfaktor  $B$  des Transistors BC548.



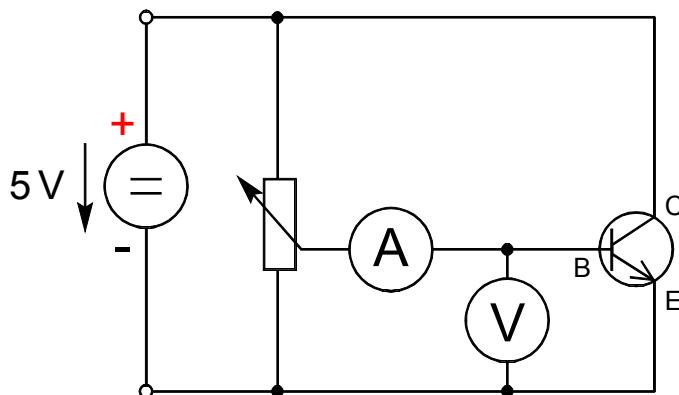
Sie sehen, dass die Kennlinie bei größeren Strömen eine Abflachung aufweist, die sogenannte Sättigung.

**Überlegen Sie:** Was bedeutet diese Abflachung der Kennlinie bei größeren Strömen?

Nehmen Sie für Ihre Überlegungen die Transistor-Analogie zu Hilfe.



**Kennlinie aufnehmen:** Eine weitere wichtige Kennlinie ist die sogenannte **Eingangskennlinie**. Sie verknüpft die beiden Eingangswerte des Transistors, die Eingangsspannung  $U_{BE}$  und den Eingangsstrom  $I_B$  miteinander. Bedingung dafür ist, dass dabei die Spannung  $U_{CE}$  konstant bleibt (hier 5 V). Diese Kennlinie nehmen Sie jetzt messtechnisch auf. Verwenden Sie dazu folgende Schaltung:



Verwenden Sie den Transistor BC548. Als Potentiometer verwenden Sie das im Baukasten vorhandene mit  $50\text{ k}\Omega$ . Messen Sie jeweils die Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$  und die dazugehörige Basisstromstärke  $I_B$ .

- Sie sollten die Spannung  $U_{BE}$  auf keinen Fall größer als 0,8 V machen, da sonst die maximale Kollektorstromstärke  $I_C$  dieses Transistors weit überschritten wird! Messen Sie also am besten „von oben nach unten“, stellen Sie das Poti also zunächst so ein, dass Sie ein  $U_{BE}$  von 0,8 V messen und lesen die dazu gehörige Basisstromstärke  $I_B$  ab, dann verkleinern Sie nach und nach die Spannung  $U_{BE}$ ....



Notieren Sie Ihre Messwerte in einer Tabelle.



**Zeichnen** Sie auf Millimeter–Papier die Eingangs–Kennlinie auf.

Kommt Ihnen die Form dieser Kennlinie bekannt vor? Wo haben Sie sie schon einmal gesehen?



Können Sie erklären, wieso am Eingang des Transistors diese Kennlinie auftritt?



Mit dem Simulationsprogramm „**Der Transistor**“ können Sie alle Kennlinien des Transistors aufnehmen.



Können Sie sich vorstellen, welche Auswirkungen diese Eingangskennlinie auf die Beschaltung eines Transistors haben wird?

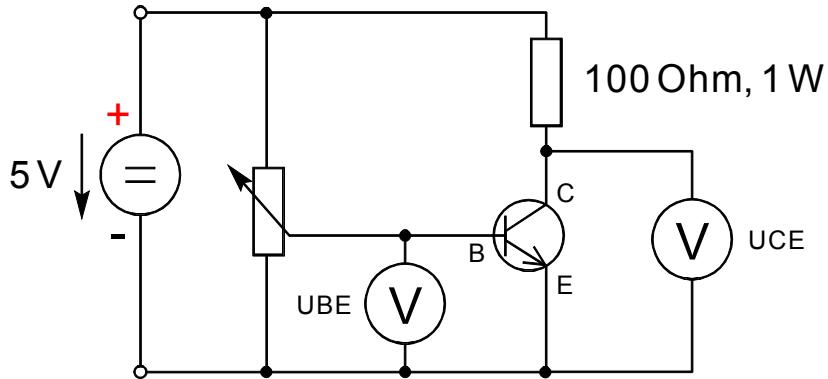
Wie groß müssen Sie die Steuerspannung des Transistors machen, damit er überhaupt öffnen kann?

### Spannung am Ausgang des Transistors:

Für das Verstehen und für das Dimensionieren von Transistorschaltungen ist es wichtig, den Zusammenhang zwischen Eingangs– und Ausgangsspannung zu kennen. Dafür gibt es keine eigene Kennlinie.



Machen Sie sich den Zusammenhang mit Hilfe folgender Schaltung klar:



Wie ist genau der Zusammenhang zwischen Eingangsspannung  $U_{BE}$  und Ausgangsspannung  $U_{CE}$  beim Transistor?



Beachten Sie bei Ihren Überlegungen, dass sie am Ausgang einen Spannungssteiler haben, dessen „unterer“ Widerstand der innere Widerstand des Transistors ist.

Stellen Sie eine **Wirkungskette** folgender Art auf: Vergrößern der Spannung  $U_{BE} \rightarrow \dots$

Lassen Sie bei dieser Wirkungskette kein Kettenglied aus. d.h. beziehen Sie die Ströme mit ein.

### Schaltungen mit dem Transistor, Signalumkehr:

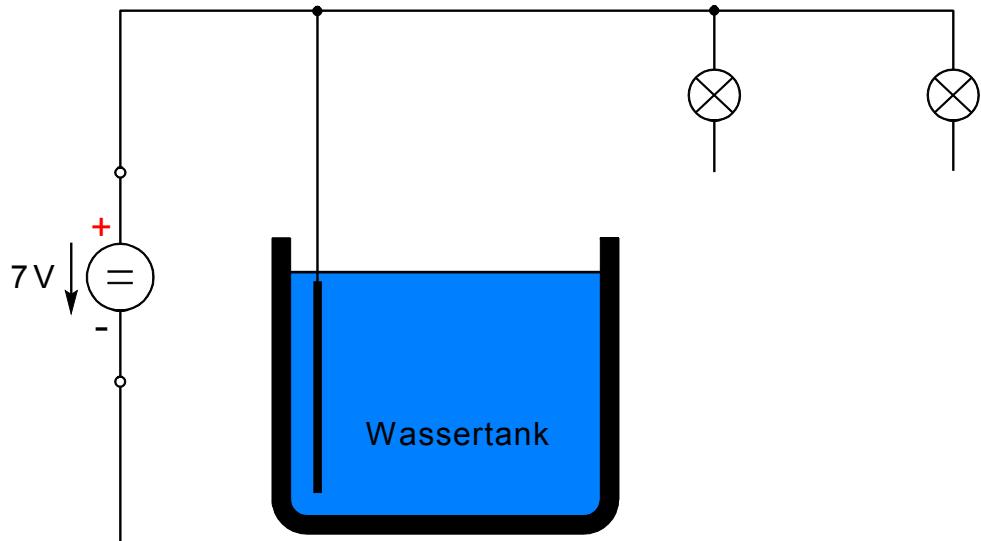


Die **nächste Aufgabenstellung** ist relativ kompliziert bzw. ungewohnt: Es soll eine Schaltung entworfen werden, die durch ein hell leuchtendes Lämpchen anzeigt, dass der Tank leer ist. Der Zusammenhang soll also so sein: Wenn eine der Elektroden (oder beide) **nicht mehr in das Wasser eintauchen**, dann soll das **Lämpchen leuchten**.

Natürlich kann man diese Aufgabe mit Hilfe einer geeigneten Relaischaltung lösen. Da es sich aber hier um eine „Einführung in die Elektronik“ handelt, soll diese Lösungsmöglichkeit jetzt nicht in Betracht gezogen werden.

Zur Vorbereitung bzw. Anbahnung bestimmter Lösungsrichtungen soll folgende vorgeschaltete Aufgabe dienen:

**Füllstandsanzeige mit Vorwarnung:** Die eingangs entwickelte Füllstandsanzeige soll folgendermaßen erweitert werden: Es gibt 2 Lämpchen, von denen eines aufleuchtet, wenn der Tank fast voll ist (dies ist die „Vorwarnung“), das zweite Lämpchen soll – wie zuvor auch schon – dann aufleuchten, wenn der Tank ganz voll ist.



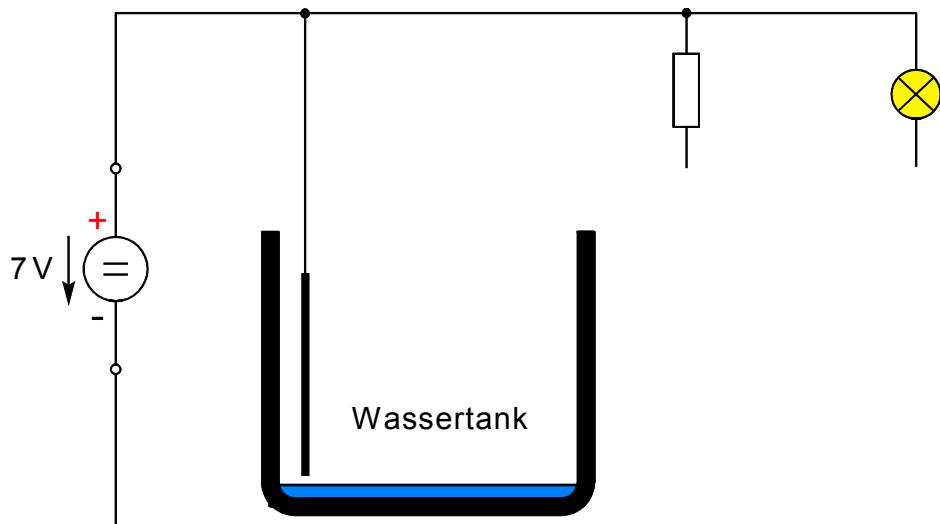
**Hinweis:** Vermuten Sie hinter dieser Aufgabe kein schwieriges Problem. Es ist leichter, als Sie denken. Wenn Sie also eine recht einfache Lösungsidee haben, dann ist es vermutlich schon die Richtige!

Nun also wieder zurück zur ursprünglichen Aufgabe:



Sie sollen eine Schaltung erfinden, die durch ein **hell leuchtendes Lämpchen** anzeigt, dass der Tank **leer** ist.

Die Situation soll durch folgende Abbildung gekennzeichnet sein:



Wenn Sie eine Lösung gefunden haben: **Beschreiben** Sie sie:

Auf welcher **Idee** beruht Ihre Lösung?

Wie ist der Wirkungszusammenhang bzw. die **Wirkungskette**?

- Zeichnen Sie sich die Arbeitsweise der Schaltung in ihren verschiedenen Betriebszuständen auf; zeichnen Sie sich die entstehenden Spannungen und Ströme in ihrer Größe ein.



**Vertiefungsstoff:** Im Übungs- und Vertiefungsteil sind Lösungsvorschläge gezeigt. Bauen Sie sie nach und untersuchen Sie sie. Analysieren Sie diese möglichst exakt und beschreiben Sie ihre Funktionsweise. Zeigen Sie, weshalb sie funktionieren bzw. nicht funktionieren. Beachten Sie dabei, dass der Transistor einen veränderlichen Widerstand darstellt, der meist als Spannungsteiler-Widerstand mit einem anderen Widerstand zusammen arbeitet. Stellen Sie jeweils eine Wirkungskette auf, die die Abhängigkeiten und Beeinflussungen genau wiedergibt.



Siehe dazu: „Übungs- und Vertiefungsteil; 4. Funktion: Stabilisierung der Ausgangsspannung; Der Transistor; Lösungsvorschläge zum Problem: Anzeige des leeren Tanks“.



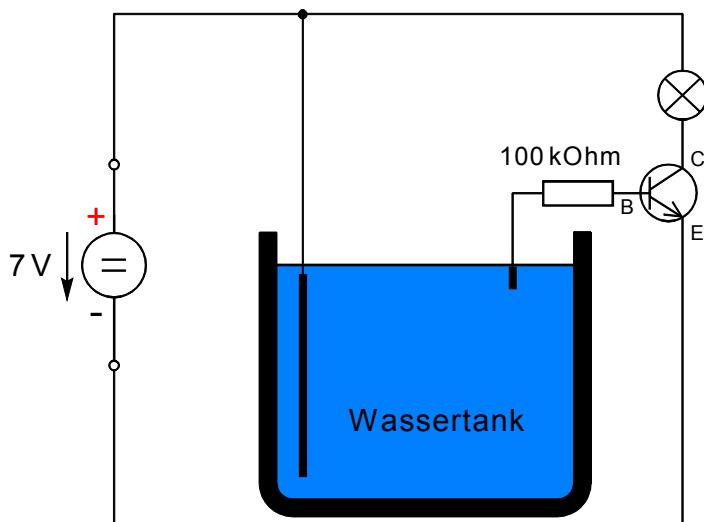
Genauer untersuchen können Sie diese Verhältnisse im: Übungs- und Vertiefungs- teil; 4. Funktion: Stabilisierung der Ausgangsspannung; Der Transistor; Zweistufige Schaltung mit Signalumkehr.

### Schaltungen mit dem Transistor, Darlingtonorschaltung:

Bei den weiteren Überlegungen gehen wir aus von dem Lösungsvorschlag 6, bei dem zwei separate Transistorstufen zusammen geschaltet wurden.

Wenn man nochmal von der ursprünglichen Aufgabenstellung „Anzeige des vollen Tanks“ ausgeht, dann gibt es noch eine effektivere Art, die beiden Transistoren zusammen zu schalten.

- Bauen Sie zunächst folgende Schaltung auf:

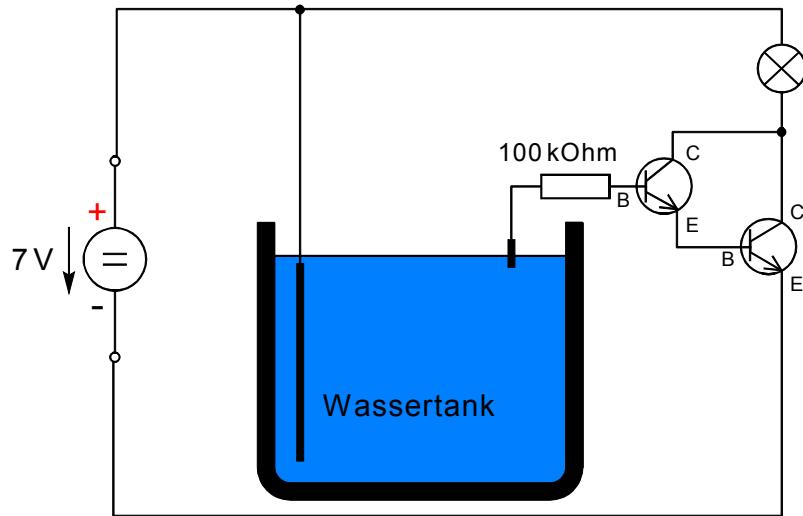


Der einzige Unterschied zu der ursprünglichen Schaltung besteht in dem sehr großen Basis–Vorwiderstand von  $100\text{ k}\Omega$ .

- Untersuchen** Sie die Schaltung genau.

**Messen:** Um sich Klarheit über die Verhältnisse in der Schaltung zu verschaffen, messen Sie die Stromstärke im Basis–Emitter–Kreis und im Kollektor–Emitter–Kreis. Was fällt Ihnen auf?

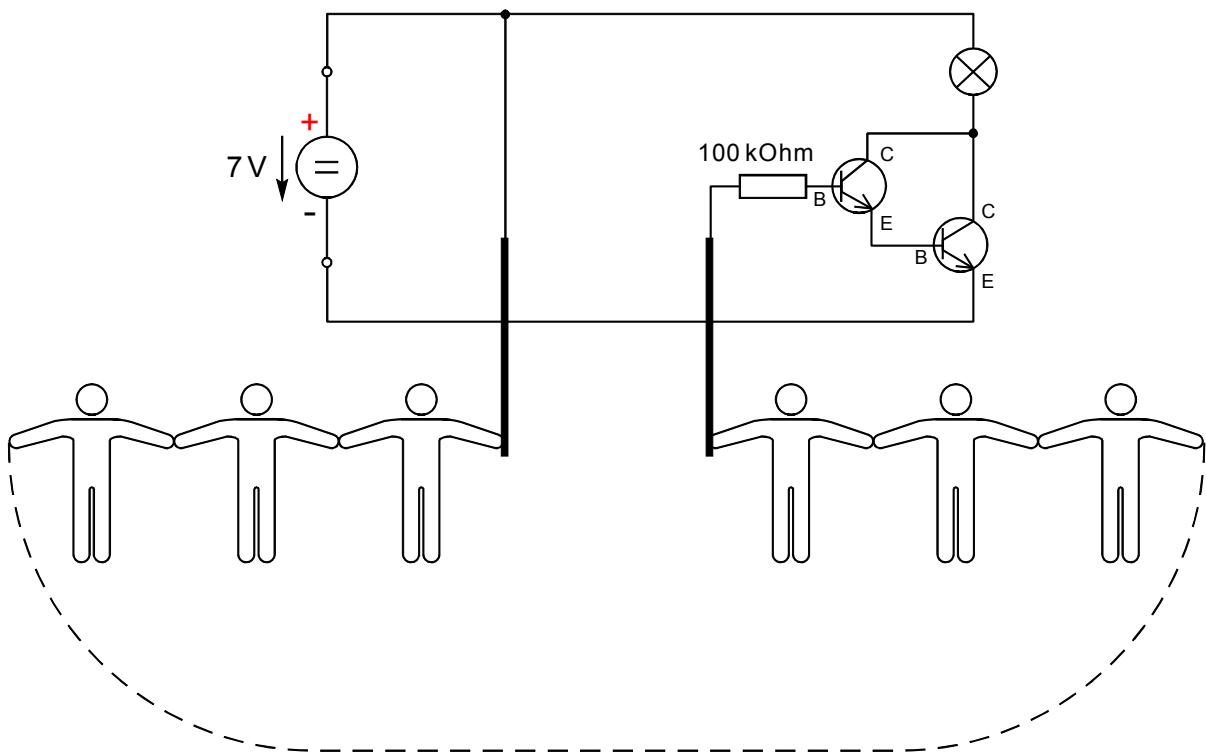
- Und jetzt verändern Sie die Schaltung folgendermaßen:



**Untersuchen** Sie auch diese Schaltung genau.

**Messen:** Um sich Klarheit über die Verhältnisse in der Schaltung zu verschaffen, messen Sie die Stromstärke im Basis–Emitter–Kreis und im Kollektor–Emitter–Kreis. Was fällt Ihnen auf?

**E** Um die Leistungsfähigkeit dieser Schaltung noch zu unterstreichen, testen Sie, wie viele Menschen Sie zwischen die beiden Elektroden "schalten" können, bevor das Lämpchen deutlich dunkler wird!





Diese Schaltung mit der extrem großen Stromverstärkung heißt: **Darlington-Schaltung**. Da sie in der Elektronik relativ häufig vorkommt, gibt es diese typische Verschaltung zweier Transistoren auch in einem einzigen Gehäuse als **Darlington-Transistor**.



Überlegen Sie, wie diese „riesige“ Stromverstärkung bei der Darlington-Schaltung zustande kommt. Verfolgen Sie dazu den Verlauf der einzelnen Ströme sehr genau!



Wenn Sie Hilfe brauchen, schauen Sie nach im: Übungs- und Vertiefungsteil ; 4. Funktion: Stabilisierung der Ausgangsspannung; Der Transistor; Stromverstärkung bei der Darlington-Schaltung.



Wegen der extrem hohen Empfindlichkeit der Darlington-Schaltung wendet man sie überall dort an, wo es um eine hohe Stromverstärkung geht, z.B. sind die Sensortasten (die mit dem Finger überbrückt werden) an manchen Geräten an Darlington-Transistoren angeschlossen, die den winzigen Strom, der über den menschlichen Finger fließt, verstärkt und zur Verarbeitung weitergibt.

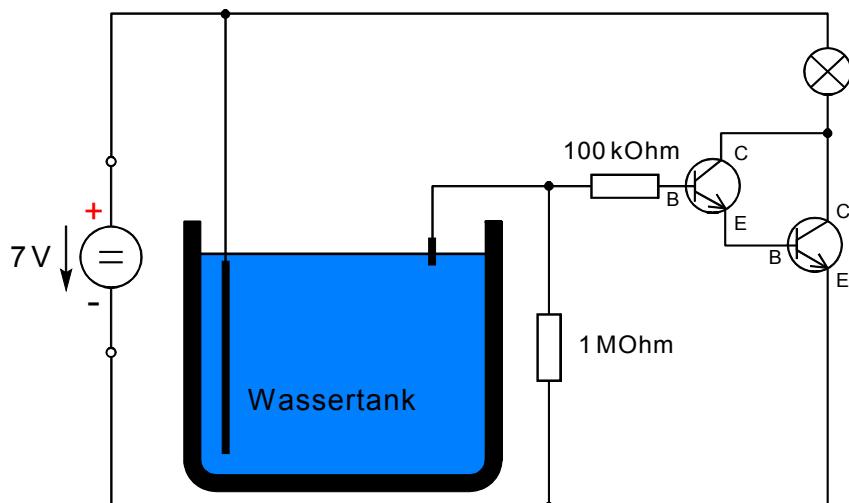
**Ende Information.**

### Schaltungen mit dem Transistor, Signalumkehr mit der Darlington-Schaltung:

Um die Möglichkeiten der Schaltungstechnik mit der Darlington-Schaltung zu erweitern, untersuchen Sie bitte folgende Schaltungen:

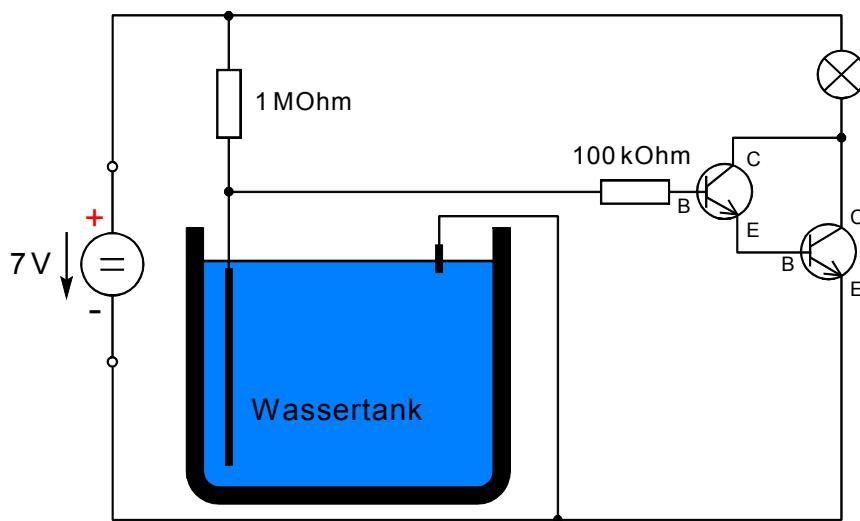


Bauen Sie zunächst folgende Schaltung auf:



**Untersuchen** Sie die Schaltung, indem Sie den Kontakt einer Elektrode mit dem Wasser unterbrechen und wieder herstellen Wie reagiert die Schaltung?

Und jetzt verändern Sie die Schaltung folgendermaßen:



**Untersuchen** Sie die Schaltung, indem Sie den Kontakt einer Elektrode mit dem Wasser unterbrechen und wieder herstellen Wie reagiert diese Schaltung im Unterschied zur obigen?



Versuchen Sie heraus zu finden, wie dieser Effekt zustande kommt. Messen Sie dazu die verschiedenen Spannungen. Beachten Sie dabei, dass die Wasserstrecke mit dem 1 MΩ-Widerstand einen Basisspannungsteiler bildet. Wie ist das Verhältnis dieser beiden Widerstände?



Sie können die Zusammenhänge dieser Schaltung genauer untersuchen im: Übungs- und Vertiefungsteil; 4. Funktion: Stabilisieren der Ausgangsspannung; Der Transistor; Emitterschaltung mit Signalamkehr, 2 Eingänge bei der Emitterschaltung.

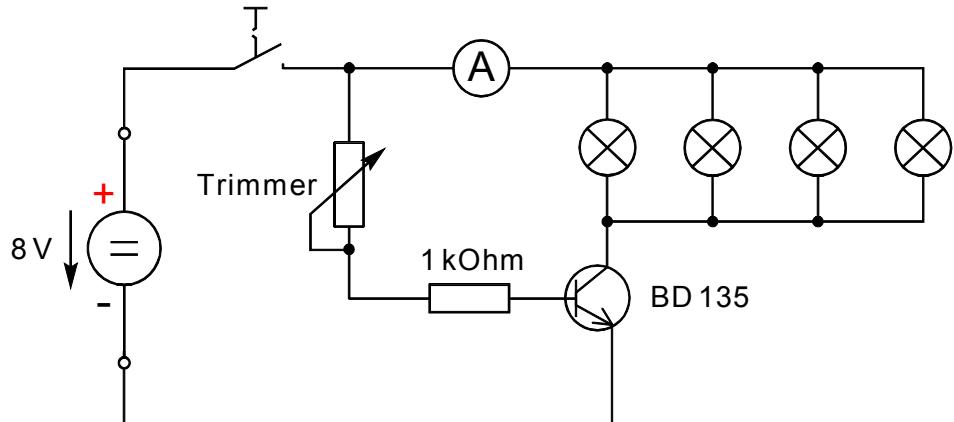


Wenn Sie zusätzliche Informationen brauchen, schauen Sie nach im: Systematischen Teil; Transistoren; Anwendungen; Emitterschaltung

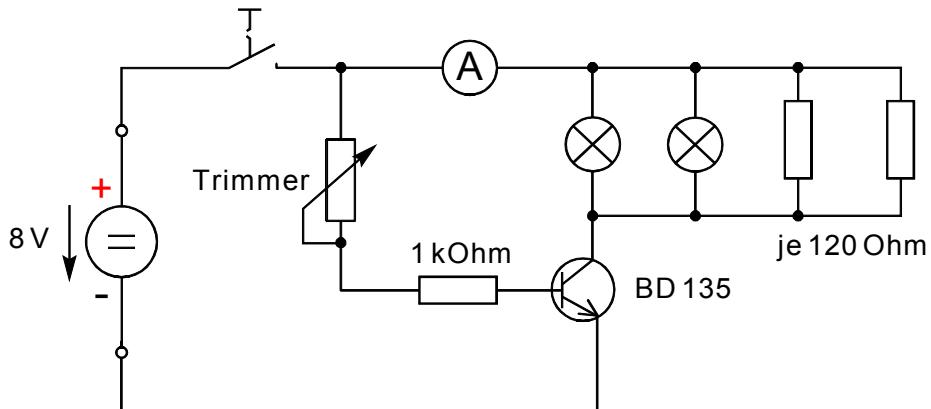
## Leistung beim Transistor



Bauen Sie folgende Schaltung auf:



Wenn Sie nicht so viele Lämpchen im Baukasten haben, können Sie die Schaltung auch folgendermaßen abwandeln:



**Vorsicht!**, Immer erst die Schaltung spannungslos aufbauen, am Messgerät den Messbereich einstellen, kurz messen und dann wieder abschalten.



**Messen:** Gehen Sie beim Messen folgendermaßen vor: Drehen Sie den Trimmer auf Null (kein Widerstand), messen den Kollektorstrom und fühlen gleichzeitig mit dem Finger die Temperatur des Transistors. Notieren Sie beides. Dann drehen Sie den Trimmer hoch (großer Widerstand), messen wieder den Kollektorstrom und fühlen dabei die Temperatur am Transistor. **Wenn Sie spüren, dass der Transistor heiß wird, schnell abschalten!!**



Notieren Sie Ihre Beobachtungen in einer Tabelle.

Trimmer	auf Null (kein Widerstand)	aufgedreht (voller Widerstand)
Kollektorstrom $I_c$	ca.	ca.

Temperatur des Transistors		
----------------------------	--	--



Wie kann das sein, dass der Transistor beim größeren Strom kalt ist und beim kleineren heiß wird??

Müsste es nicht gerade umgekehrt sein? Haben Sie eine Idee?

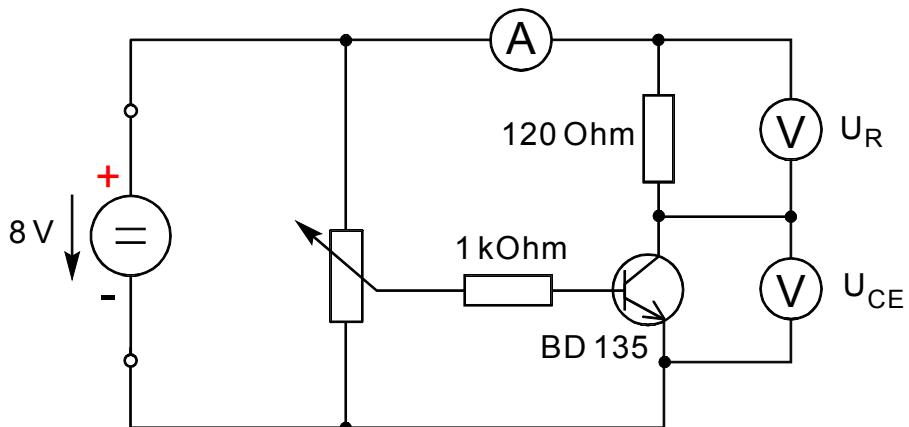
- Messen:** Um sich hier mehr Klarheit zu verschaffen, messen Sie noch einmal, notieren sich dazu aber gleichzeitig den Wert der Kollektor–Emitterspannung  $U_{CE}$  am Ausgang des Transistors.



Tragen Sie Ihre Werte in die folgende Tabelle ein.

Trimmer	auf Null (kein Widerstand)	aufgedreht (voller Widerstand)
Kollektorstrom $I_c$	ca.	ca.
Temperatur des Transistors		
Spannung $U_{CE}$	ca.	ca.
Leistung $P$	ca.	ca.

- Um heraus zu finden, unter welchen Bedingungen am Transistor die größte Verlustleistung auftritt, bauen Sie folgende Schaltung auf:





**Messen:** Gehen Sie beim Messen folgendermaßen vor: Stellen Sie das Potentiometer so ein, dass Sie beim Kollektorstrom ( $I_C$ ) einen Wert von 10 mA bekommen. Dann lesen Sie die dazu gehörigen Spannungswerte am Kollektowiderstand ( $U_R$ ) und am Ausgang des Transistors ( $U_{CE}$ ) ab. Verstellen Sie das Potentiometer so, dass Sie als nächstes 20 mA bekommen und lesen Sie wiederum die Spannungswerte ab. Steigern Sie die Stromstärke so in Zehnerschritten, bis Sie etwa 70 mA erreichen.

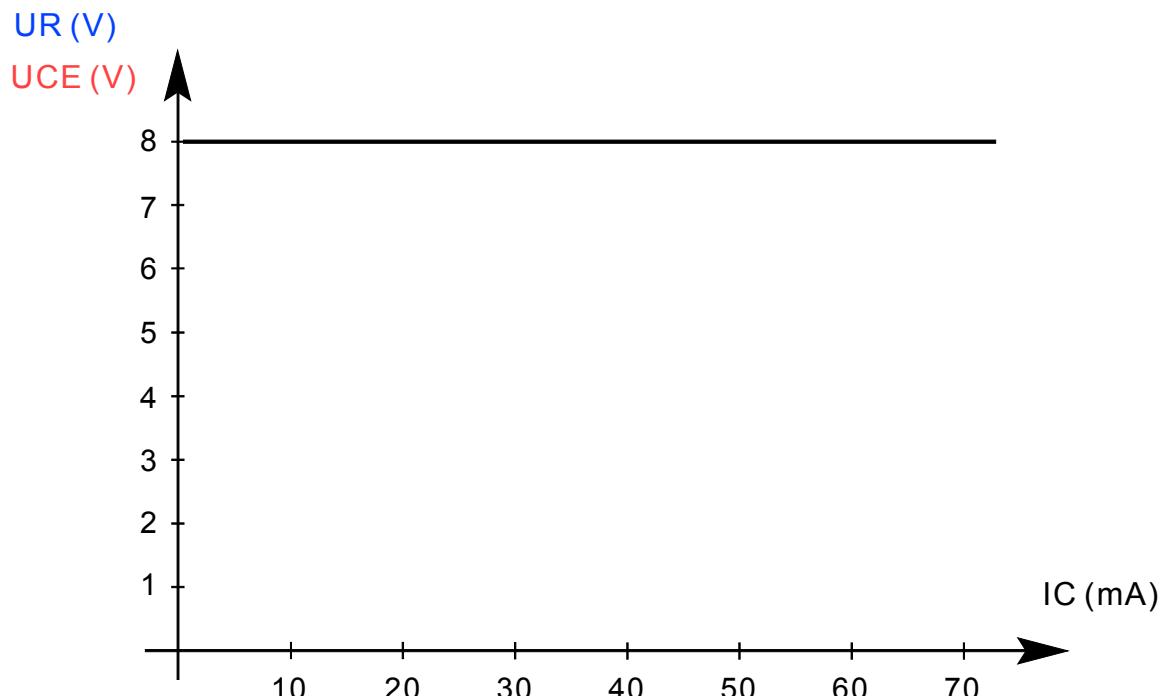
- Tragen Sie Ihre Werte in die folgende Tabelle ein.

$I_C$	10 mA	20 mA	30 mA	40 mA	50 mA	60 mA	70 mA
$U_R$							
$U_{CE}$							



**Zeichnen:** Sie auf Millimeter-Papier die beiden Kurven für den Widerstand und den Transistor in ein Diagramm (U–I–Diagramm).

**Hilfe:** Da Widerstand und Transistor einen Spannungsteiler bilden, muss die Summe der beiden Spannungen immer die angelegte Betriebsspannung von 8 Volt ergeben. Sie können also für die Betriebsspannung eine Gerade in das Diagramm einzeichnen. Und nun tragen Sie für die verschiedenen Kollektorströme die gemessenen Spannungen ein, am besten in zwei verschiedenen Farben und so, dass sie sich zur Betriebsspannung ergänzen.

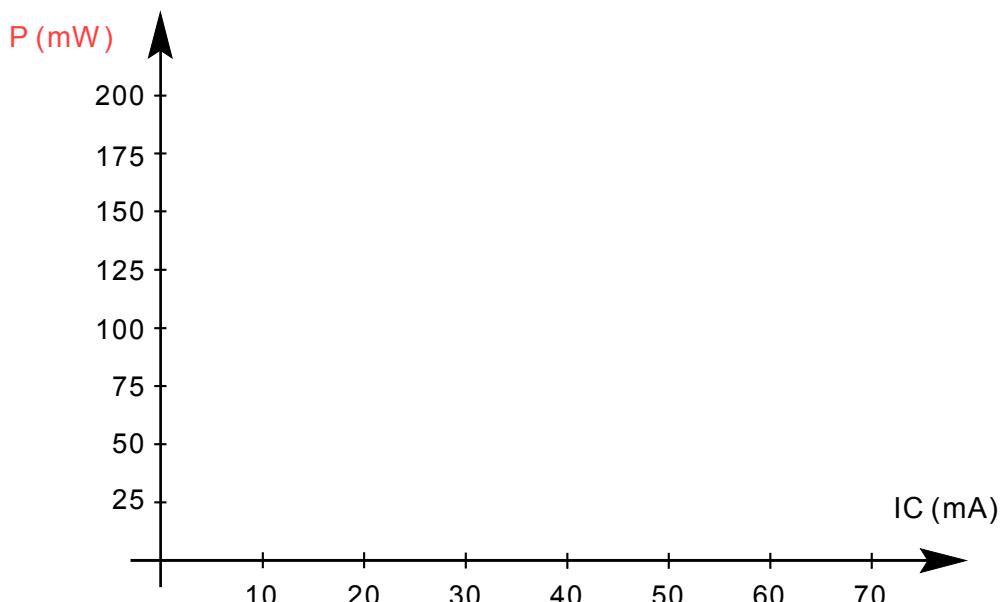


Aus diesem Diagramm lässt sich nun die tatsächlich im Transistor umgesetzte Leistung ermitteln:

### Innenwiderstand des Transistors:

Die hohe Spannung am Transistor auf der linken Seite des Diagramms lässt darauf schließen, dass hier der Transistor einen hohen Innenwiderstand (Übergangswiderstand vom Kollektor zum Emitter) aufweist. Im gespererten Zustand liegt dieser Wert bei etwa  $100\text{ M}\Omega$ ! Auf der rechten Seite sinkt die Spannung am Transistor wieder auf einen sehr niedrigen Wert ab (etwa 0,2 V). Daraus kann man schließen, dass der Transistor im voll durchgeschalteten Zustand einen sehr niedrigen Innenwiderstand aufweist. Dieser liegt etwa bei  $4\Omega$ . Dies ist ein Unterschied in der Größenordnung von  $10^8$ !

 Nehmen Sie folgendes Diagramm zu Hilfe und zeichnen Sie auf Millimeter-Papier die Leistungskurve des Transistors.



Beim Messen ist Ihnen sicherlich aufgefallen, dass Sie den Wert 70 mA kaum noch oder sogar gar nicht mehr erreichen konnten, obwohl Sie doch das Potentiometer ganz aufgedreht haben, also die volle Steuerspannung an den Transistor angelegt haben. Können Sie dieses Verhalten mit der Stromsteuerkennlinie des Transistors in Verbindung bringen?

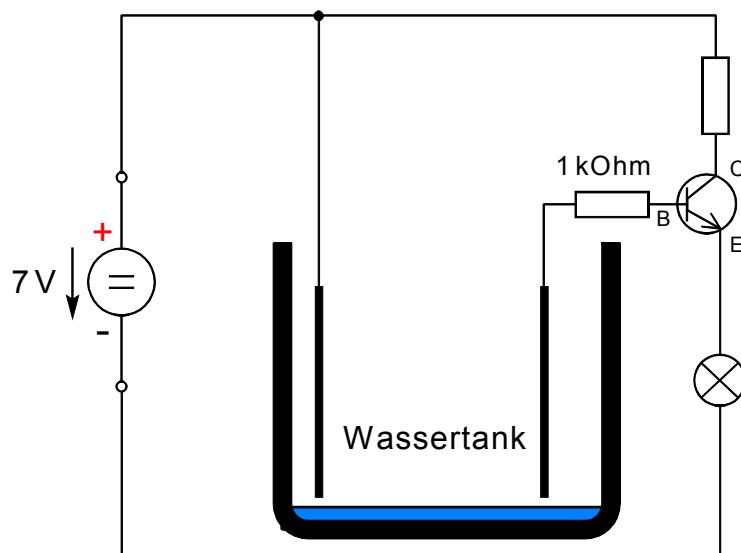


Weitere Informationen zur Leistung im Transistor bekommen Sie im: Systematischen Teil; Transistoren; Leistung beim Transistor.



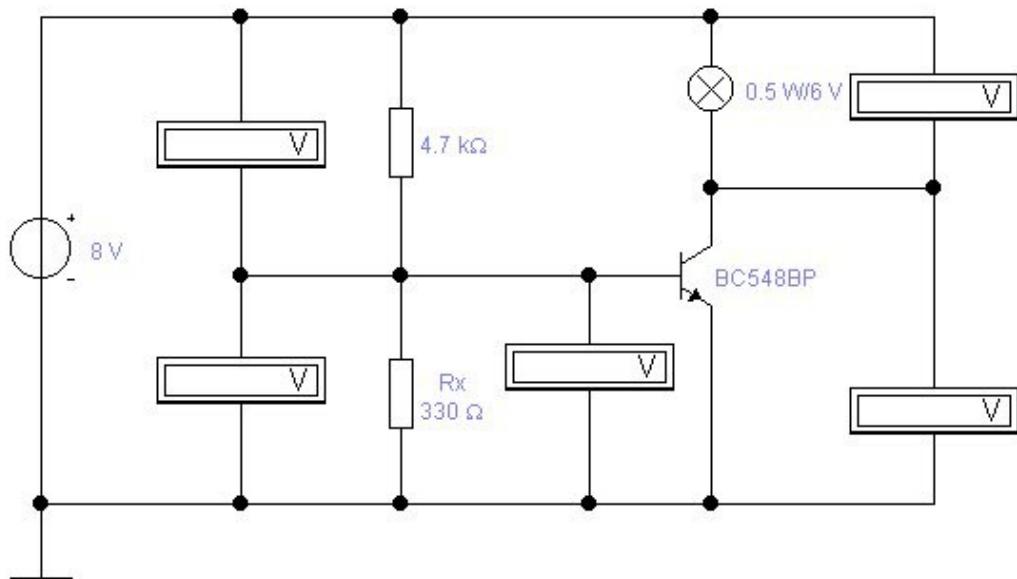
### Schaltungen mit dem Transistor, Kollektorschaltung:

Bereits beim Versuch, eine Schaltung zu erfinden, die mit einem hell leuchtenden Lämpchen den leeren Tank anzeigt, tauchte folgende Schaltung auf:



Als Lösung für die Aufgabenstellung war sie nicht geeignet, aber sie führt uns auf die Spur einer neuen Grundschaltung des Transistors.

- Bauen Sie dazu zunächst folgende Schaltung auf (mit dem **Baukasten**, nicht mit EWB):



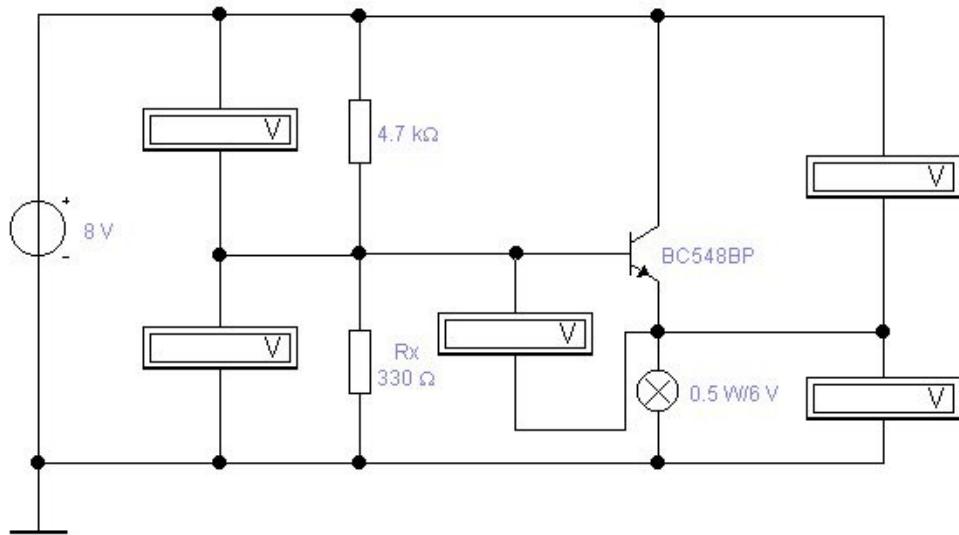
- Messen:** Stecken Sie nacheinander verschiedene Widerstände für  $R_x$  in die Schaltung und messen Sie jeweils folgende Werte:  $U_{R1}$  (oberer Widerstand des Basisspannungsteilers),  $U_{Rx}$ , (unterer Widerstand des Basisspannungsteilers),  $U_{BE}$  ( Basis–Emitterspannung des Transistors),  $U_L$  (Lampenspannung) und  $U_{CE}$  (Kollektor–Emitterspannung des Transistors)

- Tragen Sie Ihre Werte in die folgende Tabelle ein.

$R_x$	ohne $R_x$	10 k $\Omega$	4,7 k $\Omega$	1 k $\Omega$	820 $\Omega$	470 + 330 $\Omega$	470 + 220 $\Omega$	470 + 100 $\Omega$	470 $\Omega$	330 $\Omega$
$U_{R1}$										
$U_{RX}$										
$U_{BE}$										
$U_L$										
$U_{CE}$										

Das Verhalten dieser Schaltung ist nichts Neues für Sie, das kennen Sie jetzt zur Genüge: es ist die typische Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler.

- Und nun ändern Sie eine Kleinigkeit, indem Sie die Lampe aus dem Kollektorkreis entfernen und in den Emitterkreis des Transistors einfügen:



- Messen:** Stecken Sie wieder nacheinander die verschiedenen Widerstände für  $R_x$  in die Schaltung und messen Sie folgende Werte:  $U_{R1}$  (oberer Widerstand des Basisspannungsteilers),  $U_{RX}$ , (unterer Widerstand des Basisspannungsteilers),  $U_{BE}$  ( Basis–Emitterspannung des Transistors),  $U_L$  (Lampenspannung) und  $U_{CE}$  (Kollektor–Emitterspannung des Transistors)

- Tragen Sie Ihre Werte in die folgende Tabelle ein.

$R_x$	ohne $R_x$	10 k $\Omega$	4,7 k $\Omega$	1 k $\Omega$	820 $\Omega$	470 + 330 $\Omega$	470 + 220 $\Omega$	470 + 100 $\Omega$	470 $\Omega$	330 $\Omega$
$U_{R1}$										
$U_{RX}$										
$U_{BE}$										
$U_L$										
$U_{CE}$										



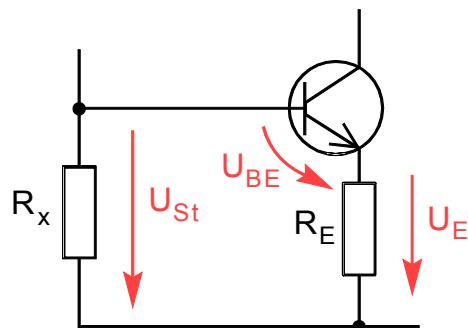
Machen Sie sich zunächst den Unterschied im Verhalten der beiden Schaltungen klar. Beschreiben Sie diesen Unterschied möglichst genau.

Versuchen Sie eine Erklärung für diesen Unterschied zu finden.

Womit könnte es zusammenhängen, dass im zweiten Fall das Lämpchen erst bei so großen Widerständen  $R_x$  leuchtet?

Was bewirkt dieser große Widerstand  $R_x$  ?

**Hilfe:** Vielleicht hilft Ihnen bei Ihren Überlegungen folgendes kleines Bildchen. Der Widerstand „unter“ dem Emitter ist hier mit  $R_E$  (Emitterwiderstand) bezeichnet, was in der Literatur so üblich ist:



Diese Schaltung, bei der der Ausgangswiderstand im Emitterkreis liegt und nicht im Kollektorkreis heißt **Kollektorschaltung**.

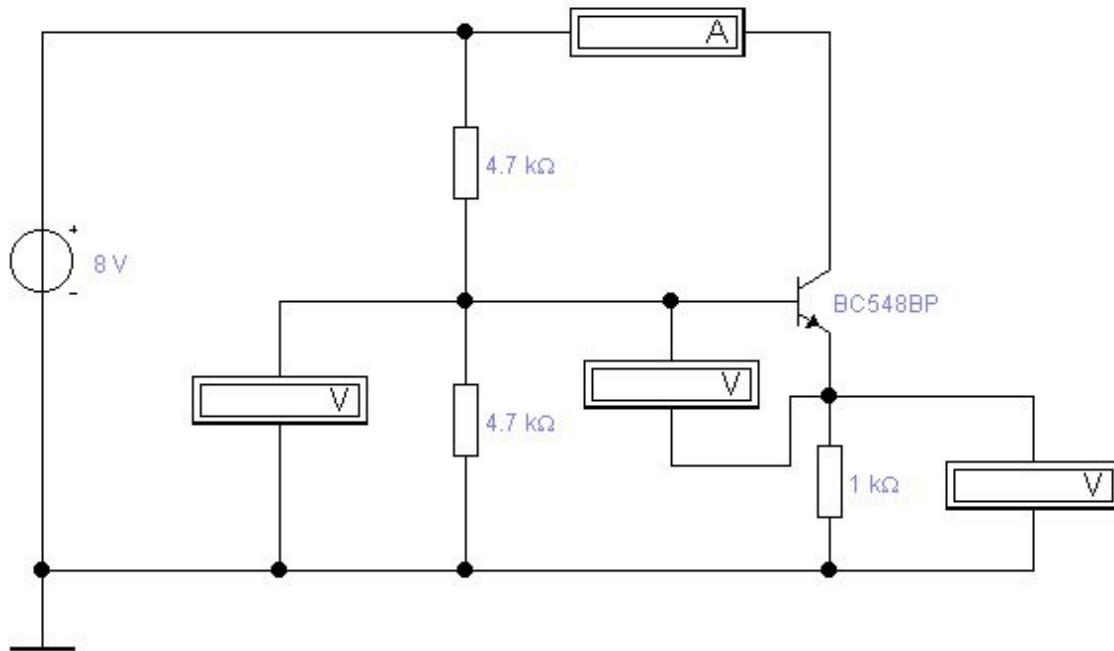


Zur Kollektorschaltung: Systematischer Teil: Transistoren; Transistor–Grundschaltungen; und etwas detaillierter: Kollektorschaltung.

## Spannungsstabilisierung mit der Kollektorschaltung

Bis jetzt sieht es so aus, als hätte diese Kollektorschaltung nur Nachteile. Doch ihre Stärke können Sie durch folgendes Experiment ermitteln:

- Bauen Sie dazu zunächst folgende Schaltung auf (mit dem **Baukasten**, nicht mit EWB):



- Messen:** Dieses Mal verändern Sie nacheinander den Wert des Emitterwiderstandes  $R_E$  und messen folgende Werte:  $U_{R2}$ , (unterer Widerstand des Basisspannungsteilers; dies ist die Steuerspannung),  $U_{BE}$  ( Basis–Emitterspannung des Transistors),  $U_E$  (Spannung am Emitterwiderstand) und  $I_C$  (Kollektorstrom)

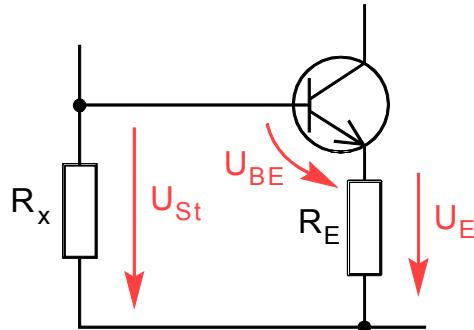
- Tragen Sie Ihre Werte in die folgende Tabelle ein.



Was fällt Ihnen auf, wenn Sie sich die Spannung am Widerstand  $R_E$  anschauen?

Versuchen Sie, eine Erklärung für dieses Verhalten der Kollektorschaltung zu finden. Benutzen Sie als Hilfe dazu auch das Bildchen mit der Darstellung der Spannungen.

Geben Sie sich erst dann zufrieden, wenn Sie das Verhalten vollständig verstanden haben.



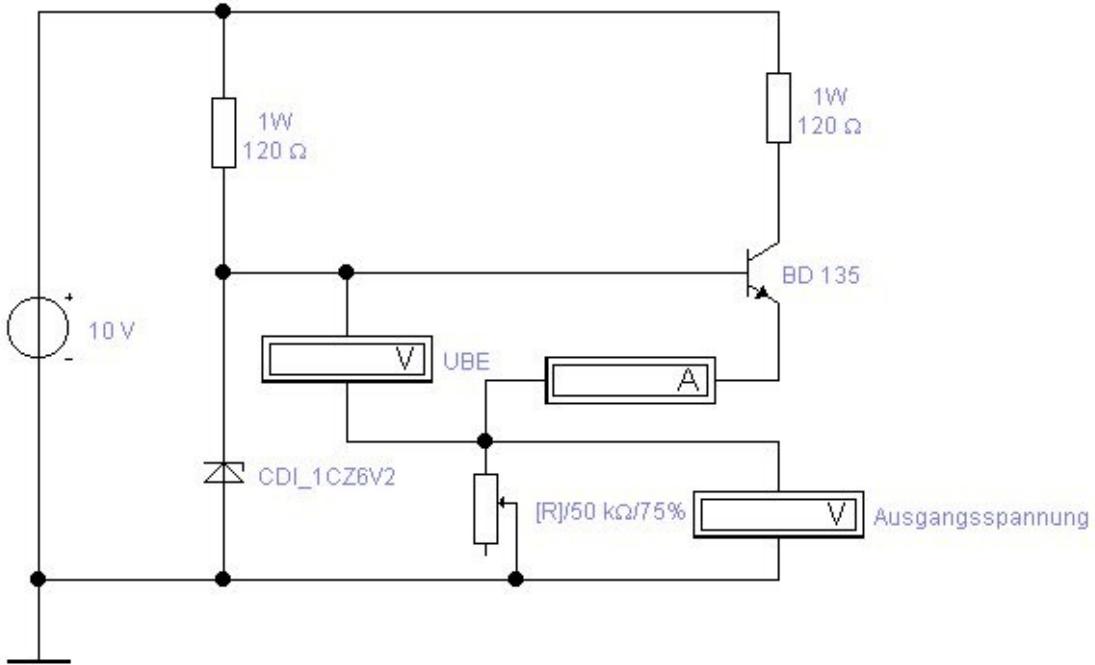
Wenn Sie dennoch Hilfe brauchen, schauen Sie nach im: Systematischen Teil bei:  
Transistoren; Anwendungen; Kollektorschaltung.

### Spannungsstabilisierung mit Kollektorschaltung und Z–Diode:

Diese stabilisierende Eigenschaft der Kollektorschaltung lässt sich noch enorm verbessern, wenn man in die Schaltung eine Z–Diode einfügt.



Bauen Sie dazu folgende Schaltung auf (mit dem **Baukasten**, nicht mit EWB):



Wie Sie sehen, wurde der untere Widerstand des Basisspannungsteilers durch die Z-Diode ersetzt. Um am Emitterwiderstand über einen größeren Widerstandsbereich beobachten zu können, wurde der Einfachheit halber ein Trimmer eingesetzt. Der Widerstand im Kollektorkreis dient der Begrenzung des Kollektorstroms durch den Transistor beim Experimentieren, da die Schaltung ja noch keine elektronische Sicherung besitzt.

- Messen:** Verändern Sie nacheinander die Einstellungen am Emitterwiderstand (Trimmer; zuerst gesamter Widerstand, dann den Widerstand Schritt für Schritt kleiner drehen) und messen für jede gewählte Winkelstellung des Trimmers folgende Werte:  $U_Z$ , (Spannung über der Z-Diode; dies ist die Steuerspannung),  $U_{BE}$  ( Basis–Emitterspannung des Transistors),  $U_A$  (Spannung am Trimmer, Ausgangsspannung der Schaltung) und  $I_E$  (Emitterstrom).



Wie groß ist der Bereich, über den diese Schaltung die Spannung stabilisiert?

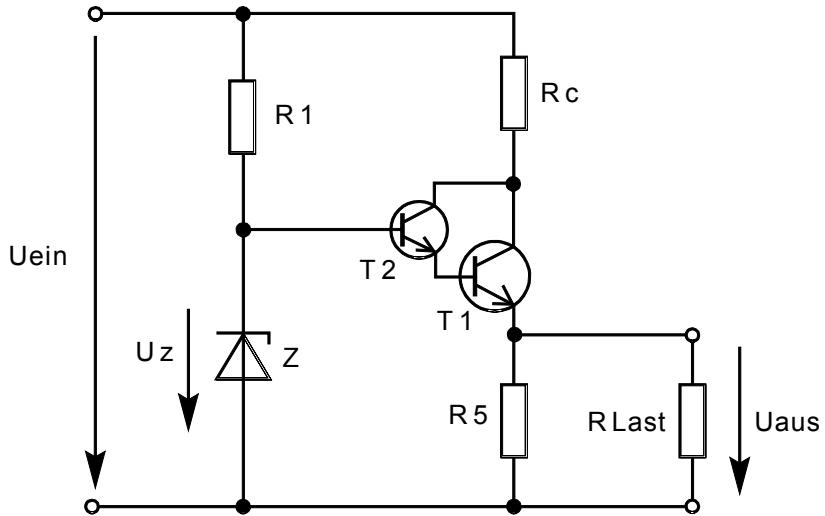
Erklären Sie, welche Rolle die Z-Diode in der Schaltung spielt. Warum setzt man sie gerade an dieser Stelle in die Schaltung ein?



Einen kleinen Schaltungsvergleich finden Sie im: Übungs– und Vertiefungsteil: Der Transistor; Schaltungsvergleich.

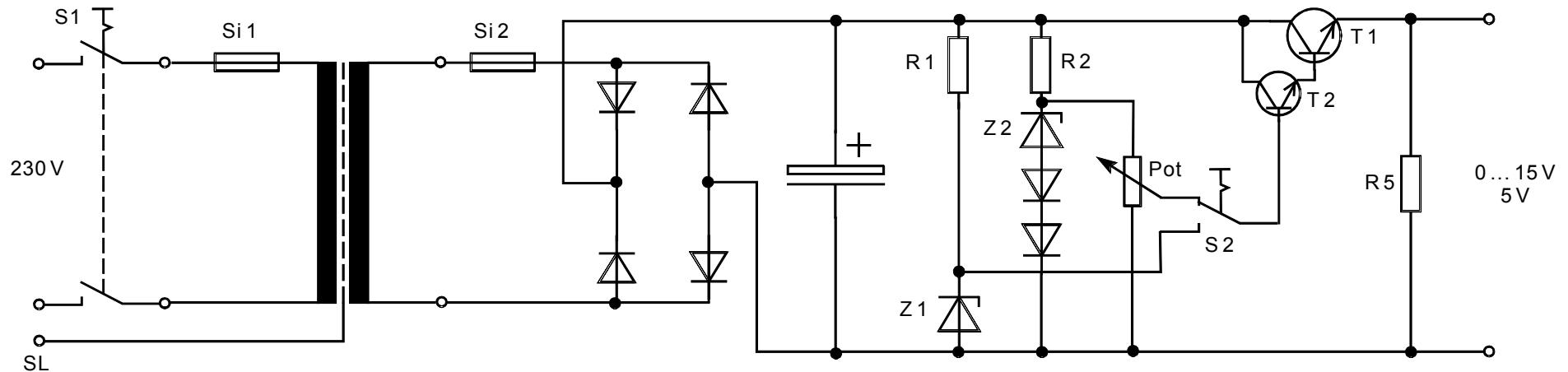
### Ergebnis:

Als Ergebnis der Untersuchungen zur Stabilisierung mit Kollektorschaltung und Z-Diode kann man also die folgende Schaltung festhalten:



In diese Schaltung wurde bereits statt eines einzelnen Transistors eine Darlingtonsschaltung eingefügt, so wie es im Netzgerät wegen der hohen Stromstärke auch sein wird.

Fügt man diesen Schaltungsteil an die bis jetzt erarbeitete Gesamtschaltung an, so ergibt sich:



## 5. Funktion: Sichern des Netzgeräts gegen Kurzschlüsse

### Schmelzsicherungen:

Wie Sie am letzten Ergebnis bereits gesehen haben, wurden in die Schaltung zwei Schmelzsicherungen eingefügt: eine auf der Primärseite und eine auf der Sekundärseite des Trafos. Dies entspricht einer Grundsicherung des Netzgeräts, die sich z.B. beim Reparieren und Fehlersuchen bewährt.

Schmelzsicherungen stellen die empfindlichste Stelle eines Stromkreises dar. Wird die Nennstromstärke der Sicherung um einen bestimmten Betrag überschritten, dann schmilzt der Sicherungsdräht in einer gewissen Zeit und der Stromkreis ist damit unterbrochen. In gewisser Weise entsprechen sie den sogenannten „Soll–Bruchstellen“ im Maschinenbau, um Überlastungen von Maschinenteilen zu verhindern. Schmelzsicherungen sind in diesem Sinn also „Soll–Schmelzstellen“, die verhindern sollen, dass wertvolle Bauelemente oder Baugruppen durch einen zu großen Strom beschädigt werden.



Einen Überblick über Form und Werte von Gerätesicherungen finden Sie im Übungs– und Vertiefungsteil: 5. Funktion: Sichern des Netzteils gegen Kurzschlüsse; Schmelzsicherungen.

**Problem:** Allerdings ist es so, dass Halbleiterbauelemente oft schneller auf Überströme reagieren als Schmelzsicherungen, was dazu führen kann, dass Dioden, Transistoren usw. bereits defekt sind, bevor die Schmelzsicherungen ansprechen.

Es ist also sinnvoll, eine sehr schnelle Sicherung einzubauen, die dafür sorgt, dass auch die Halbleiterbauelemente optimal geschützt sind. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten.

### Elektronische Sicherungen:

#### **Kurzschluss–Sicherung mit Kaltleiter:**



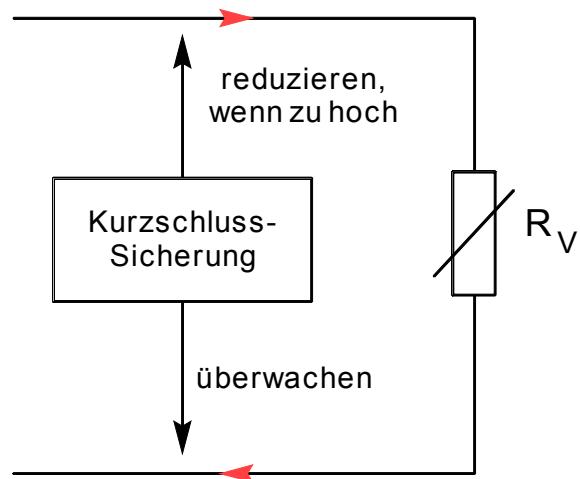
Eine Schaltung zur Kurzschluss–Sicherung mit Kaltleiter finden Sie im: Systematischen Teil: Kaltleiter (PTC–Widerstände); Anwendungen von Kaltleitern.

#### **Kurzschluss–Sicherung mit Transistor:**

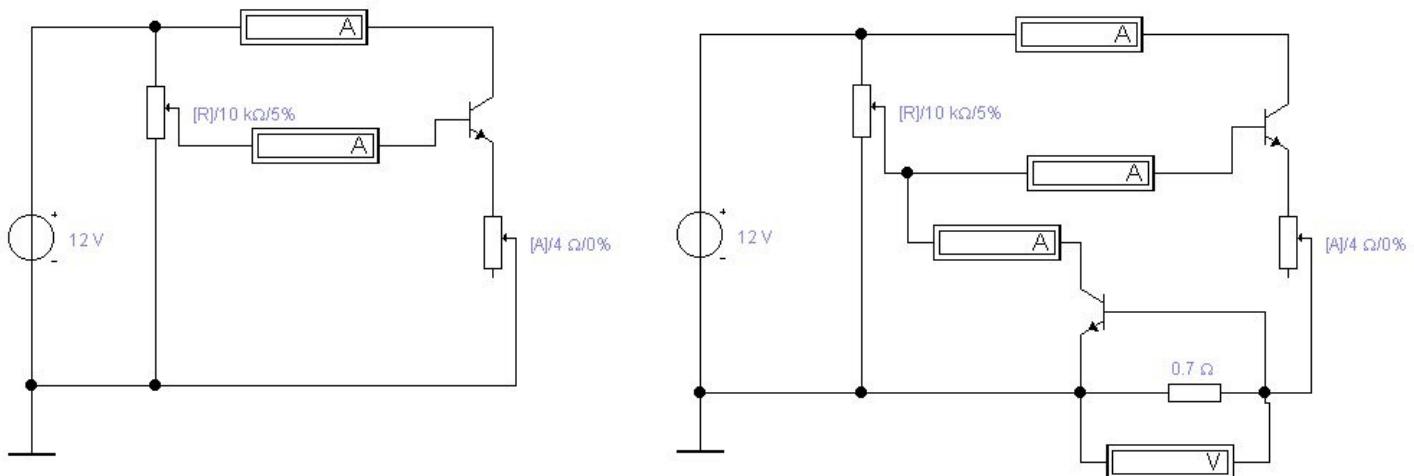
Das typische Kennzeichen der Kurzschluss–Sicherung mit Kaltleiter ist, – im Gegensatz zu Schmelzsicherungen – dass sie den Stromkreis nicht abschaltet, sondern nur die Stromstärke auf einen zulässigen Wert begrenzt.

Eine solche Art der Sicherung lässt sich auch mit einem Transistor aufbauen. Doch zuerst ist es sinnvoll, sich darüber Klarheit zu verschaffen, welche Teil–Funktionen in der Schaltung enthalten sein müssen.

- Um die Stromstärke auf einen bestimmten Wert begrenzen zu können, muss der momentane Wert der Stromstärke jederzeit bekannt sein → „Messen“ der Stromstärke
- Steigt die Stromstärke über den erlaubten Wert, dann muss sie durch geeignete Maßnahmen wieder auf den erlaubten Wert reduziert werden → die Kurzschluss-Schaltung muss verhindern, dass die Stromstärke über den erlaubten Wert ansteigen kann → Einhalten des oberen Grenzwertes.



Um dieses Verhalten zu verstehen, bauen Sie mit EWB gleichzeitig folgende Schaltungen auf:



Wichtig ist, dass Sie in beiden Schaltungen bei den beiden Potis die gleichen Grundeinstellungen vornehmen: bei R: Schritt: 1%; bei A: Schritt: 10%.

Wenn Sie die Simulation starten, lassen Sie die Einstellung von R unverändert, sie legt im Kreis eine Stromstärke von etwa 1 A fest. Verändern Sie nur die Einstellung am Poti A, indem Sie kontinuierlich den Wert verkleinern (Taste a drücken). Vergleichen Sie das Verhalten der beiden Schaltungen.

Lassen Sie sich nicht dadurch verwirren, dass in diesen Schaltungen ideale Spannungsquellen eingebaut sind, die auch bei Kurzschluss ihre Spannung beibehalten.

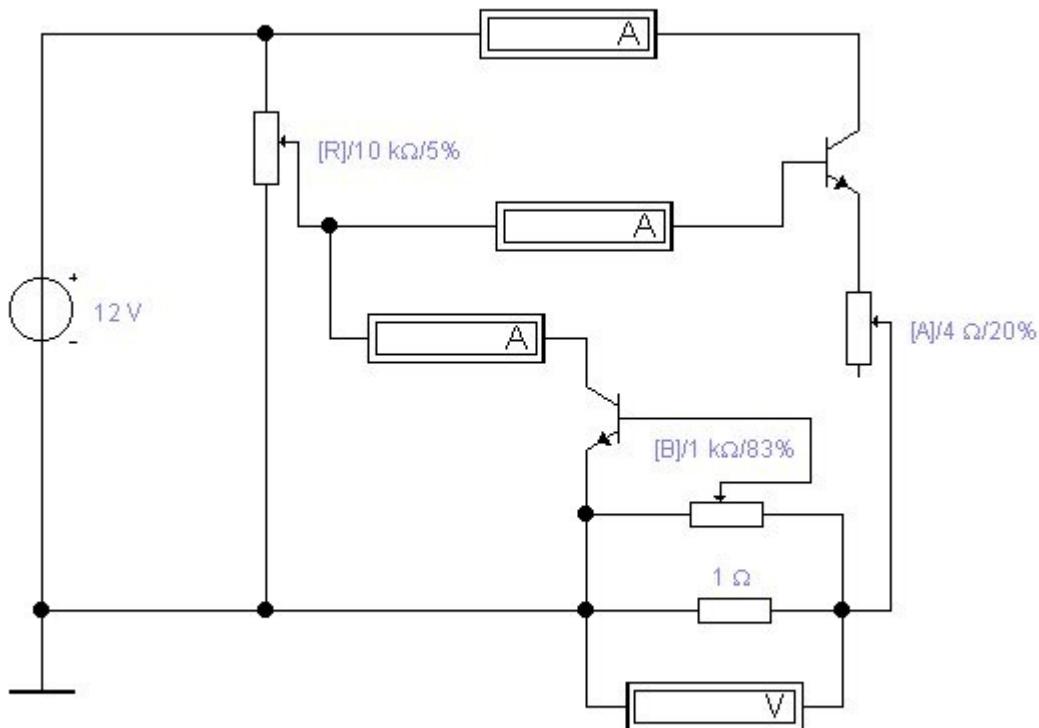


Beschreiben Sie das Verhalten der beiden Schaltungen.

Überlegen Sie: Welches Bauelement übernimmt in der rechten Schaltung die Funktion: Überwachen der Stromstärke?

Welches Bauelement übernimmt in der rechten Schaltung die Funktion: Einhalten des oberen Grenzwertes? Wie genau geschieht das?

**Verbesserung der Schaltung:** Sicher ist Ihnen beim Experimentieren aufgefallen, dass es bei dieser Schaltung ein wenig schwierig ist, den Einsatzpunkt genau zu bestimmen, bei dem die Sicherung zu arbeiten beginnt. Bei konkreten Schaltungen ist das noch schwieriger, da die verwendeten Bauelemente immer eine gewisse Toleranz aufweisen, so dass man immer nur ungefähre Werte für den Kurzschlussstrom bekommt. Um diesen Punkt bequem und vor allem exakter einstellen zu können, wird die obige Schaltung folgendermaßen ergänzt:



Damit Sie sauber experimentieren können, stellen Sie bitte die Potis auf folgende Schrittweiten ein: R: Schritt 1%; B: Schritt 1%; A: Schritt 2%.

Sie werden sehen, dass man mit dieser Schaltung den gewünschten Kurzschlussstrom sauber einstellen und genau einhalten kann.

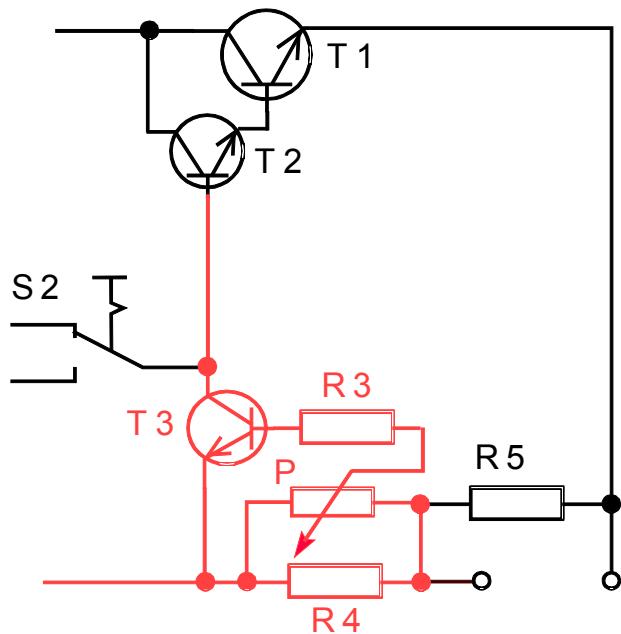
### Kurzschluss-Sicherung mit Thyristor:



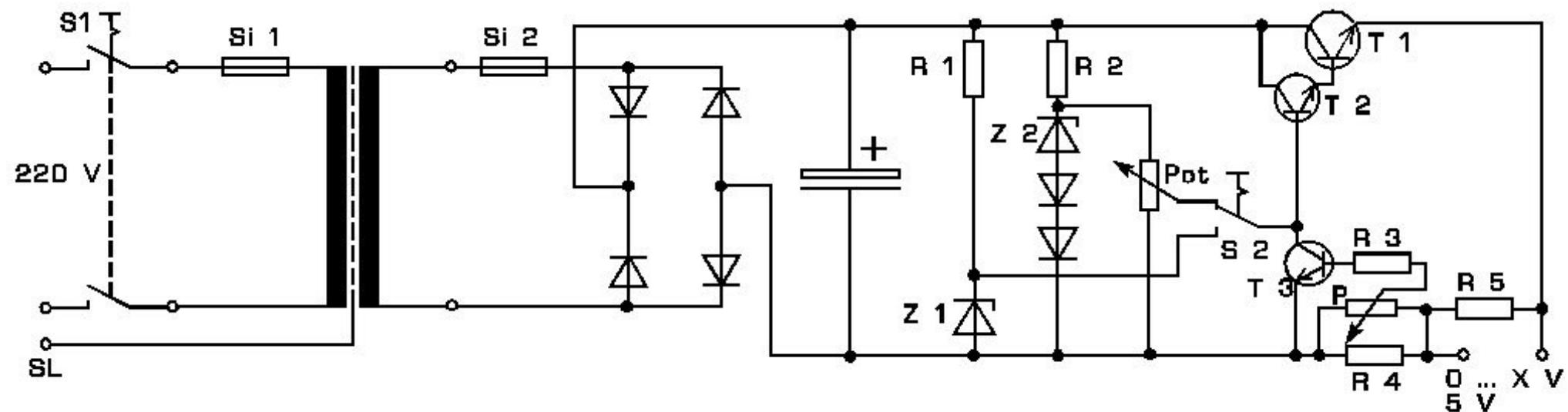
Siehe dazu: Übungs- und Vertiefungsteil: 5. Funktion: Sichern des Netzgeräts gegen Kurzschlüsse; Kurzschluss-Sicherung mit Thyristor.

### Ergebnis:

Die entsprechende Schaltungsergänzung für das Netzgerät würde also so aussehen:



Und damit ergibt sich als Gesamtschaltung für das Netzgerät:



## ÜBUNGS- UND VERTIEFUNGS-TEIL

### 1. Funktion: Transformieren der Eingangsspannung

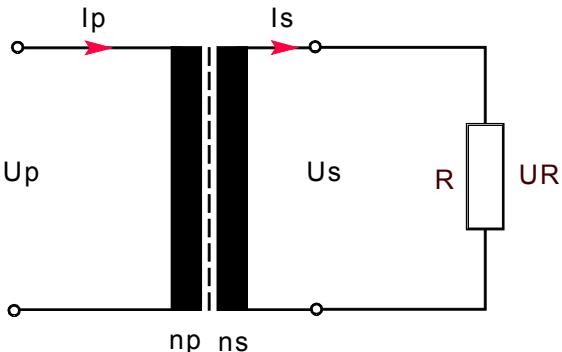
#### Berechnung von Transformatoren:

Transformatoren werden zur Erzeugung der erforderlichen Versorgungsspannungen herangezogen. Dabei wird gleichzeitig die galvanische Trennung (keine direkte Leitungsverbindung) vom Netz erreicht.

Die Berechnung eines Transformators ist nicht einfach, da sie davon abhängt, welchen Kern er besitzt und welche Schaltung er versorgen soll, bzw. wie er belastet wird. Die Vorgänge in Transformatoren sind recht kompliziert, weshalb man sich bei der Berechnung auf überschlägige Werte stützt, die aber bezüglich der Genauigkeit in der Regel ausreichen. So werden die inneren Verluste in der Regel mit 20% angenommen. Deshalb wird der Wirkungsgrad der übertragenen Leistung von der Primär– zur Sekundärseite in der Regel mit  $\eta = 0,8$  angegeben.

- Informieren Sie sich in der Literatur über die Verluste im Transformator und über den Begriff des Wirkungsgrades.

#### **Berechnung eines Transformators mit einem Widerstand als Last:**



- $U_p \rightarrow$  Primärspannung (Effektivwert)
- $U_s \rightarrow$  Sekundärspannung (Effektivwert)
- $I_p \rightarrow$  Primärstrom (Effektivwert)
- $I_s \rightarrow$  Sekundärstrom (Effektivwert)
- $n_p \rightarrow$  Primärwindungszahl
- $n_s \rightarrow$  Sekundärwindungszahl
- $R \rightarrow$  Lastwiderstand
- $U_R \rightarrow$  Spannung am Lastwiderstand (Effektivwert)

Für einen **idealen Transformator** ( $\eta = 1$ ) gelten folgende Beziehungen:

$$U_R = U_s$$

$$I_R = I_s$$

$P_p = P_s$ , wobei gilt:

$$P_s = I_s \cdot U_s = I_s^2 \cdot R = \frac{U_s^2}{R}$$

$$\dot{\mu} = \frac{n_p}{n_s} = \frac{U_p}{U_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

wobei mit  $\dot{u}$  das Übersetzungsverhältnis bezeichnet wird.

**Realer Transformator ( $\eta = 0,8$ ):**

Da in der Praxis die inneren Verluste des Transfomators nicht vernachlässigt werden dürfen, muss hier folgende Korrektur angebracht werden:

$$P_P * 0,8 = P_S \quad \text{oder: } P_S * 1,2 = P_P$$

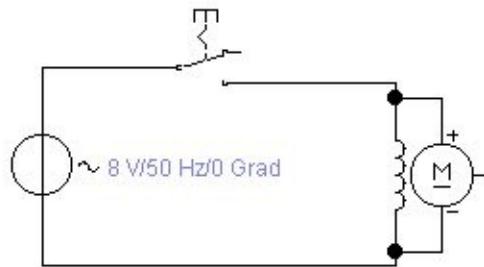
Das bedeutet (bei gleichbleibender Sekundärspannung), dass der Sekundärstrom um 20% höher angesetzt werden muss, als im idealen Fall.

## 2. Funktion: Gleichrichten der Sekundärspannung

Allgemeines, Erweiterungen:

**Gleichstrommotor:**

Sie hatten einen Gleichstrommotor an Wechselspannung angeschlossen und beobachtet, dass sich der Motor nicht drehte, sondern nur hin und her pendelte (brummte). Schauen Sie sich folgende Schaltung genau an und überlegen Sie, weshalb in diesem Fall sich der Motor dreht, obwohl Sie ihn an Wechselspannung angeschlossen haben:

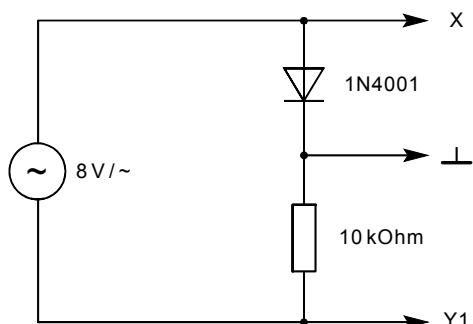


**Dioden-Kennlinie aufnehmen mit dem Oszillographen:**



**Aufnehmen der Dioden-Kennlinie mit dem Oszillographen:**

Die Schaltung dafür und der Anschluss an den Oszillographen zeigt folgendes Bild:



Um ein sauberes Bild zu bekommen, stellen Sie am Oszi folgende Werte ein:

DC, Invert 1, Vert.Ampl. 1: 0,2 V/cm  
DC, Hor.Ext., Hor.Ampl.: 0,2 V/cm

Bauen Sie diese Schaltung auf und versuchen Sie, ein Oszillogramm der Kennlinie zu „schreiben“.

**Spannungen an der Diode im Gleichstromkreis:**



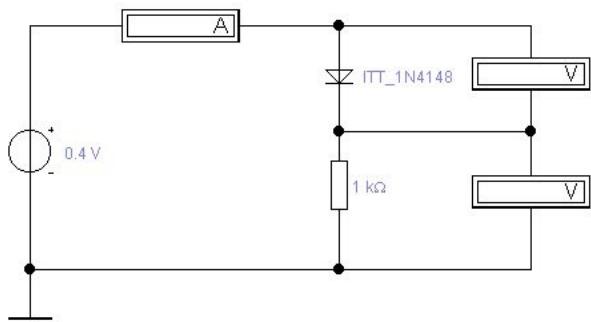
Was wird passieren, wenn Sie bei der untenstehenden Schaltung die Versorgungsspannung kontinuierlich erhöhen? Welche Spannungen werden Sie an der Diode und am Widerstand feststellen? Überlegen Sie zuerst.

Versuchen Sie, anhand einer Arbeitspunktendarstellung mittels Kennlinien diese Frage zu klären. Überlegen Sie auch, welche Spannungen sich ergeben werden, wenn Sie die Diode umdrehen.



Wenn Sie nicht mehr genau wissen, wie der Arbeitspunkt mittels Kennlinien grafisch ermittelt werden kann, informieren Sie sich im Systematischen Teil unter: „Ermitteln des Arbeitspunktes mit Kennlinien“.

- Zur Kontrolle: Bauen Sie folgende Schaltung auf (entweder real aufbauen oder mit EWB simulieren) und steigern Sie kontinuierlich die Spannung an Netzgerät. • Notieren Sie sich die Messwerte. Drehen Sie die Diode um und wiederholen Sie den Vorgang. Messen Sie jetzt bis 24V.

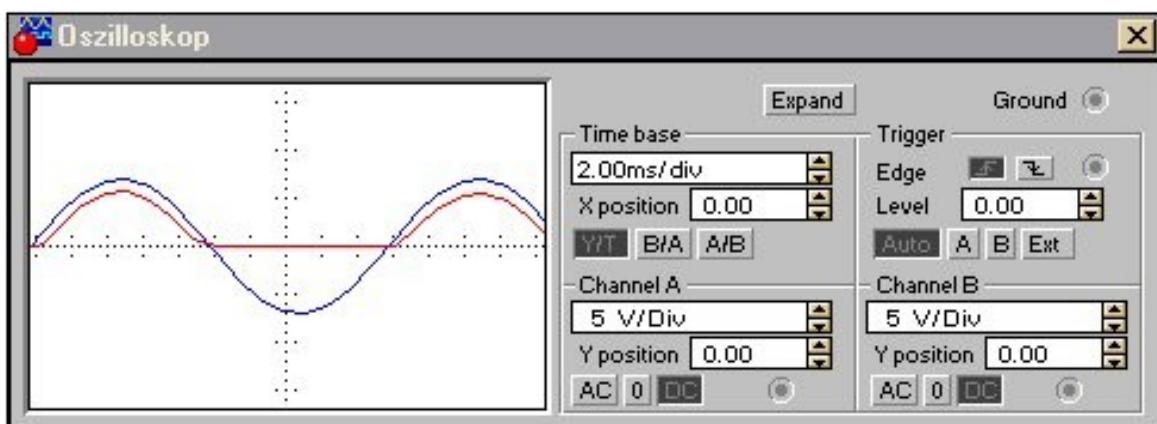


Vergleichen Sie Ihre Messwerte mit ihren Überlegungen und der graphischen Ermittlung des Arbeitspunktes der Schaltung. Erklären Sie, weshalb es erlaubt ist, bei einer Diode in Durchlassrichtung mit einer grob angenommenen Spannung von etwa 0,6 - 0,8 V (0,7 V) zu rechnen. Erklären Sie, weshalb in Sperrrichtung die Spannung an der Diode im Wesentlichen der Spannung der Spannungsquelle entspricht.

### Unterschiede der Oszillogramme der Wechselspannung und der pulsierenden Gleichspannung (Einweggleichrichtung):

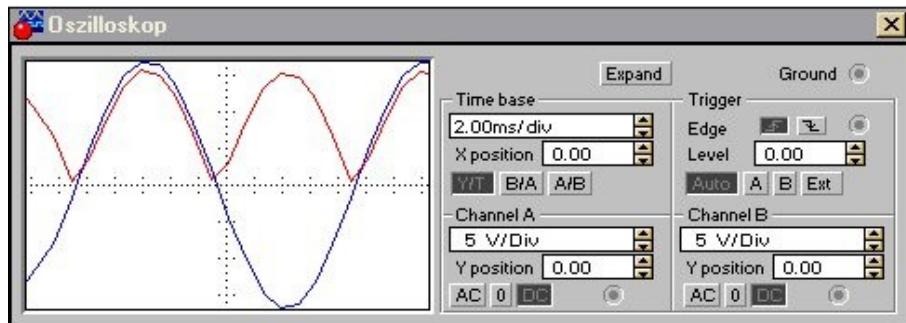
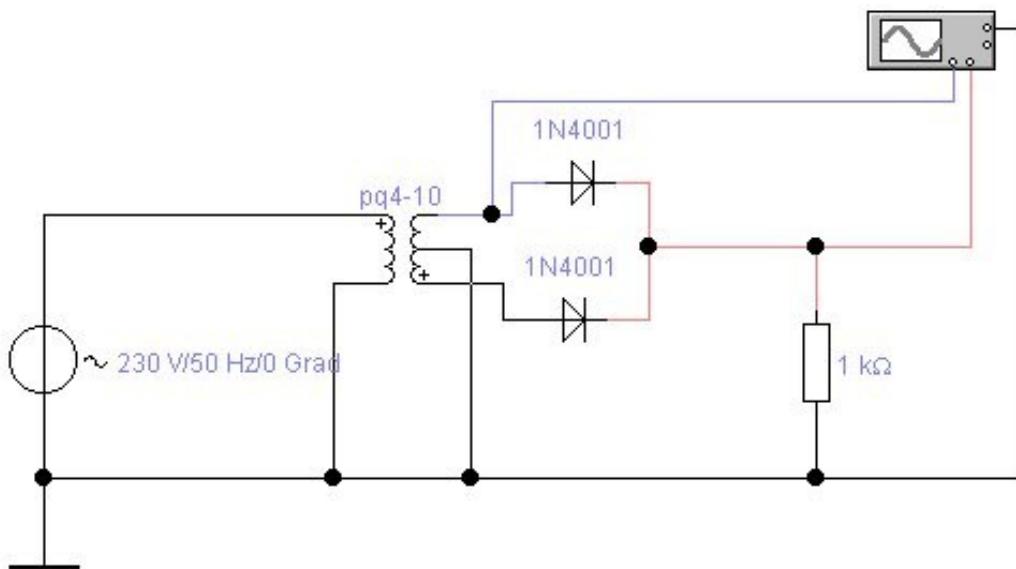
Wenn Sie beim Oszillografieren (mit einem Zwei-Kanal-Oszilloskop) oder beim Simulieren mit EWB sowohl die Wechselspannung als auch die pulsierende Gleichspannung „geschrieben“ haben, werden Sie feststellen, dass die pulsierende Gleichspannung

- etwas später ansteigt und früher abfällt als die Wechselspannung
- im Maximum nicht ganz den Spitzenwert der Wechselspannung erreicht.



Machen Sie sich klar, woraus sich dieses Verhalten ergibt! Tauschen Sie sich mit Ihren Kommilitonen/Innen aus. • Notieren Sie sich Ihre Überlegungen.

**@ Noch eine Schaltung, die von der Wechselspannung beide Halbwellen nutzt:**



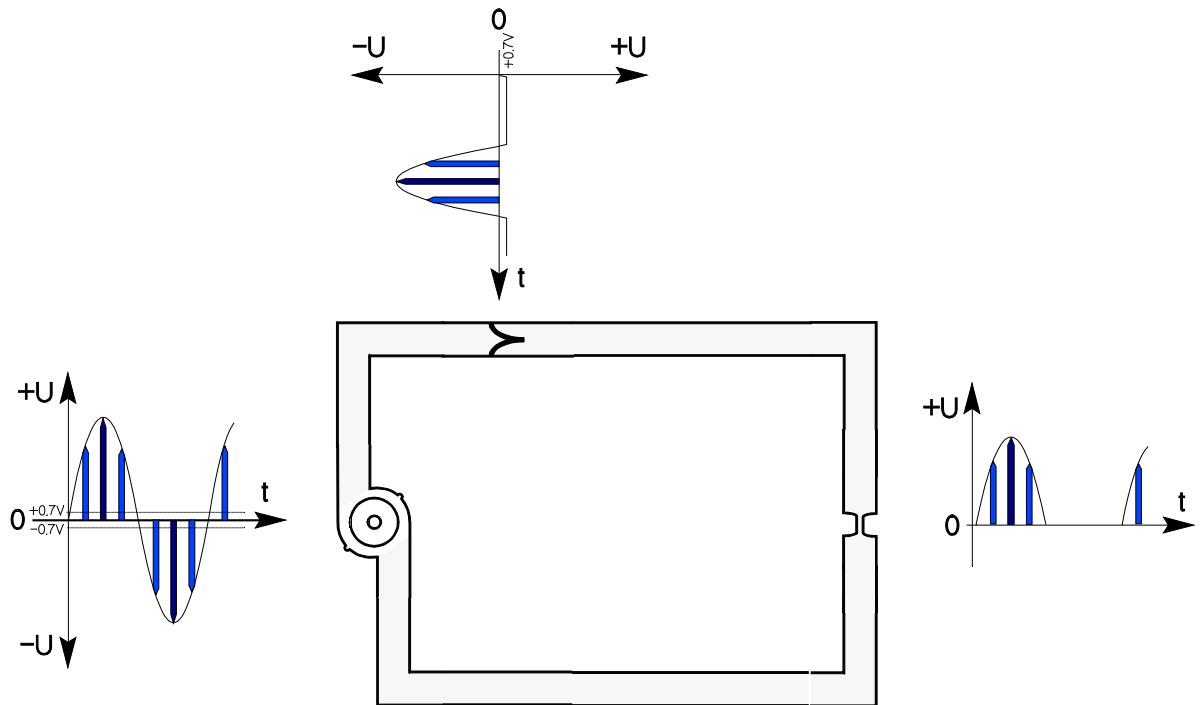
Diese Schaltung wird in der Literatur als Zweiweg-Gleichrichterschaltung bezeichnet. Wie Sie sehen, benötigt man dazu einen Transformator, der an der Sekundärseite eine Mittenanzapfung besitzt. Bei der positiven und der negativen Halbwelle der Wechselspannung ist immer eine andere Hälfte der Sekundärwicklung in „Aktion“, die andere wird jeweils gesperrt. Diese Form der Gleichrichtung wurde in Zeiten angewendet, als Dioden als Bauelemente noch teuer waren: man benötigt nur zwei anstatt vier Dioden. Der Nachteil dieser Schaltung besteht allerdings darin, dass man den Transformator sekundärseitig auf die doppelte Spannung auslegen muss, da ja immer nur eine Hälfte dieser Spannung wirksam ist.

Zeichnen Sie sich möglichst exakt und ausführlich auf, wie diese Schaltung genau funktioniert. Machen Sie sich vor allem klar, wie sich sekundärseitig am Transformator die Spannungsanteile „abwechseln“.

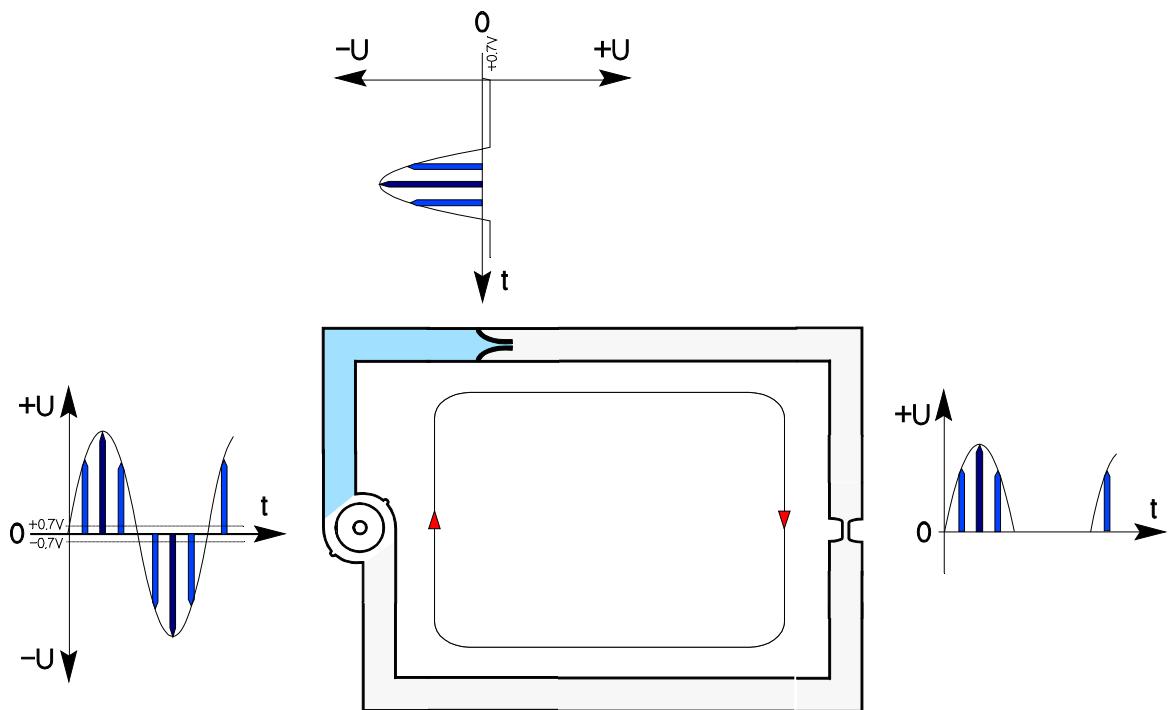


@ Pneumatische Analogie der Einweg-Gleichrichtung:

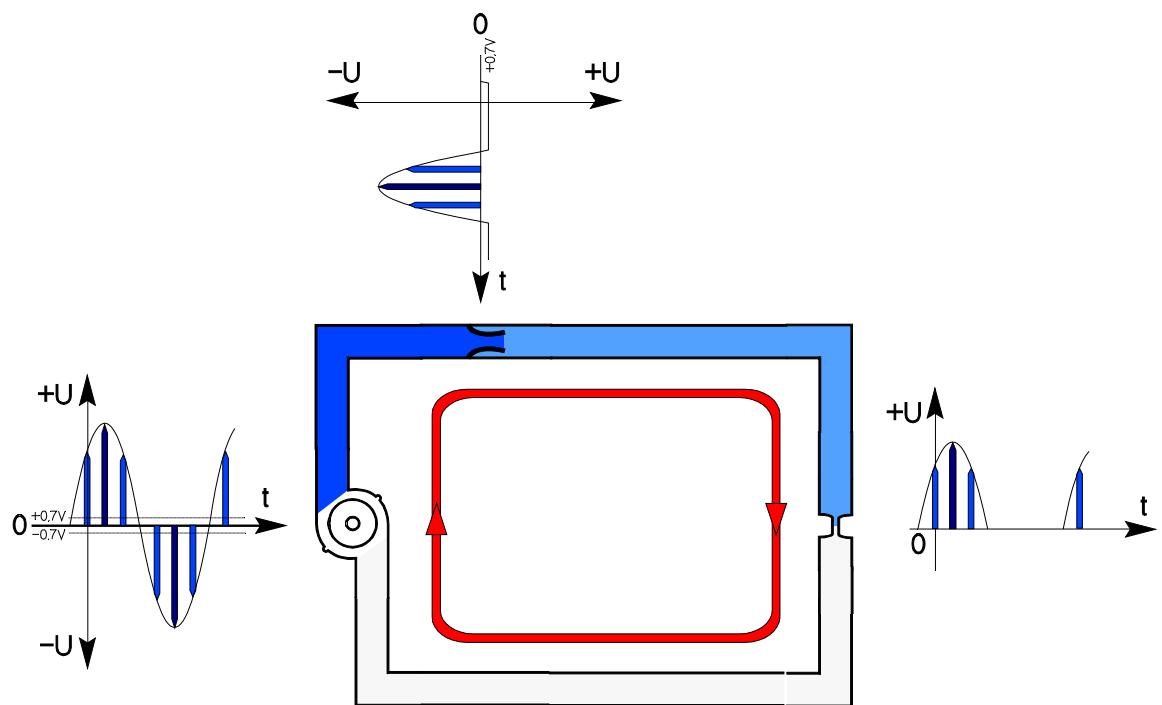
Einweg-Gleichrichtung von Wechselspannung



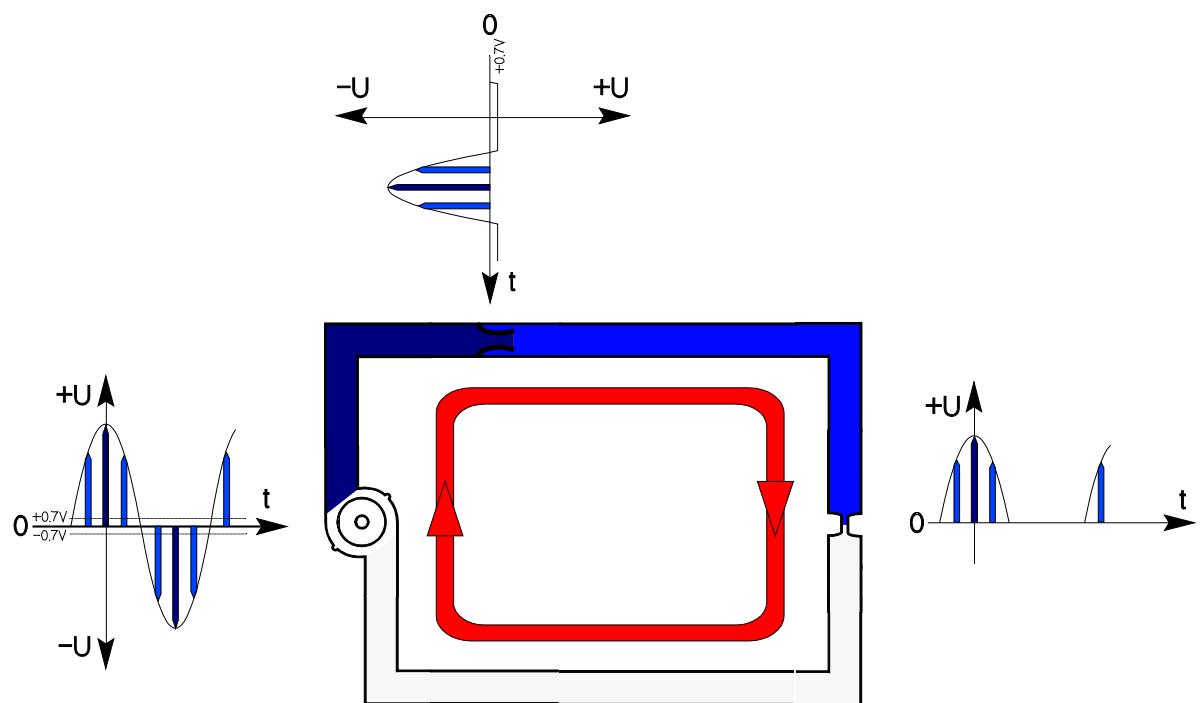
Ausgangslage: Nulldurchgang der Spannung



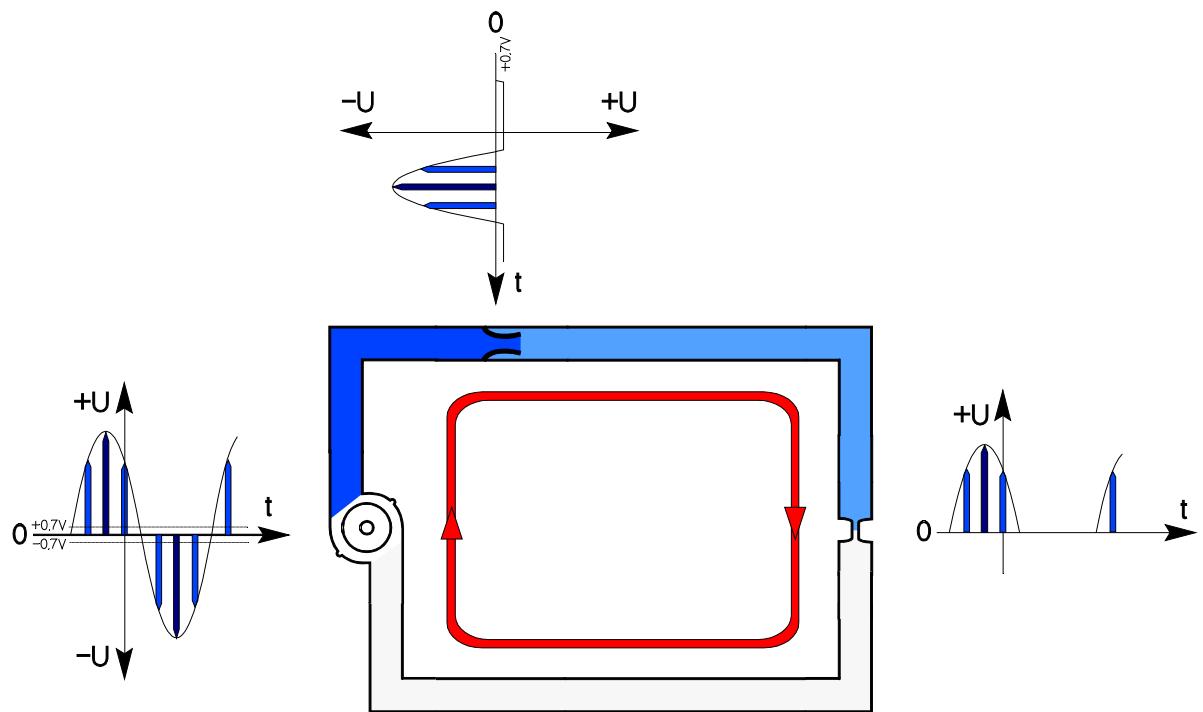
Phase 1: Überschreiten der Schleusenspannung



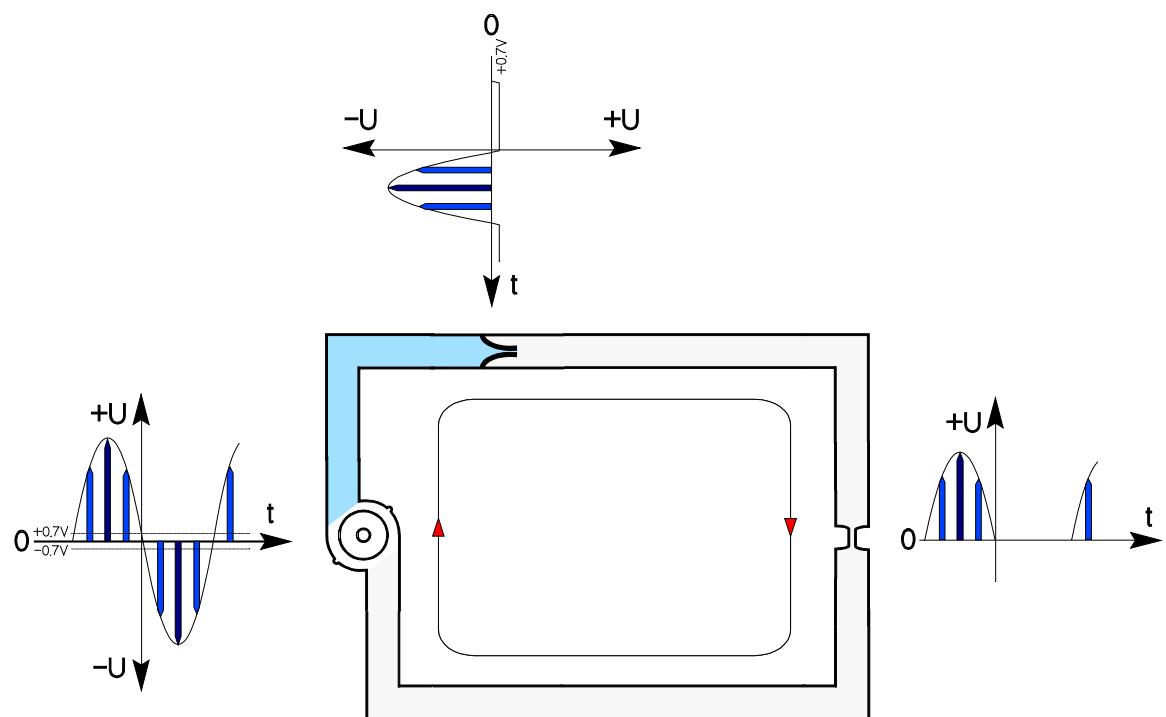
Phase 2: ansteigende positive Spannung



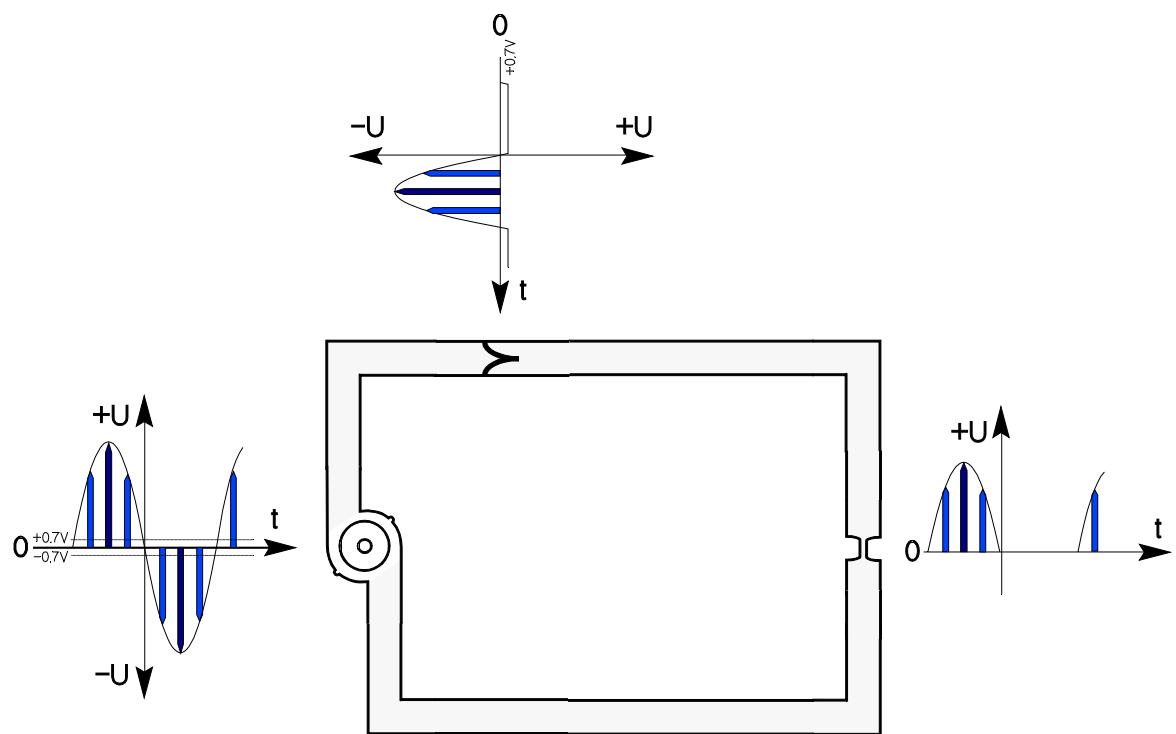
Phase 3: maximale positive Spannung



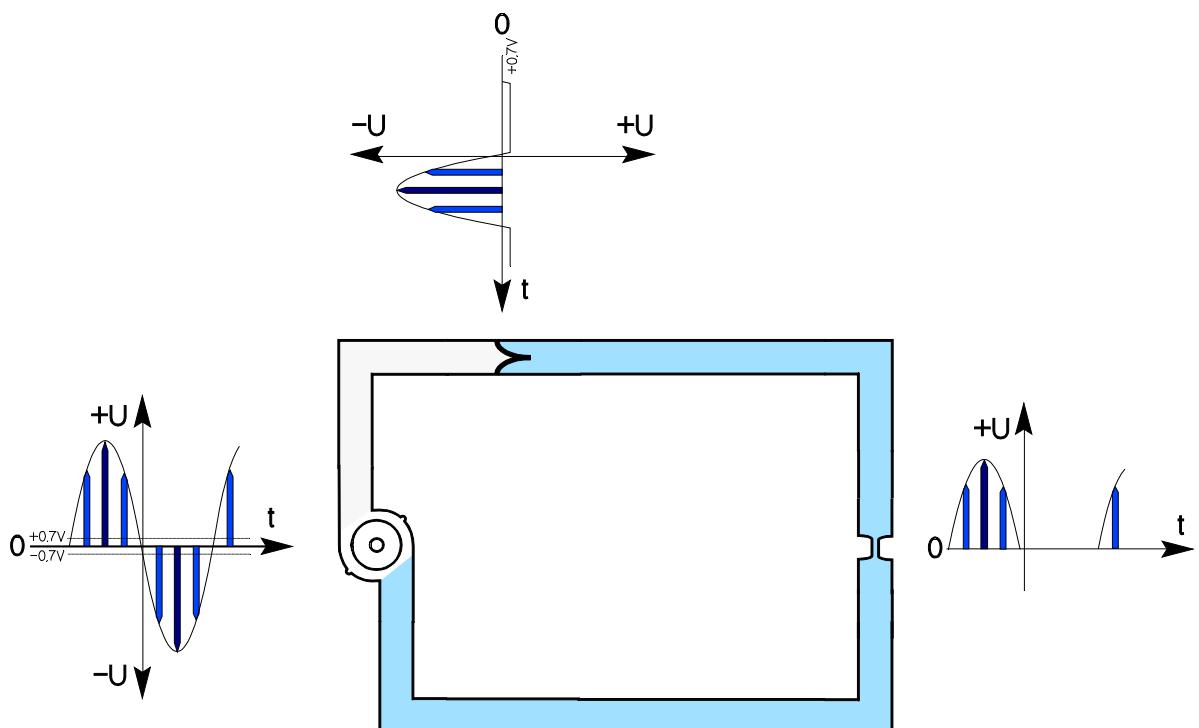
Phase 4: zurückgehende positive Spannung



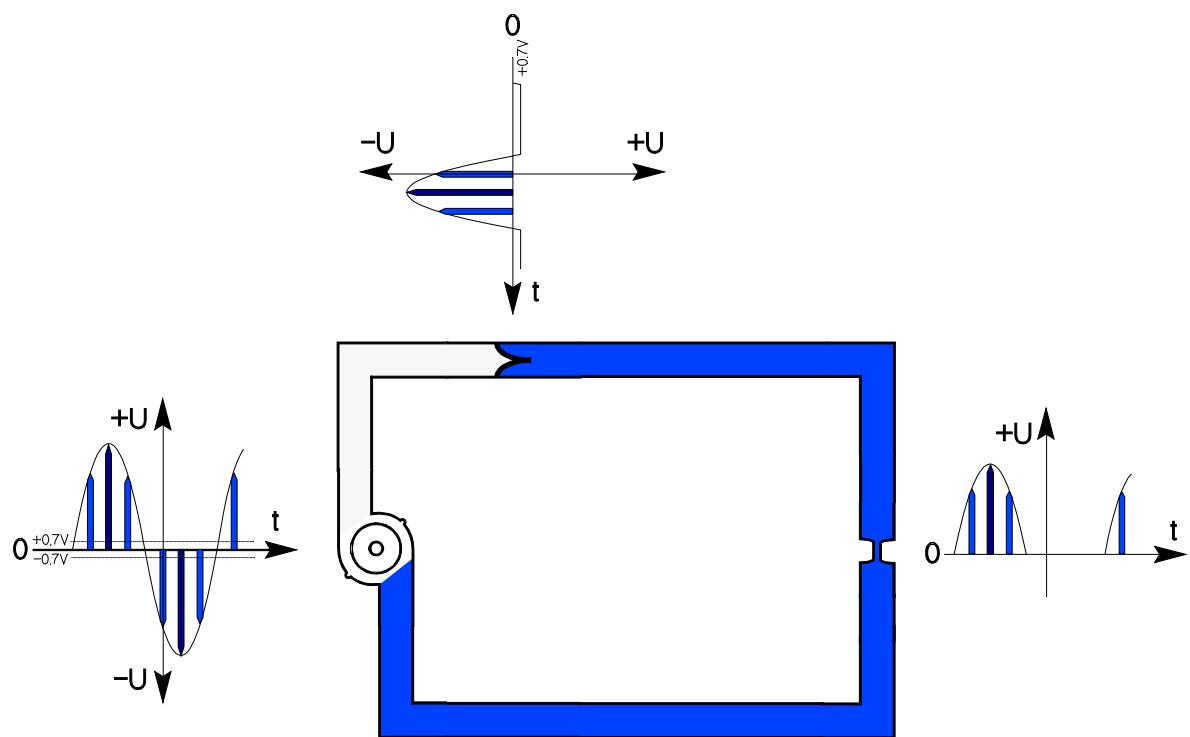
Phase 5: Unterschreiten der Schleusenspannung



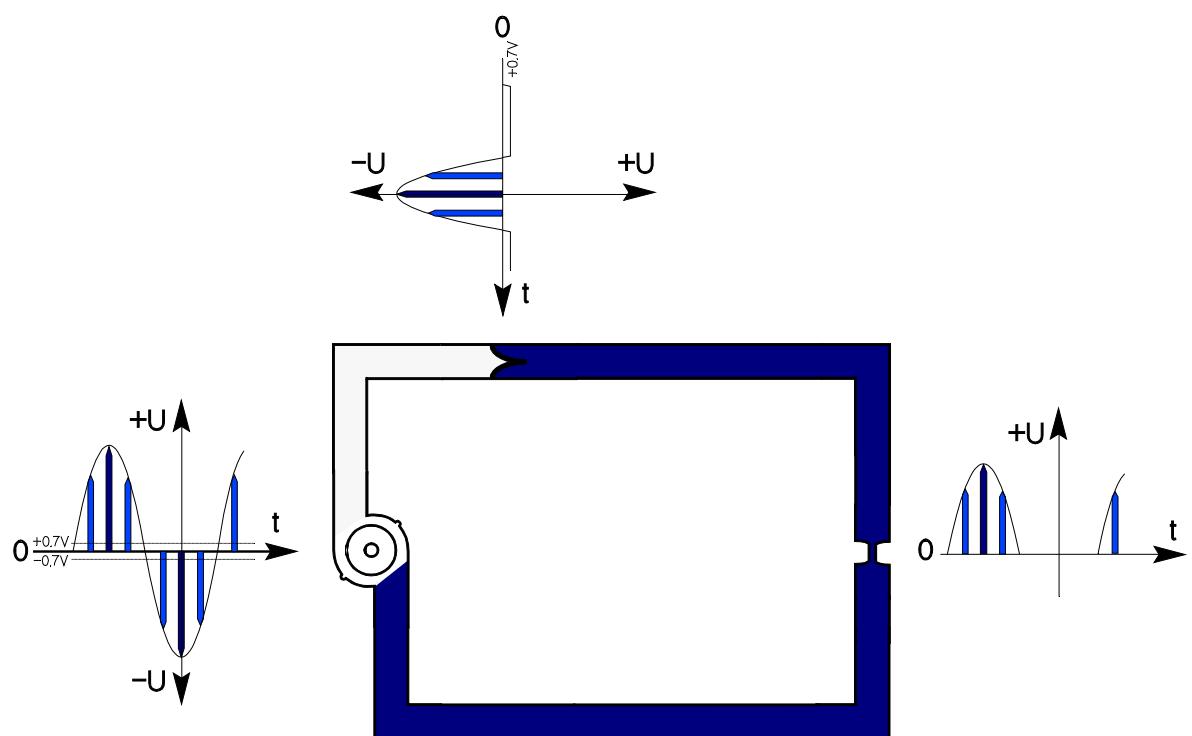
Phase 6: Nulldurchgang der Spannung



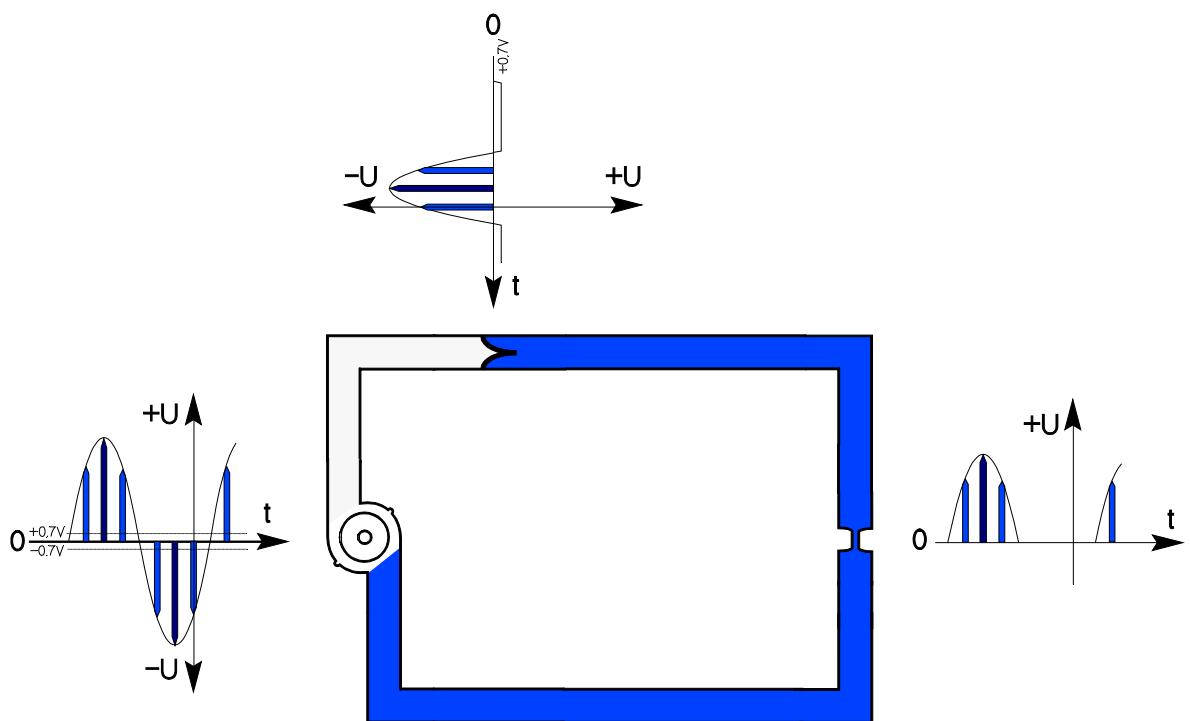
Phase 7: Überschreiten der Schleusenspannung



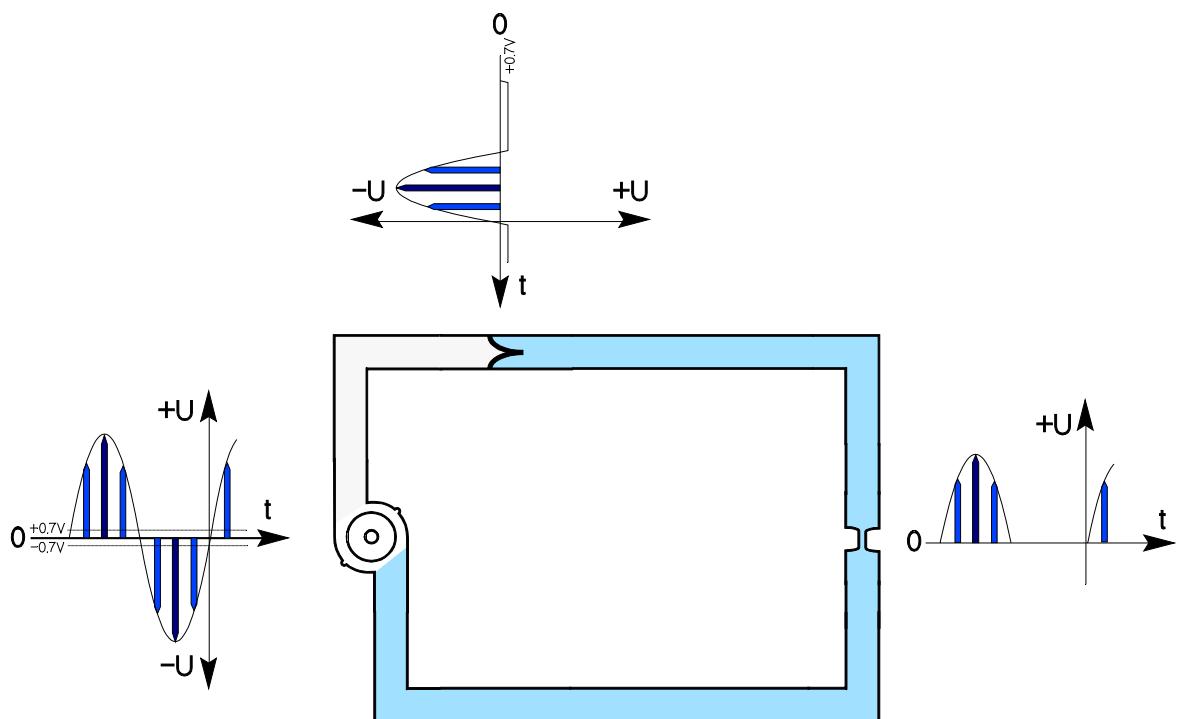
Phase 8: ansteigende negative Spannung



Phase 9: maximale negative Spannung



Phase 10: abfallende negative Spannung

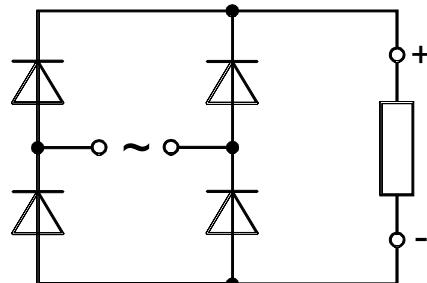
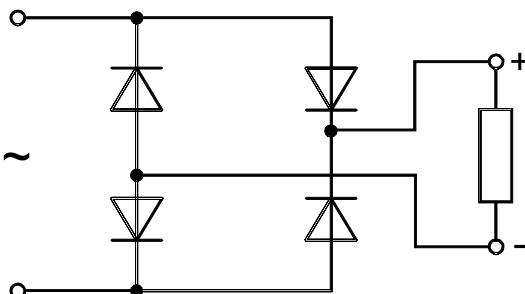
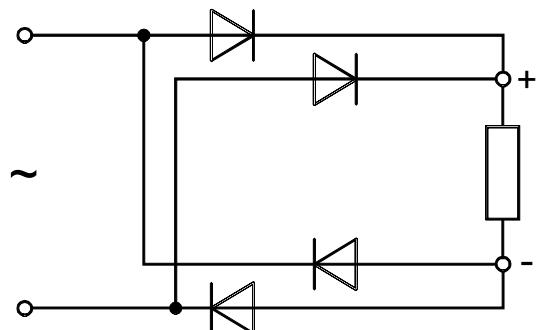
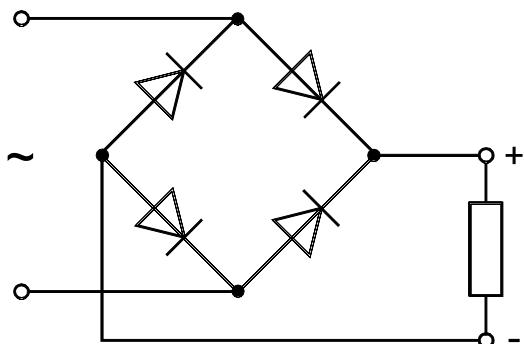


Phase 11: Unterschreiten der Schleusenspannung



### Verschiedene Darstellungsweisen von Schaltungen:

Die Brückengleichrichter– oder Graetz–Schaltung wird in der technischen Literatur auf unterschiedliche Weise dargestellt. Machen Sie sich klar, dass die folgenden vier Formen der Darstellung exakt dieselbe Schaltung zeigen.

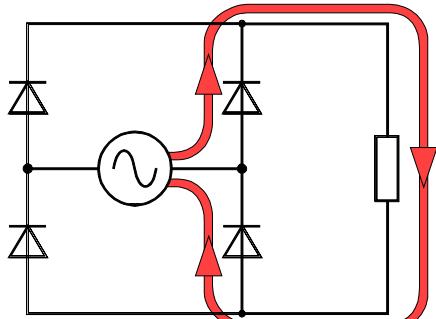
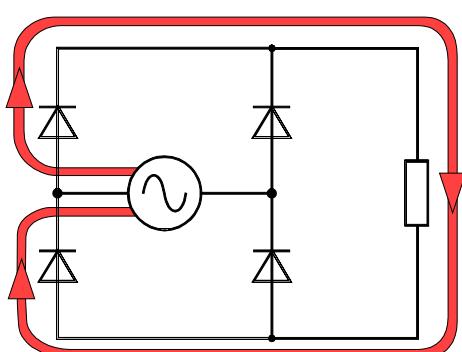


### Unmögliche Stromwege bei der Graetz–Schaltung:



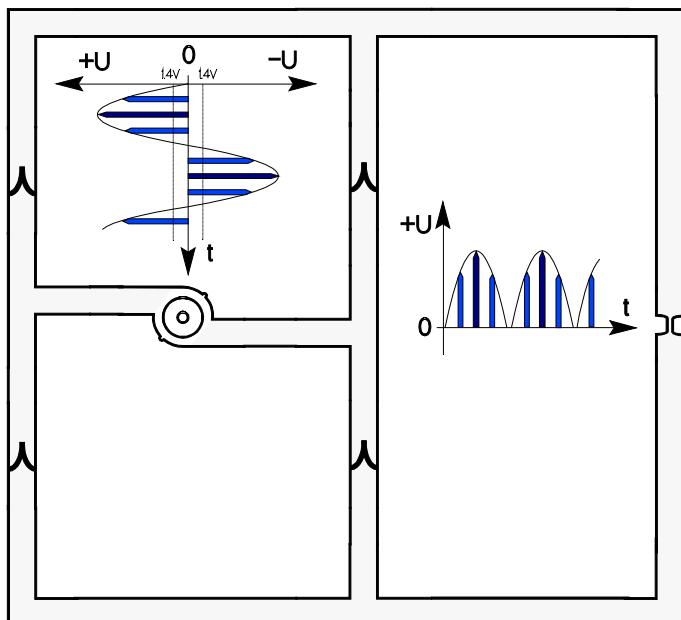
Schauen Sie sich die folgende Abbildung genau an und erklären Sie, weshalb diese Stromwege nicht möglich sind:

Sie können für die Beantwortung dieser Frage auch die pneumatische Analogie nutzen.

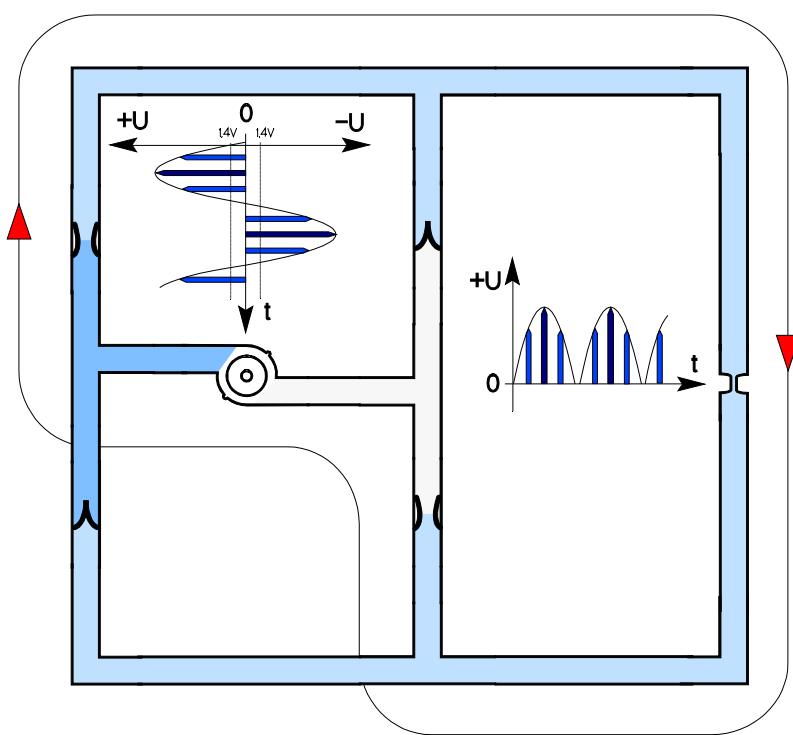


@ Pneumatische Analogie der Brücken-Gleichrichterschaltung:

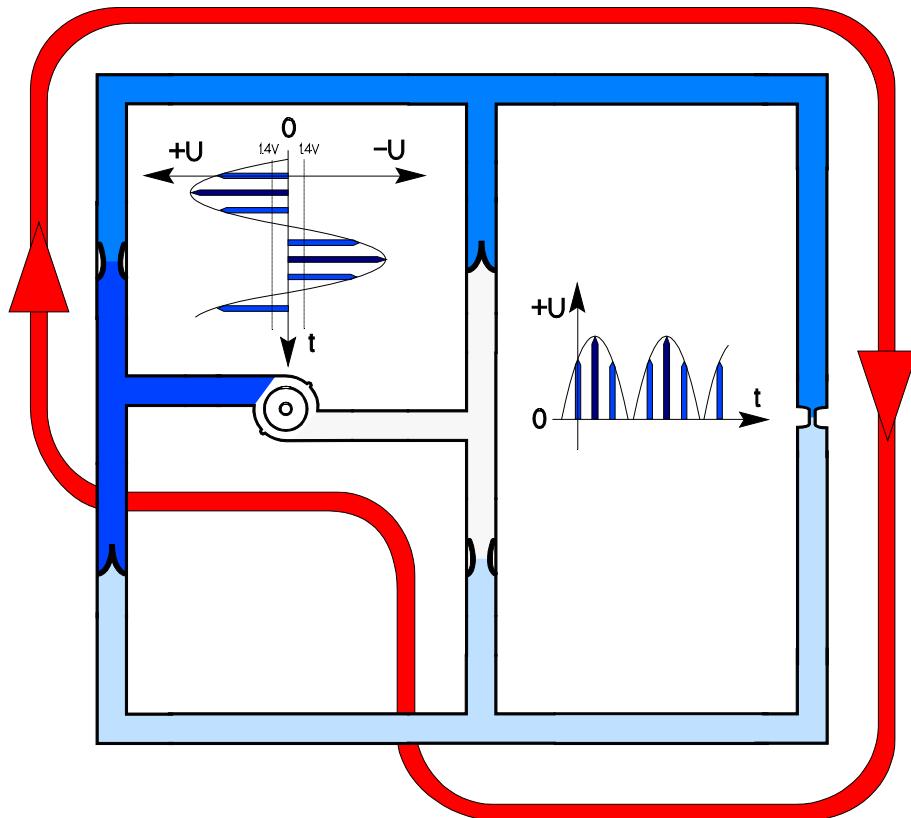
Brücken-Gleichrichtung von Wechselspannung



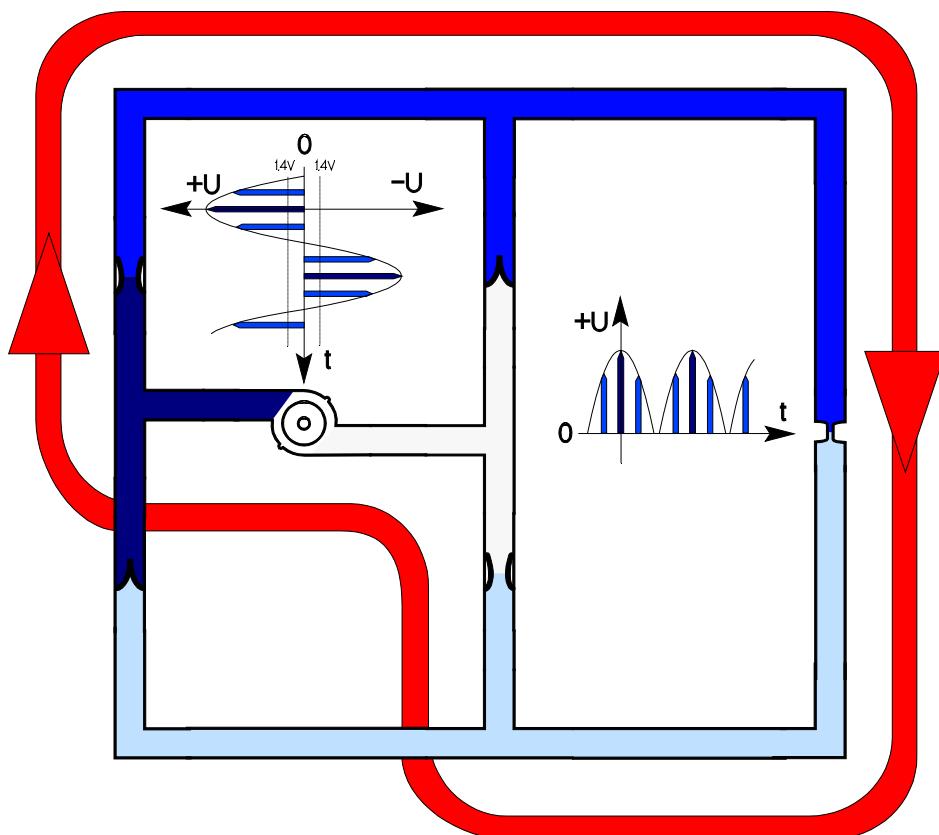
Ausgangslage: Nulldurchgang der Spannung



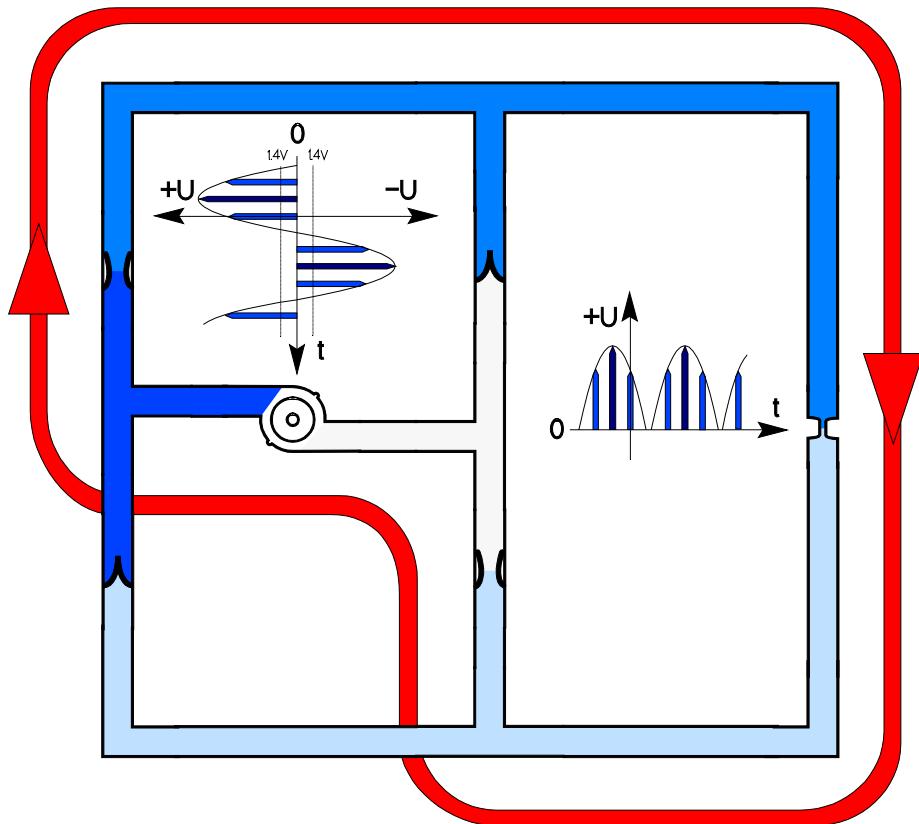
Phase 1: Überwinden der Schleusenspannungen



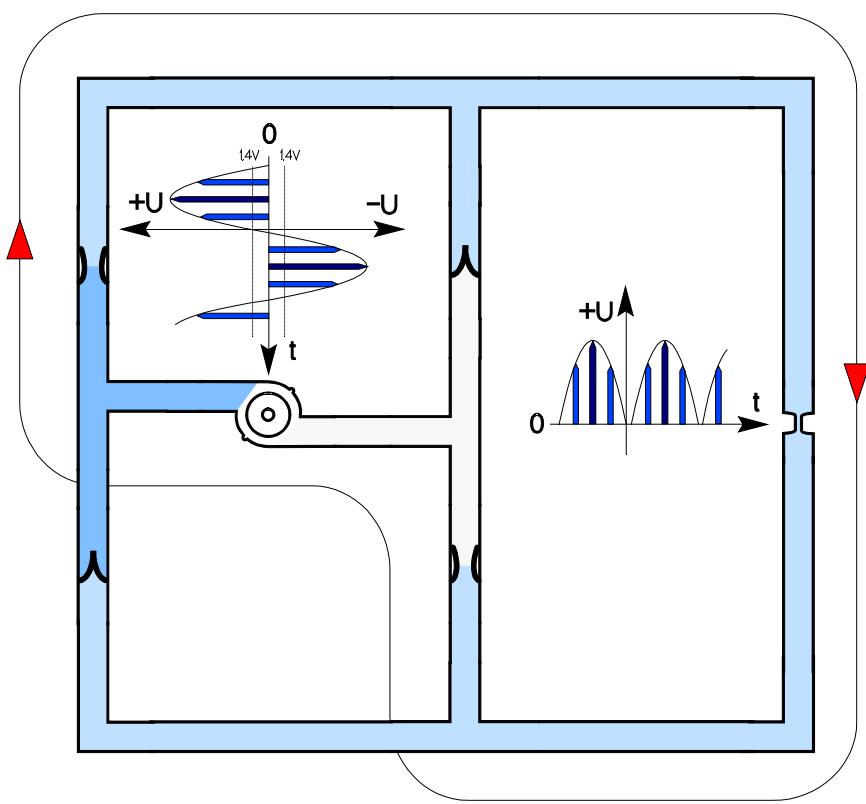
Phase 2: ansteigende positive Spannung



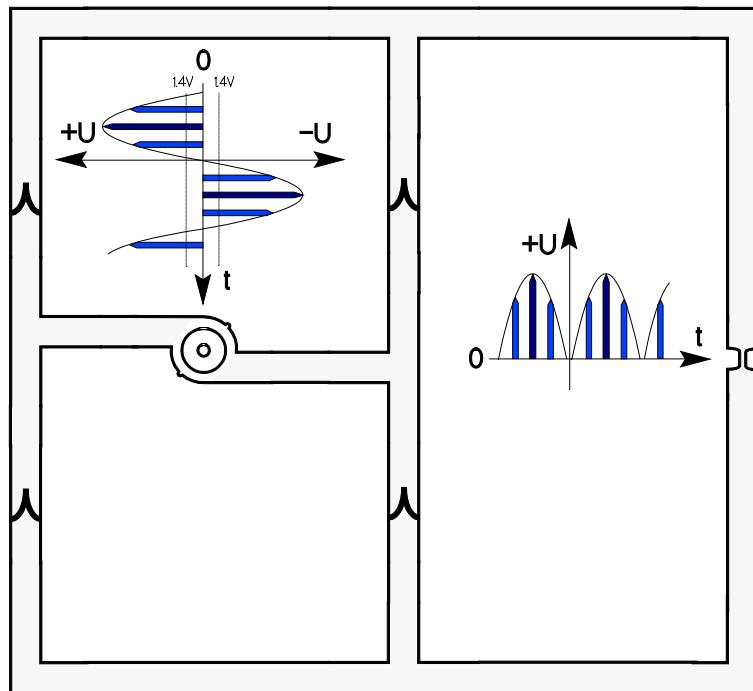
Phase 3: maximale positive Spannung



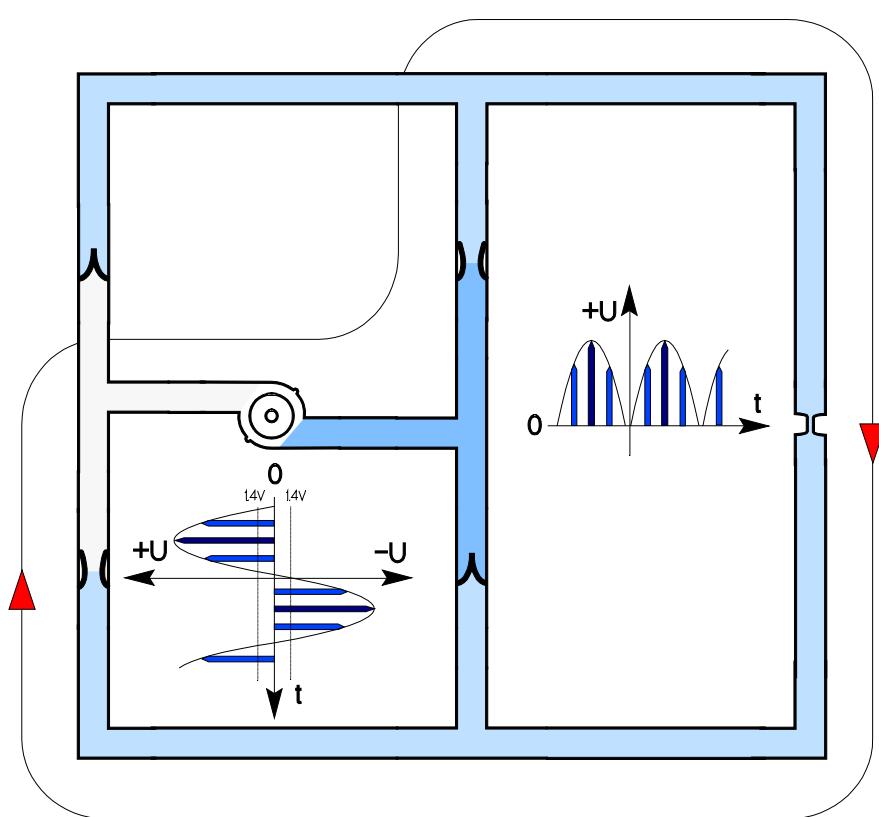
Phase 4: zurückgehende positive Spannung



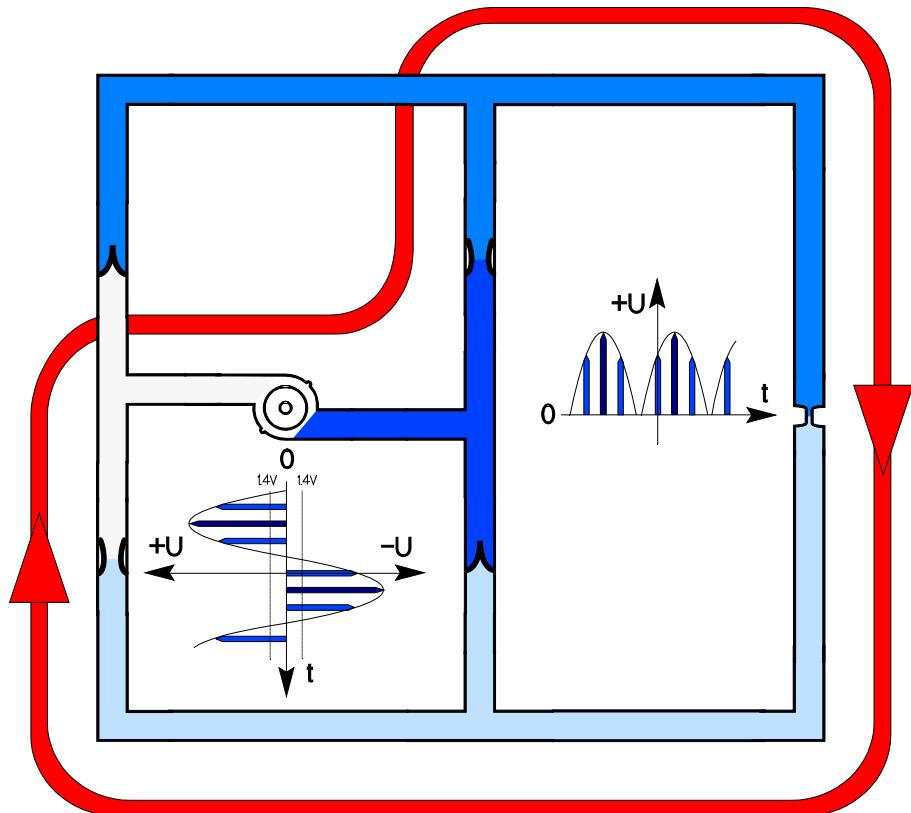
Phase 5: Unterschreiten der Schleusenspannungen



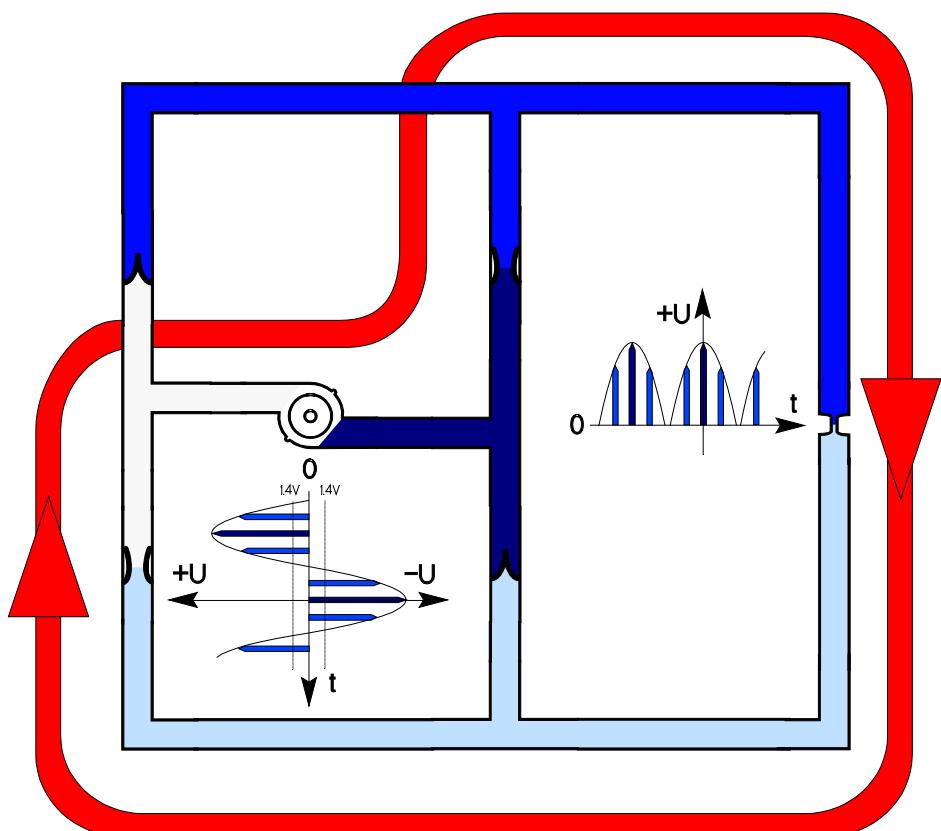
Phase 6: Nulldurchgang der Spannung



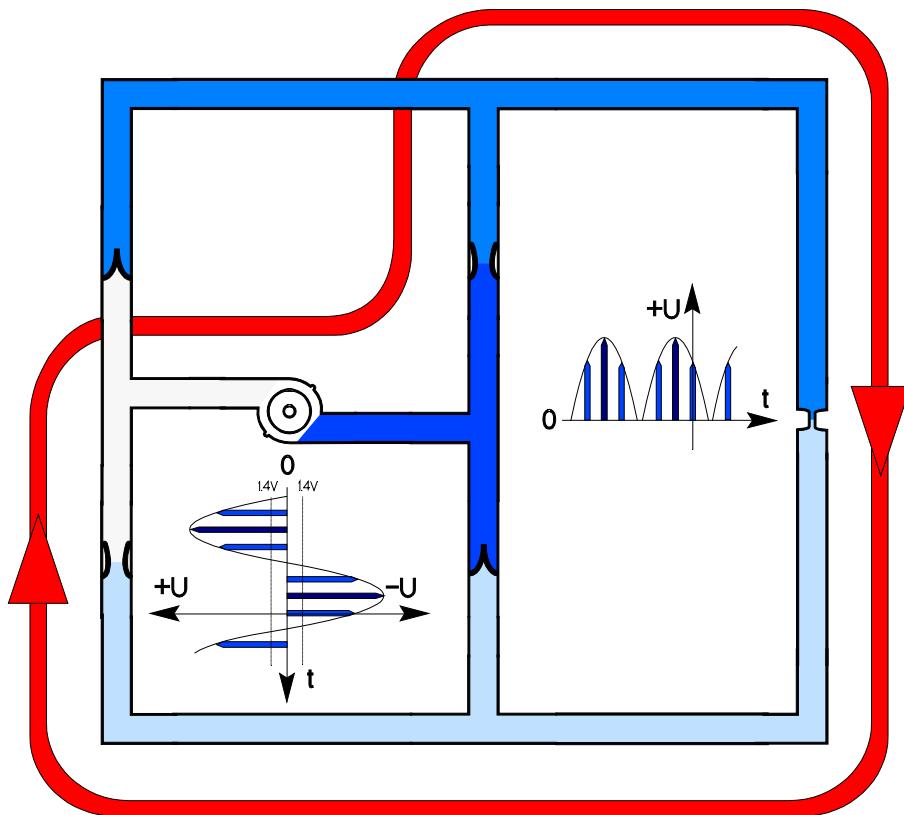
Phase 7: Überschreiten der Schleusenspannungen



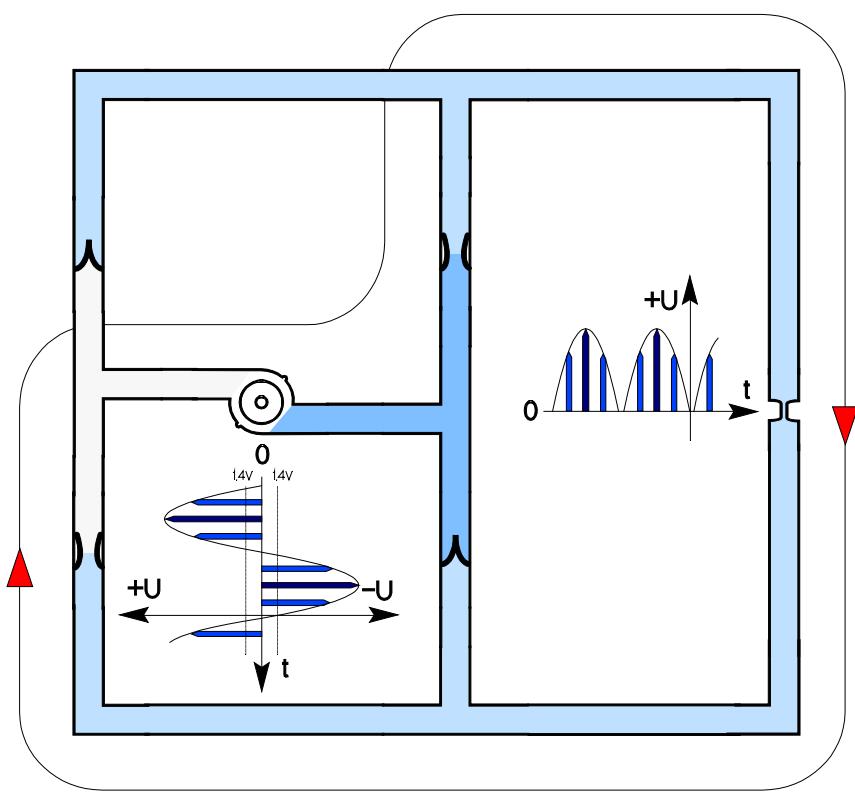
Phase 8: ansteigende negative Spannung



Phase 9: maximale negative Spannung



Phase 10: abfallende negative Spannung

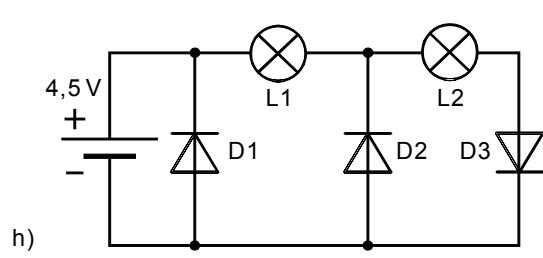
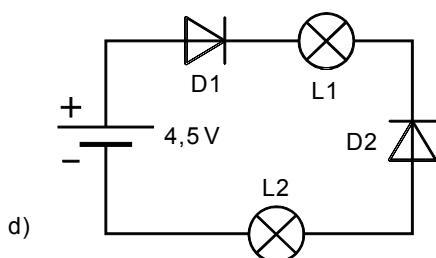
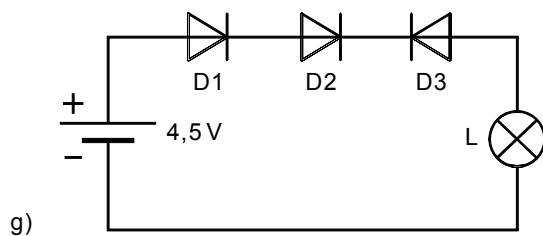
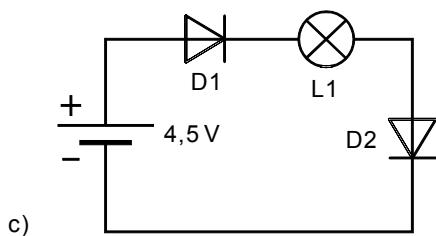
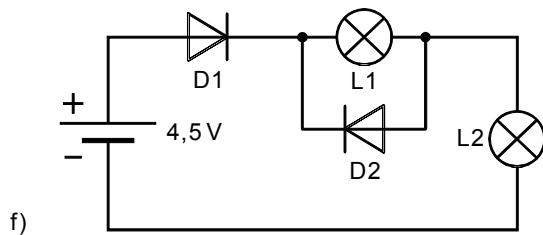
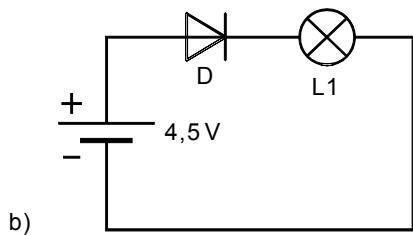
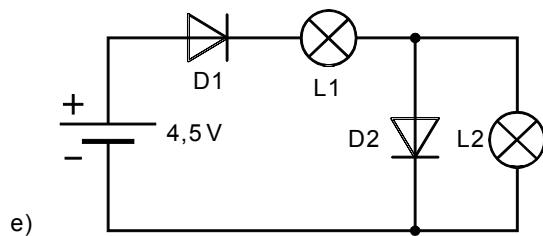
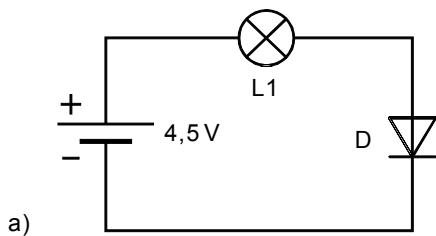


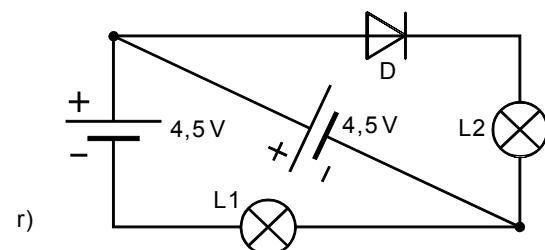
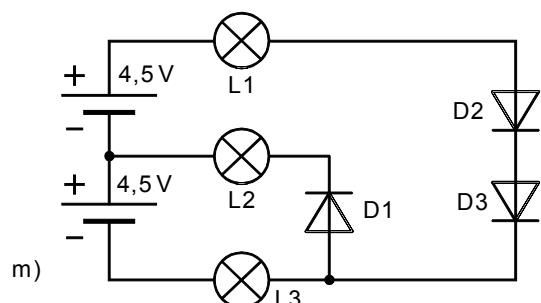
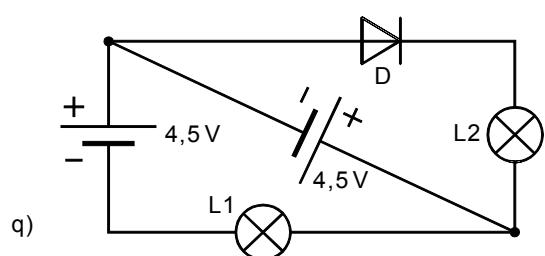
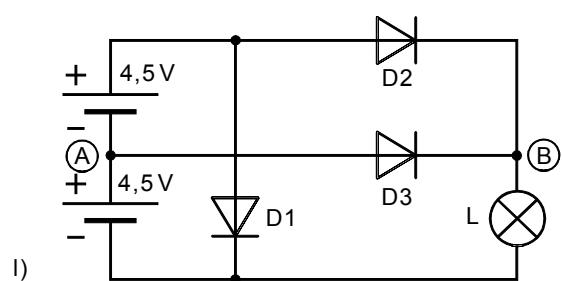
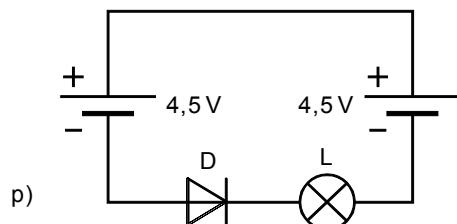
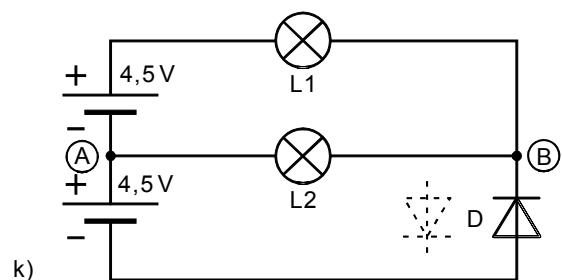
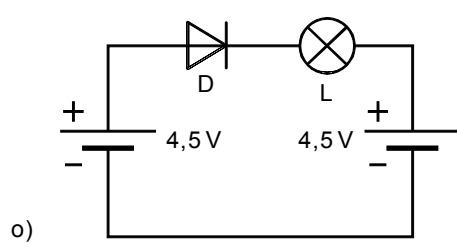
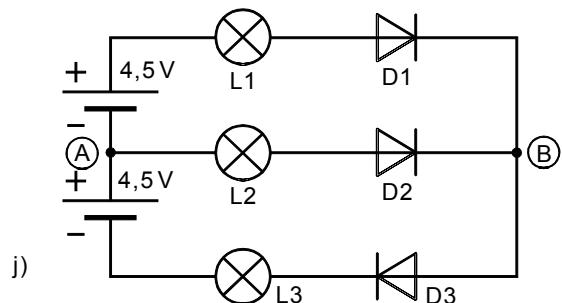
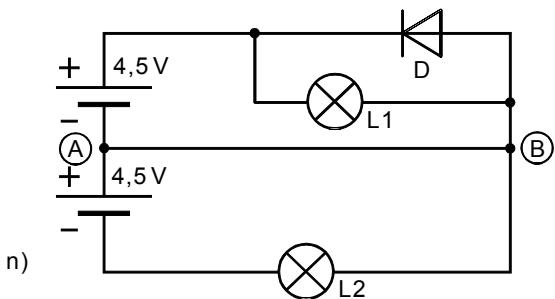
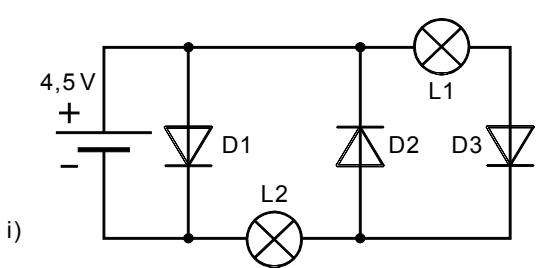
Phase 11: Unterschreiten der Schleusenspannungen

## Analysieren von Schaltungen:

Zur Übung sollten Sie das folgende „Dioden–Puzzle“ durcharbeiten. Es ist nicht vorgesehen, dass Sie die einzelnen Schaltungen aufbauen und messen, sondern dass Sie sie in Gedanken analysieren. Beantworten Sie dabei bei jedem Beispiel folgende Fragen:

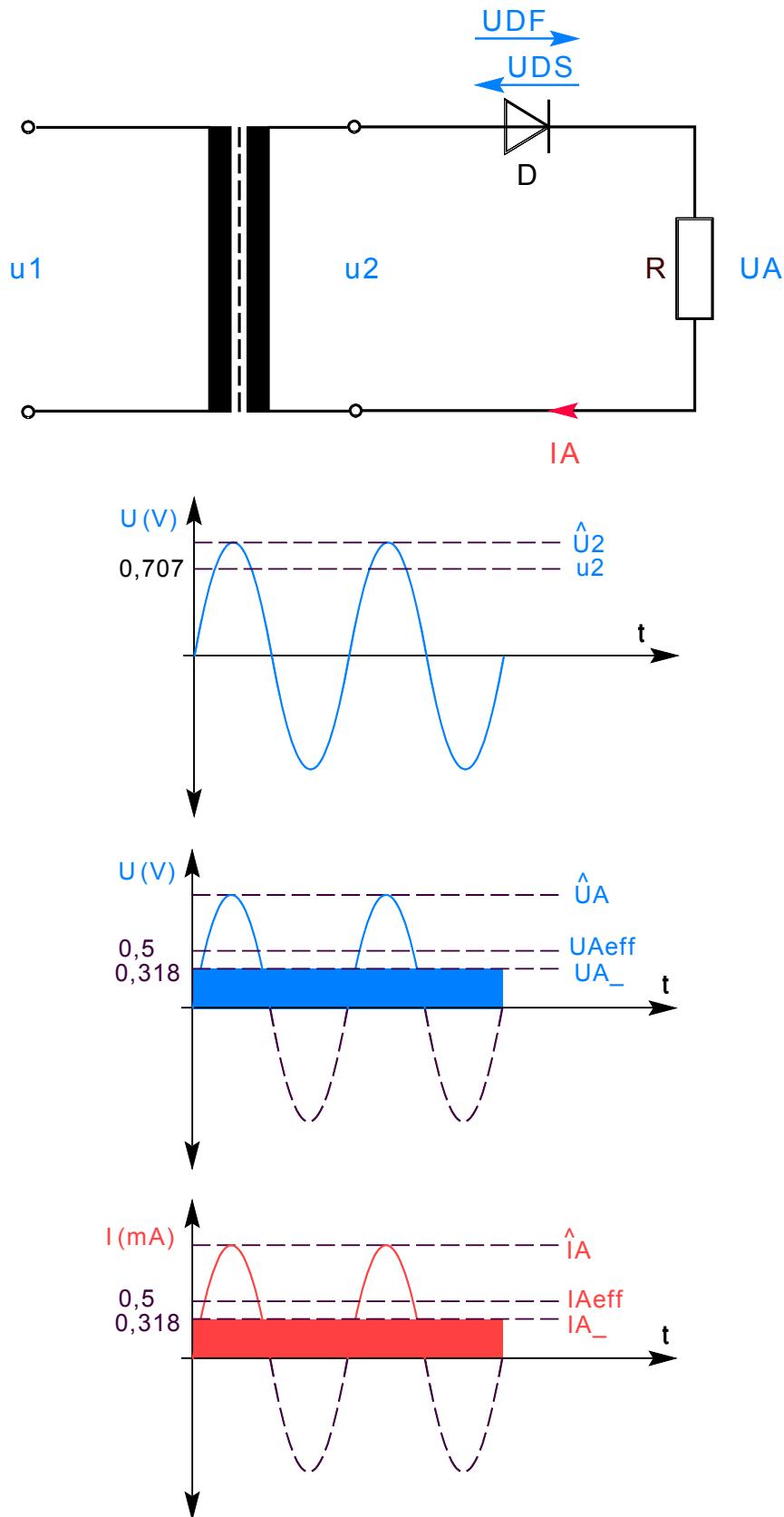
- Welche Lämpchen leuchten und welche Lämpchen leuchten nicht?
- Welche Spannungen ergeben sich an den einzelnen Dioden und an den einzelnen Lämpchen?
- Gibt es Bauteile, die zerstört werden?
- Wenn diese Bauteile zerstört sind, was wird in der Schaltung weiter geschehen?
- Bei den Schaltungen, die mit einem Brückenast versehen sind (j, k, l, m, n) sollten Sie zusätzlich die Frage beantworten können, ob an dem Brückenast eine Spannung anliegt, wie groß sie ist und welche Polarität sie hat.
  
- Notieren Sie sich Ihre Ergebnisse und vergleichen Sie sie mit denen Ihrer Kommilitonen/Innen.





### Berechnung von Gleichrichterschaltungen:

#### **Berechnung einer Einweg-Gleichrichterschaltung mit ohmscher Last:**



Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, treten bei einer Gleichrichterschaltung sowohl Wechselspannungen und Wechselströme, als auch pulsierende Gleichspannungen und –ströme auf. Für die Berechnung ist es jetzt wichtig, die Bedeutung der unterschiedlichen angegebenen Größen zu kennen. Da Gleichrichterschaltungen grundsätzlich die Aufgabe haben, Wechselspannungen und –ströme in Gleichspannungen und –ströme umzuwandeln, muss bei den am Ausgang entstehenden pulsierenden Gleichspannungen und –strömen der Gleichstromanteil bestimmt werden. Dies kann man so verstehen, dass eine pulsierende Gleichspannung eigentlich eine Mischspannung ist, d.h. aus einem Anteil glatter Gleichspannung und einem Anteil verschiedener Wechselspannungen zusammengesetzt ist, die beim Zusammenwirken genau diese Form der pulsierenden Gleichspannung ergeben.

Für die oben angegebene Einweg–Gleichrichterschaltung können damit folgende Größen festgehalten werden:

$u_1$  und  $u_2$  sind die Primär– bzw. die Sekundärspannung des Transfornators. Diese Spannungen werden in der Regel als Effektivwerte angegeben. Die Effektivwerte entsprechen denjenigen Werten, die in einem Widerstand die gleiche Wärmewirkung hervorrufen wie ein gleich großer Gleichstrom und ergeben sich aus den Spitzenwerten der Wechselspannung  $\hat{U}, \hat{I}$  durch:

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \hat{U}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \hat{I}$$

Die Spannungen und Ströme eines Transfornators werden in Katalogen oder Datenblättern grundsätzlich als Effektivwerte angegeben.

Grundsätzlich ist der Spitzenwert der Ausgangsspannung um die Durchflussspannung der Diode, also um 0,7 V kleiner, was man meist vernachlässigt, da der Fehler bei größeren Spannungen vernachlässigbar ist. Grundsätzlich gilt aber:

$$\hat{U}_A = \hat{U}_2 - U_{DF}$$

Den Gleichspannungsanteil der Ausgangsspannung erhält man mit der Gleichung:

$$U_{A-} = \frac{\hat{U}_A}{\pi} = 0,318 \hat{U}_A$$

Außer dem Gleichspannungsanteil enthält die Ausgangsspannung  $U_A$  noch sinusförmige Wechselspannungsanteile. Der größte dieser Anteile hat dieselbe Frequenz wie die Eingangsspannung, also 50 Hz. Darüber gelagert sind noch Anteile mit Vielfachen dieser Grundfrequenz, also 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz usw. Diese Frequenzanteile können mit Hilfe der Fourier–Analyse berechnet werden und ergeben sich bei dieser Form der pulsierenden Gleichspannung zu:

$$U_w = 1,21 U_{A-}$$

Diese Spannung  $U_w$  wird Welligkeitsspannung genannt. Das Verhältnis des Anteils der Welligkeitsspannung zum Anteil der Gleichspannung wird Welligkeit genannt und beträgt bei der Einweg–Gleichrichtung 1,21.

$$W: \frac{U}{U_{A-}} = 1,2$$

Der Effektivwert dieser pulsierenden Gleichspannung ist (wegen der Lücke) natürlich niedriger als bei Wechselspannung und ergibt sich aus:

$$U_{A_{eff}} = \frac{1}{2} \cdot \hat{U}_A$$

Bei Vernachlässigung der Dioden–Flussspannung kann man den Gleichspannungsanteil der Ausgangsspannung auch direkt aus der Sekundärspannung  $u_2$  des Transformators bestimmen:

$$\hat{U}_2 = \pi \cdot U_{A-}$$

$$u_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_{A-} = 2,2 \cdot U_{A-} \quad (\text{u2 ist der Effektivwert der Trafo–Sekundärspannung})$$

Dieselben Beziehungen gelten grundsätzlich auch für die Ströme:

$$I_{A_{eff}} = \frac{1}{2} \cdot \hat{I}_A$$

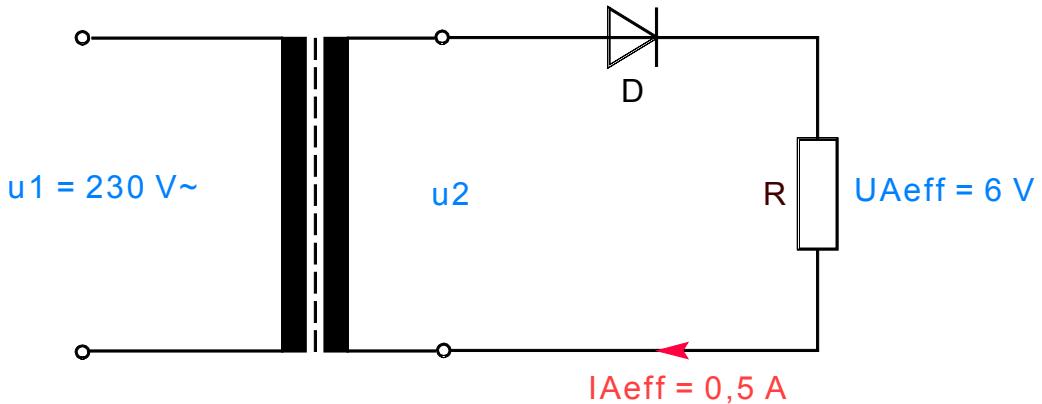
$$I_{A-} = \frac{\hat{I}_A}{\pi} = 0,318 \hat{I}_A, \text{ oder:}$$

$$I_{A-} = \frac{\hat{I}_A}{\pi} = \frac{2 \cdot I_{A_{eff}}}{\pi} = 0,637 I_{A_{eff}}$$

$$I_w = 1,2 \cdot I_{A-}$$

$I_w$  ist dabei der Effektivwert aller Wechselstromanteile.

Berechnungsbeispiel:



Für diese Gleichrichterschaltung sollen bestimmt werden (dabei soll die Dioden–Flussspannung unberücksichtigt bleiben):

- Den Effektivwert der Sekundärspannung des Trafo:  $u_2$
- Den Spitzenwert der Sekundärspannung des Trafo:  $\hat{U}_2$
- Das Übersetzungsverhältnis des Trafo  $\ddot{u}$
- Die Welligkeitsspannung  $U_w$
- Den Spitzenwert der Ausgangsspannung  $\hat{U}_A$
- Den Gleichspannungsanteil der Ausgangsspannung  $U_{A-}$
- Den Spitzenwert des Ausgangstroms  $\hat{I}_A$
- Den Gleichstromanteil des Ausgangstroms  $I_{A-}$
- Den Welligkeitsstrom  $I_w$  (Effektivwert der Wechselspannungsanteile)
- Den Widerstand  $R$

Ergebnisse (zur Kontrolle):

$$u_2 = 8,48 \text{ V}$$

$$\hat{U}_2 = 12 \text{ V}$$

$$\ddot{u} = 27,12$$

$$U_w = 4,62 \text{ V}$$

$$\hat{U}_A = 12 \text{ V}$$

$$U_{A-} = 3,82 \text{ V}$$

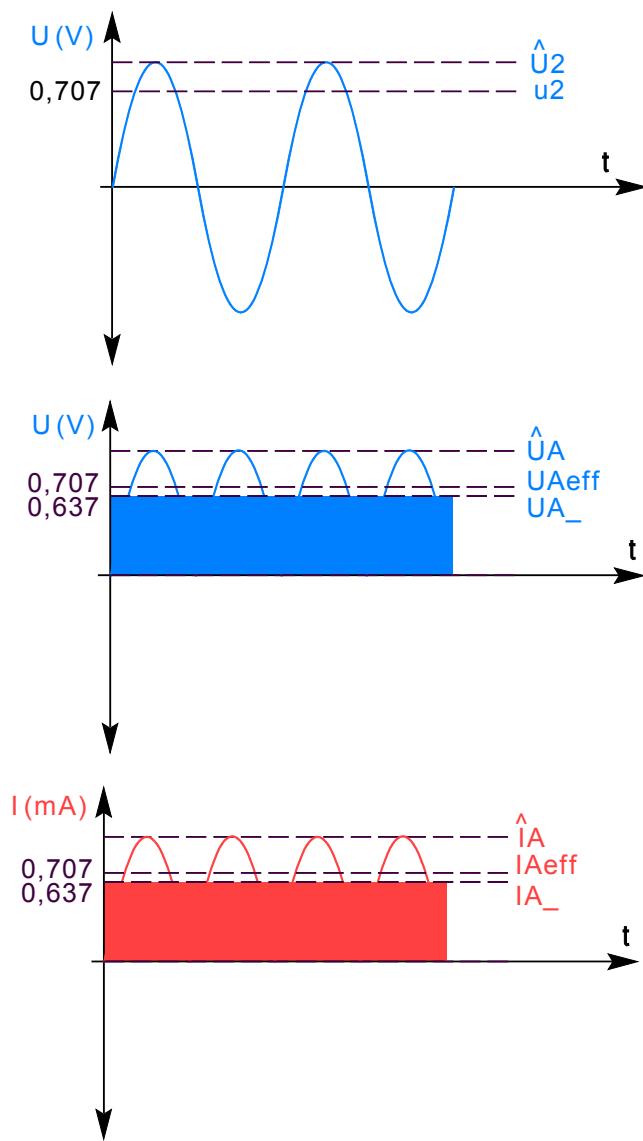
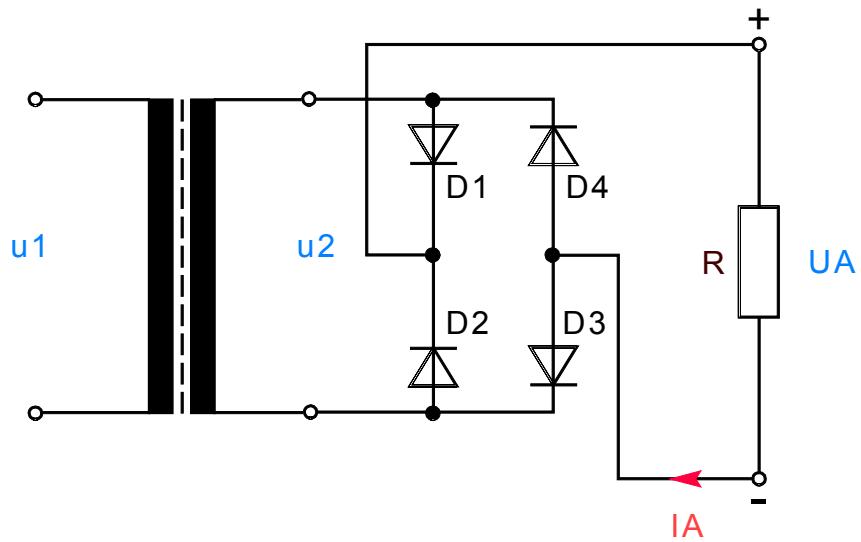
$$\hat{I}_A = 1 \text{ A}$$

$$I_{A-} = 0,32 \text{ A}$$

$I_w = 0,38 \text{ A}$

$R = 12 \text{ Ohm.}$

Berechnung einer Brücken-Gleichrichterschaltung mit ohmscher Last:



Für die angegebene Brücken–Gleichrichterschaltung können folgende Größen festgehalten werden:

$u_1$  und  $u_2$  sind wieder die Primär– bzw. die Sekundärspannung des Transformators und ergeben sich aus den Spitzenwerten der Wechselspannung  $\hat{U}$ ,  $\hat{I}$  durch:

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \hat{U}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \hat{I}$$

Grundsätzlich ist der Spitzenwert der Ausgangsspannung um die Durchflussspannungen zweier Dioden, also um etwa 1,4 V kleiner, was man bei größeren Spannungen vernachlässigen kann. Grundsätzlich gilt aber:

$$\hat{U}_A = \hat{U}_2 - 2 \cdot U_{DF}$$

Den Gleichspannungsanteil der Ausgangsspannung erhält man mit der Gleichung:

$$U_{A-} = 2 \cdot \frac{\hat{U}_A}{\pi} = 0,63 \cdot \hat{U}_A$$

Außer dem Gleichspannungsanteil enthält die Ausgangsspannung  $U_A$  noch sinusförmige Wechselspannungsanteile (jetzt mit 100 Hz in der Grundschwingung), die sich hier – da keine Lücken mehr vorhanden sind – ergeben zu:

$$U_w = 0,48 \cdot U_{A-}$$

$U_w$  ist die Welligkeitsspannung. Die Welligkeit, also das Verhältnis des Anteils der Welligkeitsspannung zum Anteil der Gleichspannung, beträgt bei der Brücken–Gleichrichtung 0,485.

$$W: \frac{U_w}{U_{A-}} = 0,48$$

Werden die Durchfluss–Spannungen der Dioden vernachlässigt, ist der Effektivwert der pulsierenden Gleichspannung identisch mit dem Effektivwert der Sekundärspannung des Trafo:

$$U_{A\text{eff}} = u2, \quad \text{oder: } U_{A\text{eff}} = 0,707 \cdot \hat{U}_2$$

Bei Vernachlässigung der Dioden–Flussspannung kann man den Gleichspannungsanteil der Ausgangsspannung auch direkt aus der Sekundärspannung  $u_2$  des Transformators bestimmen:

$$U_{A-} = 2 \cdot \frac{\hat{U}_2}{\pi} = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot u_2 = 0,9 \cdot u_2$$

$$U_2 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot U_{A-} : 1,1 \cdot U_{A-} \quad (\text{u2 ist der Effektivwert der Trafo-Sekundärspannung})$$

Dieselben Beziehungen gelten grundsätzlich auch für die Ströme:

$$I_{A_{eff}} = \frac{\hat{I}_A}{\sqrt{2}}$$

$$I_{A-} = 2 \cdot \frac{\hat{I}_A}{\pi} = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{A_{eff}} = 0,9 \cdot I_{A_{eff}}$$

$$I_{A_{eff}} = 1,1 \cdot I_{A-}$$

$$I_w = 0,4 \cdot 8 \cdot I_{A-}$$

Da die Diodenströme dieselben Lücken besitzen wie bei der Einweg-Gleichrichtung, müssen für ihre Berechnung diese Beziehungen verwendet werden. Zunächst setzt sich der gesamte Gleichstromanteil aus den beiden Gleichstromanteilen der Diodenströme zusammen:

$$I_d = \frac{1}{2} \cdot I_A$$

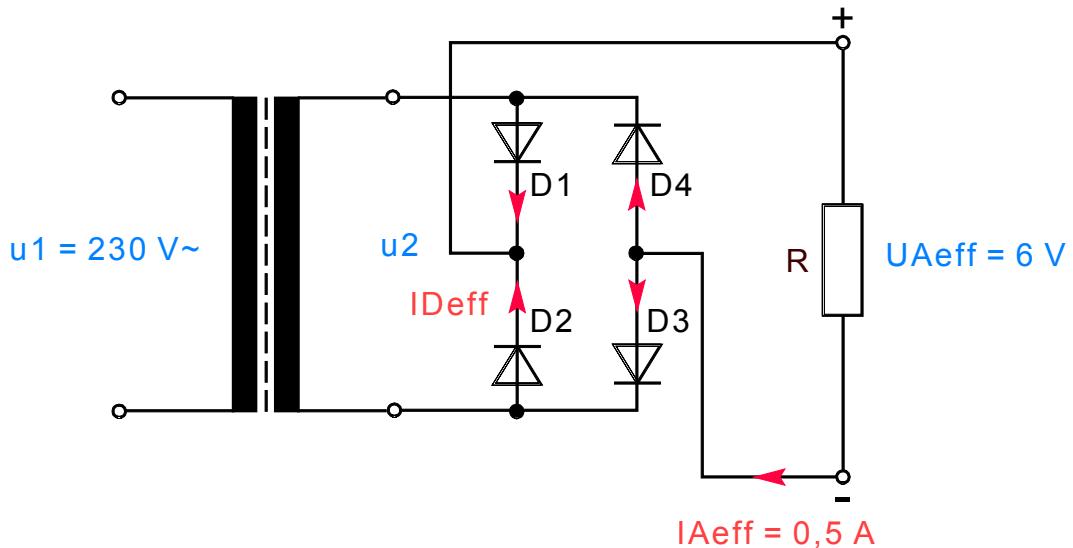
Wie bei der Einweg-Gleichrichtung gilt für den Effektivwert der Diodenströme:

$$I_{D_{eff}} = \frac{\hat{I}_D}{2}$$

Da ohne Berücksichtigung der Dioden-Flussspannungen die Spitzenwerte von Ausgangsspannung und Diodenspannung gleich sind ( $\hat{I}_A = \hat{I}_D$ ), gilt:

$$I_{D_{eff}} = \frac{\hat{I}_D}{2} = \frac{\hat{I}_A}{2} = \frac{1}{4} \cdot I_{A-} = 0,78 \cdot I_{A-}$$

### Berechnungsbeispiel:



Für diese Gleichrichterschaltung sollen bestimmt werden (dabei soll die Dioden–Flussspannung unberücksichtigt bleiben):

- Den Effektivwert der Sekundärspannung des Trafo:  $u_2$
- Den Spitzenwert der Sekundärspannung des Trafo:  $\hat{U}_2$
- Das Übersetzungsverhältnis des Trafo  $\ddot{u}$
- Die Welligkeitsspannung  $U_w$
- Den Spitzenwert der Ausgangsspannung  $\hat{U}_A$
- Den Gleichspannungsanteil der Ausgangsspannung  $U_{A-}$
- Den Spitzenwert des Ausgangstroms  $\hat{I}_A$
- Den Gleichstromanteil des Ausgangstroms  $I_{A-}$
- Den Welligkeitsstrom  $I_w$  (Effektivwert der Wechselspannungsanteile)
- Den Effektivwert der Diodenströme  $I_{D\text{eff}}$
- Den Widerstand  $R$

Ergebnisse (zur Kontrolle):

$$u_2 = 6 \text{ V}$$

$$\hat{U}_2 = 8,48 \text{ V}$$

$$\ddot{u} = 38,3$$

$$\hat{U}_A = \hat{U}_2 = 8,48 \text{ V}$$

$$U_{A-} = 5,4 \text{ V}$$

$$U_w = 2,62 \text{ V}$$

$$\hat{I}_A = 0,7 \text{ A}$$

$$I_{A-} = 0,45 \text{ A}$$

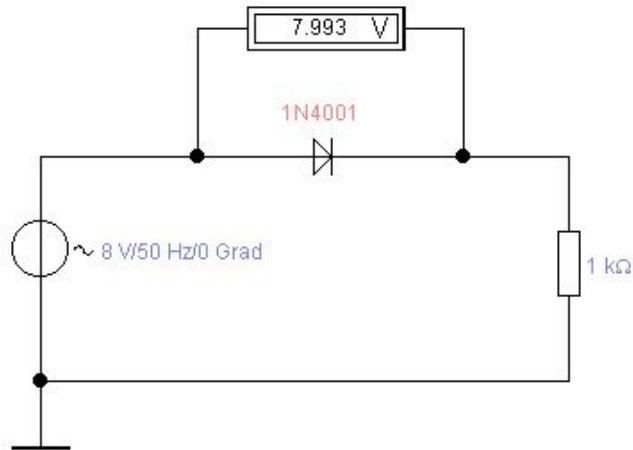
$$I_w = 0,22 \text{ A}$$

$$I_{D_{eff}} = 0,35 \text{ A}$$

$$R = 12 \text{ Ohm}$$

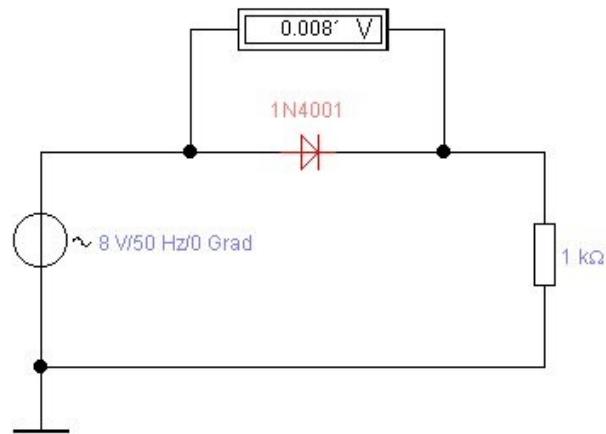
### Praxis: Messen von Gleichrichterschaltungen, Fehlersuche:

**Aufgabe 1:** Sie stellen fest, dass eine Einweggleichrichterschaltung nicht funktioniert und messen deshalb die Spannung über der Diode. Sie bekommen folgendes Ergebnis:



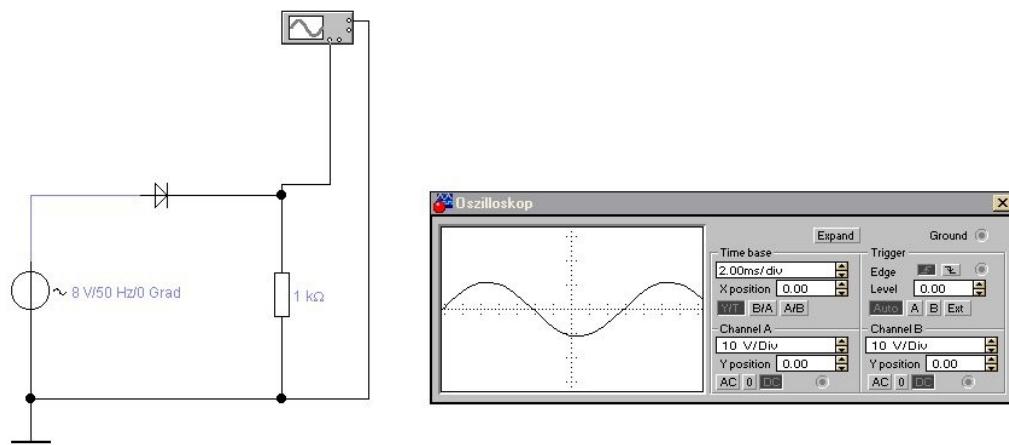
Welche Art von Fehler liegt hier vor?

**Aufgabe 2:** Sie stellen fest, dass eine Einweggleichrichterschaltung nicht funktioniert und messen deshalb die Spannung über der Diode. Sie bekommen folgendes Ergebnis:



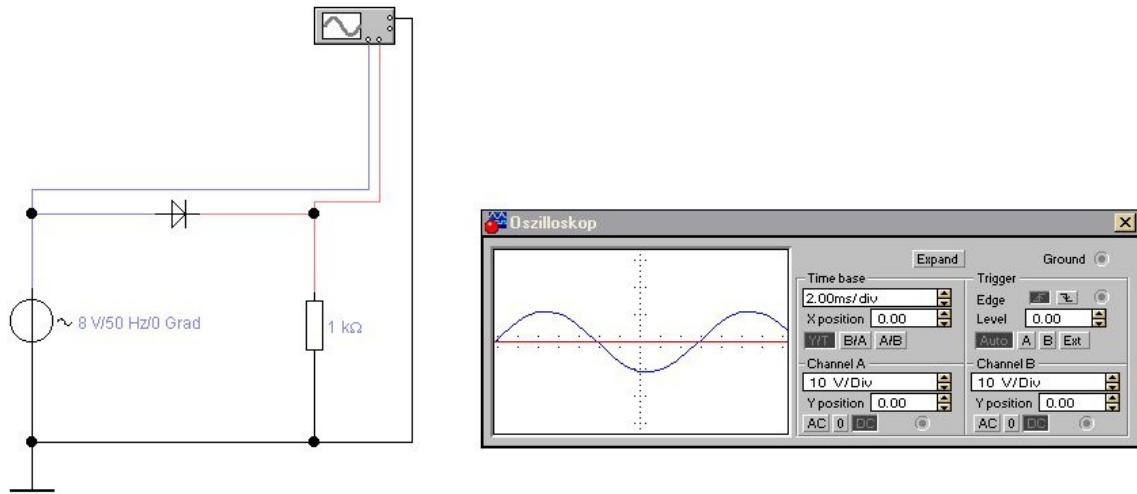
Welche Art von Fehler liegt hier vor?

**Aufgabe 3:** Sie stellen fest, dass eine Einweg–Gleichrichterschaltung nicht funktioniert und oszillografieren deshalb die Spannung über dem Widerstand. Sie bekommen folgendes Ergebnis:



Welche Art von Fehler liegt hier vor?

**Aufgabe 4:** Sie stellen fest, dass eine Einweg–Gleichrichterschaltung nicht funktioniert und oszillografieren deshalb sowohl die Spannung über der Diode als auch über dem Widerstand. Sie bekommen folgendes Ergebnis:



Welche Art von Fehler liegt hier vor?

## Erweiterung: Leuchtdioden (LEDs)

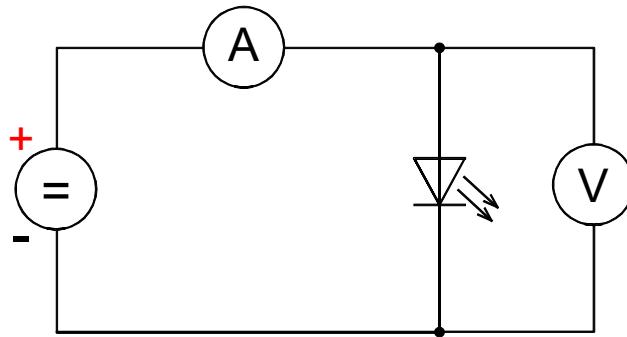
Es handelt sich dabei um Dioden, die eine Durchlass- und eine Sperr-Richtung haben, allerdings wird bei den LEDs in der Regel nicht die Dioden-Funktion sondern die **Anzeige-Funktion** genutzt.



Zum grundsätzlichen Wirkungszusammenhang der Erzeugung von Licht aus Strom bei LEDs siehe: Systematischer Teil, Materialien der Elektronik.



Nehmen Sie die Kennlinie einer roten und einer grünen LED auf:



Die Spannung am Netzgerät lässt sich kontinuierlich einstellen. Benutzen Sie für eine genaue Spannungseinstellung an der LED aber ein separates Spannungs-Messinstrument.



Ermitteln Sie auch den Kennlinienast für die Sperrrichtung. Erhöhen Sie aber die Spannung dabei **nicht über 3 V**, da LEDs nur eine sehr geringe maximale Sperrspannung aushalten können!

Vergleichen Sie die ermittelten Kennlinien mit der Kennlinie der Gleichrichterdiode.

- Halten Sie die Unterschiede fest.

### **Berechnung des erforderlichen Vorwiderstands für eine LED:**

Im Gegensatz zu Siliziumdioden schwankt die Schleusenspannung bei LEDs beträchtlich:

- rote LEDs: 1,2 bis 1,5 V
- gelbe LEDs: 1,4 bis 1,8 V
- grüne LEDs: 2,0 bis 2,5 V
- blaue LEDs: 3,3 bis 3,7 V
- weiße LEDs: 3,3 bis 3,7 V
- infrarote LEDs: 1,2 bis 1,5 V

Für die Berechnung von Vor- oder Schutzwiderständen verwendet man deshalb einen Mittelwert aus dieser Streuung.

Aufgabe: Eine LED (rot, gelb, grün) soll als Anzeige an eine Gleichspannung von 9 V angeschlossen werden, Berechnen Sie dafür die erforderlichen Vorwiderstände, wenn die Strom-

stärke ca. 20 mA betragen soll. Wählen Sie aus der E12–Normreihe die passenden Widerstände aus.

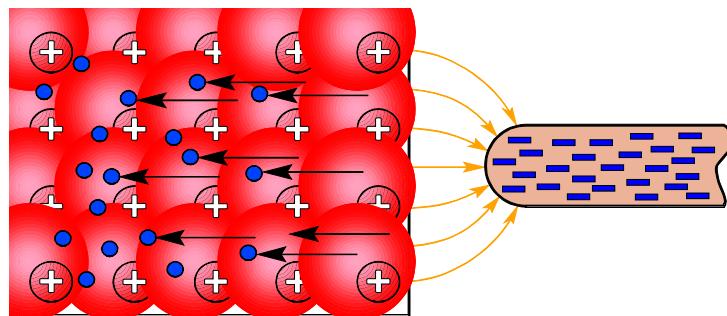
### 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung

Allgemeines:

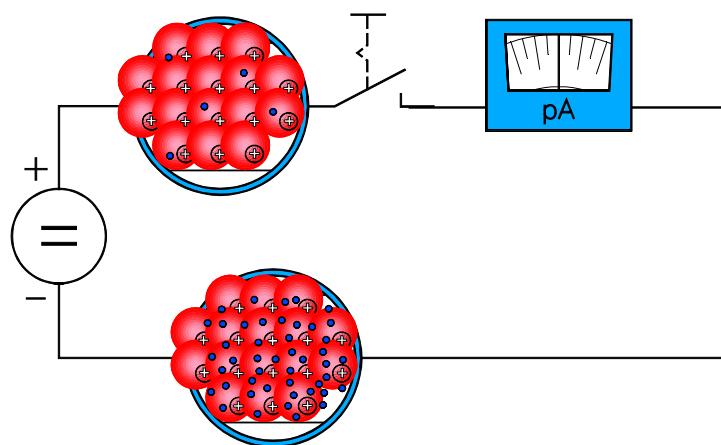
#### Influenz als Ursache des Kondensatoreffekts

Elektrische Ladungen bilden um sich ein elektrisches Feld aus, das durch eine Kraftwirkung (auf andere Ladungen) „auf Entfernung“ gekennzeichnet ist, d.h. es wirkt eine Anziehungs– oder Abstoßungskraft, ohne dass sich die Körper berühren.

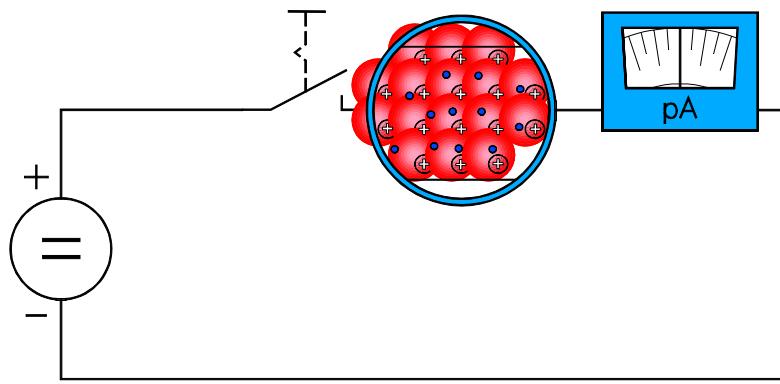
Reibt man z.B. einen Kunststoffstab mit einem Wolltuch, so werden von seiner Oberfläche positive Ladungen abgestreift und der Stab ist damit negativ geladen. Bringt man ihn jetzt in die Nähe eines Metalls, so werden die im Metall vorhandenen freien Elektronen von dem Stab abgestoßen:



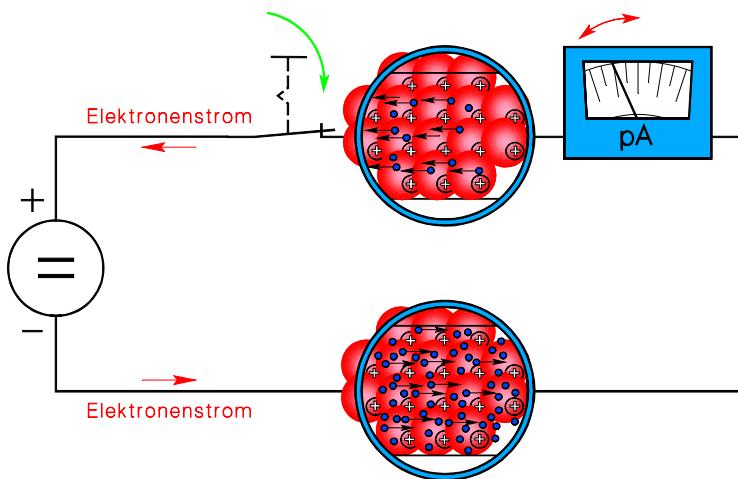
Nun ein **Gedankenexperiment** zum Wirkungszusammenhang des Kondensatoreffekts:



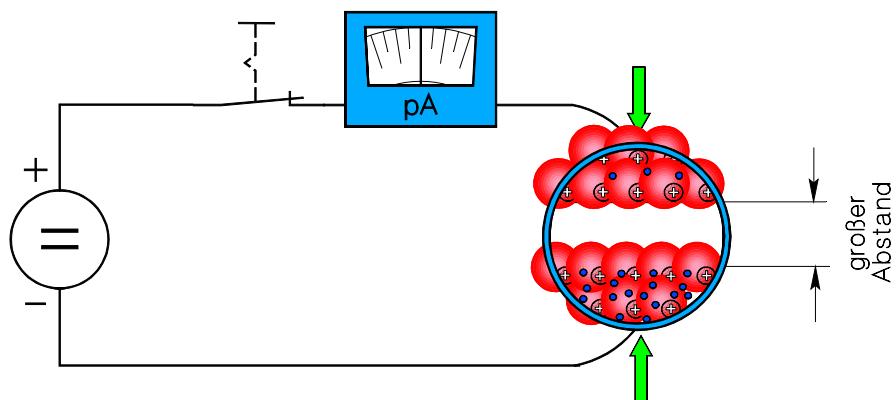
Eine Gleichspannungsquelle ist mit einem Schalter verbunden, der ein offenes Stück Leitung zu- und abschalten kann. Die beiden Luppen sollen grob den Zustand in den beiden Leitungen der Quelle zeigen: am Pluspol herrscht Elektronenmangel, am Minuspol Elektronenüberschuss. Nach dem Schalter ist ein sehr (!!!) empfindliches Strommessgerät eingebaut, das auch winzigste Elektronenverschiebungen anzeigen kann.



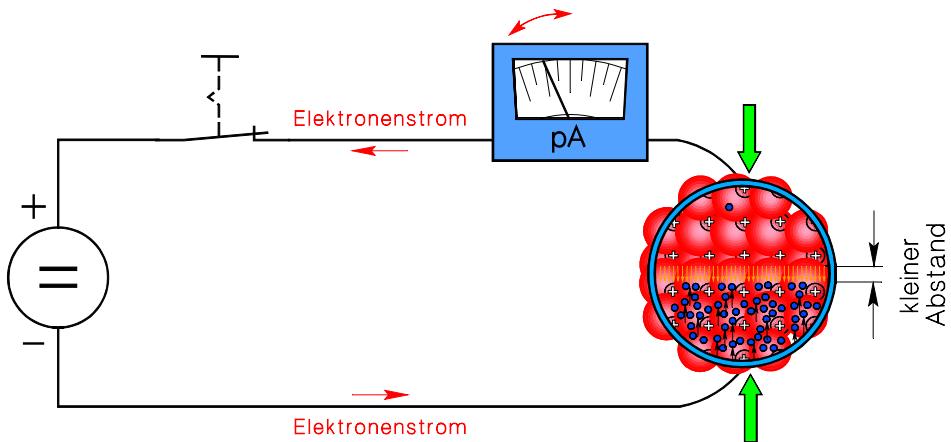
Diese Abbildung zeigt den Zustand der Leitung hinter dem Schalter: die Elektronen stehen nicht unter Spannung/Druck, sind also frei beweglich.



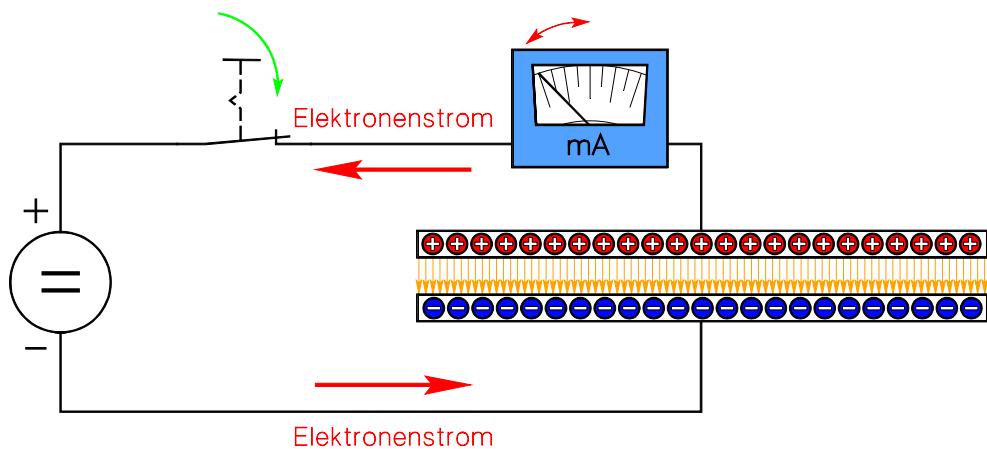
Wird nun der Schalter geschlossen, breitet sich schlagartig die Spannung auf das Leitungsstück hinter dem Schalter aus und die Elektronen folgen diesem Sog: das Messinstrument zeigt einen winzigen Verschiebungsstrom an.



Jetzt werden die beiden Enden der Leitungen einander angenähert. Wie man sehen kann, passiert bei einem noch relativ großen Abstand nichts.



Werden die beiden Enden einander aber so weit angenähert, dass die Kraftwirkung der Ladungen in den Drähten wirken kann, so bildet sich ein elektrisches Feld aus und es entsteht ein zusätzlicher, kurzer Verschiebungsstrom: der Zeiger des Instrumentes schlägt aus. Dieser Effekt lässt sich jetzt beliebig wiederholen: Ein Vergrößern des Abstandes führt zur Abschwächung des Feldes und damit zum Rückfluss der Ladungen, ein erneutes Annähern der beiden Enden erzeugt wiederum das Feld und damit die Kraftwirkung der Ladungen aufeinander, was wieder zu dem Verschiebungsstrom führt. Je näher die beiden Enden zusammengeführt werden, desto größer wird dieser Verschiebungsstrom sein.



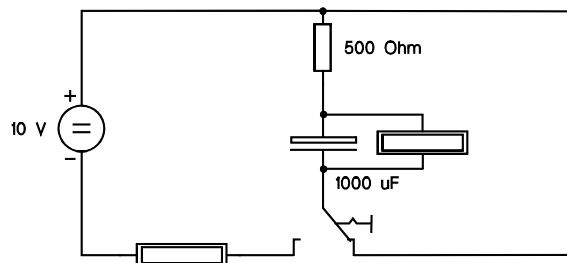
Dieser Effekt lässt sich noch enorm steigern, wenn man dafür sorgt, dass sich sehr viele Ladungsträger gegenüberstehen → beachten Sie die unterschiedlichen Messbereiche des Instrumentes. Wegen der Influenz der Ladungen in den beiden Enden nimmt die Größe der „Kapazität“ von Kondensatoren mit kleiner werdendem Abstand und größer werdender Fläche der beiden Platten/Folien zu. Daraus wird auch der Name des Kondensators verständlich: **Verdichter**.



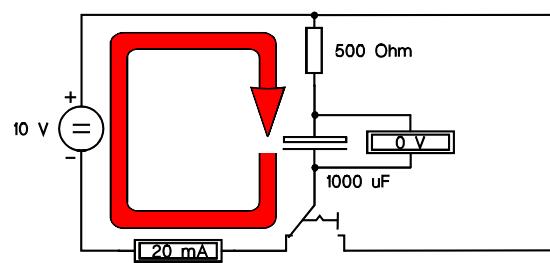
Die zusätzliche Wirkung des sogenannten Dielektrikums zwischen den beiden Platten, können Sie sich in dem Simulationsprogramm **Der Kondensator an Gleichspannung** anschauen. In diesem Programm können Sie außerdem mit dem Kondensator frei experimentieren, also Plattengröße, Plattenabstand und Spannung verändern und die Unterschiede ermitteln.

## Lade- und Entladevorgang beim Kondensator

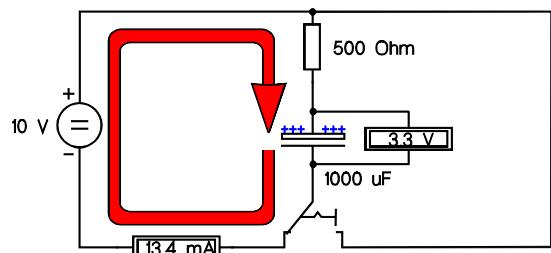
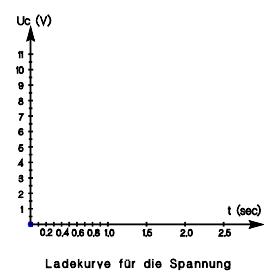
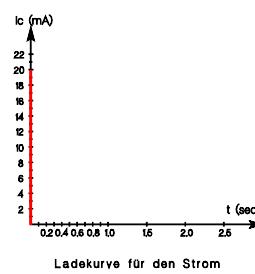
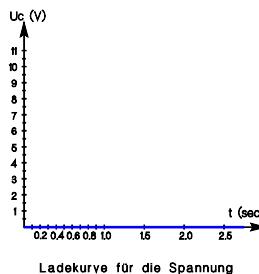
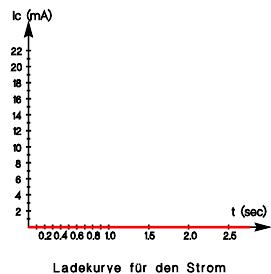
### Aufladen eines Kondensators



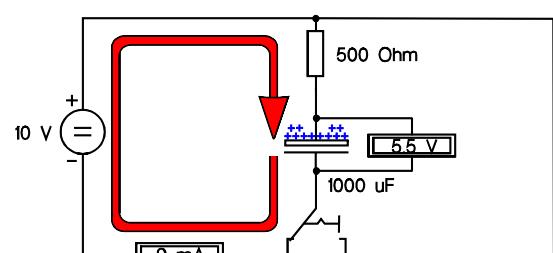
1. Ausgangszustand: Kondensator leer



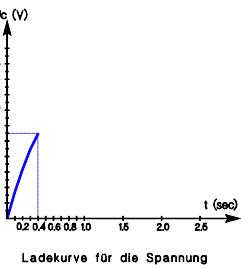
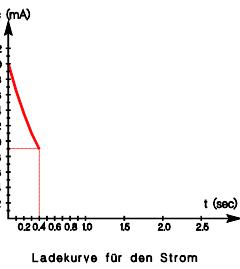
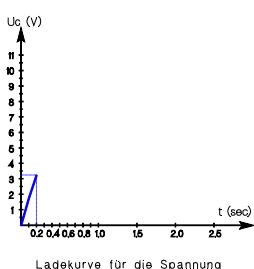
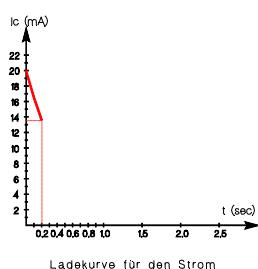
2. Schalter betätigt: Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ sec}$



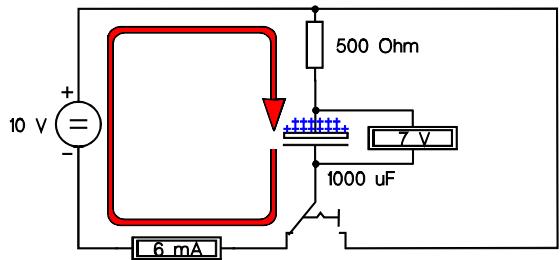
3. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0.2 \text{ sec}$



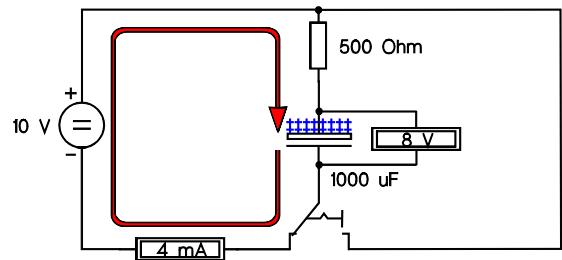
4. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0.4 \text{ sec}$



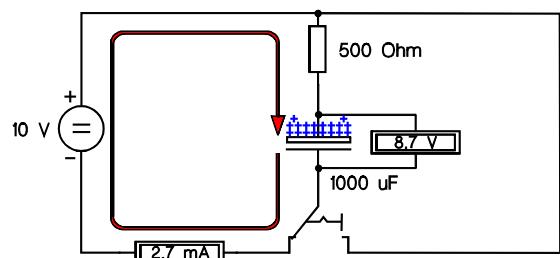
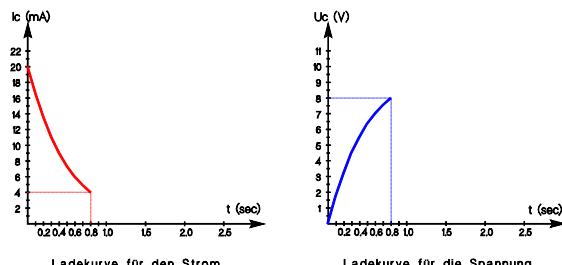
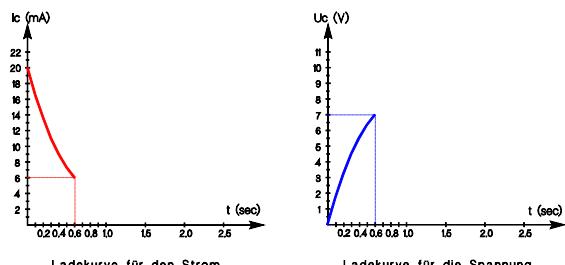
## Aufladen eines Kondensators



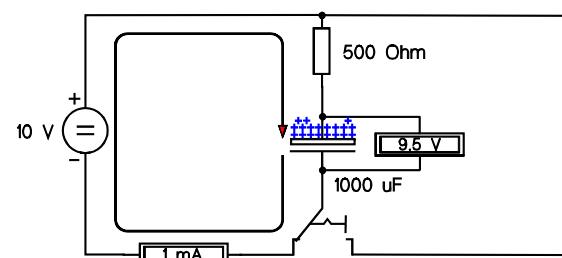
5. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0.6 \text{ sec}$



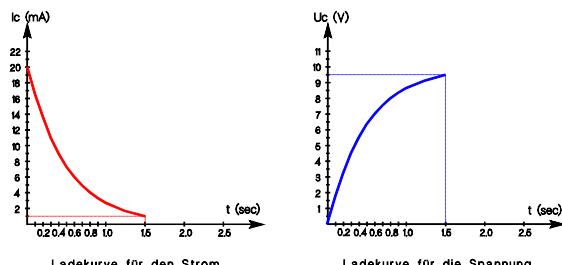
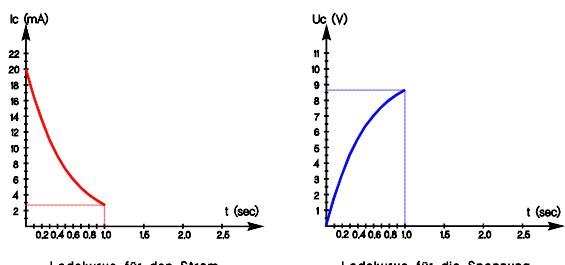
6. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0.8 \text{ sec}$



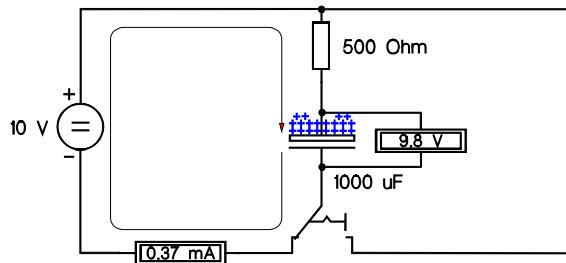
7. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 1 \text{ sec}$



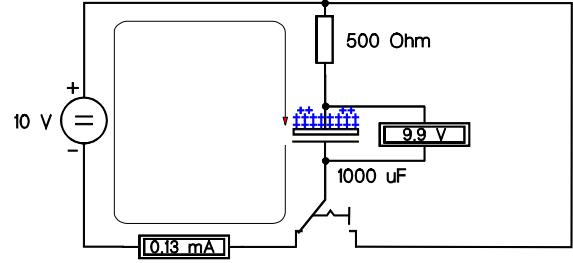
8. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 1.5 \text{ sec}$



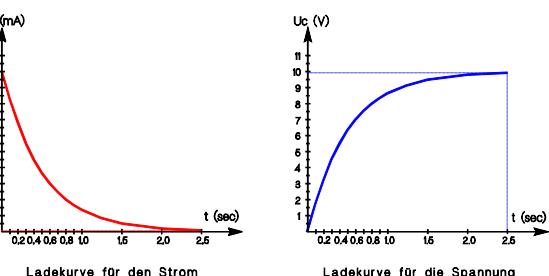
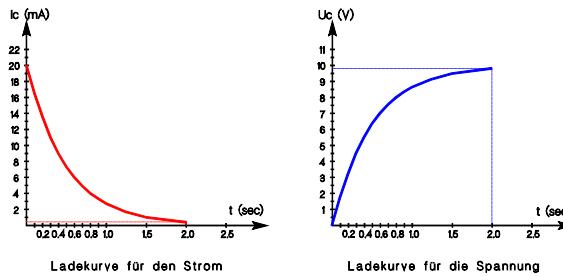
## Aufladen eines Kondensators



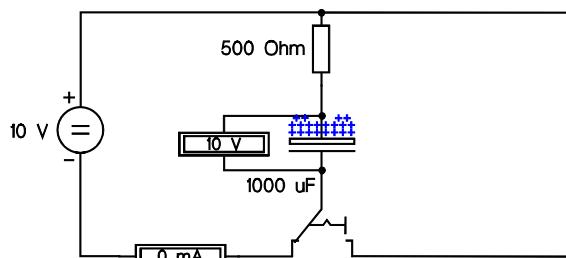
9. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 2$  sec



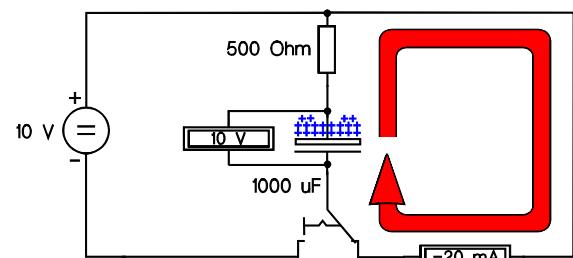
10. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 2.5$  sec



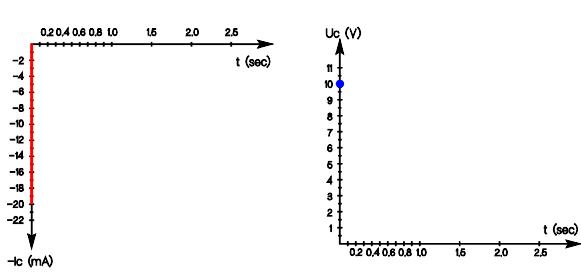
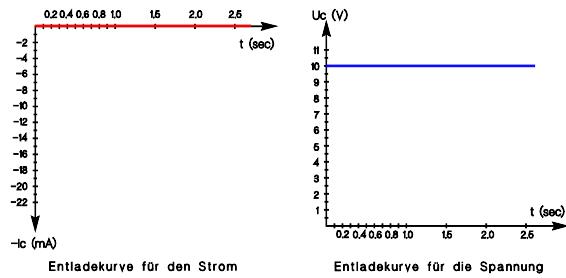
## Entladen eines Kondensators



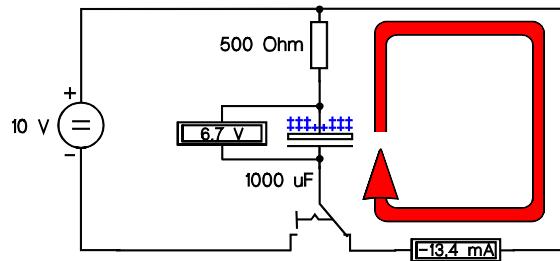
1. Ausgangszustand: Kondensator geladen



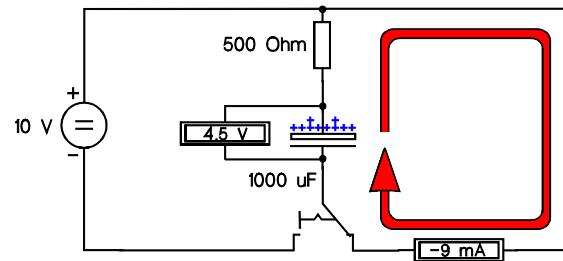
2. Schalter betätigt: Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0$  sec



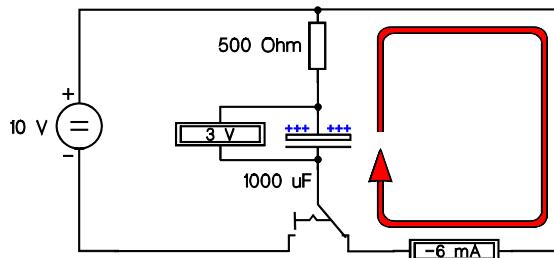
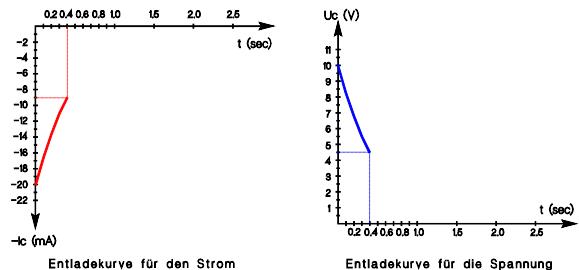
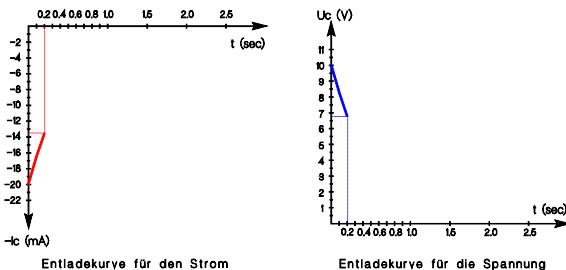
## Entladen eines Kondensators



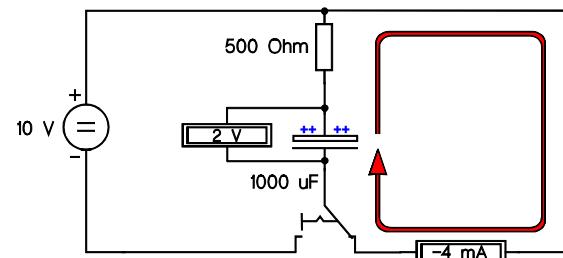
3. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0.2$  sec



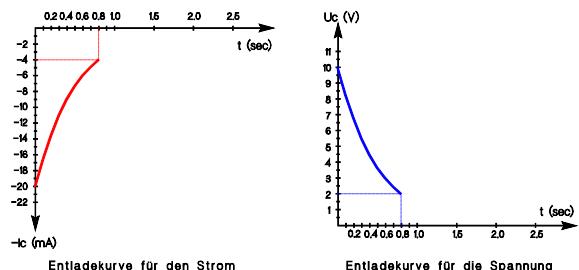
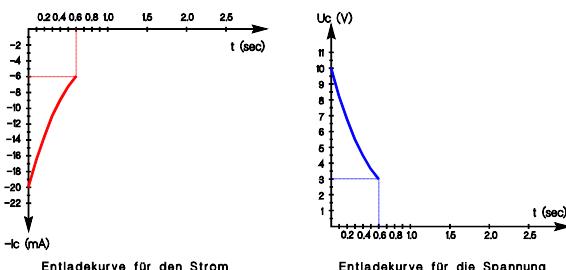
4. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0.4$  sec



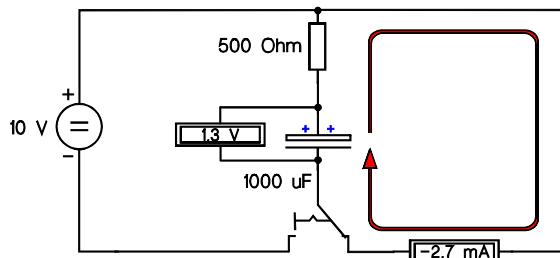
5. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0.6$  sec



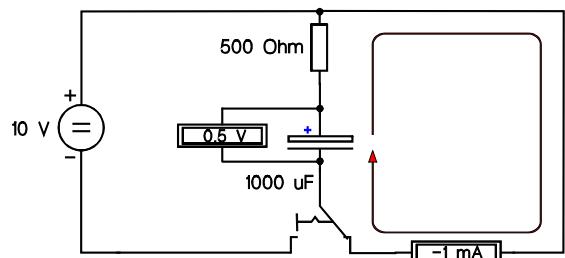
6. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 0.8$  sec



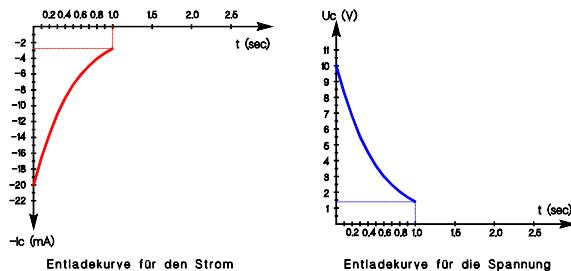
## Entladen eines Kondensators



7. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 1 \text{ sec}$

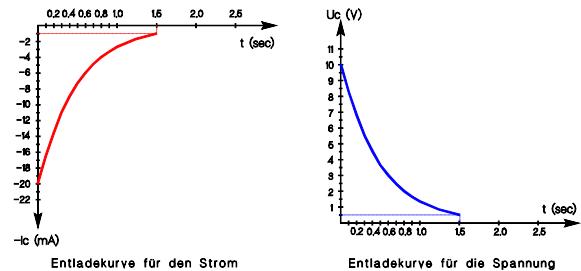


8. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 1.5 \text{ sec}$



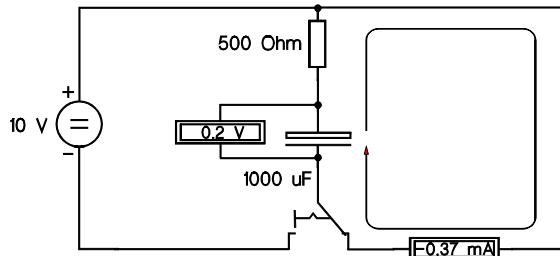
Entladekurve für den Strom

Entladekurve für die Spannung

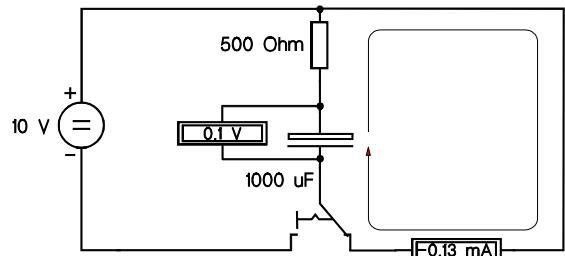


Entladekurve für den Strom

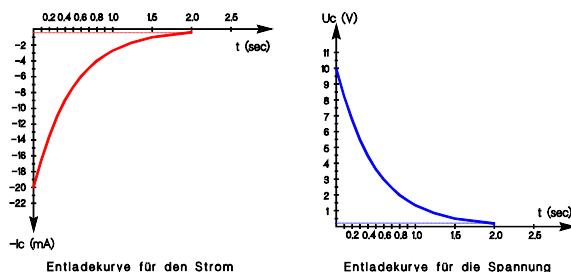
Entladekurve für die Spannung



9. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 2 \text{ sec}$

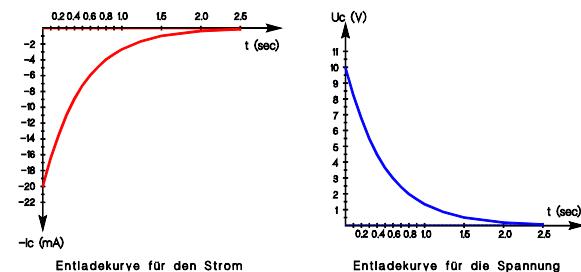


10. Zustand zum Zeitpunkt  $t = 2.5 \text{ sec}$



Entladekurve für den Strom

Entladekurve für die Spannung

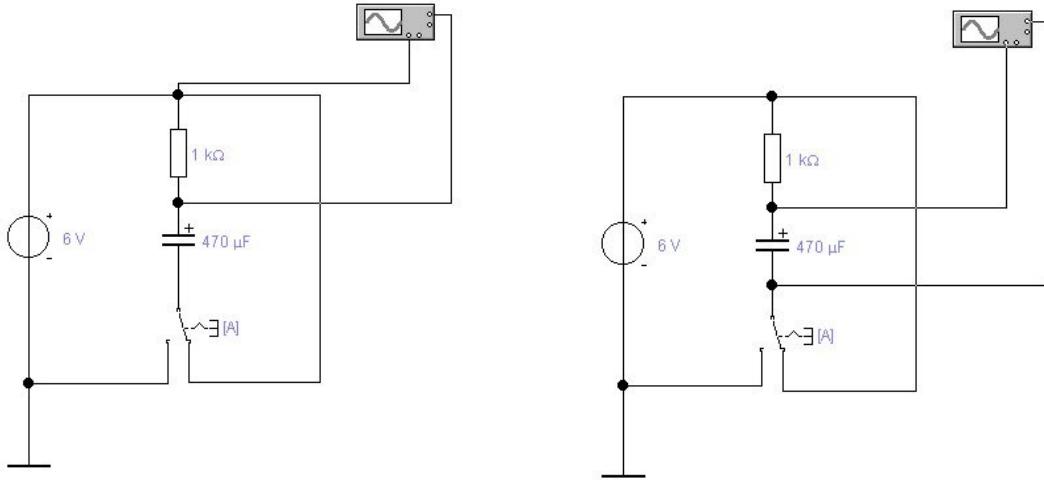


Entladekurve für den Strom

Entladekurve für die Spannung

## Zeitkonstante beim Auf- und Entladen eines Kondensators

Wenn Sie einen Kondensator in Reihe mit einem Widerstand an eine Gleichspannung anschließen, dann bekommen Sie beim Oszillografieren die typischen Lade- und Entladekurven für Stromstärke und Spannung als e-Funktionen in der Zeit.



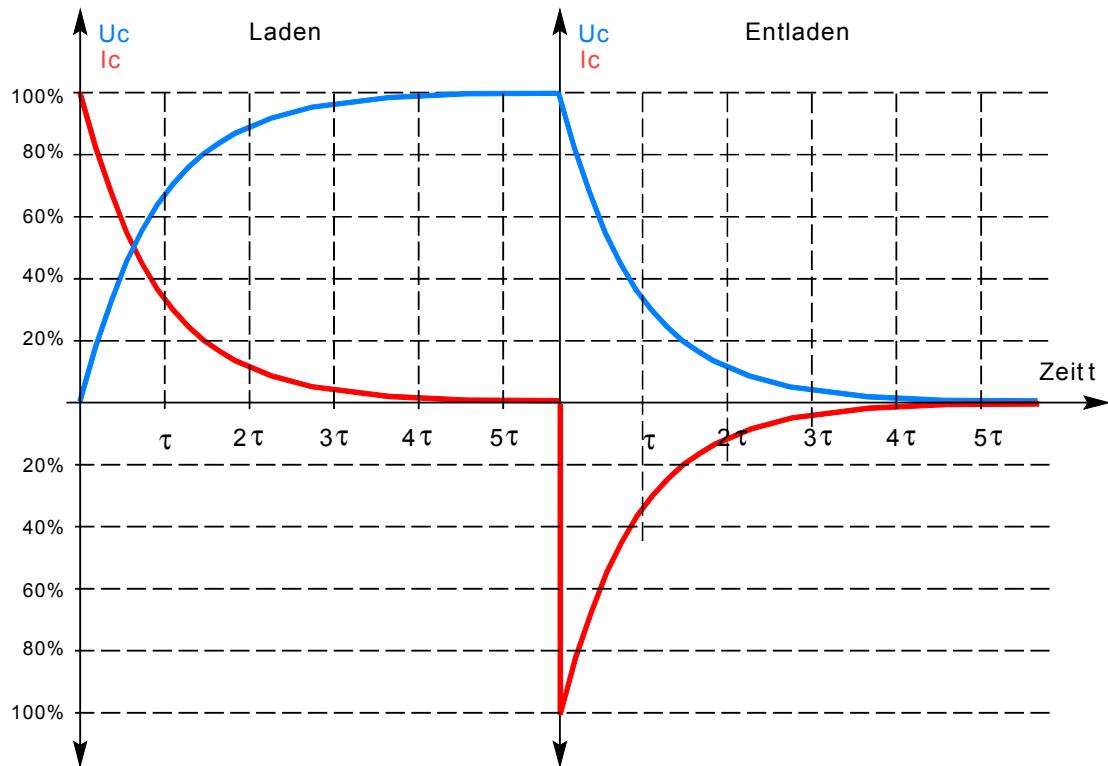
Bei der Beantwortung der Frage, wie lange es dauert, bis ein Kondensator restlos auf- bzw. wieder entladen ist, spielen zwei Faktoren eine Rolle:

- Je größer der im Lade- bzw. im Entladekreis vorhandene Widerstand ist, desto länger dauert der Vorgang. Bei Verdoppelung des Widerandes verdoppelt sich die Zeit.
- Je größer die Kapazität (das Fassungsvermögen) des Kondensators ist, desto länger dauert der Vorgang. Bei Verdoppelung der Kapazität verdoppelt sich die Zeit.

Da beide Faktoren unabhängig voneinander wirken, hat man sie in der sogenannten Ladezeitkonstanten  $\tau$  zusammengefasst:

$$\tau = R \cdot C$$

Die folgende Abbildung macht deutlich, welche Bedeutung diese Zeitkonstante hat:



**Aufladen:** Nach Ablauf der Zeit  $\tau$  ist die Spannung am Kondensator auf etwa 63% angestiegen bzw. die Stromstärke auf etwa 37% gesunken.

Für den **Entladevorgang** gilt: Nach Ablauf der Zeit  $\tau$  sind sowohl die Spannung als auch die Stromstärke auf etwa 37% gesunken.

Aber nach Ablauf der Zeit  $\tau$  ist der Kondensator ja noch nicht restlos auf- bzw. entladen! Diese Gesamt–Lade– bzw. Entladezeit wird so festgelegt:

Der Kondensator ist nach der Zeit  $5 * \tau$  vollständig auf– bzw. entladen.

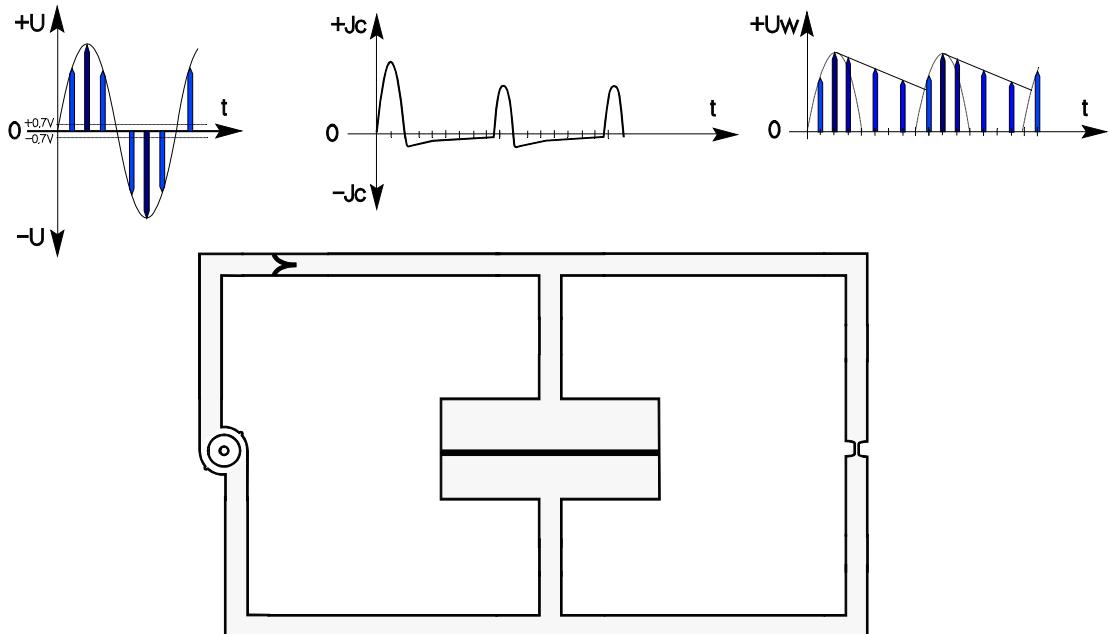
Wenn Sie in dieser Formel den Widerstand in Ohm und die Kapazität in Farad einsetzen, dann erhalten Sie die Zeit in Sekunden.

Beispiel: Ein Kondensator von  $C = 470 \mu F$  wird über einen Widerstand  $R = 1 \text{ kOhm}$  aufgeladen.  $\rightarrow \tau = 470 \text{ ms}$ , und damit beträgt die Gesamtladezeit: 2,35 Sekunden.

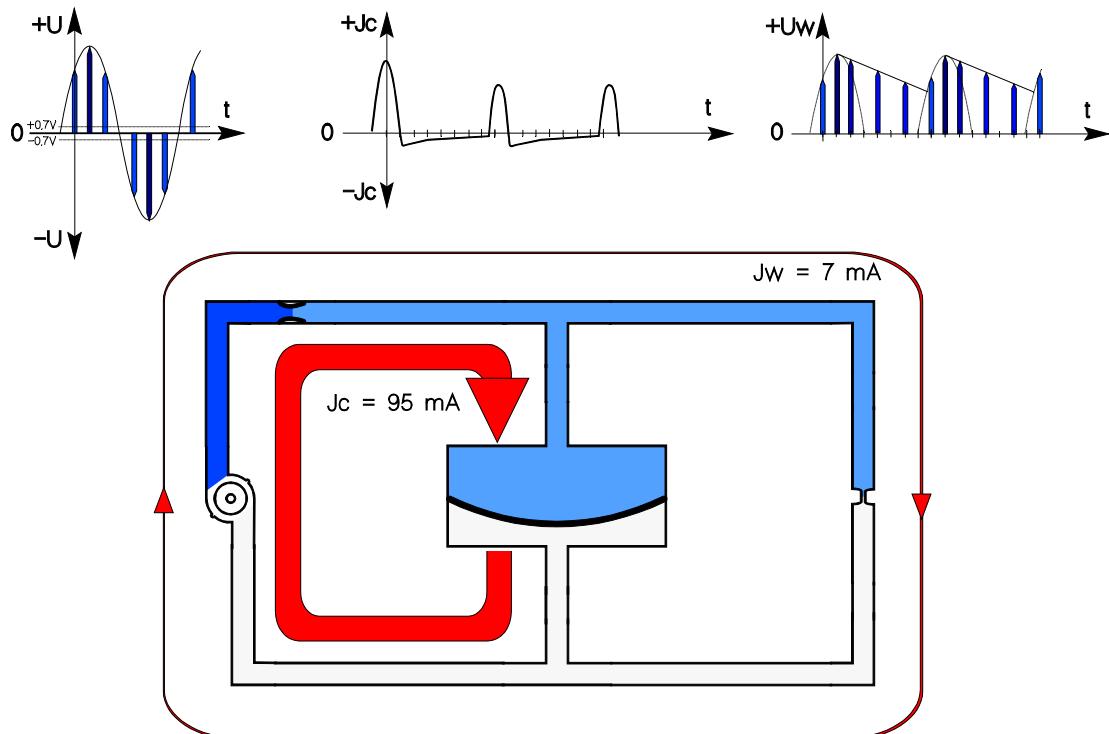
## Pneumatische Analogien

### @ Pneumatische Analogie der Einweggleichrichtung mit Glättung:

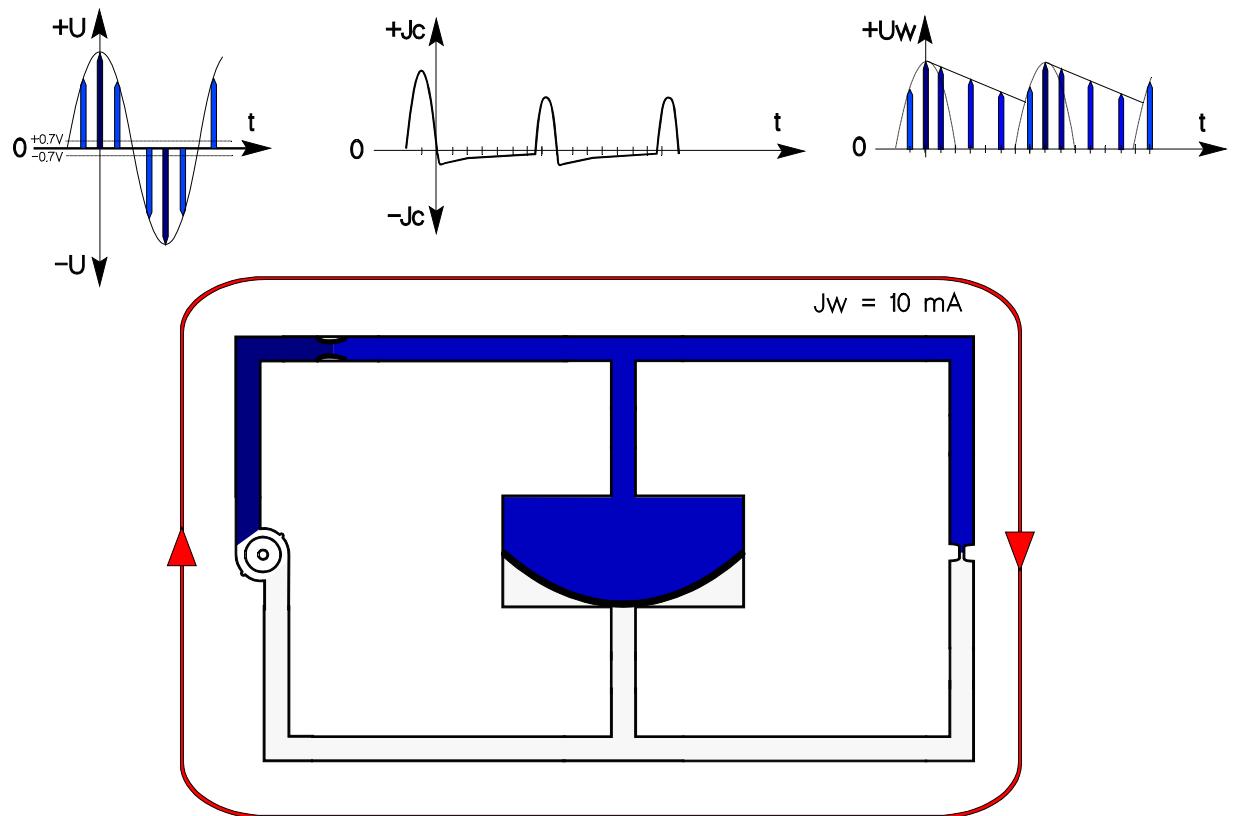
Einweggleichrichtung mit Glättung und Stromentnahme



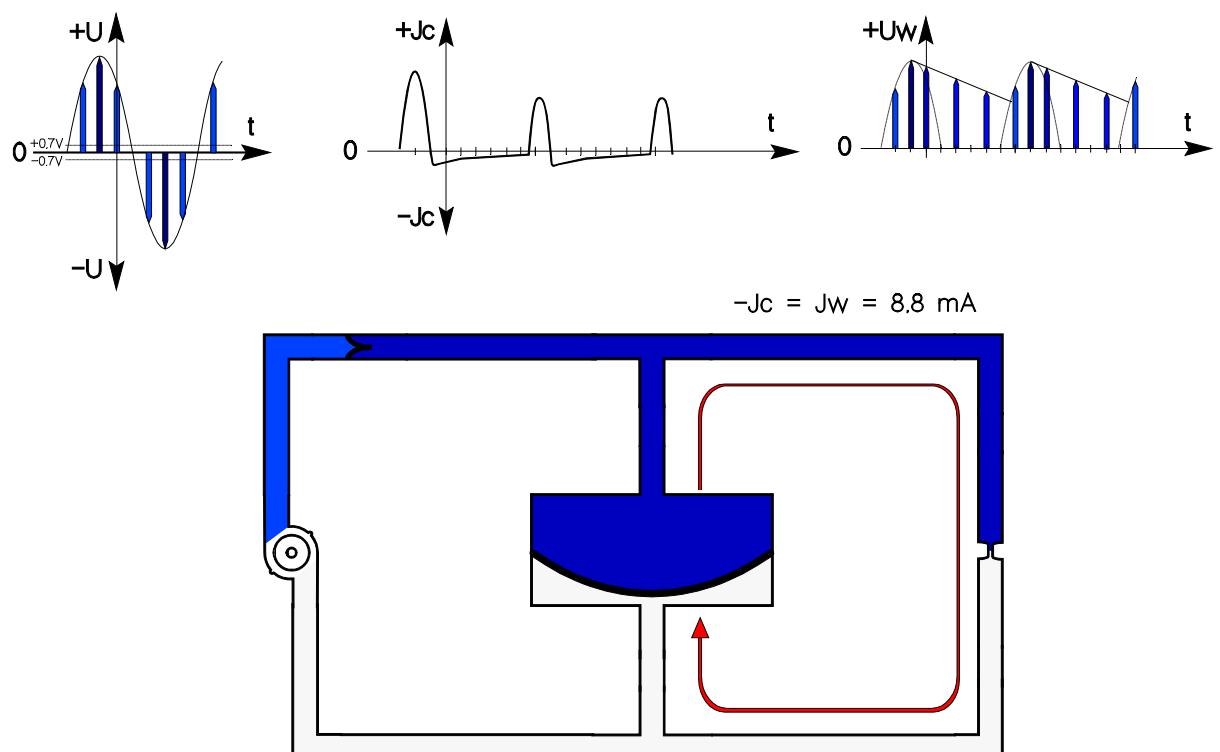
Ausgangslage: keine Spannung



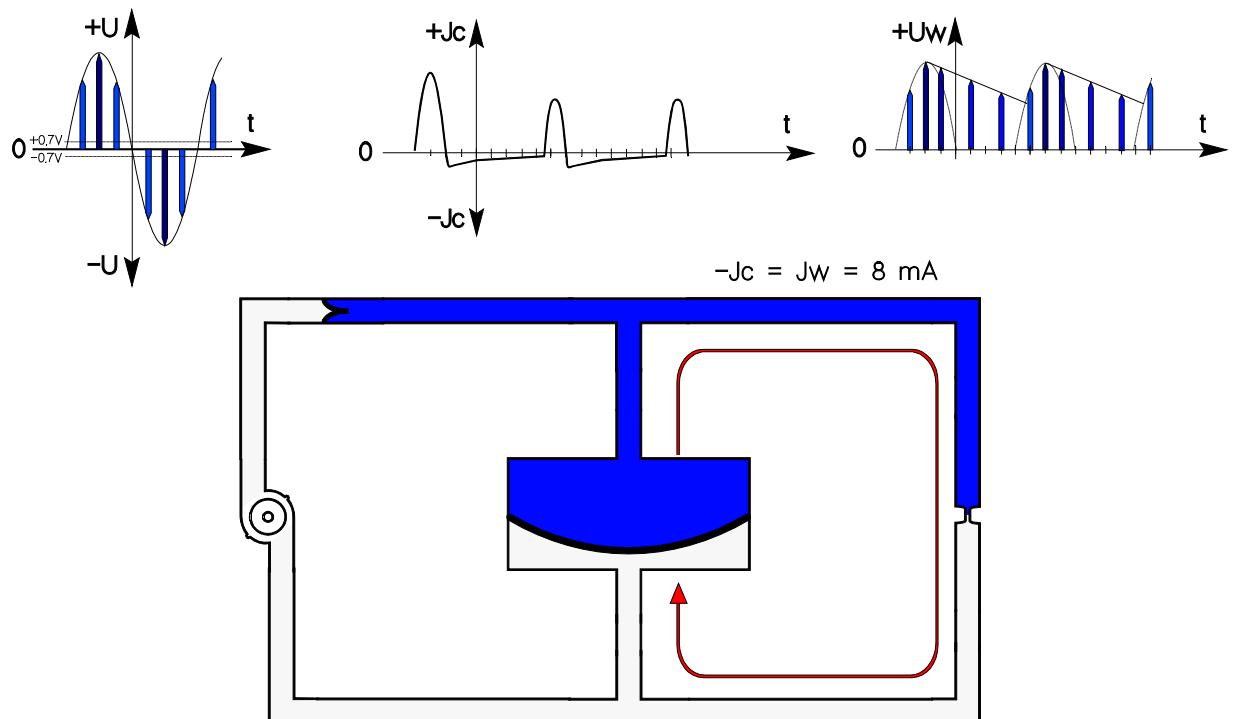
Phase 1: ansteigende positive Spannung



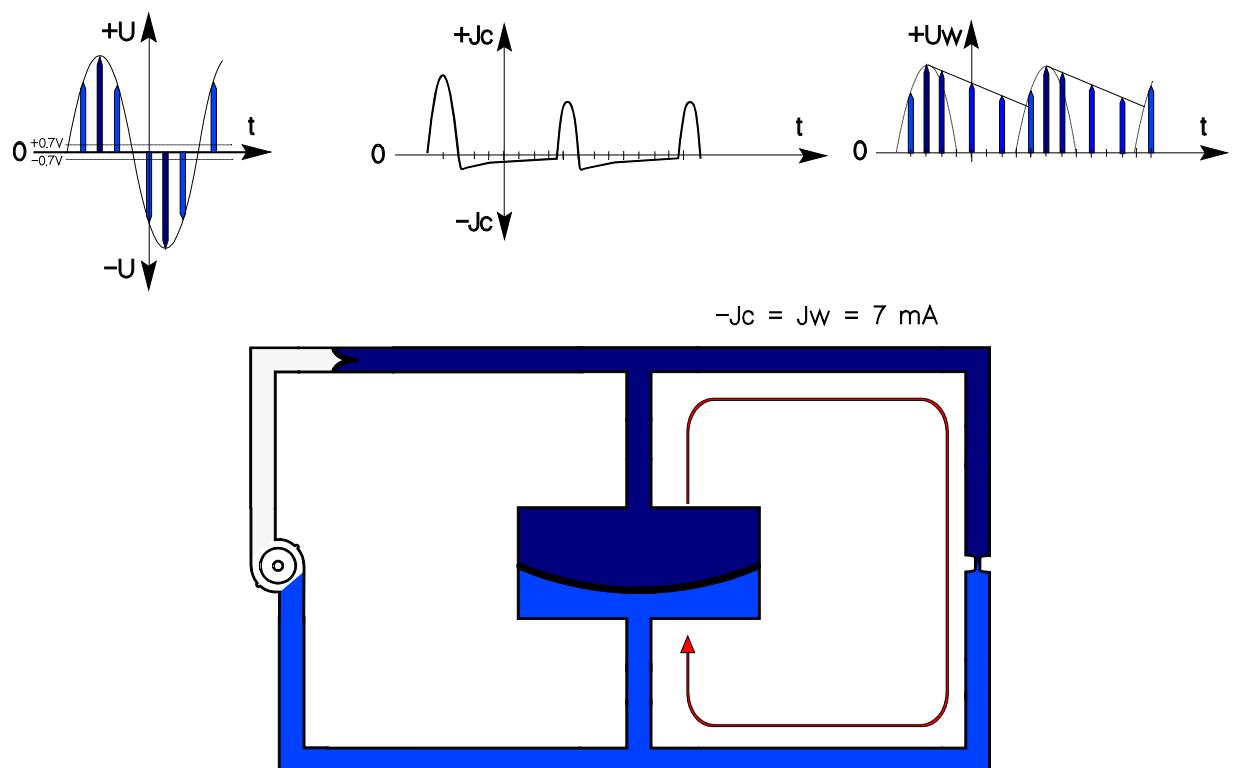
Phase 2: maximale positive Spannung



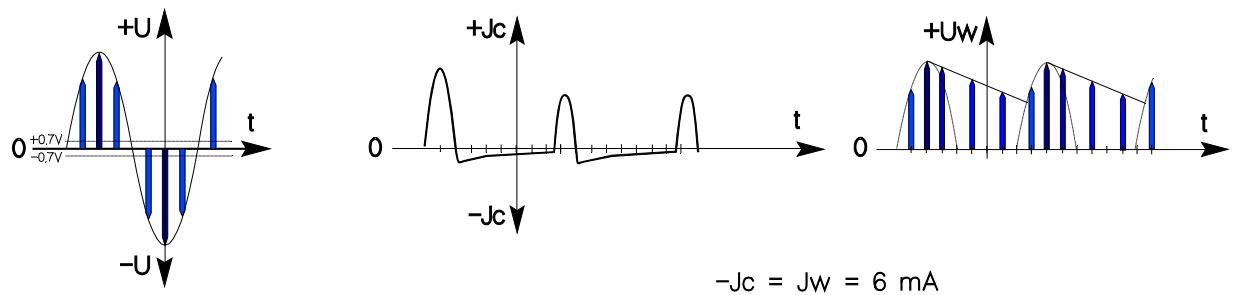
Phase 3: abnehmende positive Spannung



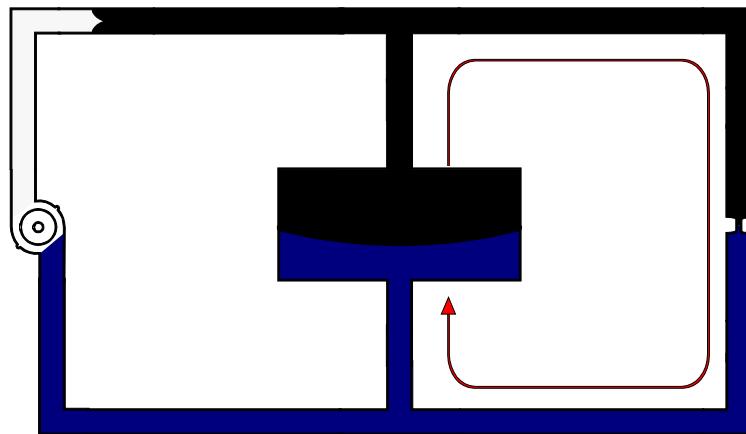
Phase 4: Nulldurchgang der Spannung



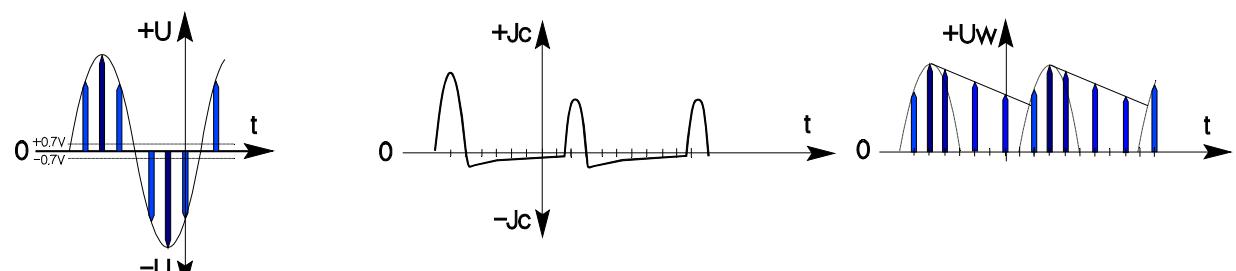
Phase 5: ansteigende negative Spannung



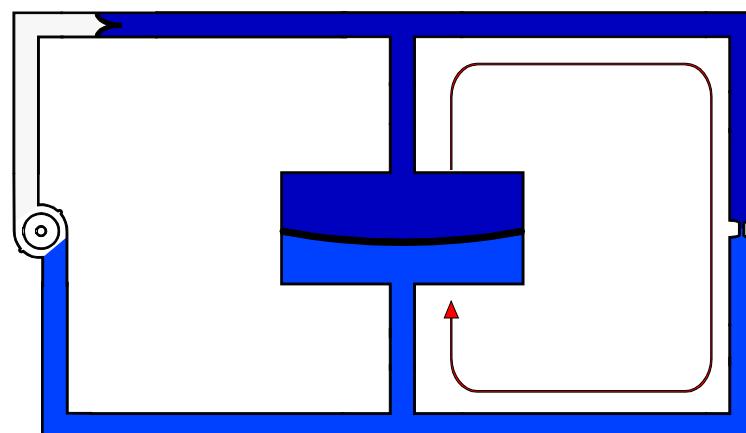
$$-J_c = J_W = 6 \text{ mA}$$



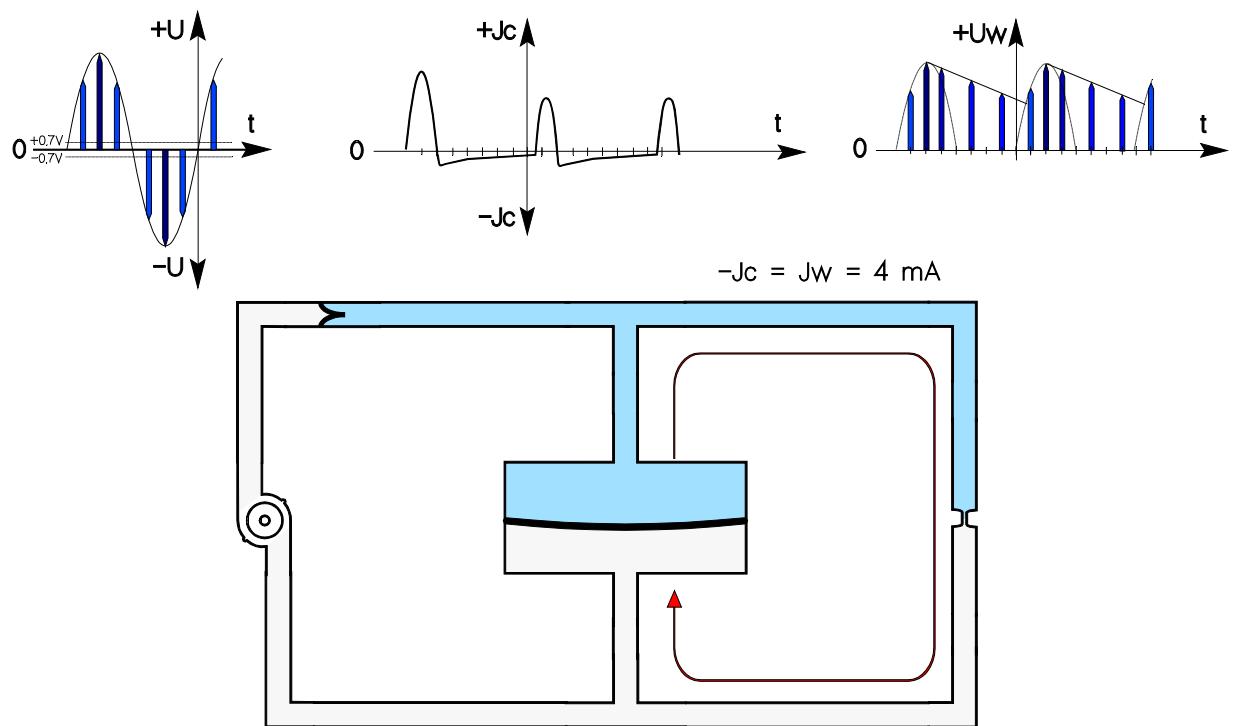
Phase 6: maximale negative Spannung



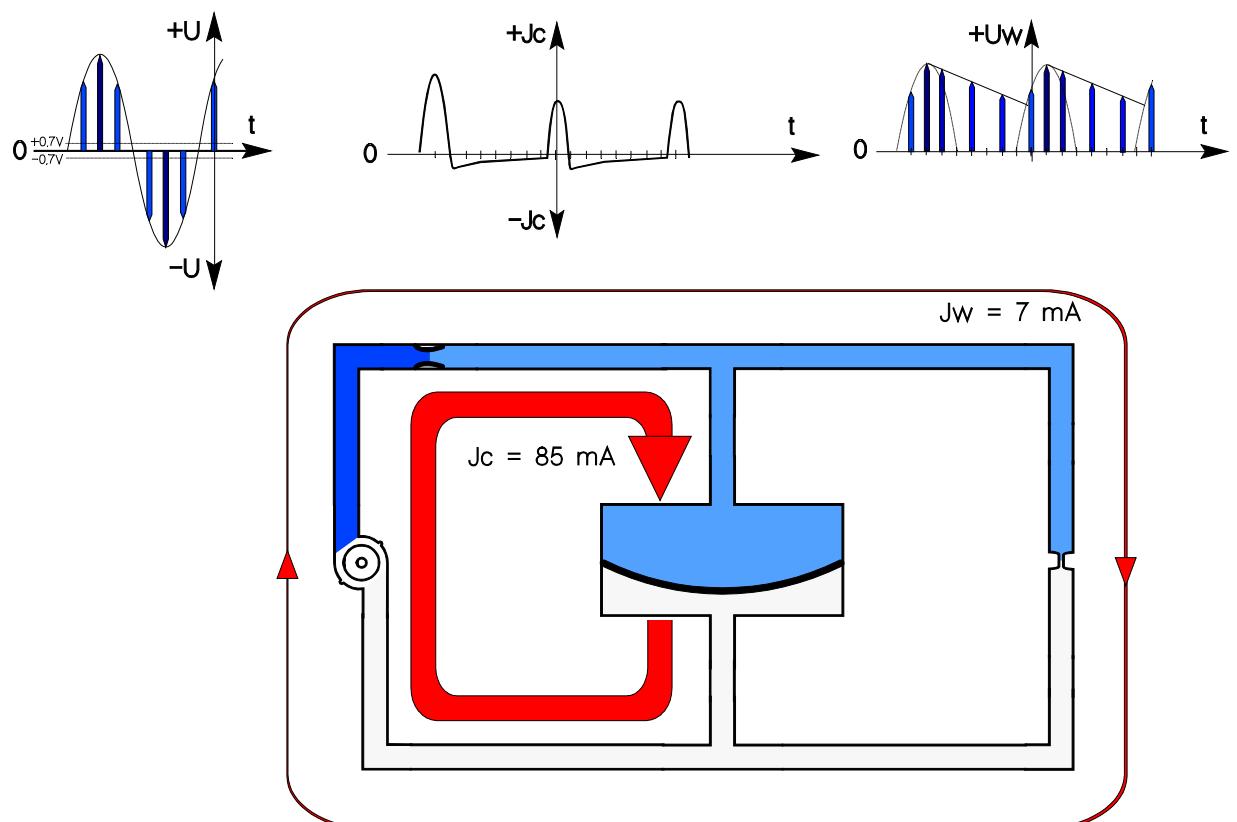
$$-J_c = J_W = 5 \text{ mA}$$



Phase 7: abnehmende negative Spannung



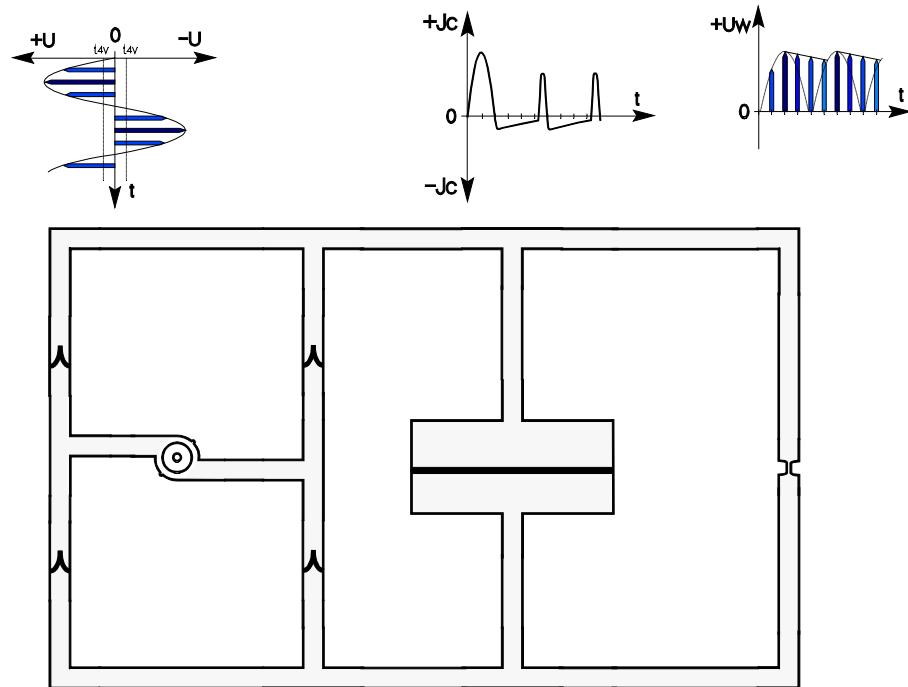
Phase 8: Nulldurchgang der Spannung



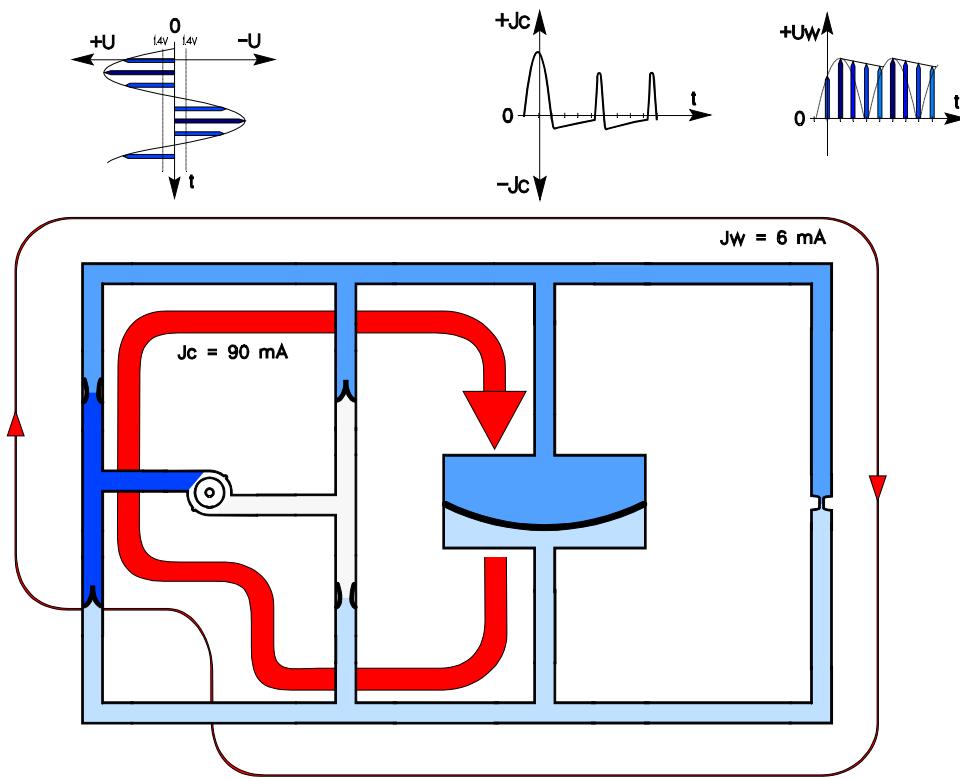
Phase 9: ansteigende positive Spannung

**@ Pneumatische Analogie der Brückengleichrichtung mit Glättung:**

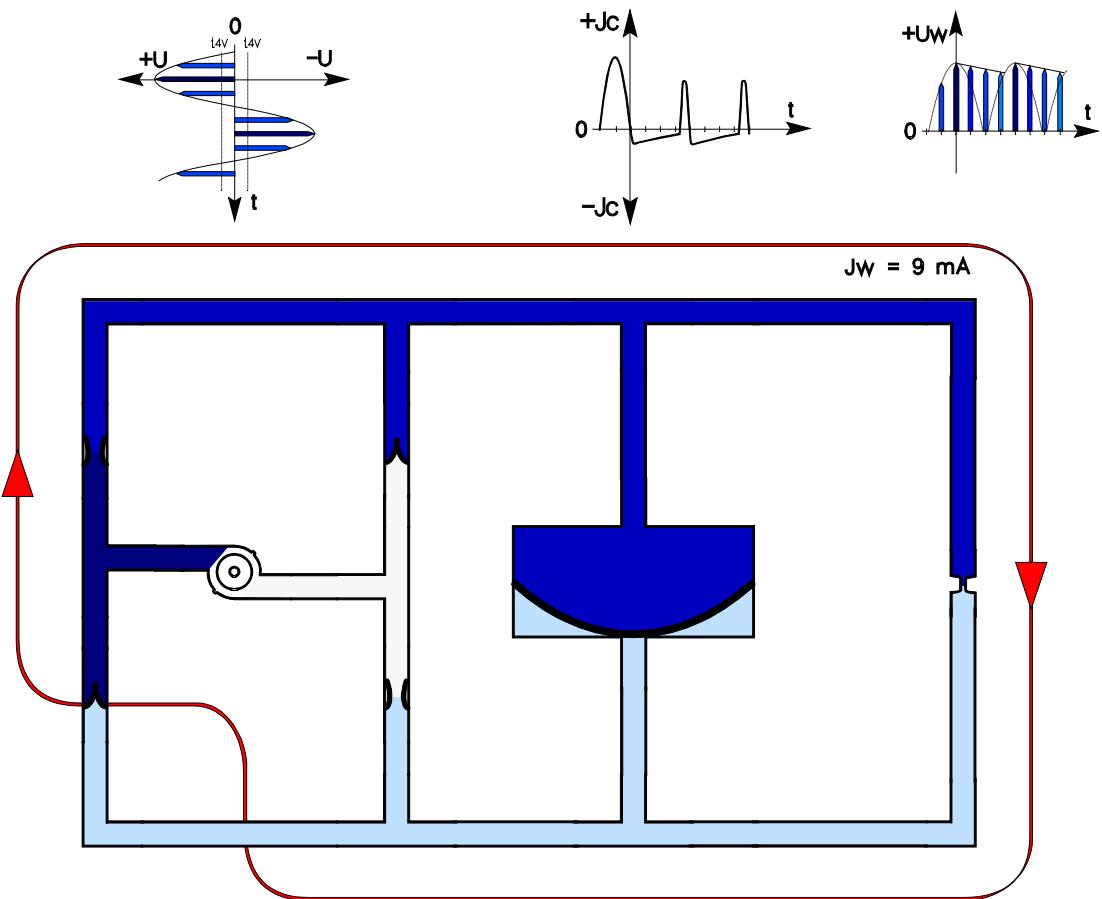
Brückengleichrichtung mit Glättung und Stromentnahme



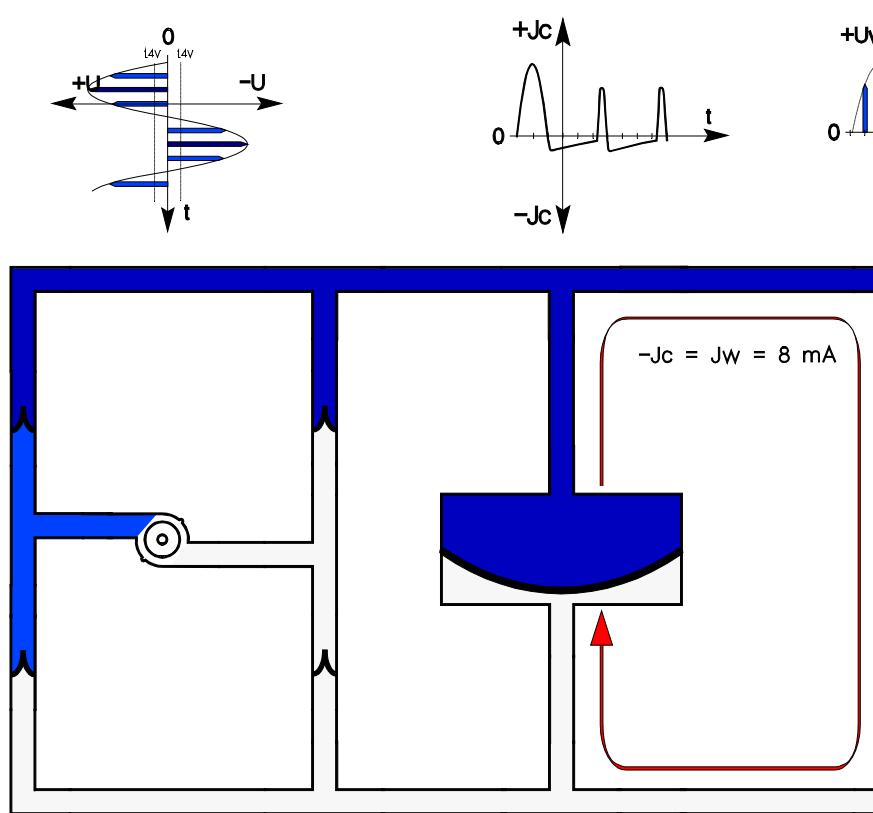
Ausgangssituation: keine Spannung, Kondensator entladen



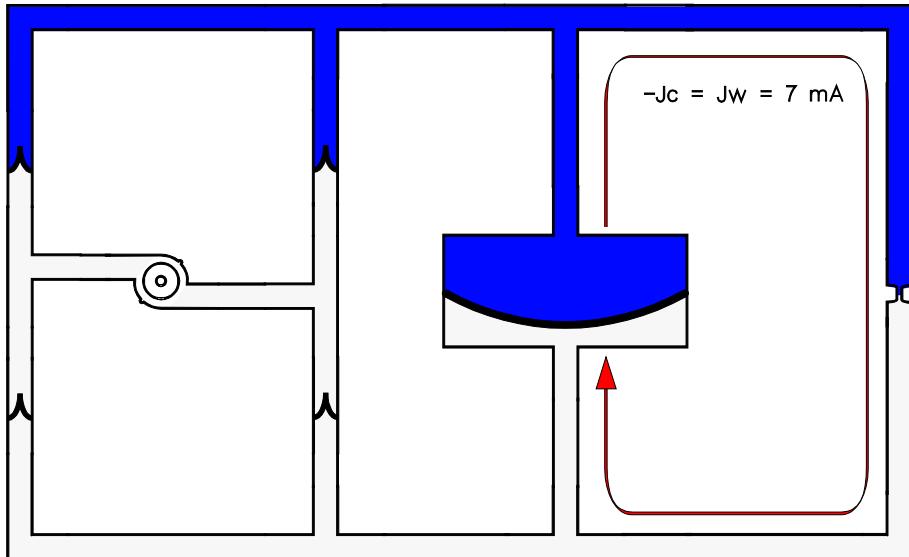
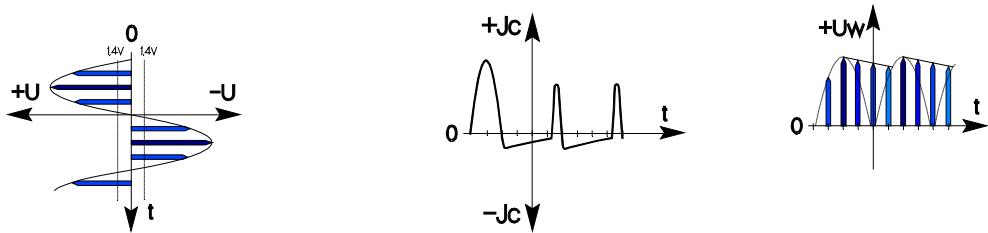
Phase 1: ansteigende positive Spannung



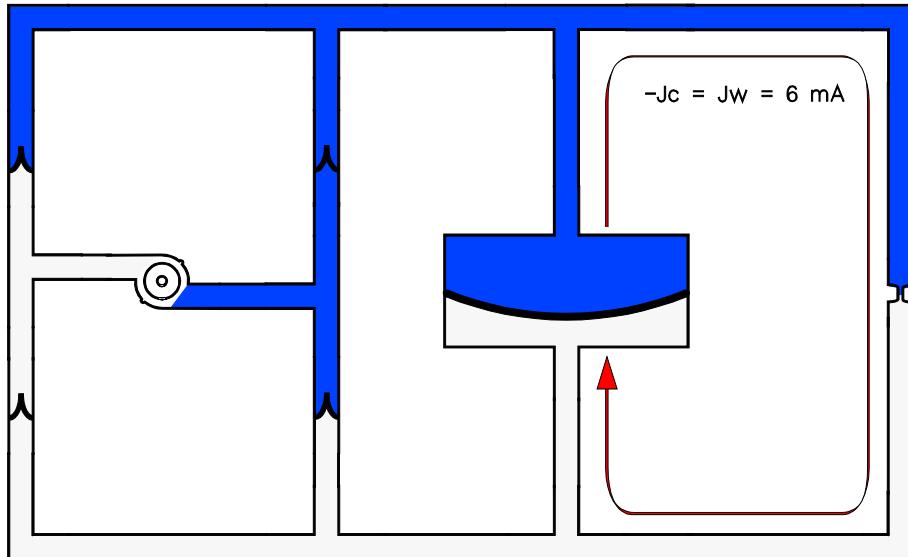
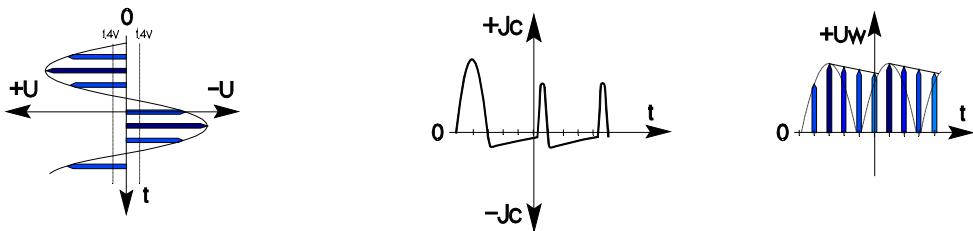
Phase 2: maximale positive Spannung



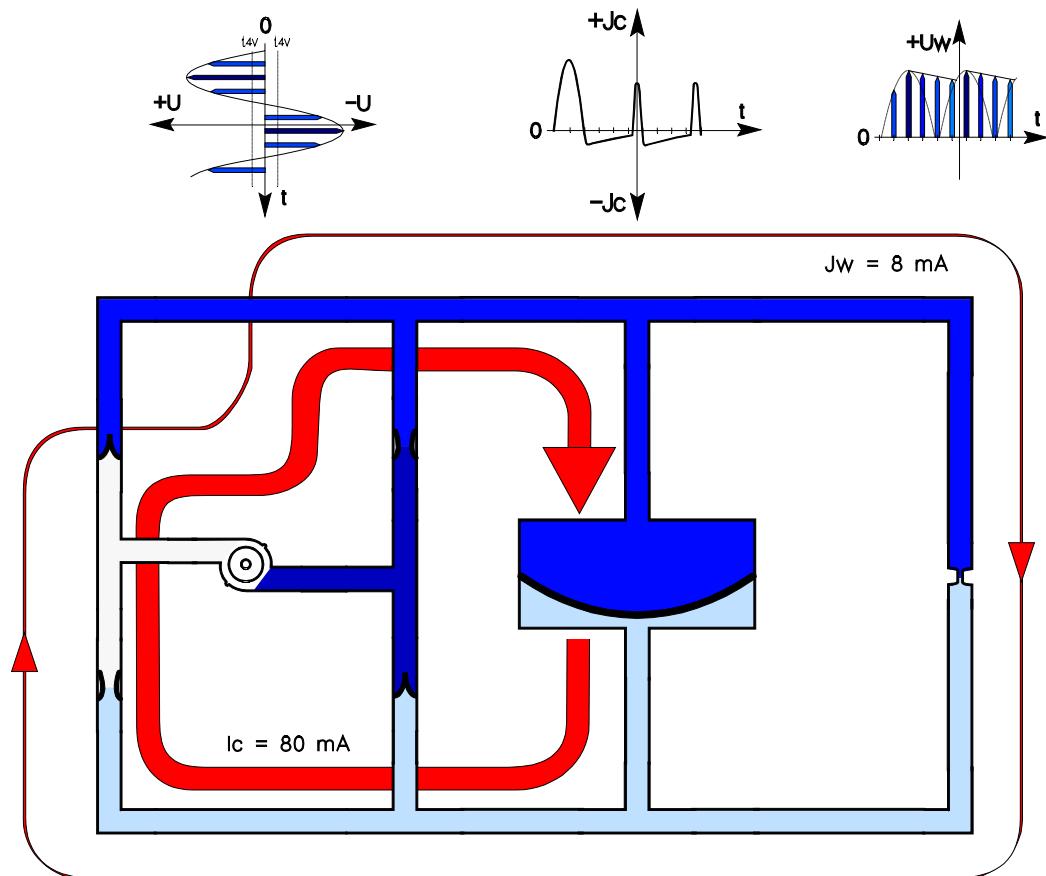
Phase 3: abnehmende positive Spannung



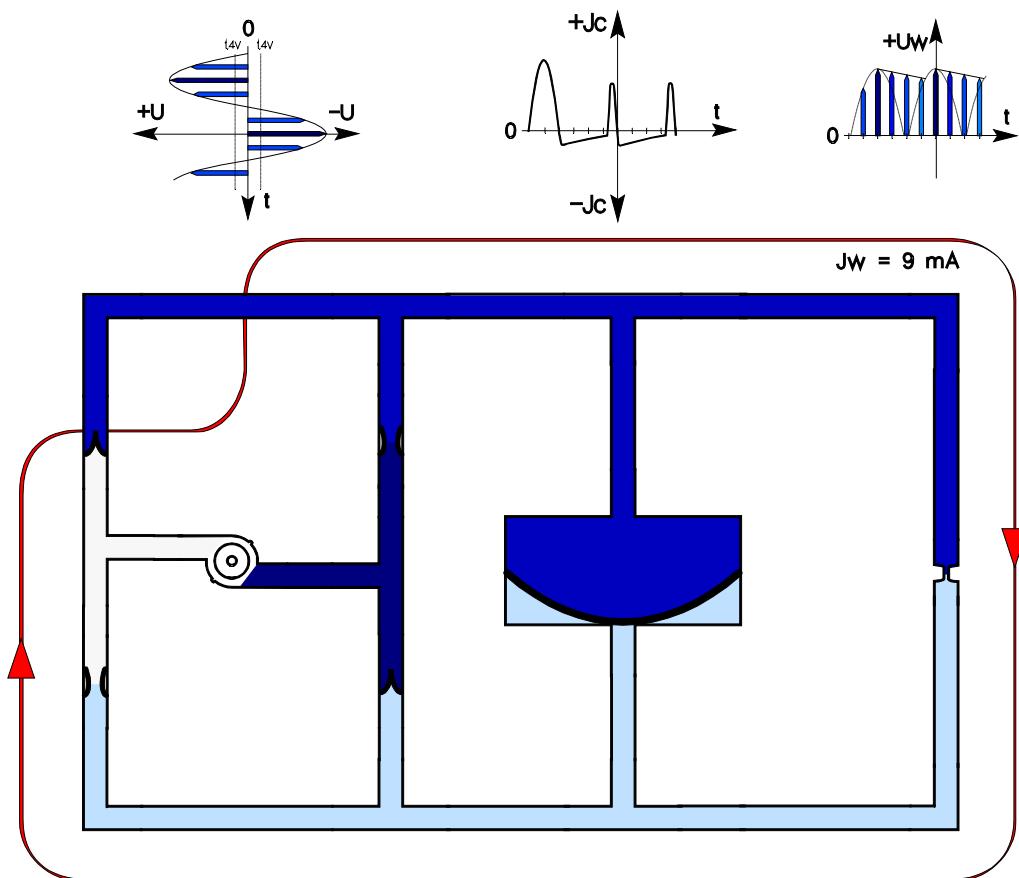
Phase 4: Nulldurchgang der Spannung



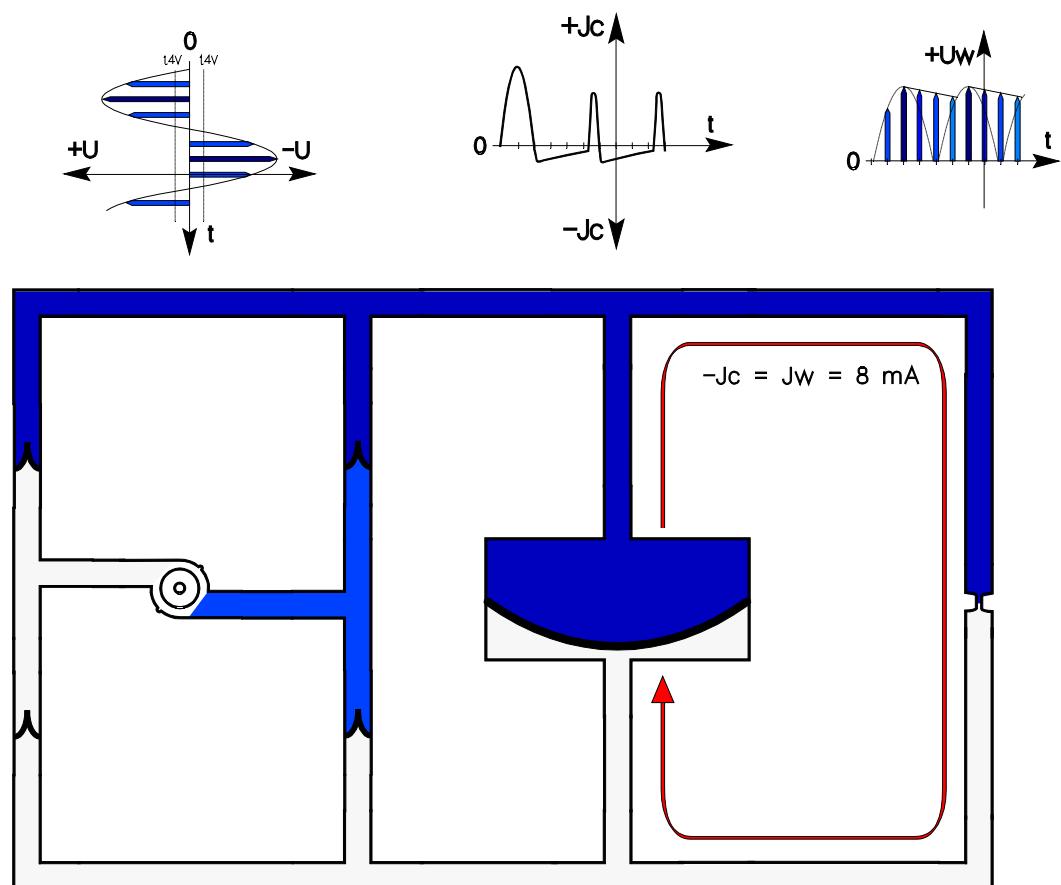
Phase 5: ansteigende negative Spannung



Phase 6: Spannung größer als Kondensatorspannung



Phase 7: maximale negative Spannung



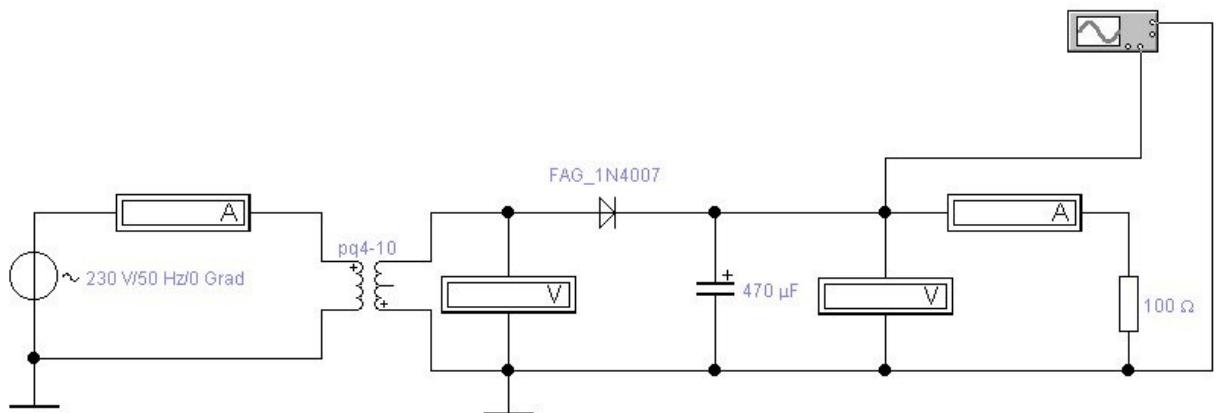
Phase 8: abnehmende negative Spannung

## Untersuchen von Gleichrichterschaltungen mit Glättung:

### **@ Experimentieren mit der Einweg–Gleichrichterschaltung mit Glättung:**

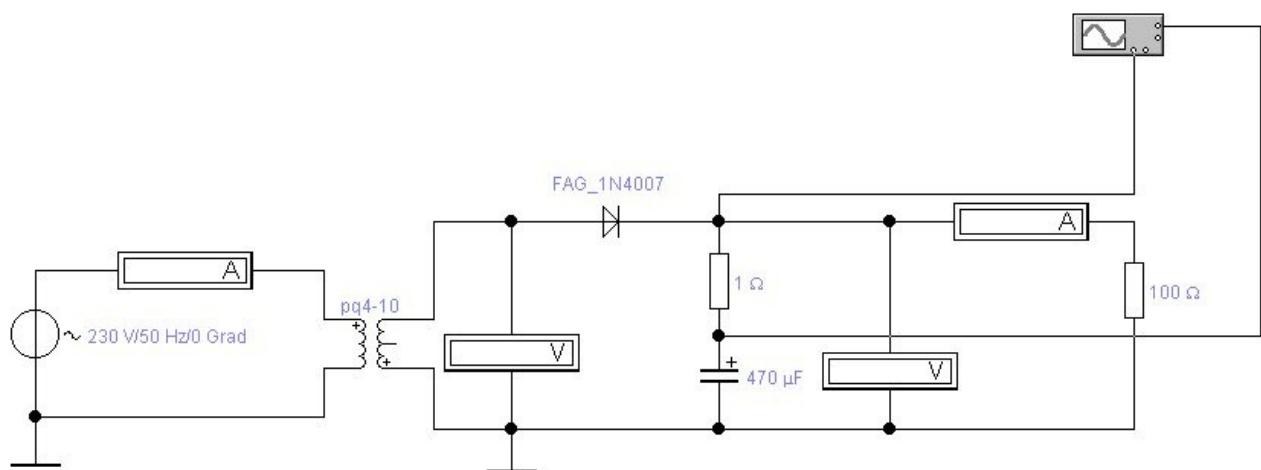


Bauen Sie die folgende Schaltung mit dem Simulationsprogramm EWB auf und untersuchen Sie sie gründlich. Stellen Sie das Übersetzungsverhältnis des Transfomers zunächst so ein, dass Sie sekundärseitig möglichst genau 24 V bekommen. Dann verändern Sie kontinuierlich den Wert des Kondensators und beobachten Sie, welche Auswirkungen das auf die Größe der Lücken hat. Dann variieren Sie die Größe des Widerstandes (Last) und untersuchen, welche Wirkungen eine mehr oder weniger große Stromentnahme auf die Größe der Lücken hat.



- Halten Sie die Ergebnisse schriftlich fest.

Um die Lade- und Entladeströme des Glättungskondensators sehen zu können, verändern Sie die Schaltung folgendermaßen:



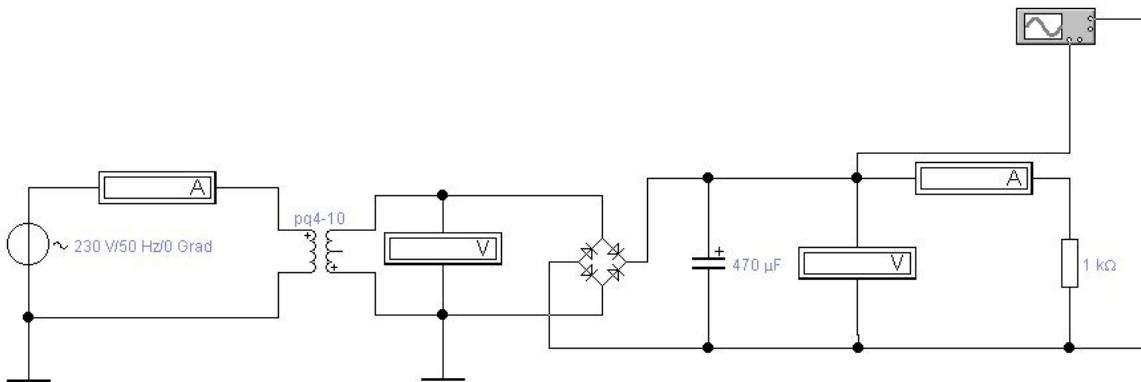
Erklären Sie, weshalb die Ladeströme des Kondensators diese seltsame Form haben, die Entladeströme aber den gewohnten Verlauf als e-Funktion. Beschreiben Sie in Worten, wo-

von genau die Länge der Ladeimpulse abhängt. Diese Länge wird in der Literatur als Stromflusswinkel  $\phi$  bezeichnet.

## @ Experimentieren mit der Brücken–Gleichrichterschaltung mit Glättung:



Bauen Sie die folgende Schaltung mit dem Simulationsprogramm EWB auf und untersuchen Sie sie gründlich. Stellen Sie das Übersetzungsverhältnis des Transfomators zunächst so ein, dass Sie sekundärseitig möglichst genau 24 V bekommen. Dann verändern Sie kontinuierlich den Wert des Kondensators und beobachten Sie, welche Auswirkungen das auf die Größe der Lücken hat. Dann variieren Sie die Größe des Widerstandes (Last) und untersuchen, welche Wirkungen eine mehr oder weniger große Stromentnahme auf die Größe der Lücken hat.



- Halten Sie die Ergebnisse schriftlich fest.

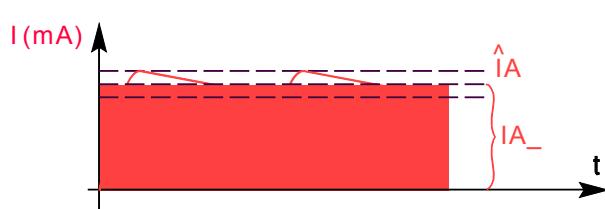
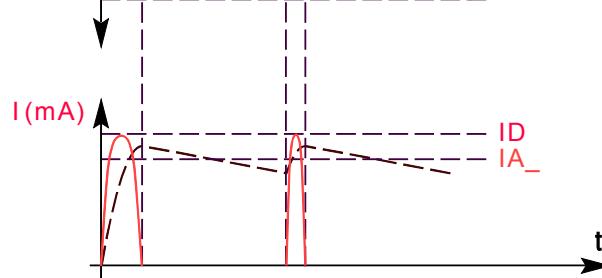
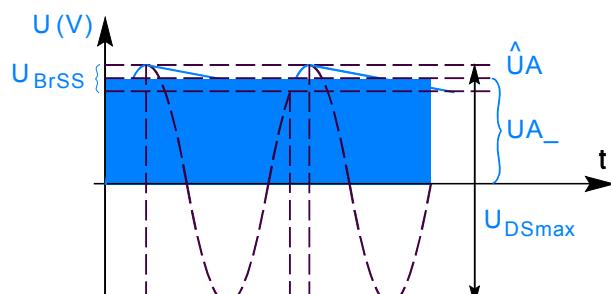
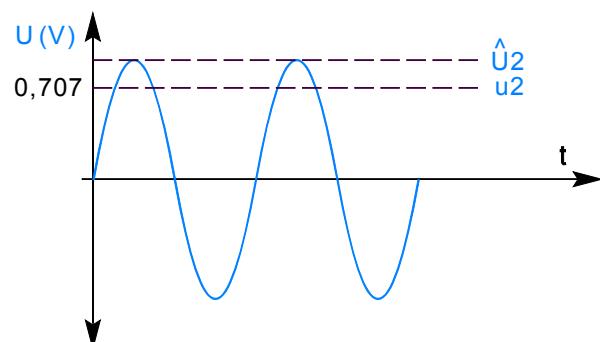
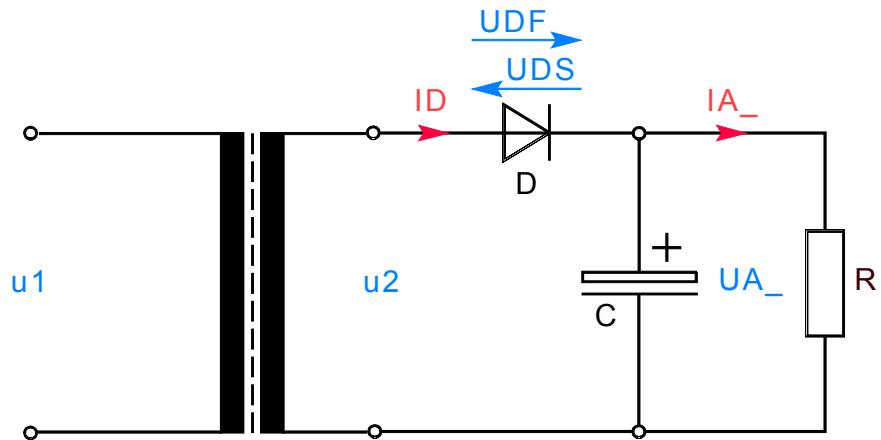
Auch hier können Sie die Lade– und Entladeströme des Glättungskondensators sichtbar machen.



Experimentieren Sie auch mit dem Simulationsprogramm „Die Diode“, mit dem Sie sich auch die wichtigen Zeitdiagramme für die Einweg– und die Brücken–Gleichrichtung für alle möglichen Belastungsfälle und Frequenzen zeichnen lassen können.

### Berechnung von Gleichrichterschaltungen mit Glättung:

#### **Berechnung einer Einweg-Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator:**



Bei einer Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator muss man für die Berechnung unterscheiden, ob der Schaltung Strom entnommen wird oder nicht.

### Schaltung ohne Belastung:

Wird der Schaltung kein Strom entnommen, fehlt also der Widerstand  $R$ , so ist die Bestimmung relativ einfach.

Nach dem Einschalten lädt sich der Glättungskondensator auf die Spitzenspannung der Sekundärspannung auf und die Ausgangsspannung bleibt dann einfach bei diesem Wert stehen: eine völlig glatte Gleichspannung. Die notwendigen Gleichungen:

Die Ausgangsspannung beträgt dann also, wenn man die Flussspannung der Diode berücksichtigt (mit  $U_{DF} = 0,7 \text{ V}$  für Siliziumdioden):

$$U_{A-} = \hat{U}_2 - 0,7V = \sqrt{2} \cdot U_{A\ eff} - 0,7V$$

Da  $u_2$  ja eine Wechselspannung ist, ergibt sich bei der negativen Halbwelle die maximale Sperrspannung für die Diode, die sie aushalten muss. Diesen Wert erhöht man aus Sicherheitsgründen noch um 50%:

$$U_{DS} = 2 \cdot \hat{U}_2 \cdot 1,5$$

Der kurzzeitig fließende Diodenstrom besteht aus stark oberwelligen Stromimpulsen (Ladestrom des Kondensators), die nur während der Dauer des Stromflusswinkels fließen. Da der Schaltung kein Strom entnommen wird, bleibt die Ladung des Kondensators praktisch erhalten und nach den ersten Ladeimpulsen hört der Ladestrom und damit auch der Diodenstrom auf.

### Schaltung mit Belastung:

Bei Belastung der Schaltung ist die Ausgangsspannung in der Regel nicht mehr glatt, sondern weist eine verbleibende Welligkeit auf. D.h. die Ausgangsspannung hat wieder die beiden Anteile: die glatte Gleichspannung  $U_{A-}$  und die Welligkeitsspannung  $U_w$ , die auch als „Brummspannung“  $U_{BR}$  bezeichnet wird, weil man diesen Spannungsanteil bei der Versorgung eines Radiogerätes mit einem solchen Netzgerät als ein starkes Brummen hören könnte.

Der Gleichspannungsanteil bestimmt sich jetzt folgendermaßen:

$$U_{A-} = \hat{U}_2 - 0,7V - 0,5 \cdot U_{BRSS} = \sqrt{2} \cdot U_{A\ eff} - 0,7V - 0,5 \cdot U_{BRSS}$$

$U_{BRSS}$  ist dabei der Wert der Brummspannung, der sich ergibt, wenn man von Spannungsspitze zu Spannungsspitze misst (siehe obige Abbildung).

Es ist recht aufwendig, diesen Wert exakt zu ermitteln, er hängt ab von der Größe des Gleichstroms, der Größe des Kondensators und von der Kreisfrequenz der Grundschwingung. Deshalb gibt man eine Faustformel für einen mittleren Stromflusswinkel an, die aber für die Praxis genau genug ist:

$$U_{BRSS} \approx 9,9 \cdot \frac{I_A}{C}$$

Wenn Sie in diese Formel den Strom in mA und den Kapazitätswert des Kondensators in  $\mu\text{F}$  eingeben, dann bekommen Sie die Brummspannung in V.

Den Effektivwert dieser Brummspannung erhält man mit folgender Faustformel:

$$U_{BReff} \approx 4,5 \cdot \frac{I_A}{C}$$

Auch hier geben Sie den Strom in mA und den Kapazitätswert des Kondensators in  $\mu\text{F}$  ein, um die Brummspannung in V zu bekommen.

Damit gilt:  $U_{BRSS} = 2,2 \cdot U_{BReff}$

Den Spitzenwert der Diodensperrspannung erhält man wie bei der unbelasteten Schaltung mit:

$$U_{DS} = 2 \cdot \hat{U}_2 \cdot 1,5$$

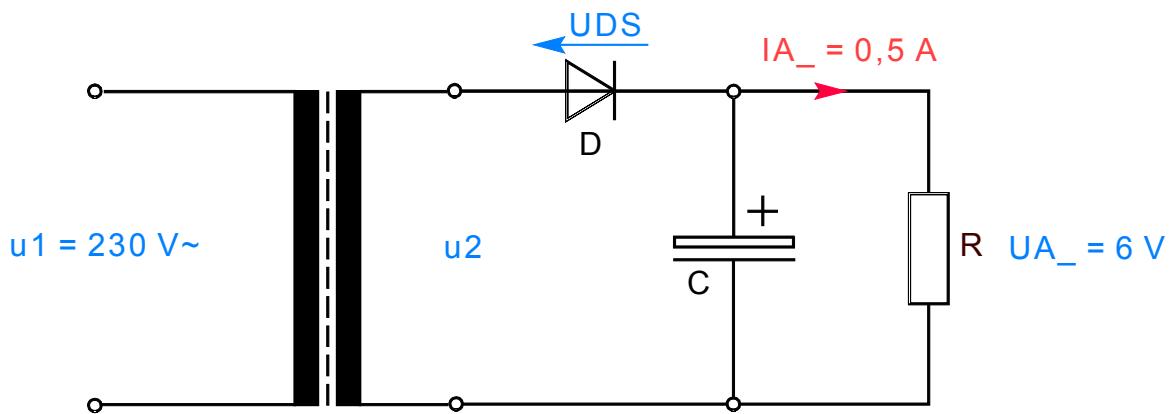
Auch die Größe des impulsförmigen Diodenstroms kann man über eine Faustformel bestimmen, die für die Praxis ausreicht:

$$I_D : I_A \cdot 1,2$$

Der Faktor 1,2 bedeutet einfach einen Sicherheitszuschlag von 20%. Beim Aussuchen von geeigneten Dioden für eine Gleichrichterschaltung ist zu beachten, dass dieser Diodenstrom kein Dauerstrom sondern ein **Impulsstrom** ist. Dieser wird in Datenblättern als Stoßstrom  $I_{FSM}$  bezeichnet und ist wesentlich höher als der Dauerstrom (Richtstrom)  $I_0$ , da sich bei impulsförmiger Belastung die Diode zwischendurch immer wieder etwas abkühlen kann.

In der Praxis der Berechnung von Netzgeräten bestimmt man in der Regel allerdings nicht die Brummspannung aus einem vorgegebenen Kondensator, sondern man gibt die Größe der erlaubten Brummspannung vor (z.B. 5% von  $U_A$ ) und bestimmt daraus die Größe des erforderlichen Kondensators. Bei der Auswahl des Glättungskondensators muss zusätzlich noch die Spannungsfestigkeit berücksichtigt werden. Diese muss größer als  $U_A$  sein.

Berechnungsbeispiel:



Der Effektivwert der Brummspannung soll für dieses Netzgerät 5% von  $U_{A\text{--}}$  sein.

Es sind folgende Werte zu bestimmen:

- Den Effektivwert der Brummspannung  $U_{B\text{Reff}}$
- Den Spitze–Spitze–Wert der Brummspannung  $U_{BRSS}$
- Den Spitzenwert der Sekundärspannung des Trafo  $\hat{U}_2$
- Den Effektivwert der Sekundärspannung des Trafo  $u2$
- Das Übersetzungsverhältnis des Trafo
- Die Kapazität des Kondensators C
- Die maximale Sperrspannung  $U_{DS}$ , die die Diode aushalten muss
- Die Größe des impulsförmigen Diodenstroms  $I_D$
- Die Größe des Lastwiderstandes R

Ergebnisse (zur Kontrolle):

$$U_{B\text{Reff}} = 0,3 \text{ V}$$

$$U_{BRSS} = 0,66 \text{ V}$$

$$\hat{U}_2 = 7,03 \text{ V}$$

$$u2 = 4,97 \text{ V}$$

$$\ddot{u} = 46,28$$

$$C = 7500 \mu\text{F}$$

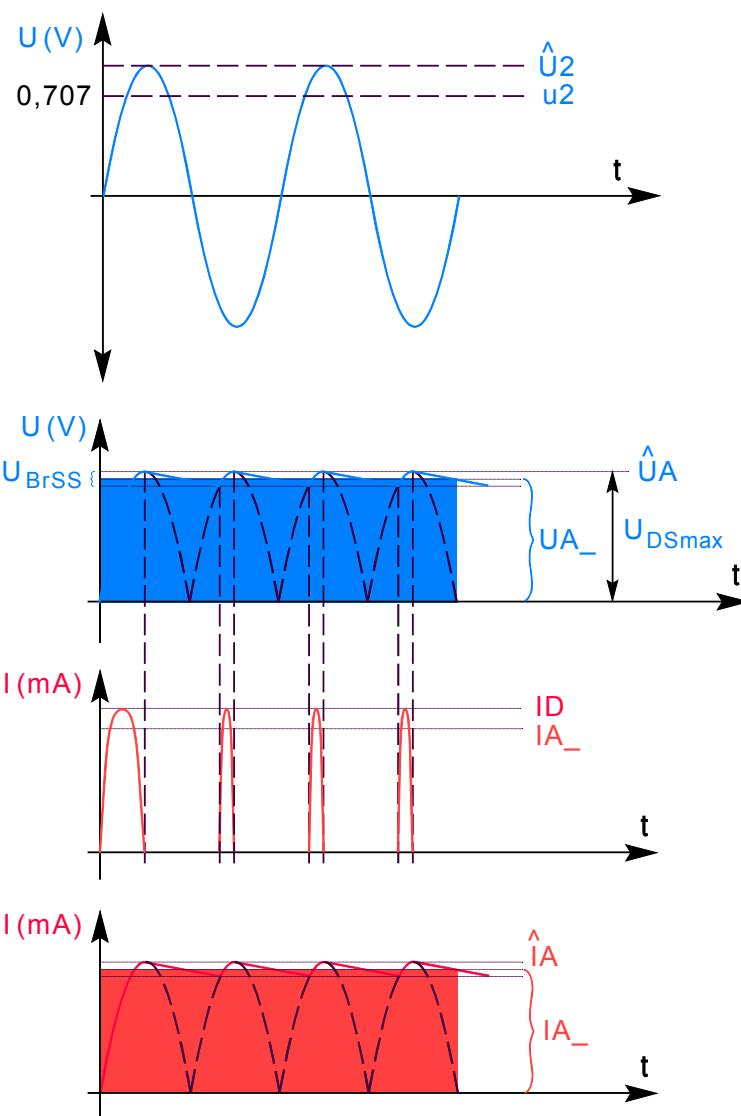
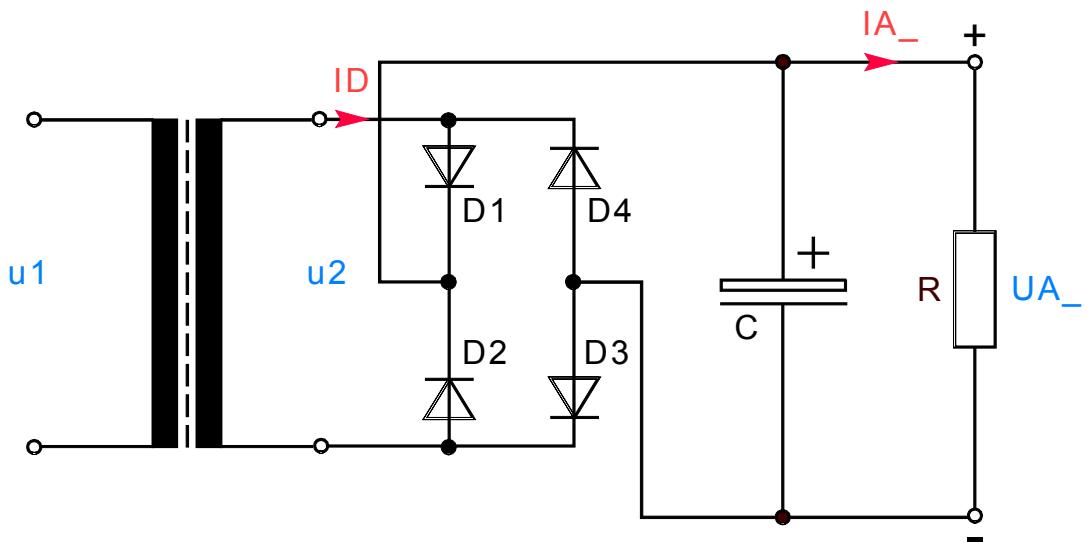
$$U_{DS} = 21,09 \text{ V}$$

$$I_D = 0,6 \text{ A}$$

$$R = 12 \text{ Ohm}$$



Berechnung einer Brücken-Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator:



Auch hier muss man für die Berechnung unterscheiden, ob der Schaltung Strom entnommen wird oder nicht.

### Schaltung ohne Belastung:

Wird der Schaltung kein Strom entnommen, fehlt also der Widerstand  $R$ , so ist die Bestimmung relativ einfach.

Nach dem Einschalten lädt sich der Glättungskondensator auf die Spitzenspannung der Sekundärspannung auf und die Ausgangsspannung bleibt dann einfach bei diesem Wert stehen: eine völlig glatte Gleichspannung. Die notwendigen Gleichungen:

Die Ausgangsspannung beträgt dann also, wenn man die Flussspannungen der Diode berücksichtigt (mit  $U_{DF} = 0,7$  V für Siliziumdioden):

$$U_{A-} = \hat{U}_2 - 1,4V = \sqrt{2} \cdot U_{A\ eff} - 1,4V$$

Im Unterschied zur Einweg-Gleichrichtung mit Glättung ist hier die maximale Sperrspannung für die Diode niedriger. Diesen Wert erhöht man aus Sicherheitsgründen noch um 50%:

$$U_{DS} = \hat{U}_2 \cdot 1,5 = u_2 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,5$$

Der kurzzeitig fließende Diodenstrom besteht aus stark oberwelligen Stromimpulsen (Ladestrom des Kondensators), die nur während der Dauer des Stromflusswinkels fließen. Da der Schaltung kein Strom entnommen wird, bleibt die Ladung des Kondensators praktisch erhalten und nach den ersten Ladeimpulsen hört der Ladestrom und damit auch der Diodenstrom auf.

### Schaltung mit Belastung:

Bei Belastung der Schaltung ist die Ausgangsspannung in der Regel nicht mehr glatt, sondern weist eine verbleibende Welligkeit auf. D.h. die Ausgangsspannung hat wieder die beiden Anteile: die glatte Gleichspannung  $U_{A-}$  und die Welligkeitsspannung  $U_w$ , die auch als „Brummspannung“  $U_{BR}$  bezeichnet wird, weil man diesen Spannungsanteil bei der Versorgung eines Radiogerätes mit einem solchen Netzgerät als ein starkes Brummen hören könnte.

Der Gleichspannungsanteil bestimmt sich jetzt folgendermaßen:

$$U_{A-} = \hat{U}_2 - 1,4V - 0,5 \cdot U_{BRSS} = \sqrt{2} \cdot U_{A\ eff} - 1,4V - 0,5 \cdot U_{BRSS}$$

$U_{BRSS}$  ist dabei der Wert der Brummspannung, der sich ergibt, wenn man von Spannungsspitze zu Spannungsspitze misst (siehe obige Abbildung).

Es ist recht aufwendig, diesen Wert exakt zu ermitteln, er hängt ab von der Größe des Gleichstroms, der Größe des Kondensators und von der Kreisfrequenz der Grundschwingung. Deshalb gibt man eine Faustformel für einen mittleren Stromflusswinkel an, die aber für die Praxis genau genug ist:

$$U_{BRSS} \approx 3,74 \frac{I_A}{C}$$

Wenn Sie in diese Formel den Strom in mA und den Kapazitätswert des Kondensators in  $\mu\text{F}$  eingeben, dann bekommen Sie die Brummspannung in V.

Den Effektivwert dieser Brummspannung erhält man mit folgender Faustformel:

$$U_{BR_{eff}} \approx 1,7 \cdot \frac{I_A}{C}$$

Auch hier geben Sie den Strom in mA und den Kapazitätswert des Kondensators in  $\mu\text{F}$  ein, um die Brummspannung in V zu bekommen.

Damit gilt:  $U_{BRSS} = 2,2 \cdot U_{BR_{eff}}$

Den Spitzenwert der Diodensperrspannung erhält man wie bei der unbelasteten Schaltung mit:

$$U_{DS} = \hat{U}_2 \cdot 1,5 = u_2 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,5$$

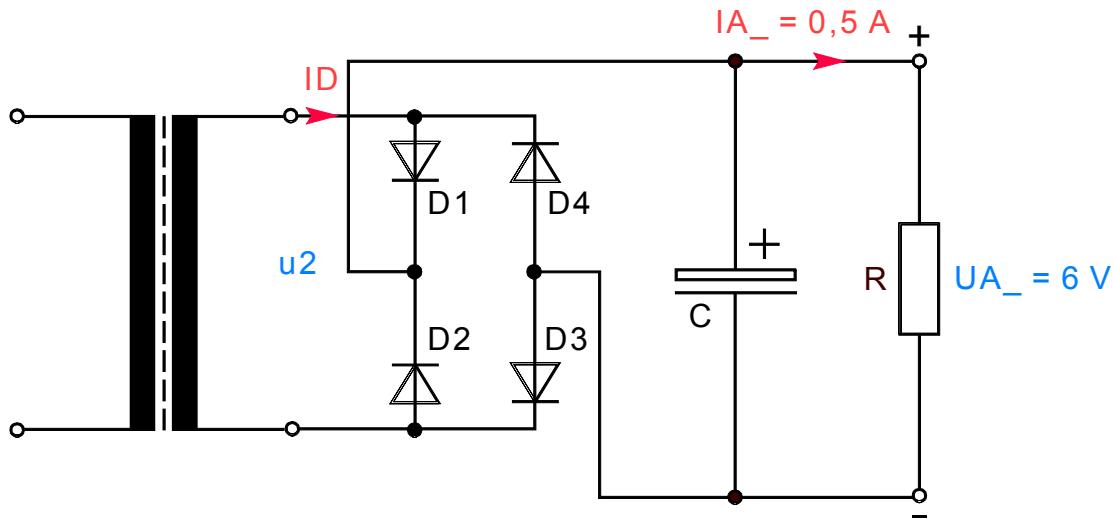
Auch die Größe des impulsförmigen Diodenstroms kann man wieder über eine Faustformel bestimmen, die für die Praxis ausreicht:

$$I_D : I_A = 1,2$$

Der Faktor 1,2 bedeutet einen Sicherheitszuschlag von 20%. Beim Aussuchen von geeigneten Diode für eine Gleichrichterschaltung ist zu beachten, dass dieser Diodenstrom kein Dauerstrom sondern ein **Impulsstrom** ist. Dieser wird in Datenblättern als Stoßstrom  $I_{FSM}$  bezeichnet und ist wesentlich höher als der Dauerstrom (Richtstrom)  $I_0$ , da sich bei impulsförmiger Belastung die Diode zwischendurch immer wieder etwas abkühlen kann.

**In der Praxis** der Berechnung von Netzgeräten bestimmt man in der Regel allerdings nicht die Brummspannung aus einem vorgegebenen Kondensator, sondern man gibt die Größe der erlaubten Brummspannung vor (z.B. **5% von  $U_A$** ) und bestimmt daraus die Größe des erforderlichen Kondensators. Bei der Auswahl des Glättungskondensators muss zusätzlich noch die Spannungsfestigkeit berücksichtigt werden. Diese muss größer als  $U_A$  sein.

Berechnungsbeispiel:



Der Effektivwert der Brummspannung soll für dieses Netzgerät 5% von  $U_{A_-}$  sein.

Es sind folgende Werte zu bestimmen:

- Den Effektivwert der Brummspannung  $U_{B\text{Reff}}$
- Den Spitze–Spitze–Wert der Brummspannung  $U_{B\text{RSS}}$
- Den Spitzenwert der Sekundärspannung des Trafo  $\hat{U}_2$
- Den Effektivwert der Sekundärspannung des Trafo  $u2$
- Das Übersetzungsverhältnis des Trafo  $\ddot{u}$
- Die Kapazität des Kondensators  $C$
- Die maximale Sperrspannung  $U_{DS}$ , die die Diode aushalten muss
- Die Größe des impulsförmigen Diodenstroms  $I_D$
- Die Größe des Lastwiderstandes  $R$

Ergebnisse (zur Kontrolle):

$$U_{B\text{Reff}} = 0,3 \text{ V}$$

$$U_{B\text{RSS}} = 0,66 \text{ V}$$

$$\hat{U}_2 = 7,73 \text{ V}$$

$$u2 = 5,46 \text{ V}$$

$$\ddot{u} = 42,12$$

$$C = 2833 \mu\text{F}$$

$$U_{DS} = 11,6 \text{ V}$$

$$I_D = 0,6 \text{ A}$$

$$R = 12 \text{ Ohm}$$

## 4. Funktion: Stabilisieren der Ausgangsspannung

### Stabilisieren mit Z–Dioden

**Arbeitspunktbestimmung mittels Kennlinien bei unterschiedlicher Eingangsspannung:**



Wenn Sie sich an dieses Verfahren nicht mehr erinnern, schauen Sie bitte nach im **systematischen Teil**: Ermitteln des Arbeitspunktes mit Kennlinien.

**Aufgabe:** Versuchen Sie, anhand der Erläuterungen über den Schnitt von Kennlinien im systematischen Teil

- diese Darstellung selbständig zu realisieren und zu zeigen,
- wie die stabilisierende Wirkung der Z–Diode bei Schwankungen der Versorgungsspannung zustande kommt.
- Tragen Sie in Ihre Darstellung die Grenzwerte der Diode ein (maximaler Strom = 65 mA, minimaler Strom = 5 mA) und versuchen Sie, aus der Darstellung abzulesen, weshalb man als Eingangsspannung für Stabilisierungsschaltungen mit Z–Dioden die doppelte Z–Spannung wählt.

**Arbeitspunktbestimmung mittels Kennlinien bei unterschiedlicher Last:**

Das obige Verfahren zur Bestimmung des Arbeitspunktes gilt nur für reine Reihenschaltungen von Bauelementen. Es lässt sich also nicht ohne weiteres auf die Stabilisierungsschaltung mit Lastwiderstand anwenden, da hierbei zusätzlich ein Lastwiderstand parallel zur Z–Diode geschaltet ist.



Wie lässt sich dieses Problem lösen?

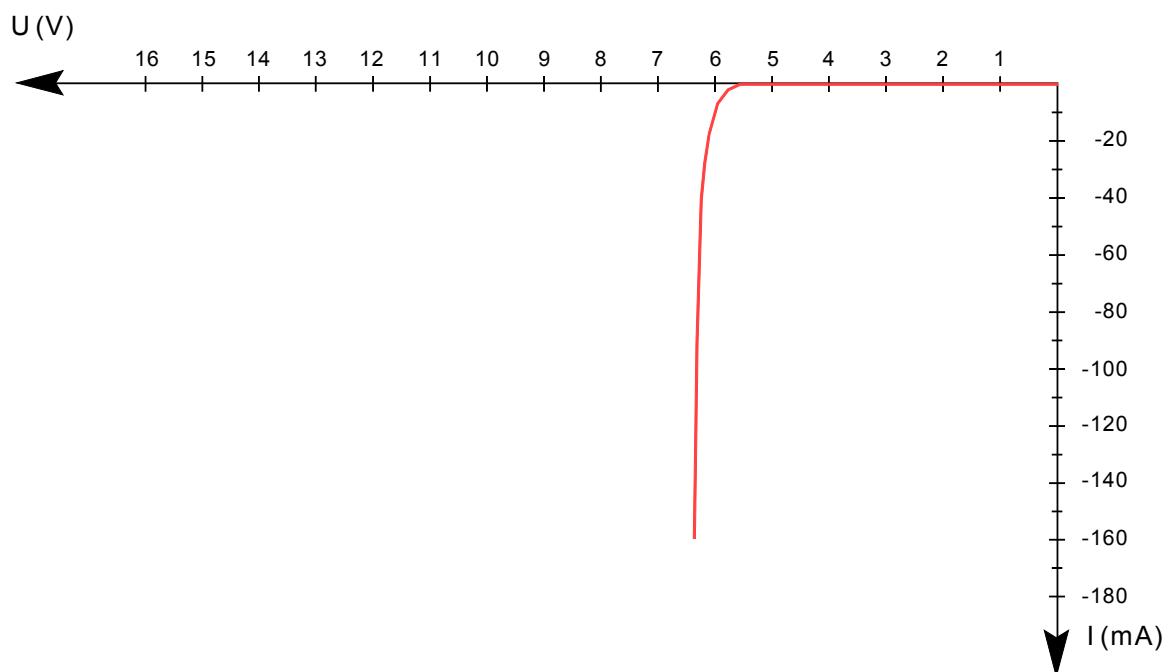
**K** Dazu muss also eine Möglichkeit gefunden werden, wie man die Parallelschaltung zweier Bauelemente bei Kennlinien darstellen kann. Dazu sehen Sie bitte nach im **systematischen Teil**: Kennlinien bei Parallelschaltung.

Damit ergibt sich folgende Möglichkeit:

- 1. Schritt: Ermitteln der resultierenden Kennlinie aus der Parallelschaltung von Z–Diode und Lastwiderstand
- 2. Schritt: Bestimmung des Arbeitspunktes zwischen der resultierenden Kennlinie und der Leitwertkennlinie des Vorwiderstandes.

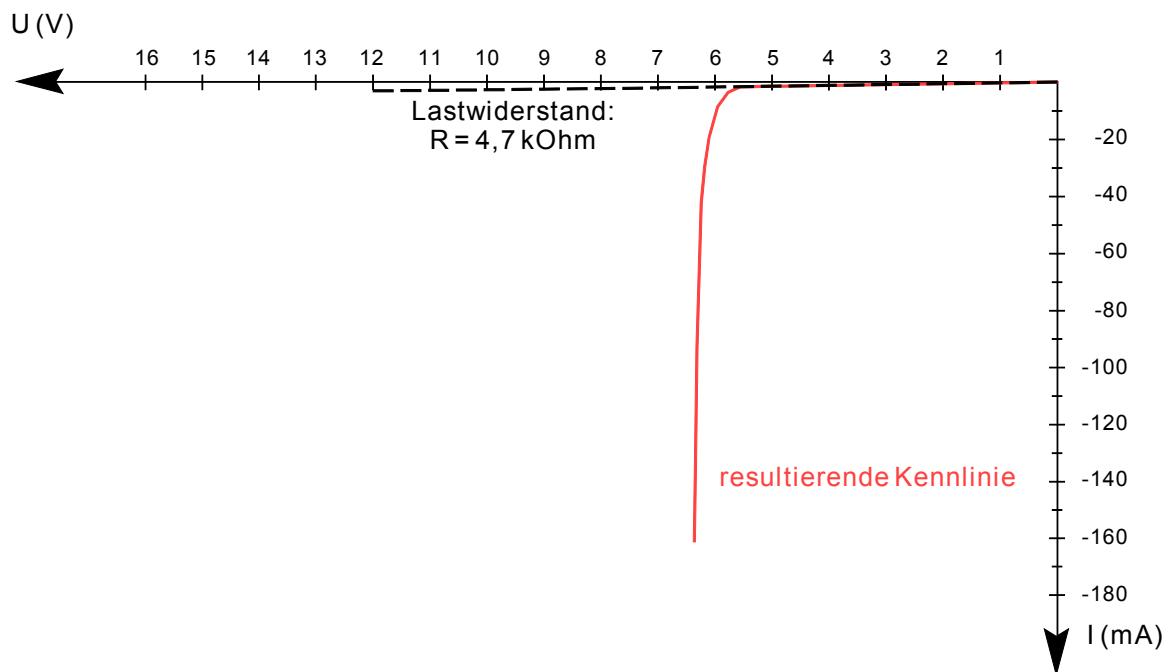
Dieses Verfahren soll jetzt ausführlich dargestellt werden:

**1. Schritt:** Zunächst muss also die resultierende Kennlinie aus der Parallelschaltung von Z–Diode und Lastwiderstand ermittelt werden. Man geht dabei zunächst von der Kennlinie der Z–Diode aus. Hier die Kennlinie einer Z–Diode mit 6,2 Volt Z–Spannung:

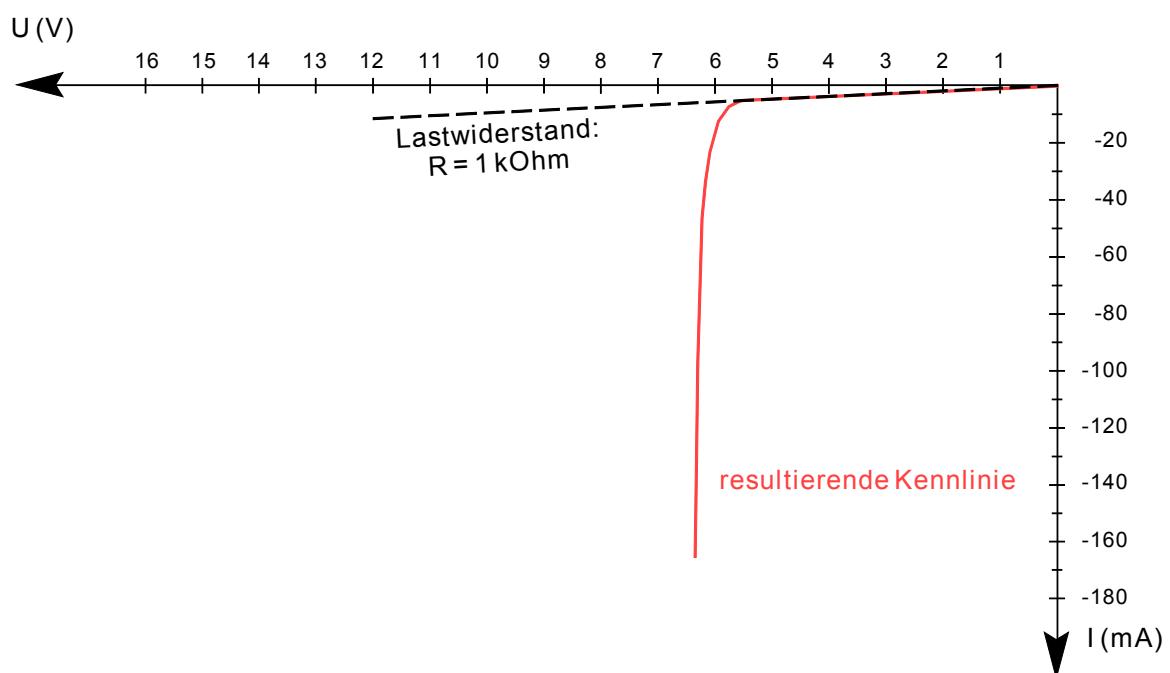


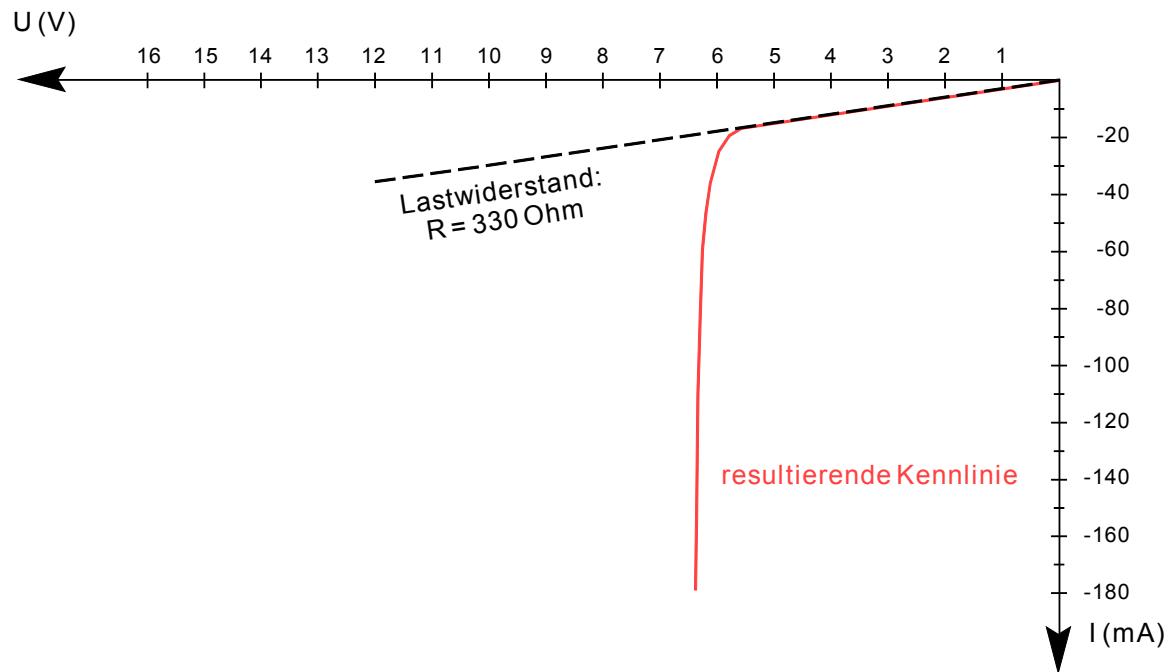
Die Z–Diode sperrt bis zu einer Spannung von knapp 6 V, dann öffnet sie langsam in einem Übergangsbereich, bis sie bei 6,2 Volt vollständig geöffnet ist.

Ist zu dieser Z–Diode ein Lastwiderstand parallel geschaltet, dann müssen die beiden Kennlinien „addiert“ werden. Für einen Lastwiderstand von  $4,7 \text{ k}\Omega$  ergibt sich damit folgendes Bild:



Das Verfahren ist hier noch nicht so deutlich zu erkennen, weshalb noch zwei kleinere Lastwiderstände gewählt werden sollen:

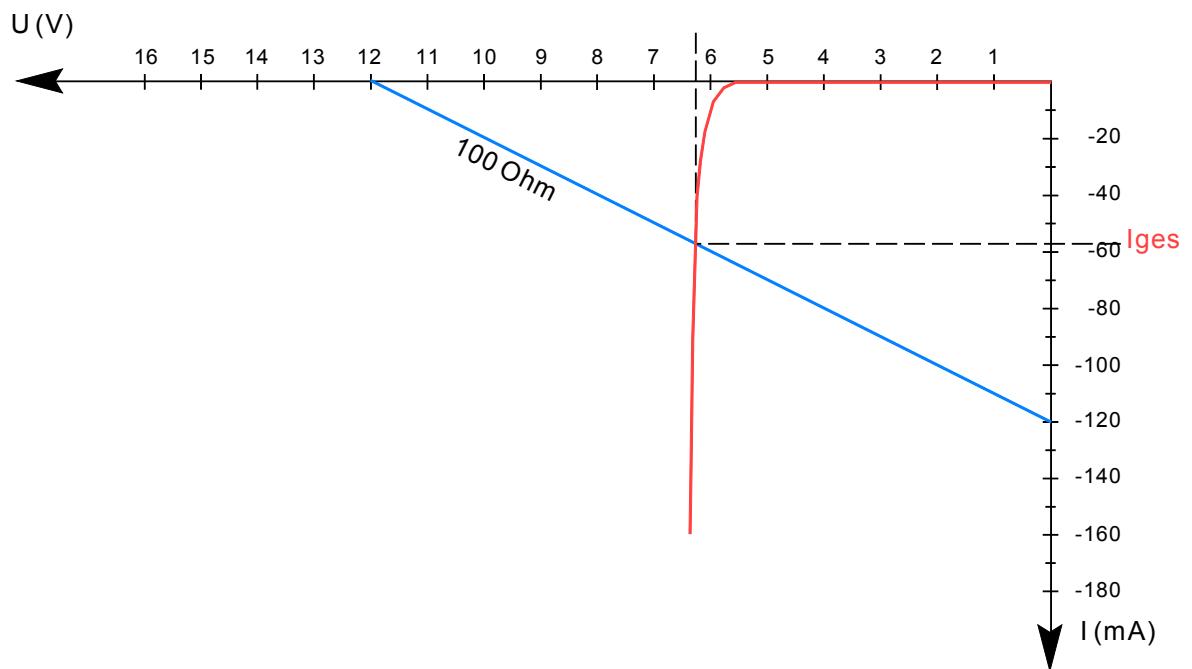




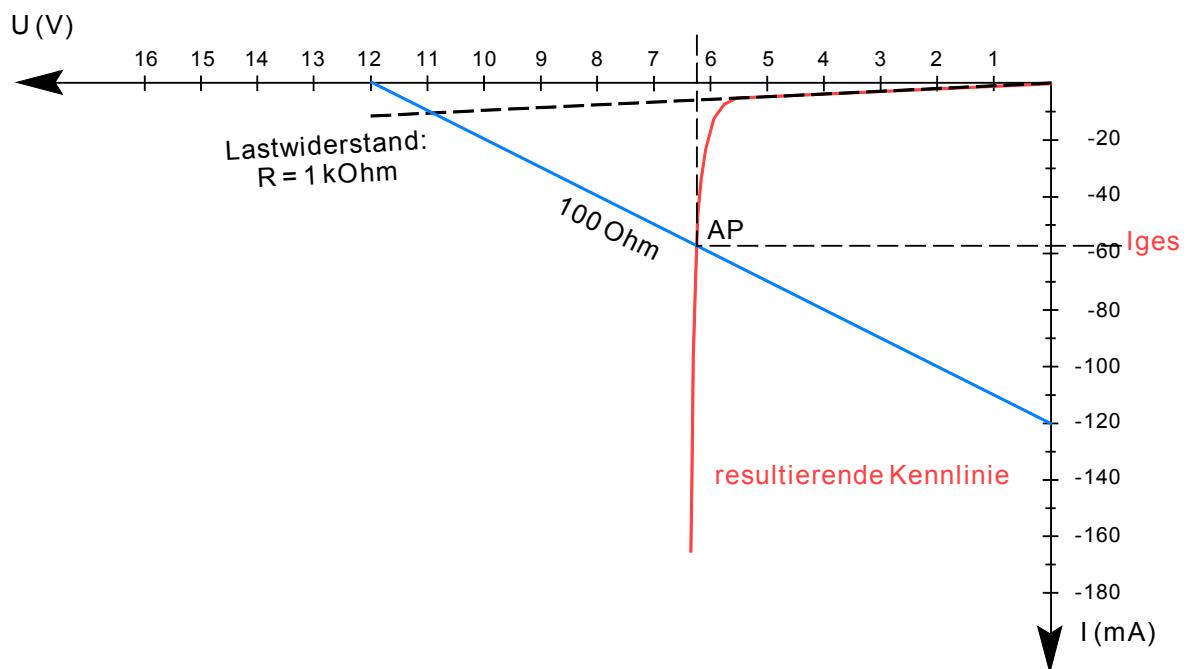
An den letzten beiden Darstellungen sieht man deutlich, wie das Verfahren gemeint ist und auch, welche Ergebnisse sich für die Schaltung ablesen lassen: bei einem parallel geschalteten Widerstand sperrt zwar die Z-Diode weiterhin bis zu ihrer Z-Spannung, der parallel geschaltete Widerstand lässt aber vorher einen gewissen Strom fließen, so dass sich eine Neigung der resultierenden Kennlinie ergibt. Es sind deutlich zwei Bereiche zu erkennen:

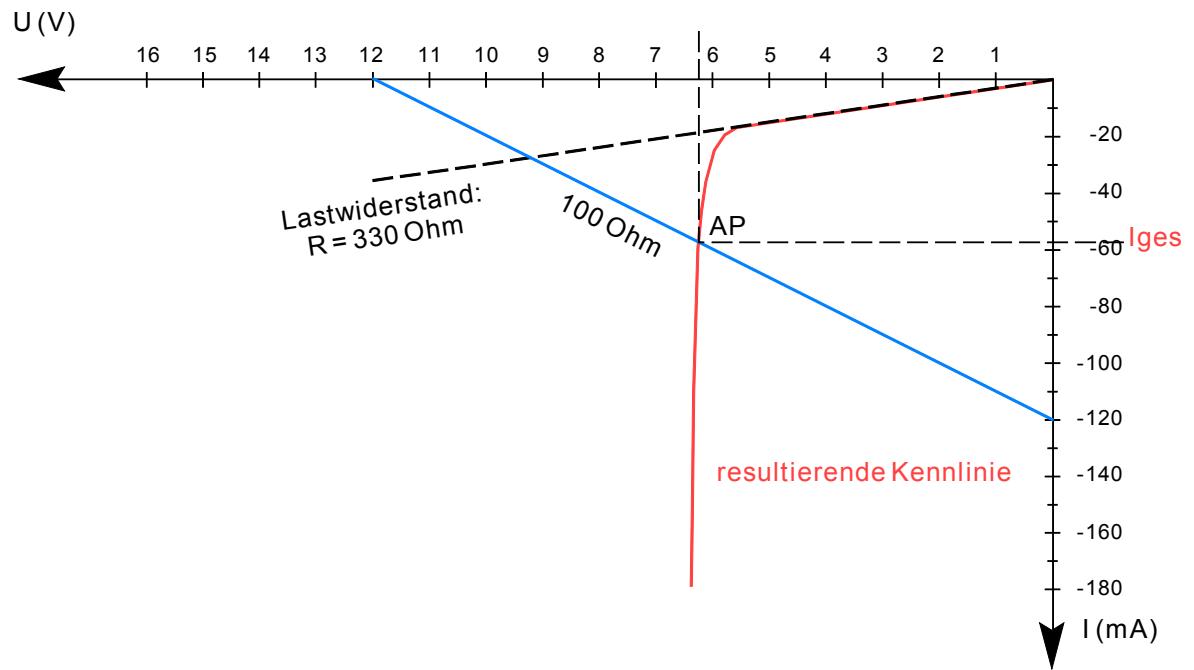
- der Bereich, in dem die Z-Diode noch sperrt: hier bestimmt der Lastwiderstand das Verhalten der Schaltung
- der Bereich, in dem die Z-Diode geöffnet hat: hier bestimmt die Z-Diode das Verhalten der Schaltung.

**2. Schritt:** Nun muss diese resultierende Kennlinie noch mit der Leitwertkennlinie des Vorwiderstandes geschnitten werden. Ohne Lastwiderstand (ohne  $R_x$ ) ergibt sich folgendes Bild:



Bei einem parallelen Lastwiderstand verschiebt sich die resultierende Kennlinie:





Aus diesen Abbildungen ist ganz deutlich zu erkennen, dass die Aufteilung der Spannung und auch die Gesamtstromstärke sich kaum ändern, dass aber bei immer kleiner werdendem Lastwiderstand der Übergangsbereich und damit auch der Sperrbereich der Z-Diode immer näher an den Arbeitspunkt rückt. Wird dieser Lastwiderstand zu klein gemacht, rutscht der Arbeitspunkt in den Übergangsbereich der resultierenden Kennlinie oder sogar in den sperrenden Ast, und damit bestimmen allein die beiden Widerstände das Verhalten der Schaltung.

### Reihenschaltung von Z-Dioden:

Z-Dioden gibt es in recht eng abgestuften Spannungsschritten:

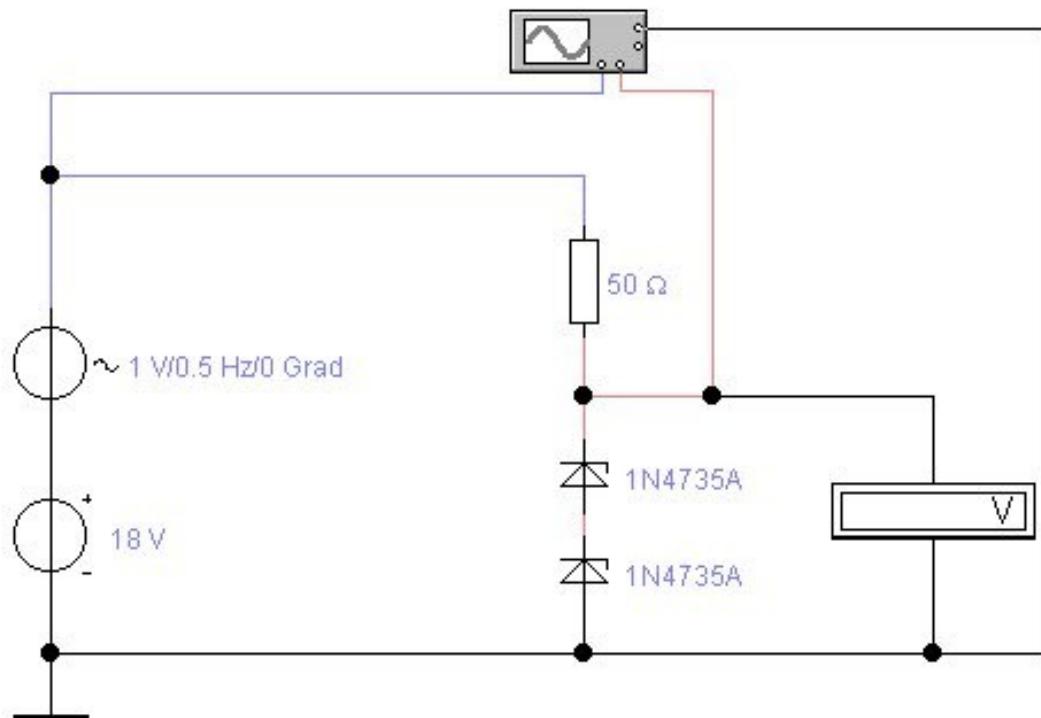
0,8V	2,7V	3,0V	3,3V	3,6V	3,9V	4,3V	4,7V	5,1V	5,6V	6,2V	6,8V	7,5V	8,2V
9,1V	10V	11V	12V	13V	15V	16V	18V	20V	22V	24V	27V	30V	33V
36V	39V	43V	47V	51V	56V	62V	68V	75V	82V	91V	100V	110V	120V
130V	150V	160V	180V	200V									

Dennoch kommt es manchmal vor, dass man die Z-Diode für genau die Z-Spannung nicht findet, die man benötigt. In diesem Fall kann man sich die benötigte Z-Spannung „zusammenstellen“.



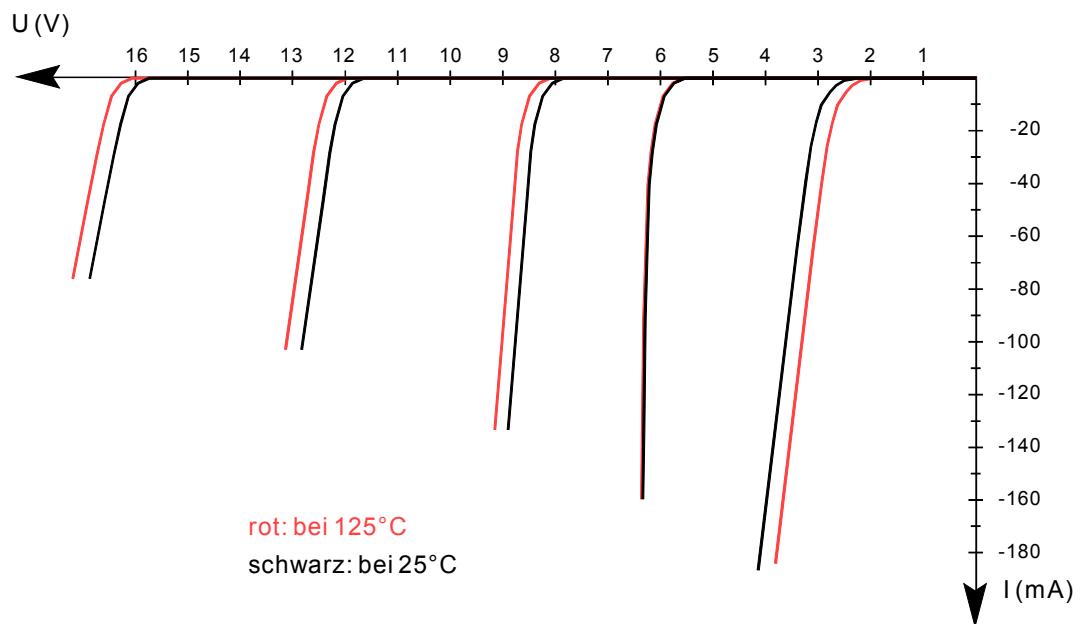
Siehe auch unten: Temperaturabhängigkeit von Z-Dioden.

**E** Experimentieren, Untersuchen:  Bauen Sie mit EWB die folgende Schaltung auf, mit der Sie die Stabilisierung von Schwankungen der Eingangsspannung mit der Reihenschaltung zweier Z-Dioden simulieren können. Kombinieren Sie auch andere Typen und auch mehr als zwei Z-Dioden. Sie können auch die Reihenschaltung von Z-Diode und Silizium-Dioden untersuchen. Dabei müssen allerdings die Si-Dioden in Durchlassrichtung geschaltet werden.



### Temperaturabhängigkeit von Z-Dioden, Temperaturkompensation:

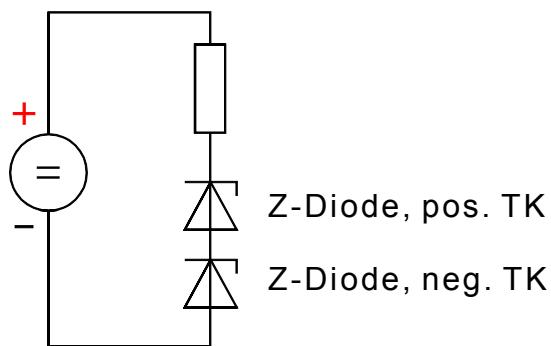
Leider sind Z-Dioden in ihren Eigenschaften temperaturabhängig. Die folgende Abbildung zeigt die Kennlinien von Z-Dioden verschiedener Z-Spannungen bei verschiedenen Temperaturen:



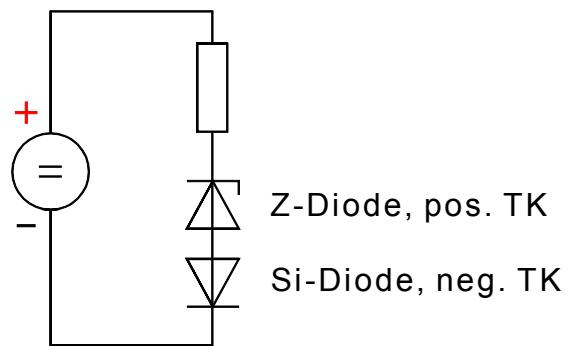
Wie man sieht, verschieben sich die Kennlinien bei zunehmender Temperatur. Die geringste Verschiebung ergibt sich bei Z-Dioden mit etwa 6 V Z-Spannung. Bei Z-Spannungen unterhalb dieses Wertes verschieben sich die Kennlinien bei steigender Temperatur in Richtung kleiner werdender Spannungen, sie haben also einen negativen Temperatur-Koeffizienten, bei Z-Spannungen oberhalb dieses Wertes verschieben sich die Z-Spannungen in Richtung größer werdender Spannungen, sie besitzen einen positiven Temperatur-Koeffizienten.

Um diese Wärmedrift zu kompensieren, kann man die gewünschte Z-Spannung zusammensetzen

- durch zwei Z-Dioden mit entgegengesetztem Temperaturkoeffizienten,



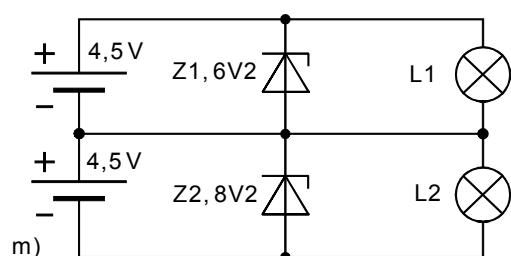
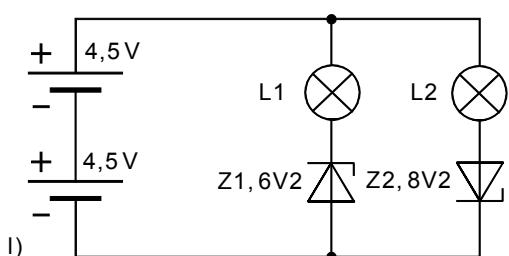
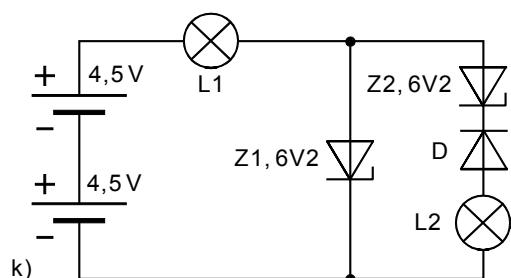
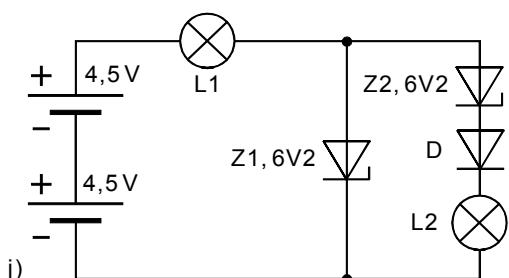
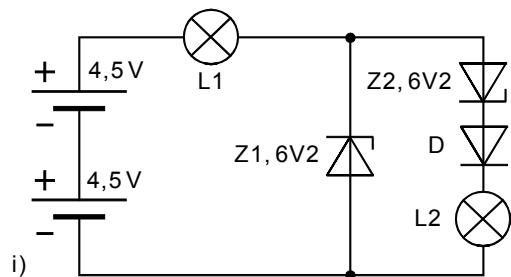
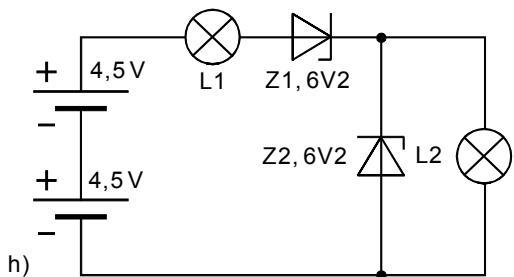
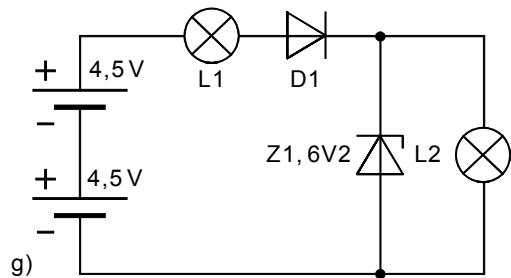
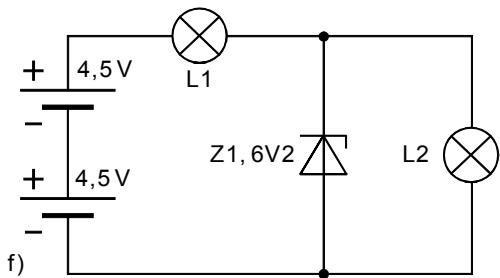
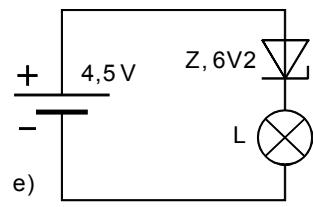
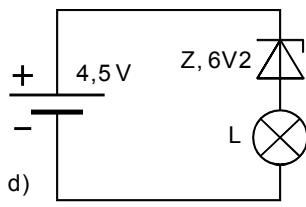
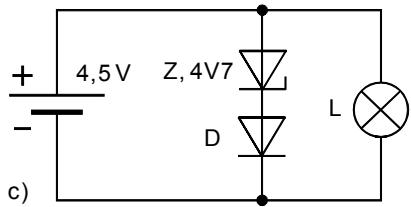
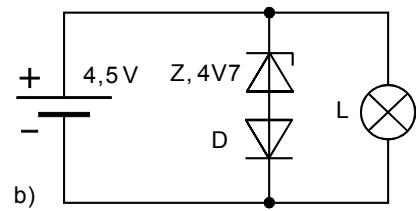
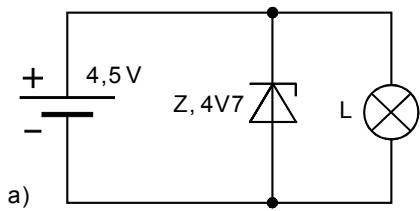
- oder durch die Reihenschaltung einer Z-Diode mit positivem und normalen Si-Dioden mit negativem Temperaturkoeffizienten:



Si–Dioden haben alle einen negativen Temperaturkoeffizienten, weshalb man sie immer dann heranziehen kann, wenn man die Kombination mit Z–Dioden unterschiedlicher Koeffizienten nicht anwenden kann.

Die Hersteller von Z–Dioden führen solche Zusammenschaltungen bereits innerhalb der Z–Diodengehäuse durch und liefern diese Bauteile als **temperaturkompensierte Z–Dioden** oder **Referenzelemente**.

**@ Analysieren von Schaltungen:**



Zur Übung sollten Sie das obige „Dioden–Puzzle“ durcharbeiten. Es ist nicht vorgesehen, dass Sie die einzelnen Schaltungen aufbauen und messen, sondern dass Sie sie in Gedanken analysieren. Beantworten Sie dabei bei jedem Beispiel folgende Fragen:

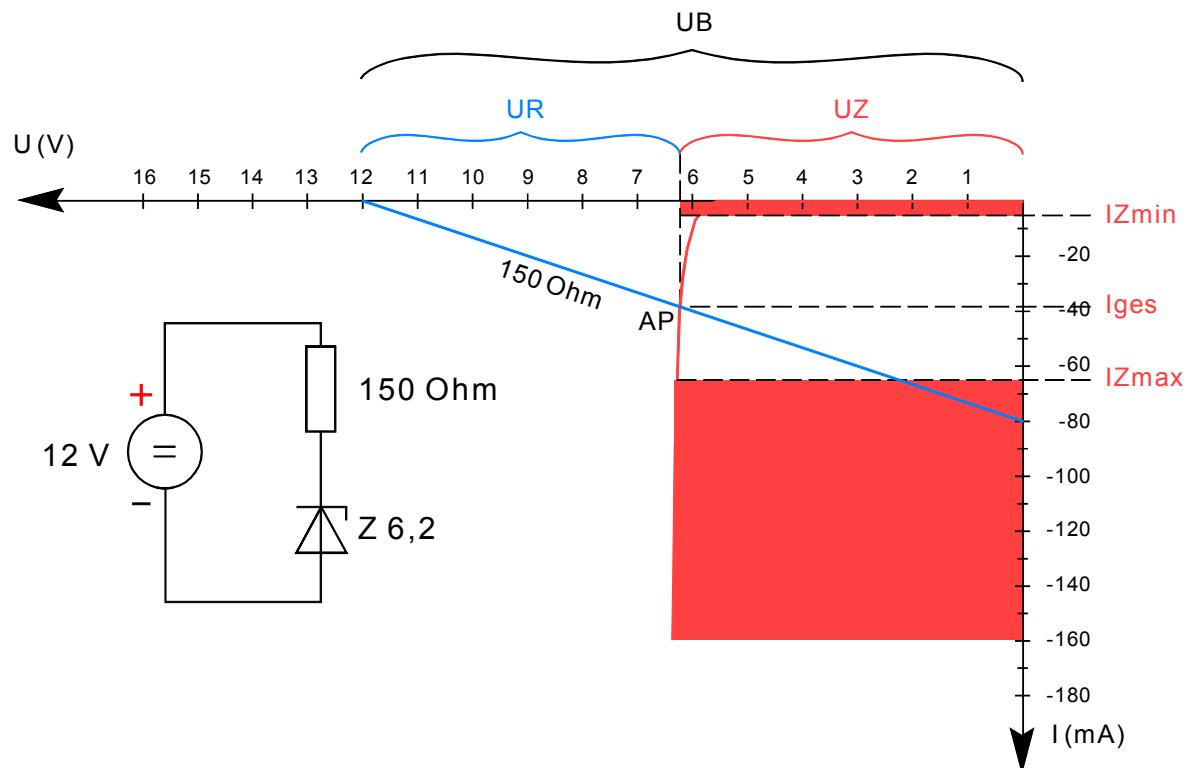
- Welche Lämpchen leuchten und welche Lämpchen leuchten nicht?
- Welche Spannungen ergeben sich an den einzelnen Z–Dioden und Dioden und an den einzelnen Lämpchen?
- Gibt es Bauteile, die zerstört werden?
- Wenn diese Bauteile zerstört sind, was wird in der Schaltung weiter geschehen?
  
- Notieren Sie sich Ihre Ergebnisse und vergleichen Sie sie mit denen Ihrer Kommilitonen/Innen.

### Berechnung der Vorwiderstände für Z–Dioden:

Damit Z–Dioden nicht durch einen zu hohen Sperrstrom zerstört werden, schaltet man sie mit einem Vorwiderstand (Schutzwiderstand) in Reihe.

#### Stabilisierungsschaltung ohne Lastwiderstand:

Für die reine Reihenschaltung ohne Lastwiderstand gilt folgende Abbildung:



Diese Abbildung zeigt sehr anschaulich, weshalb man bei Stabilisierungsschaltungen mit Z–Dioden die **Eingangsspannung etwa 2–mal so groß** macht wie die (stabilisierte) Ausgangsspannung.

Bei der Berechnung von Strömen und Vorwiderständen geht man immer von der maximal zulässigen Leistung der Z-Diode aus. Diese ist definiert als:

$$P_{tot} = I_{Z \max} \cdot U_Z$$

Dabei ist  $U_Z$  die Z-Spannung der Diode,  $I_{Z \max}$  ist der maximal zulässige Sperrstrom durch die Z-Diode und  $P_{tot}$  ist die maximal zulässige Verlustleistung der Z-Diode.

$P_{tot}$  entnimmt man dem Datenblatt und  $U_Z$  entweder dem Datenblatt oder der Typenbezeichnung der Diode.

Um die Stabilisierungswirkung nicht zu beeinträchtigen, darf der Sperrstrom  $I_Z$  aber auch einen Minimalwert  $I_{Z \min}$  nicht unterschreiten (siehe obige Abbildung). Falls vom Hersteller nichts anderes angegeben wird, gilt die Faustregel:

$$I_{Z \min} = 0,1 \cdot I_{Z \max}$$

Um bei Schwankungen der Eingangsspannung immer im „sicheren“ Bereich der Kennlinie zu arbeiten, legt man den Arbeitspunkt in die Mitte zwischen  $I_{Z \min}$  und  $I_{Z \max}$  und bildet das Mittel der beiden Werte:  $I_{Z \text{mittel}}$ .

Der Vorwiderstand berechnet sich dann zu:

$$R_V = \frac{U_B - U_Z}{I_{Z \text{mittel}}}$$

Beim Betrieb der Schaltung kann die Eingangsspannung  $U_B$  schwanken. In der Praxis nimmt man eine Schwankungsbreite von  $\pm 10\%$  an, womit die beiden Stromgrenzwerte nicht erreicht werden.

#### Berechnungsbeispiel:

$$U_B = 18 \text{ V} \pm 10\% ; U_Z = 8,2 \text{ V}; P_{tot} = 500 \text{ mW}$$

Aus  $P_{tot} = I_{Z \max} \cdot U_Z$  kann man  $I_{Z \max}$  ermitteln:  $I_{Z \max} = 61 \text{ mA}$

Um  $I_{Z \text{mittel}}$  zu bekommen, ermittelt man zunächst  $I_{Z \min}$ :  $I_{Z \min} = 0,1 \cdot I_{Z \max} = 6,1 \text{ mA}$

Damit ergibt sich  $I_{Z \text{mittel}}$  zu:  $I_{Z \text{mittel}} = 33,5 \text{ mA}$

Und damit bekommt man  $= 292 \Omega$

Da es in der Praxis keine Widerstände mit  $292 \Omega$  zu kaufen gibt, muss man aus den E-Reihen einen geeigneten auswählen. Am nächsten kommt man diesem Wert mit der E-24-Reihe:  $R_V = 300 \Omega$ .

Untersuchung der Auswirkung der Schwankung der Eingangsspannung  $U_B$ :

$$U_{B \max} = 19,8 \text{ V}; U_{B \min} = 16,2 \text{ V}$$

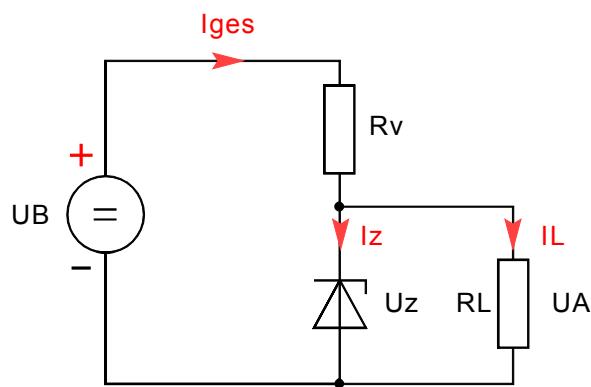
$$I_{Z1} = \frac{U_{B\max} - U_Z}{R_V} = 38,7 \text{ mA}$$

$$I_{Z2} = \frac{U_{B\min} - U_Z}{R_V} = 26,7 \text{ mA}$$

Der Z-Diodenstrom schwankt also damit innerhalb der erlaubten Grenzen.

### Stabilisierungsschaltung mit konstantem Lastwiderstand:

Soll das Netzgerät immer den gleichen „Verbraucher“ versorgen, ändert sich also der Wert des Belastungswiderstandes nicht, so bekommt man folgende Verhältnisse:



Man kann prinzipiell davon ausgehen, dass die Gesamtstromstärke praktisch gleichbleibt. Dann wird der Z-Diodenstrom  $I_Z$  um den Wert des Stroms durch den Lastwiderstand  $R_L$ , also um  $I_L$  kleiner. Um die Schwankungen der Eingangsspannung in diesem Fall gut ausgleichen zu können, macht man die beiden Ströme  $I_{Z\text{ mittel}}$  und  $I_L$  etwa gleich groß:

$$I_{Z\text{ mittel}} \approx I_L$$

Damit berechnet sich der Vorwiderstand  $R_V$  zu:

$$R_V = \frac{U_B - U_Z}{2 \cdot I_L}$$

### Berechnungsbeispiel:

$$U_B = 18 \text{ V} \pm 10\% ; U_Z = 8,2 \text{ V}; P_\alpha = 500 \text{ mW}; R_L = 500 \Omega$$

Damit ergibt sich:

$$I_L = \frac{U_Z}{R_L} = 16,4 \text{ mA}$$

Gesucht ist also eine Z-Diode, deren  $I_{Z\text{ mittel}}$  ca. 16 mA beträgt. Dies kann über die Leistung ermittelt werden:

$$P_{\text{mittel}} = I_{Z\text{mittel}} \cdot U_Z = 134,5 \text{ mW}$$

Gewählt: Z-Diode mit 250 mW.

Damit ergibt sich der Vorwiderstand  $R_V$  zu:

$$R_V = \frac{U_B - U_Z}{2 \cdot I_L} = 298 \Omega \text{ (gewählt: } 300 \Omega)$$

Untersuchung der Auswirkung der Schwankung der Eingangsspannung  $U_B$ :

$$U_{B\max} = 19,8 \text{ V}; \quad U_{B\min} = 16,2 \text{ V}$$

$$I_{Z1} = \frac{U_{B\max} - U_Z}{2 \cdot R_V} = 19,3 \text{ mA}$$

$$I_{Z2} = \frac{U_{B\min} - U_Z}{2 \cdot R_V} = 13,3 \text{ mA}$$

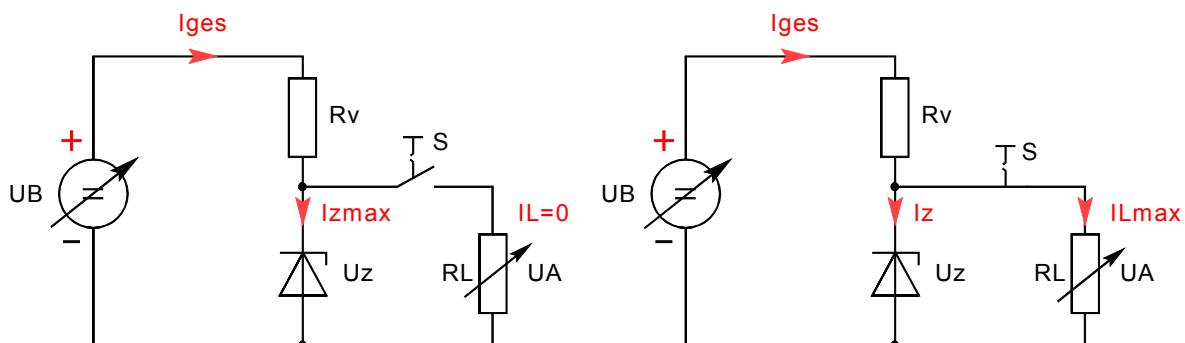
Kontrolle, ob  $I_{Z2}$  noch im Arbeitsbereich der Z-Diode liegt:

$$\text{Aus: } P_{\text{tot}} = I_{Z\max} \cdot U_Z \text{ ergibt sich: } I_{Z\max} = \frac{P_{\text{tot}}}{U_Z} = 30,48 \text{ mA.}$$

$$I_{Z\min} = 0,1 \cdot I_{Z\max} = 3,05 \text{ mA.}$$

Der Z-Diodenstrom schwankt also damit innerhalb der erlaubten Grenzen und die Schaltung arbeitet stabil.

Stabilisierungsschaltung für Experimentiernetzgerät: sich stark verändernder Lastwiderstand:



Bei einer solchen Aufgabenstellung überwiegen die Schwankungen durch Veränderungen des Lastwiderstandes diejenigen der Eingangsspannung. Dabei reichen diese Schwankungen von unendlich hohem Lastwiderstand  $R_L$  (Schalter geöffnet, Netzgerät im Leerlauf) bis zum minimalen  $R_L$ , bei dem der maximale Strom aus dem Netzgerät entnommen wird.

Nimmt man die beiden Schwankungsmöglichkeiten zusammen, können zwei Extremfälle auftreten:

- $U_B$  ist minimal und gleichzeitig  $I_L$  maximal  $\rightarrow$  beides verkleinert  $I_Z$
- $U_B$  ist maximal und gleichzeitig  $I_L$  minimal  $\rightarrow$  beides vergrößert  $I_Z$

Im ersten Fall kann  $I_{Z\min}$  möglicherweise unterschritten werden, es gibt also keine Stabilisierung mehr. Im zweiten Fall kann  $I_{Z\max}$  überschritten und dadurch die Z-Diode zerstört werden.

Unter Berücksichtigung beider Extremfälle berechnet man daher einen Minimal- und einen Maximalwert für  $R_V$ . Zwischen diesen beiden Werten kann dann der in der Schaltung zu verwendende Vorwiderstand frei gewählt werden. Dafür gelten folgende Formeln:

$$R_{V\min} = \frac{U_{B\max} - U_Z}{I_{Z\max} + I_{L\min}}$$

$$R_{V\max} = \frac{U_{B\min} - U_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}}$$

Zur Berechnung des kleinsten Lastwiderstandes:

Je kleiner  $R_L$  wird, desto größer wird  $I_L$  und desto kleiner wird deshalb  $I_Z$ . Wenn der maximale Laststrom fließt, muss durch die Z-Diode aber immer noch der kleinste Strom  $I_{Z\min}$  fließen. Der kleinste Lastwiderstand  $R_L$  ergibt sich also zu:

$$R_{L\min} = \frac{U_Z}{I_{L\max}}$$

### Berechnungsbeispiel:

Experimentiergerät mit:  $U_A = U_Z = 8,2$  V;  $I_{L\max} = 100$  mA

1. Wahl der Eingangsspannung:

Die Eingangsspannung muss immer größer sein als  $U_Z$ . Praktische Werte mit guter Stabilisierung:  $U_B$  sollte 2– bis 3-mal größer sein als  $U_Z$ .

gewählt:  $U_B = 18$  V  $\pm 10\%$

damit wird:  $U_{B\max} = 19,8$  V;  $U_{B\min} = 16,2$  V

2. Arbeitsbereich der Z-Diode:

Der maximale Strom  $I_{L\max}$ , der aus der Schaltung ausgekoppelt werden kann, ist die Stromdifferenz im Arbeitsbereich der Kennlinie:  $I_{Z\max} - I_{Z\min}$ . Da  $I_{Z\min} = 0,1 * I_{Z\max}$ , also  $I_{Z\max} (1 - 0,1)$  ist, ergibt sich daraus:

$$I_{Z \max} = \frac{I_{L \max}}{0,9} = 111,1 \text{ mA}$$

$$I_{Z \min} = 0,1 \cdot I_{Z \max} = 11,1 \text{ mA.}$$

3. Leistung der Z–Diode:

$$P_{tot} = I_{Z \max} \cdot U_Z = 911 \text{ mW}$$

gewählt: Z–Diode mit 1 W

4. Berechnung des Vorwiderstandes  $R_V$ :

$$R_{V \min} = \frac{U_{B \max} - U_Z}{I_{Z \max} + I_{L \min}} = 104,4 \Omega$$

$$R_{V \max} = \frac{U_{B \min} - U_Z}{I_{Z \min} + I_{L \max}} = 72 \Omega$$

Der größere Wert bei  $R_{V \min}$  kommt dadurch zustande, dass im Leerlauffall der Strom  $I_{L \min}$  zu Null wird.

gewählt: 82  $\Omega$

Leistung von  $R_V$ :

$$P_{R_V} = U_{R_V} \cdot I_{ges} = (U_{B \max} - U_Z) \cdot (I_{Z \min} + I_{L \max}) = 1,29 \text{ W}$$

gewählt: Widerstand mit 2 W

5. Berechnung des kleinsten Lastwiderstandes  $R_{L \min}$ :

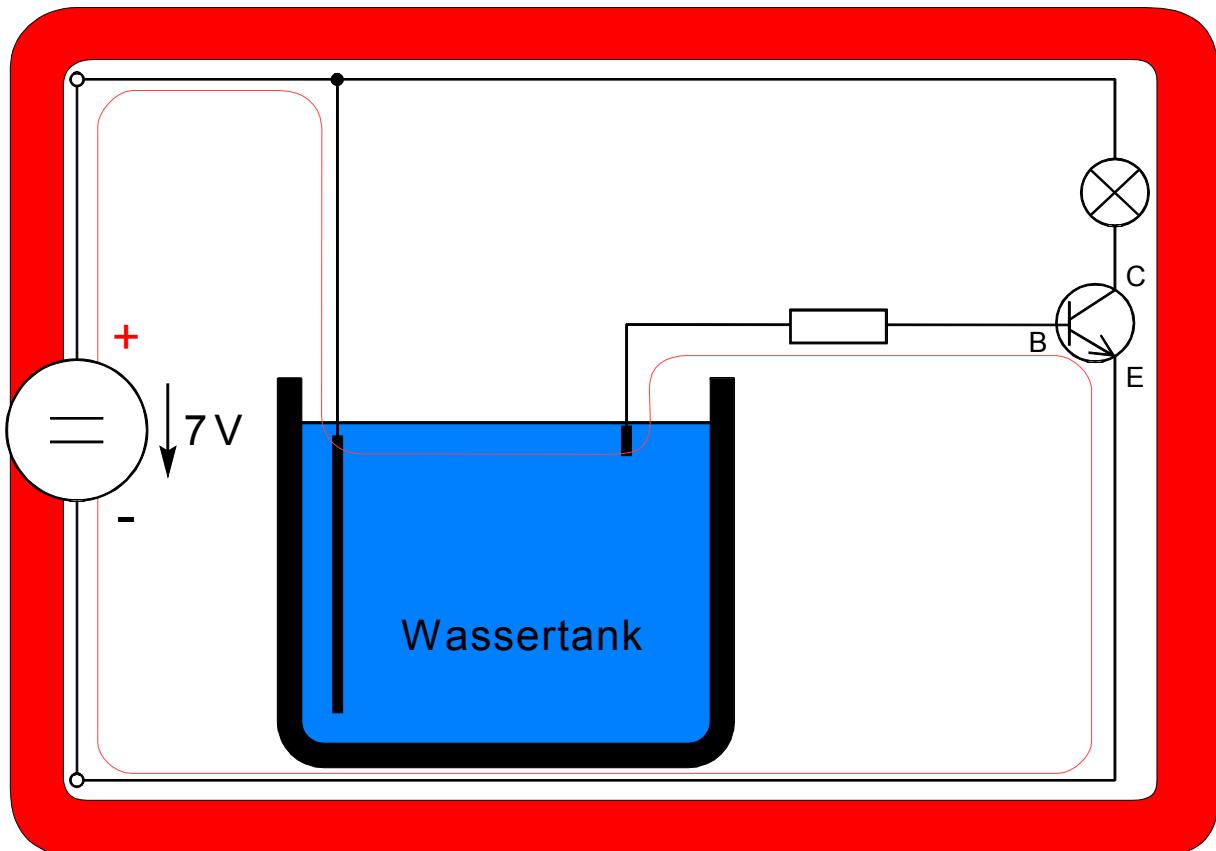
$$R_{L \min} = \frac{U_Z}{I_{L \max}} = 82 \Omega$$

Leistung dieses Lastwiderstandes: 0,82 W ( $U_Z * I_{L \max}$ )

## Der Transistor

### **Funktionsweise des Transistors:**

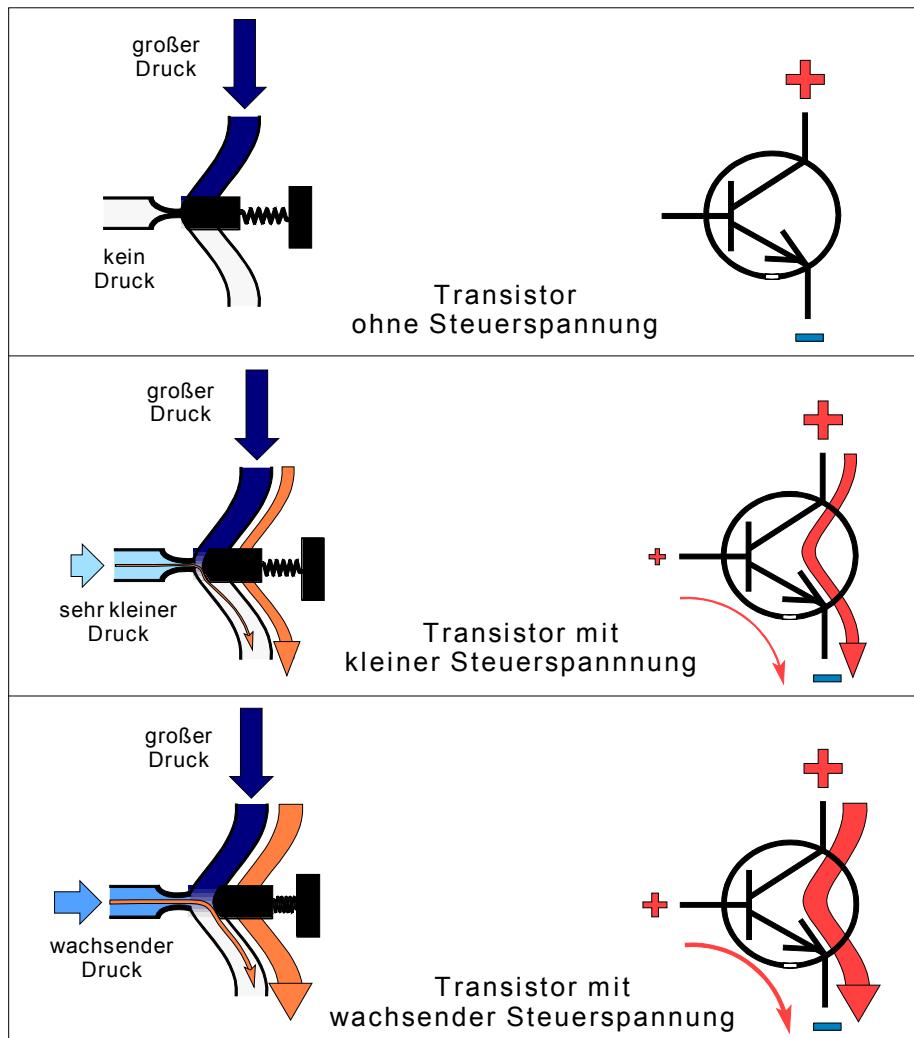
#### Ströme bei der Füllstandsanzeige:



Wie man sieht, muss man bei einem Transistor zwei Stromkreise unterscheiden: den Steuer- oder Eingangsstromkreis (durch die Basis–Emitterstrecke) und den Last– oder Ausgangsstromkreis (durch die Kollektor–Emitterstrecke). Dabei ist es so, dass ein **sehr kleiner** Steuerstrom genügt, um einen **sehr großen** Laststrom zu steuern oder zu schalten.

#### Pneumatische Analogie des Transistors:

Während sich bei Dioden der innere Widerstand durch die Polarität der angelegten Spannung verändert (Durchlass- und Sperrrichtung), kann bei Transistoren der innere Widerstand kontinuierlich verändert werden. Aus diesem Verhalten resultiert auch sein Name. Er ist als Kunstwort entstanden aus den beiden englischen Begriffen Transfer (Übertragen) und Resistor (Widerstand). **Transistoren sind also steuerbare elektrische Widerstände.**



Um dafür ein Vorverständnis zu bekommen, ist es gut, sich zunächst diese Analogie genauer anzuschauen. Auf der linken Seite ist in drei verschiedenen Betriebszuständen jeweils die pneumatische Analogie und rechts der elektronische Transistor dargestellt. Die Analogie besteht aus einem geschwungenen Rohr, das durch einen Schieber verschlossen ist. Der Schieber wird durch eine Feder nach links gedrückt. Wirkt von oben in dem Rohr ein großer Druck (Pumpe), so kann durch den geschlossenen Schieber keine Luft nach unten fließen. Der Schieber lässt sich über einen zweiten Druckanschluss (links) bewegen, der an seiner Einmündung zwei bewegliche Lippen besitzt (pneumatische Diode), die in Ruhestellung geschlossen sind. Beaufschlagt man diese Leitung gerade mit so viel Druck, dass sich die Lippen öffnen können (Schleusenspannung), so wird der dadurch fließende Luftstrom auf den Schieber prallen und ihn etwas nach hinten drücken. Diese Bewegung gibt aber in dem abwärts laufenden Rohr einen kleinen Spalt frei, durch den jetzt ebenfalls ein Luftstrom hindurchgedrückt werden kann. Da dieses linke Rohr ausschließlich dazu dient, den Schieber zu steuern, nennt man es auch **Steuerleitung**. Durch Vergrößern des Drucks in der Steuerleitung kann nun der Schieber immer weiter zurück gedrückt werden und desto größer wird der Luftstrom sein, der in der abwärts laufenden Hauptleitung fließen kann. Wie man sieht, kann man mit dieser Anordnung mit einem kleinen Luftstrom einen sehr großen, kräftigen Luftstrom beeinflussen (steuern). Selbstverständlich gibt es in Transistoren keine Schieber, Federn oder Luftströme, aber wenn man den Luftdruck durch eine elektrische Spannung und die Luftströme durch elektrische Ströme ersetzt, so hat man die grundsätzliche Funktionsweise des Transistors verstanden. Auch bei ihm kann durch eine kleine Spannung ein Steuerstrom fließen, der den inneren Widerstand des Transistors verkleinert. Dadurch kann in der Hauptleitung ein großer Laststrom fließen, d.h. die grundsätzlichen Verhältnisse der Verän-

derung des inneren Widerstandes durch einen (sehr kleinen) Steuerstrom zeichnen auch den elektronischen Transistor aus.

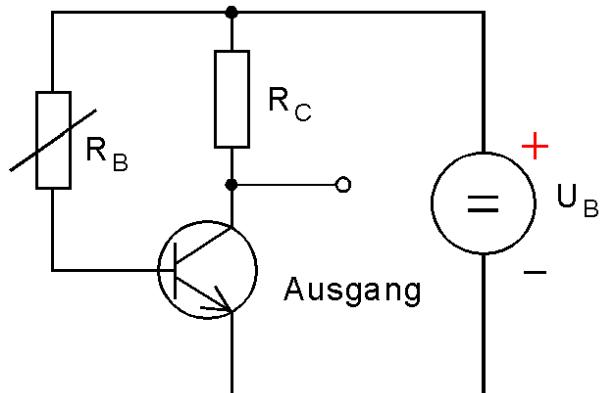


Wenn Sie sich ein genaueres Bild vom inneren Aufbau und der Wirkungsweise des Transistors machen wollen: Systematischer Teil; Transistoren; Aufbau und Wirkungsweise von bipolaren Transistoren.

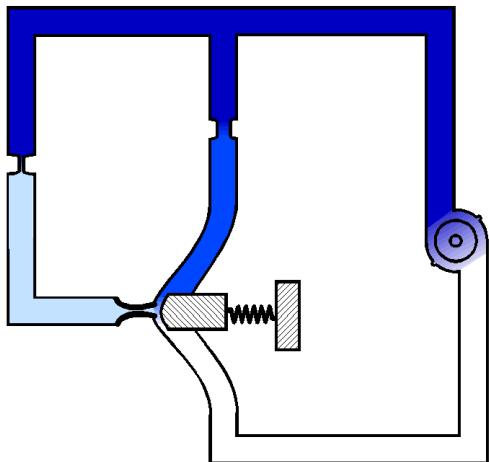
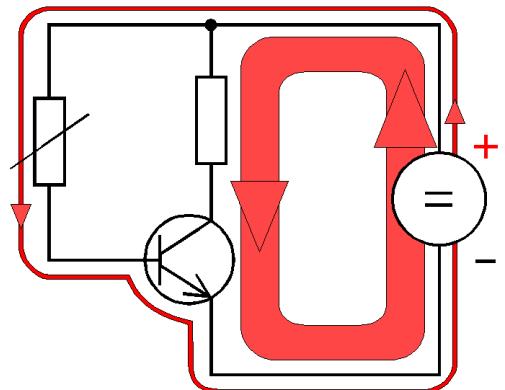
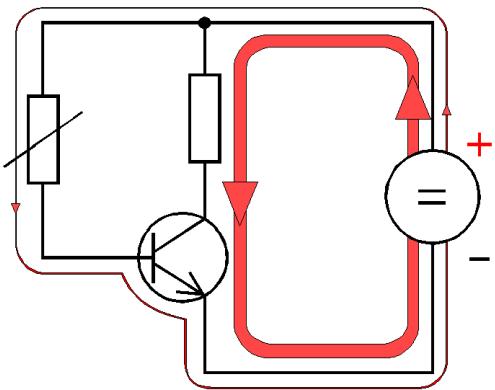
### Schaltungen mit dem Transistor, Pneumatische Analogien:

#### @ Emitterschaltung mit Basisvorwiderstand:

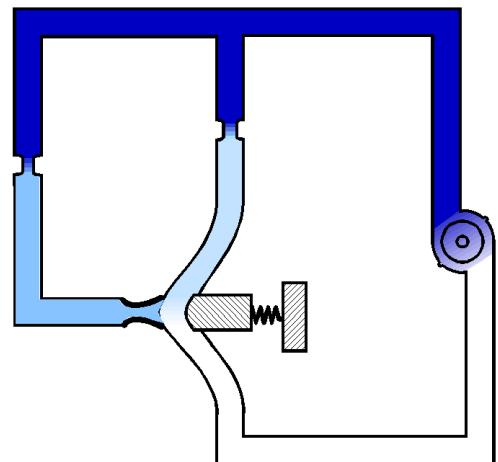
Die einfachste Art, die Eingangsspannung zu erzeugen, die den Steuerstrom fließen lässt und damit den Transistor „öffnet“, besteht darin, einen Widerstand ( $R_B$ ) in Reihe zur Basis-Emitterstrecke zu schalten. Dies ist die Schaltungsart, die bei der Füllstandsanzeige genutzt wurde: Wasserstrecke und Schutzwiderstand bildeten zusammen den Basisvorwiderstand.



Dadurch entsteht ein Spannungsteiler am Eingang des Transistors, an dem man durch Verändern des Wertes des Widerstandes ( $R_B$ ) die Steuerspannung ( $U_{BE}$ ) variieren und damit den Innenwiderstand des Transistors verändern kann: von sehr groß (MOhm-Bereich) bis sehr klein (wenige Ohm). Die beiden folgenden Abbildungen sollen das verdeutlichen. Dazu dient sowohl die analoge Darstellung der Druckverteilung (Spannung) in der Schaltung als auch die (qualitative) Darstellung der fließenden Ströme.



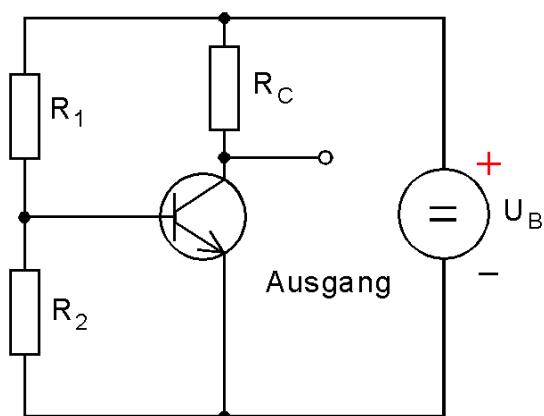
a: großer Basisvorwiderstand



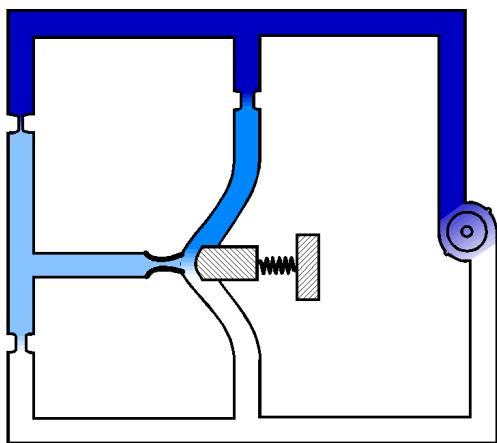
b: kleiner Basisvorwiderstand

### @ Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler:

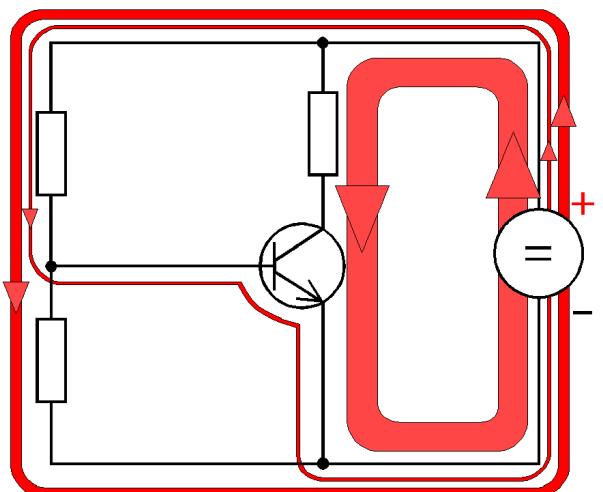
Eine zunächst aufwändiger Art, die Steuerspannung für den Transistor zu erzeugen, besteht in der Verwendung eines Spannungsteilers im Eingangsbereich.



Dieser Spannungsteiler wird so bemessen, dass an dem Widerstand  $R_2$  die Steuerspannung für den Transistor entsteht. Die nächste Abbildung zeigt für diese Schaltung wieder die analoge Darstellung der Spannungsverteilung in der Schaltung und die (qualitative) Größe der Ströme.



a: analoge Darstellung der Spannungsverteilung



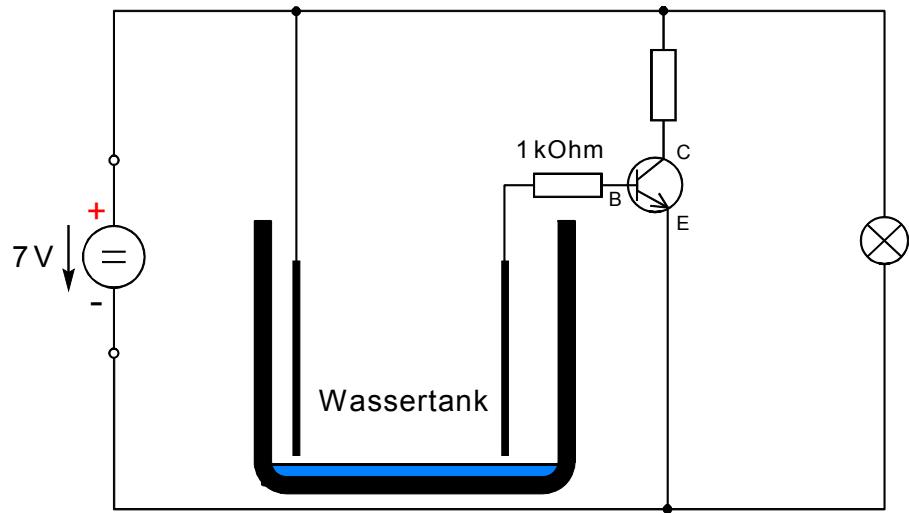
b: Darstellung der Ströme

Diese Abbildung macht klar, dass man in diesem Fall drei Stromkreise unterscheiden muss: den Stromkreis für den Basisspannungsteiler, den Eingangs- und den Ausgangstromkreis des Transistors. Dabei ist die Wirkungsrichtung eindeutig: Der Basisspannungsteiler stellt die Steuerspannung zur Verfügung, diese stellt den inneren Widerstand des Transistors ein und daraus wiederum folgt (im Zusammenspiel mit dem Lastwiderstand RC) die Größe des Laststromes.

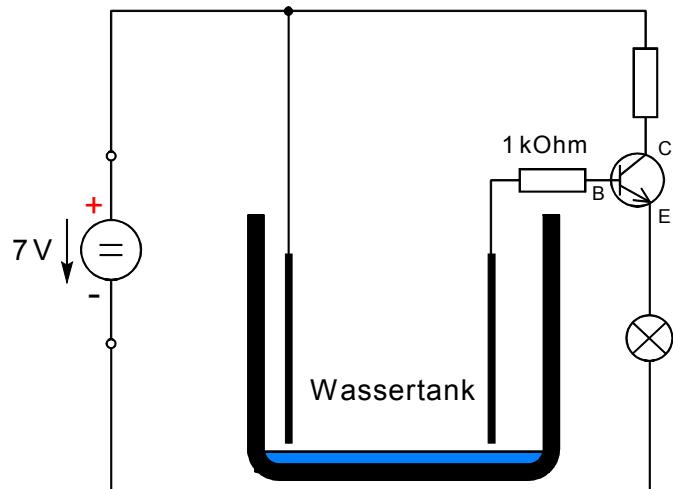
**Schaltungen mit dem Transistor, Signalumkehr:**

**@ Lösungsvorschläge zum Problem: Anzeige des leeren Tanks:**

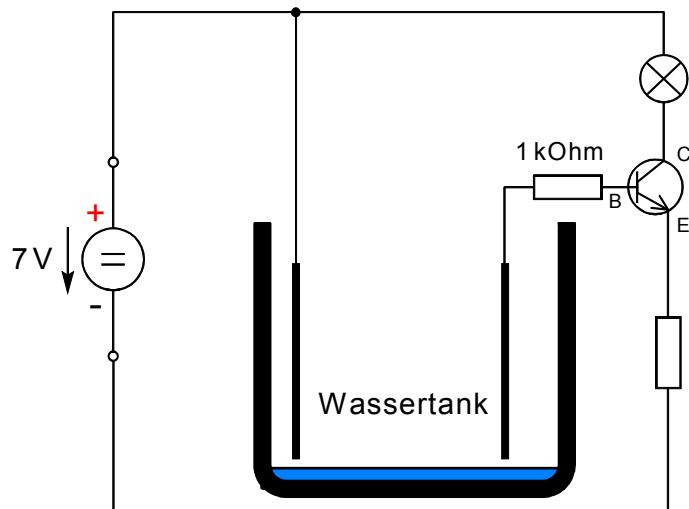
**Vorschlag 1:**



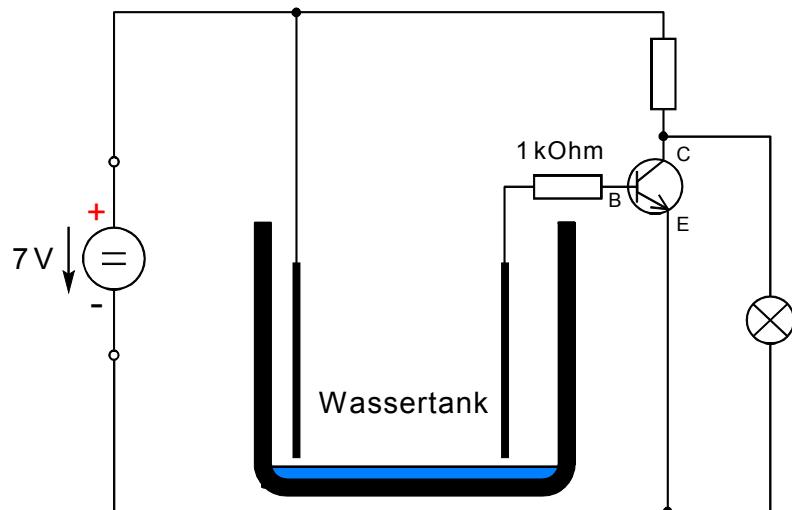
**Vorschlag 2:**



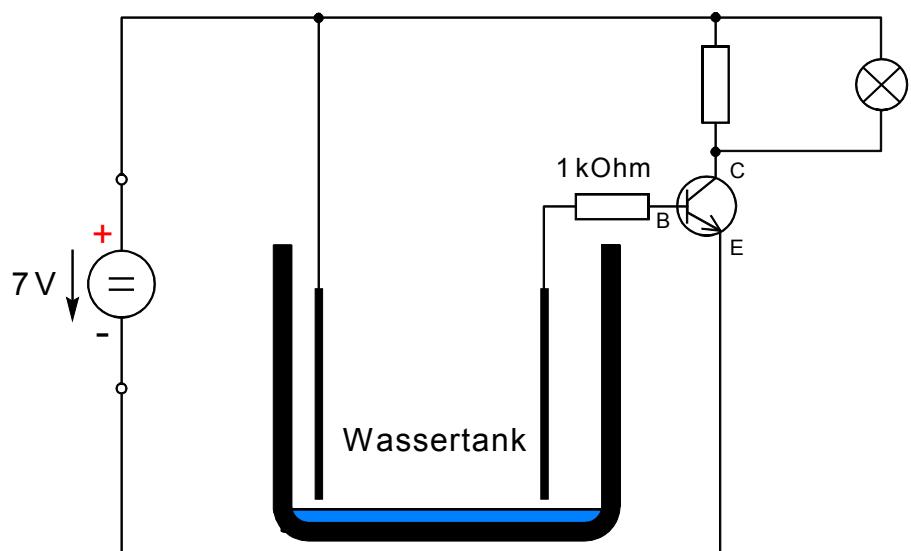
**Vorschlag 3:**



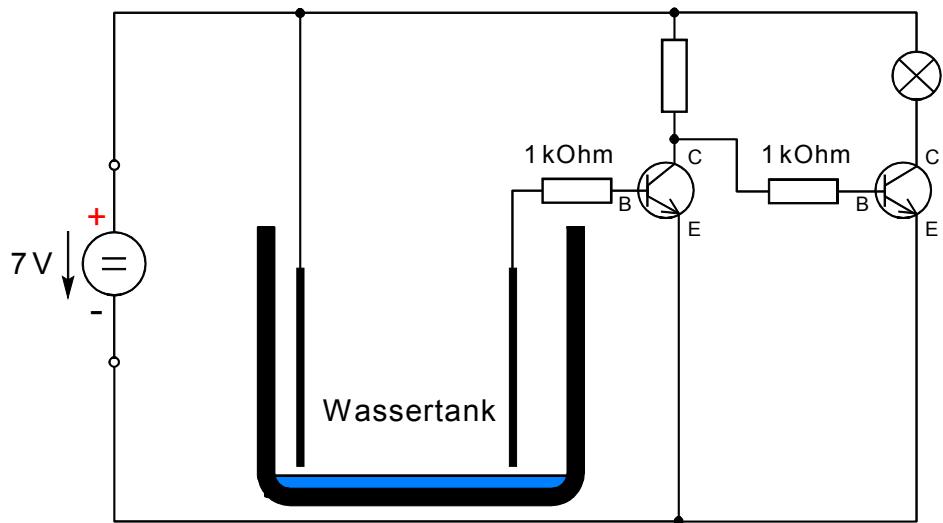
**Vorschlag 4:**



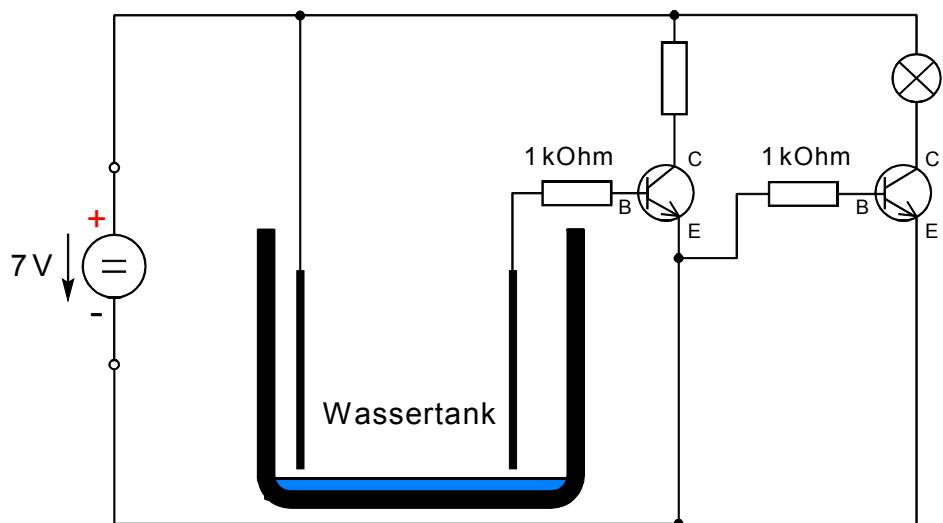
**Vorschlag 5:**



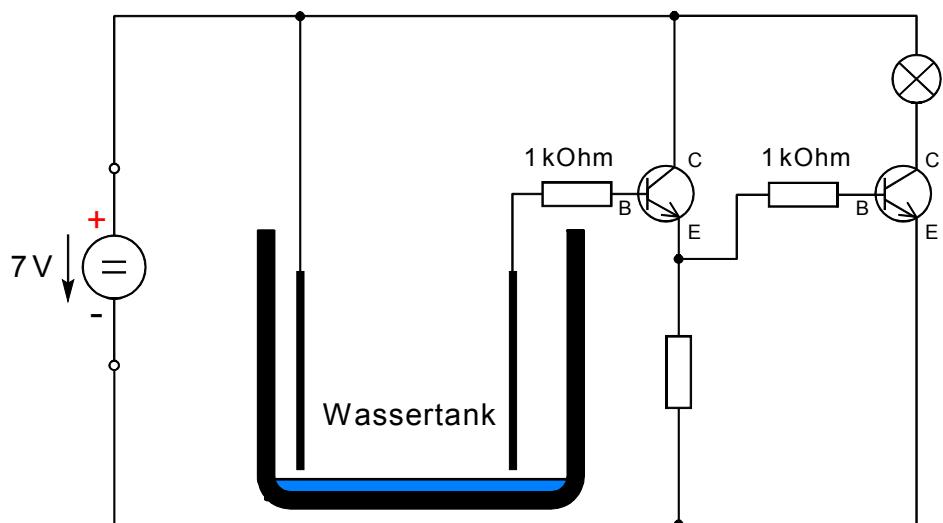
**Vorschlag 6:**



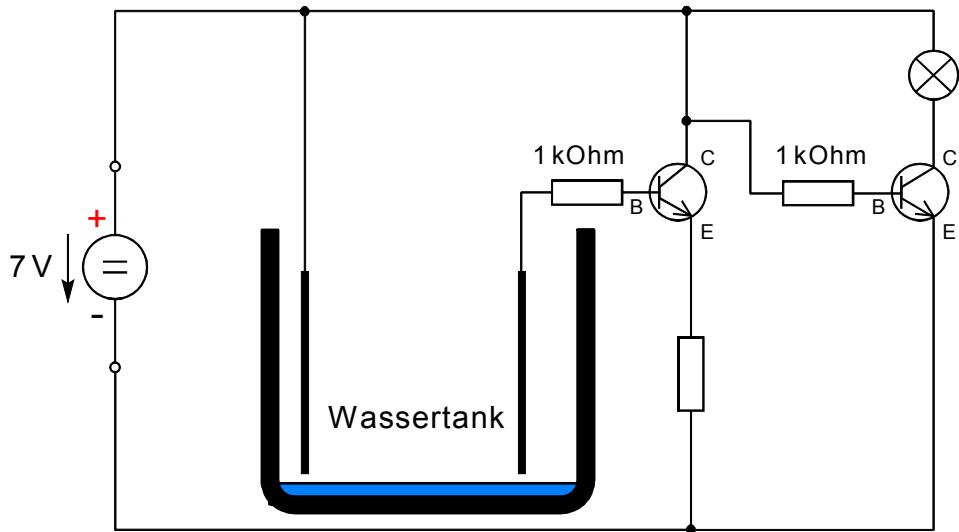
**Vorschlag 7:**



**Vorschlag 8:**



**Vorschlag 9:**



**i** Der Lösungs–Vorschlag 6 beinhaltet eine sehr wichtige Grundschaltung der Elektronik. Es geht dabei um die Frage der Signal–Umkehr: kommt am Eingang ein Signal an, so erscheint es am Ausgang; ist am Eingang kein Signal, so gibt der Ausgang ein Signal aus. Diese Funktion ist in der Digitaltechnik auch als NEGATION oder NICHT–Funktion bekannt.

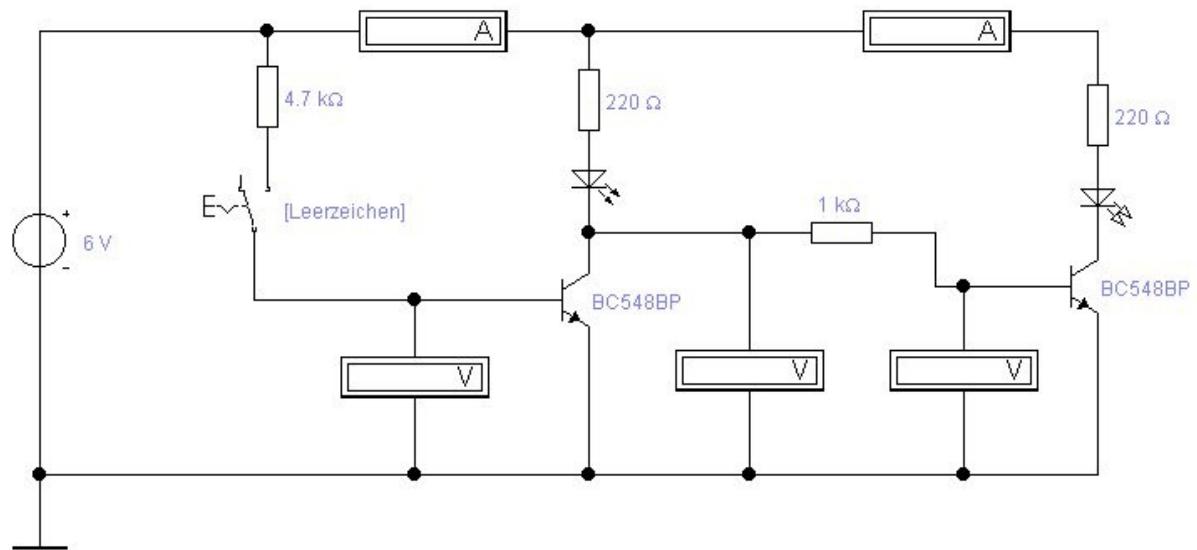
Realisiert wird diese Funktion dadurch, dass die Spannung am Ausgang des Transistors 1 als Steuerspannung für den Transistor 2 benutzt wird. Nicht das Eingangs–Signal direkt beeinflusst also das Ausgangs–Signal, sondern der Zustand des Transistors 1 beeinflusst das Ausgangs–Signal.

In der Digitaltechnik gibt es viele grundlegende Schaltungen, die dieses Prinzip nutzen: Flip–Flop, Mono–Flop, Multivibrator und andere.

**Ende Information.**

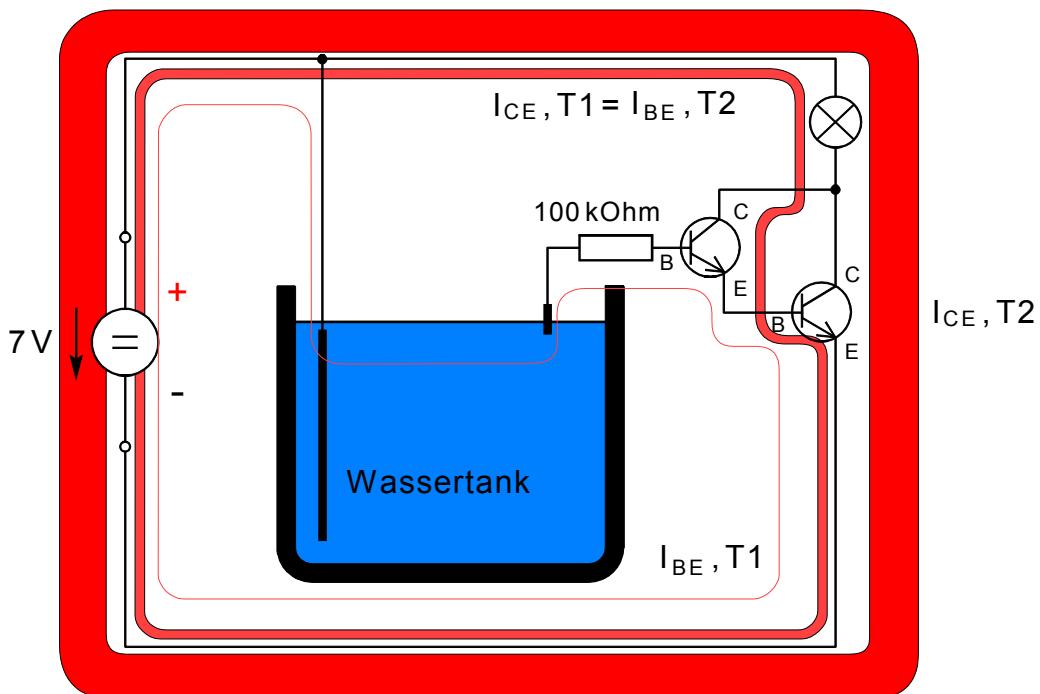
Zweistufige Schaltung mit Signalumkehr:

**E** **Experimentieren, Untersuchen:** Um die Spannungs– und Stromverhältnisse bei dieser zweistufigen Schaltung genauer untersuchen zu können, bauen Sie sich mit EWB folgende Schaltung auf: Dabei dient der Schalter im Eingangskreis des linken Transistors als Signalgeber. Beobachten Sie das Verhalten der Schaltung, wenn Sie den Schalter öffnen bzw. schließen. Beachten Sie besonders die Spannung am Ausgang ( $U_{CE}$ ) des linken Transistors, da sie als Steuerspannung für den rechten Transistor dient.



### Schaltungen mit dem Transistor, Darlingtonsschaltung:

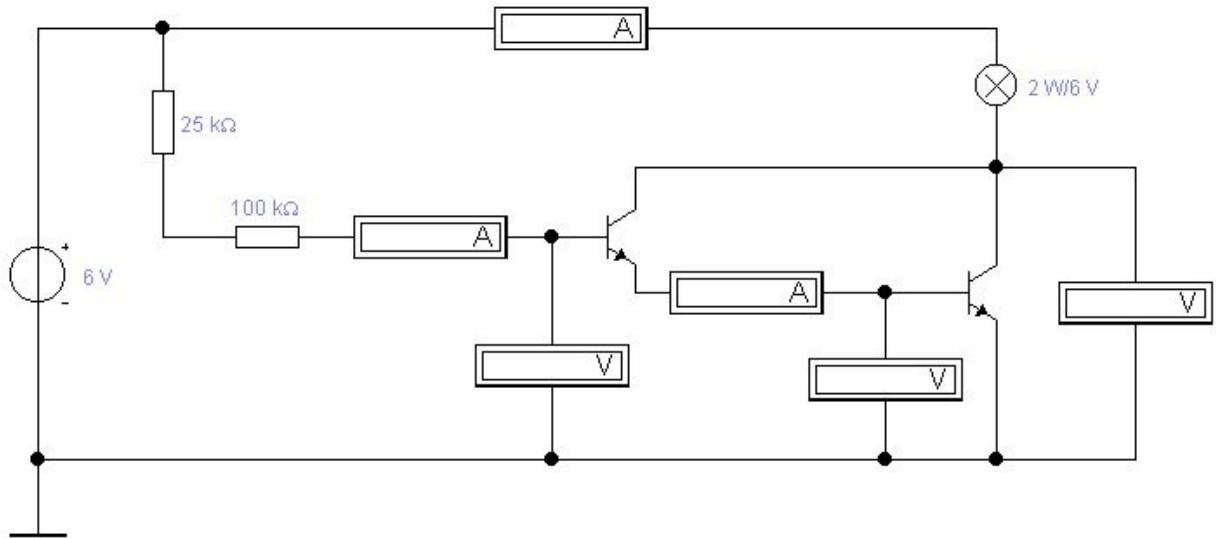
#### Stromverstärkung bei der Darlington-Schaltung:



Diese Darstellung zeigt deutlich und anschaulich die Situation bei den Strömen der Darlington-Schaltung: Durch die Wasserstrecke und über den 100 kΩ-Widerstand fließt ein winziges Strömmchen, das durch den Transistor 1 verstärkt wird. Dieser jetzt verstärkte Strom fließt als Kollektor-Emitter-Strom des Transistors 1 aber direkt und ohne Verluste als Basisstrom in den Transistor 2, von dem er nochmal verstärkt wird, so dass sich als Kollektor-Emitter-Strom des Transistors 2 (Laststrom der Schaltung) ein sehr großer Strom ergibt.

## E

**Experimentieren, Untersuchen:** Um die Spannungs– und Stromverhältnisse genauer untersuchen zu können, bauen Sie sich mit EWB folgende Schaltung auf: Da man bei EWB keine Wasserstrecke einbauen kann, wurde ein Widerstand „als Wasserstrecke“ eingefügt mit  $25\text{ k}\Omega$ . Untersuchen Sie, wie hoch Sie den Widerstandswert dieses Widerandes machen können, ohne dass das Lämpchen erlischt. Berechnen Sie die dabei auftretenden Gesamt–Stromverstärkungen.



### Berechnen der Stromverstärkung bei der Darlingtonschaltung:

Dieses Prinzip und diese extreme Stromverstärkung lässt sich auch mathematisch sehr schön deutlich machen.

Im Erarbeitungsteil (Erarbeitung der Funktionsweise des Transistors) wurde im Zusammenhang mit der Stromverstärkungs–Kennlinie bereits die statische Stromverstärkung des Transistors definiert als:  $B = \frac{I_C}{I_B}$ . Mit Hilfe dieser Beziehung kann man die Gesamt–Stromverstärkung der obigen Darlington–Schaltung bestimmen. Da es sich um zwei Transistoren handelt, definiert man zunächst die Einzel–Stromverstärkungen:

$$B_1 = \frac{I_{C1}}{I_{B1}}, \quad B_2 = \frac{I_{C2}}{I_{B2}}$$

Um zur Gesamt–Stromverstärkung zu kommen, muss man jetzt nur noch berücksichtigen, dass der verstärkte Strom  $I_{C1}$  beim zweiten Transistor wieder als Basisstrom  $I_{B1}$  auftaucht. Damit kann man sagen, dass sich die beiden Verstärkungsfaktoren multiplizieren (der mit dem Faktor  $B_1$  verstärkte Strom wird jetzt noch einmal mit dem Faktor  $B_2$  verstärkt) und es ergibt sich:

$$B = B_1 \cdot B_2 = \frac{I_{C1}}{I_{B1}} \cdot \frac{I_{C2}}{I_{B2}} = \frac{I_{C2}}{I_{B1}}$$

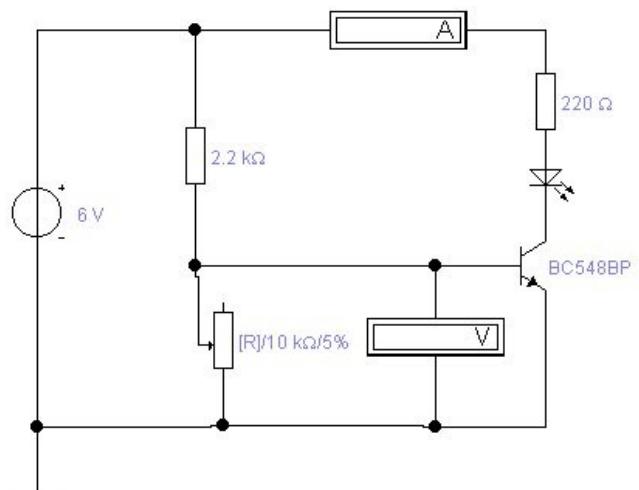
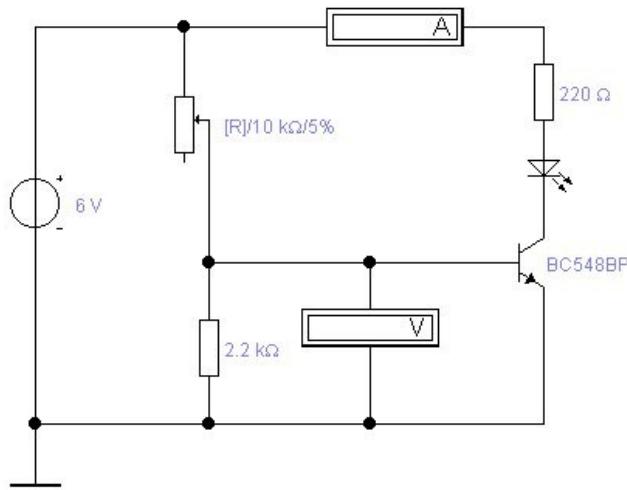
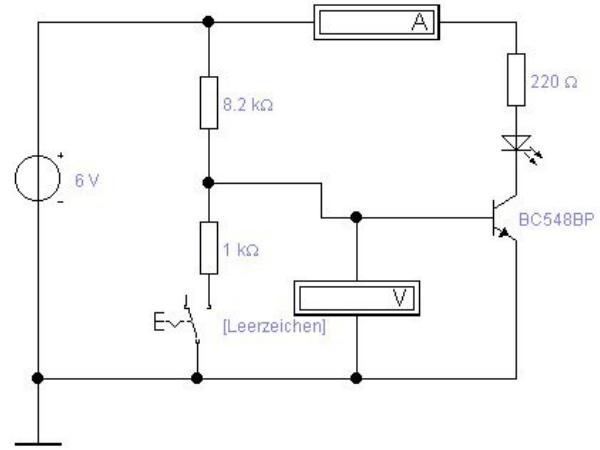
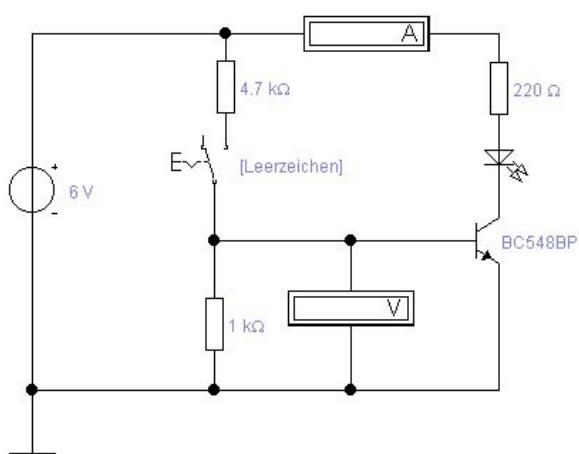
Nimmt man als Stromverstärkung für einen einzelnen Transistor jetzt mal den Faktor 200 an, so ergibt sich damit für die Darlington–Schaltung eine gesamte Stromverstärkung von 40.000!!!

## Schaltungen mit dem Transistor: Signalumkehr, 2 Eingänge bei der Emitter-schaltung:

**E**

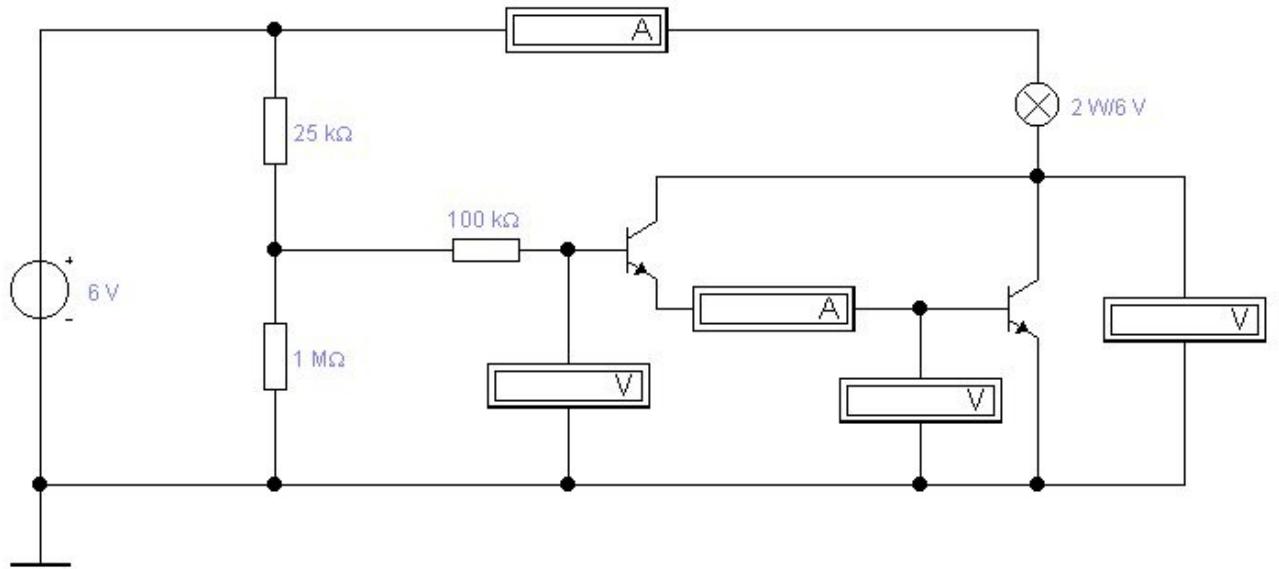
**Experimentieren, Untersuchen:** Um die Spannungs– und Stromverhältnisse genauer untersuchen zu können, bauen Sie sich mit EWB folgende Schaltungen auf: Um die Verhältnisse übersichtlich zu halten, wurde hier eine einfache Emitterschaltung ohne Darlingtontransistor gewählt.

Dabei dienen im ersten Fall die Schalter als Signalgeber, im zweiten Fall die Trimmer. Beobachten Sie das Verhalten der Schaltung, wenn Sie den Schalter öffnen bzw. schließen bzw. wenn Sie den Widerstand des Trimmers langsam verkleinern (Schritt bitte bei beiden Trimmern auf 1% stellen).



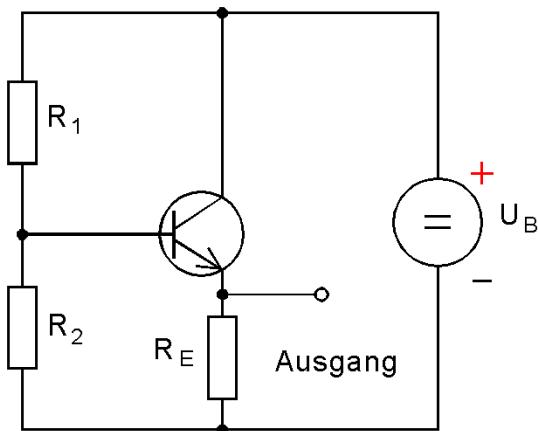
**E**

**Experimentieren, Untersuchen:** Und nun können Sie noch die Verhältnisse der ursprünglichen Schaltung mit Darlingtontransistor und „Wasserstrecke“ simulieren. Verändern Sie die Schaltung so, dass Sie den 25 kΩ–Widerstand einmal im oberen Eingang einbauen (wie es die untere Schaltung zeigt) und einmal im unteren.



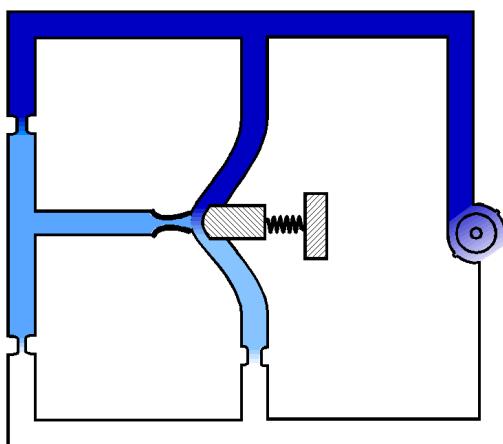
### Schaltungen mit dem Transistor: Kollektorschaltung:

#### Pneumatische Analogie:

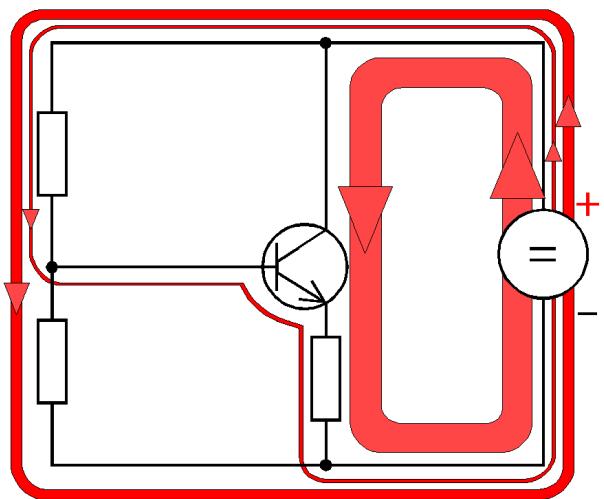


Aus der Abbildung geht hervor, dass sich die Kollektorschaltung (hier nur in der Version mit Basisspannungsteiler dargestellt) nur in einem einzigen Punkt von der Emitterschaltung unterscheidet: die Reihenfolge von Transistor und Widerstand im Ausgangskreis ist vertauscht. Diese kleine Änderung hat aber erhebliche Auswirkungen auf die Arbeitsweise der Schaltung.

Die nächste Abbildung (pneumatische Analogie) macht dies sofort deutlich: Während bei der Emitterschaltung durch die Steuerspannung lediglich die Größe der Basis–Emitter–Spannung (etwa 0,7 V) erzeugt werden muss, addiert sich dazu bei der Kollektorschaltung noch die Spannung über dem Ausgangswiderstand  $R_E$  dazu! D.h. die Steuerspannung muss in diesem Fall viel größer sein, um den Transistor zu öffnen. Würde man in diesem Fall den Basisspannungsteiler genau so bemessen wie bei der Emitterschaltung, so könnte der Transistor nicht durchschalten.



a: analoge Darstellung der Spannungsverteilung

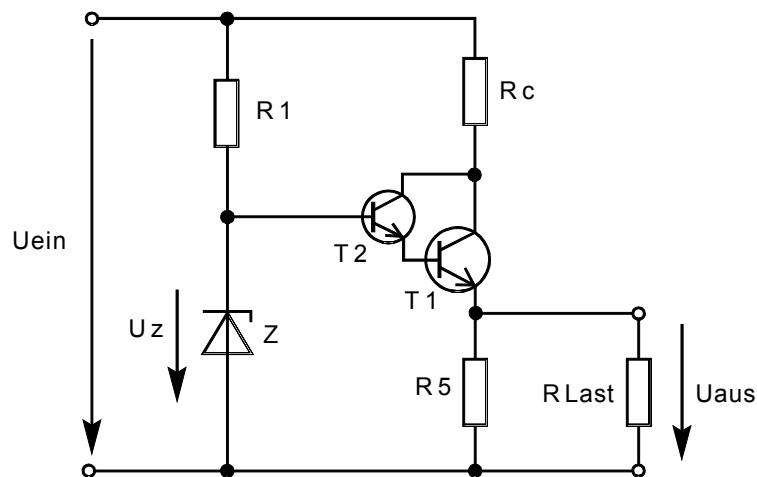


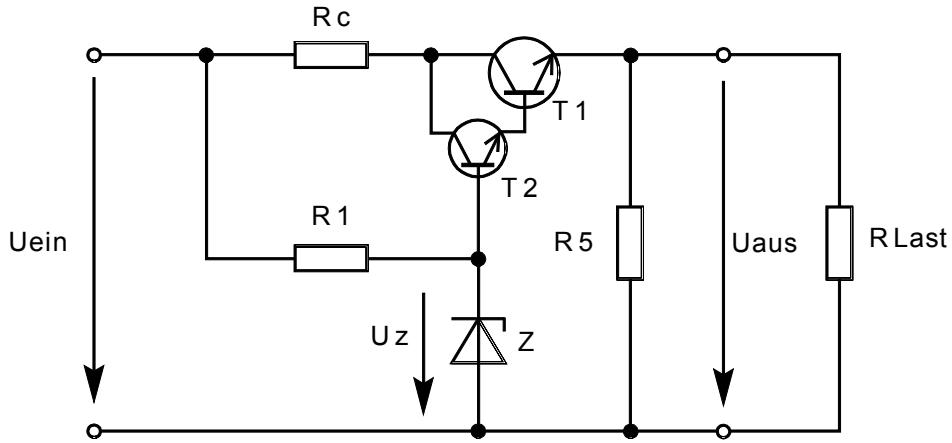
b: Darstellung der Ströme

Vergleicht man diese analoge Darstellung mit der der Emitterschaltung (mit Basisspannungsteiler), so wird deutlich, wie unterschiedlich man die Basisspannungsteiler einstellen muss (Widerstände  $R_1$  und  $R_2$ ), um am Ausgang (bei gleichem Lastwiderstand) den gleichen Laststrom zu bekommen.

### Schaltungsvergleich:

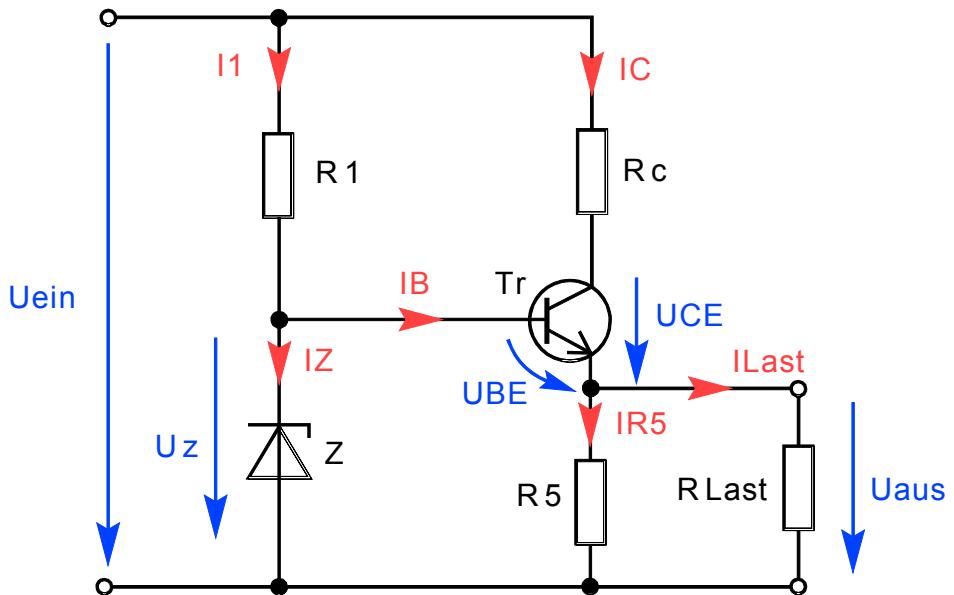
Vergleichen Sie die beiden folgenden Stabilisierungs-Schaltungen und untersuchen Sie, ob und in welchen Punkten sie sich unterscheiden.





### Berechnung der Kollektorschaltung mit Z-Diode:

Der Einfachheit halber wurde in der obigen Schaltung (Schaltungsvergleich) der Darlingtontransistor zunächst durch einen einfachen Transistor ersetzt. Zur besseren Orientierung wurden die wichtigen Spannungen und Ströme eingezeichnet.



Zunächst muss man beachten, dass bei dieser Schaltung die Parallelschaltung von  $R_5$  und  $R_{Last}$  den Emitterwiderstand bildet. Da die Schaltung noch keine Kurzschluss-Sicherung besitzt, wurde der Schutzwiderstand  $R_c$  eingefügt.

Der Basisspannungsteiler besteht also aus  $R_1$  und der Z-Diode. Damit ergibt sich die Ausgangsspannung  $U_{aus}$  zu:

$$U_{aus} = U_z - U_{BE}$$

Die Konstanz der Ausgangsspannung wird also bestimmt durch die Konstanz von  $U_z$  und  $U_{BE}$ .

Über den Widerstand  $R_1$  fließt sowohl  $I_z$  als auch  $I_B$ . Die Summe der beiden Ströme ist konstant, solange sich die Eingangsspannung  $U_{ein}$  und  $U_z$  nicht ändern:

$$I_1 = I_Z + I_B = \frac{U_{ein} - U_Z}{R_1}$$

Eine Änderung des Z-Stromes verursacht also eine gleich große, aber gegensinnige Änderung des Basisstromes.

$$\Delta I_Z = -\Delta I_B$$

### Leistungsbegrenzung durch $R_C$ :

Die Leistung des Transistors ist bestimmt durch:

$$P_{tot} \approx I_C \cdot U_{CE}$$

Bei großen Lastströmen  $I_{Last}$  und hohem UCE wird der Transistor besonders stark belastet (



siehe die Leistungskurve  $P - I_C$  im Systematischen Teil; Transistoren; Leistung beim Transistor). Da allerdings mit zunehmendem Kollektorstrom die Spannung  $U_{CE}$  wegen des Spannungsabfalls an  $R_C$  sinkt, wird die Verlustleistung begrenzt:

$$U_{CE} = U_{ein} - U_{aus} - I_C \cdot R_C$$

### Strombegrenzung durch $R_C$ :

$R_C$  hat noch eine zweite Aufgabe. Wird am Ausgang ein Kurzschluss verursacht, dann steigt der Kollektorstrom auf hohe Werte an. Durch  $R_C$  wird der Strom begrenzt auf:

$$I_{C_{max}} \approx I_{Last\_K} = \frac{U_{ein}}{R_C} \quad (I_{Last\_K} : \text{Kurzschluss-Laststrom})$$

Die Stabilisierung bleibt arbeitsfähig, so lange eine ausreichende Spannung  $U_{CE}$  vorhanden ist. Bei Erreichen der Spannung  $U_{CEmin}$  setzt die Stabilisierung allmählich aus. Damit ist der maximale Laststrom festgelegt:

$$I_{Last\_max} = U_{ein} - U_{aus} - \frac{U_{CE\ min}}{R_C}$$

### Vorlastwiderstand $R_5$ :

Die Kollektorschaltung ist nur funktionsfähig, wenn ein Emitterwiderstand vorhanden ist. Nur dann fließt Emitterstrom. Ohne den Widerstand  $R_5$  wäre die Schaltung im Leerlauf ( $R_L = \infty$ ) außer Betrieb. Bei sehr hochohmigen Lastwiderständen ist die Steuerspannung  $U_{BE}$  zunächst relativ klein (z.B. 0,55 V), da ein sehr kleiner Emitterstrom fließt. Mit steigendem Laststrom steigt nun  $U_{BE}$  an bis auf z.B. 0,75 V und ändert sich danach nur noch geringfügig. Diese Änderung von  $U_{BE}$  wirkt sich voll auf die Änderung von  $U_A$  aus.

Mit Hilfe von  $R_5$  kann der Transistor ohne Lastwiderstand in einen günstigen Arbeitspunkt gebracht werden, so dass  $U_A$  auch bei sehr kleinen Lastströmen  $I_{Last}$  seinen Nennwert annimmt:

$$R_5 = \frac{U_{aus}}{I_{C\ min}}$$

Zur Bestimmung von kann man die Eingangskennlinie benutzen. Dort sucht man die minimale Eingangsspannung  $U_{BE}$  heraus, bei der gerade noch ein kleiner Basisstrom  $I_{Bmin}$  fließen kann (meist 0,5 bis 0,55 V). Mit dem Stromverstärkungsfaktor  $B$  kann damit der Wert von  $I_{Cmin}$  berechnet werden:

$$I_{Cmin} = B \cdot I_{Bmin}$$

Einfacher geht es, wenn der Hersteller ein Diagramm zur Verfügung stellt: Kollektorstrom  $I_C$  in Abhängigkeit von der Basis–Emitter–Spannung  $U_{BE}$ . Hier kann man den Wert von  $I_{Cmin}$  oft direkt ablesen. Wenn diese Diagramme allerdings bis zu den Null–Werten der Kollektorströme gehen, kann man das  $I_{Cmin}$  daraus nicht bestimmen.

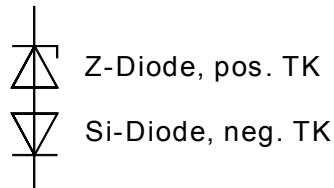
### Berechnungsbeispiel 1:

Experimentiergerät mit:  $U_A = 12 \text{ V}$ ;  $I_{Lmax} = 500 \text{ mA}$

#### **1. Spannung der Z–Diode:**

$$U_Z = U_{aus} + U_{BE} = 12 \text{ V} + 0,7 \text{ V} = 12,7 \text{ V}$$

Man kann auch (zur Temperaturkompensation) folgende Kombination wählen:



In diesem Fall muss man ansetzen:

$$U_Z = U_{aus} + U_{BE} - U_D = 12 \text{ V} + 0,7 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

#### **2. Eingangsspannung:**

Die Eingangsspannung wird, um einen günstigen Arbeitspunkt für die Z–Diode zu bekommen, auf die doppelte Z–Spannung eingestellt:

$$U_{ein} = 2 \cdot U_Z = 25,4 \text{ V}$$

#### **3. Transistor:**

Der Transistor (und sein Kühlkörper) muss für eine Maximalleistung von

$$P_{tot} \approx (U_{ein} - U_{aus}) \cdot (I_{Last\_max} + I_{R5})$$

ausgelegt sein. Der Wert von  $I_{R5}$  ist der Wert von  $I_{Cmin}$ , bei dem der Transistor gerade noch gut arbeitet. Dieser Wert ist oft in den Datenblättern nicht angegeben. Man kann aber davon ausgehen, dass er bei den meisten Transistoren der hier geforderten Leistung im Bereich von 1 ... 10 mA liegt. Somit ist  $I_{R5}$  gegenüber  $I_{Lmax}$  zu vernachlässigen und man kann schreiben:

$$P_{tot} \approx (U_{ein} - U_{aus}) \cdot I_{Last\_max} = 6,7 \text{ W}$$

Ein geeigneter Transistor wäre z.B. der npn-Typ BD 135 mit:

$I_C = 1 \text{ A}$ ;  $B = 40 \dots 250$ ;  $P_{\text{tot}} = 8 \text{ W}$  (bei  $T_G \leq 70^\circ\text{C}$ ); bei  $P_{\text{tot}} = 6,7 \text{ W}$  darf die Gehäusetemperatur bis  $85^\circ\text{C}$  betragen;  $T_J = 150^\circ\text{C}$ ;  $R_{\text{thG}} = 10 \text{ K/W}$ ;  $R_{\text{thU}} = 100 \text{ K/W}$

Wird dieser Transistor nicht gekühlt, so ist der Wärmewiderstand  $R_{\text{thU}}$  anzusetzen. Bei einer Belastung von  $P = 6,7 \text{ W}$  ergibt sich eine Sperrsichttemperatur

$$T_J = P \cdot R_{\text{thU}} + T_U$$

Setzt man die Umgebungstemperatur mit  $40^\circ$  an, so ergibt sich eine Sperrsichttemperatur von  $710^\circ\text{C}$ , der Transistorkristall würde schmelzen! Der Transistor muss also gekühlt werden.

Bestimmen des Kühlkörpers:

Bei einer Umgebungstemperatur von  $40^\circ\text{C}$  und einer zugelassenen Gehäusetemperatur von  $80^\circ\text{C}$  beträgt die Temperaturdifferenz  $40\text{K}$ . Es wird also ein Kühlkörper gesucht, der einen maximalen Wärmewiderstand von

$$R_{\text{thG max}} = \frac{40 \text{ K}}{6,7 \text{ W}} = 5,97 \text{ K/W} \text{ besitzt.}$$

#### 4. Bestimmen des Vorlastwiderstandes $R_s$ :

$$R_s = \frac{U_{\text{aus}}}{I_{C \text{ min}}}$$

Der Wert von  $I_{C \text{ min}}$  ist in den Datenblättern nicht angegeben. Man kann dafür einfach einen mittleren Wert von ca.  $5 \text{ mA}$  ansetzen. Damit ergibt sich:

$$R_s = \frac{12 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = 2,4 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{gewählt: } 2,2 \text{ k}\Omega.$$

$$P = 12 \text{ V} \cdot 5 \text{ mA} = 60 \text{ mW}$$

#### 5. Bestimmen der Ströme $I_B$ und $I_Z$ :

$$I_{B \text{ max}} = \frac{(I_{Last\_max} + I_{R5})}{B} = \frac{505 \text{ mA}}{100} = 5 \text{ mA}$$

Der Querstrom durch  $R_1$  und die Z-Diode wird 3-mal so groß gewählt, wie  $I_B$ , also  $15 \text{ mA}$

$$\rightarrow I_{Z \text{ min}} = 15 \text{ mA}; \quad I_{Z \text{ max}} = 10 \cdot I_{Z \text{ min}} = 150 \text{ mA}$$

Die Leistung der Z-Diode wird damit:

$$P = U_Z \cdot I_{Z \text{ max}} = 1,9 \text{ W} \rightarrow \text{gewählt: Z-Diode mit } 12 \text{ V und } 2,5 \text{ W}$$

#### 6. Widerstand $R_1$ :

$$I_1 = I_{Z \text{ min}} + I_{B \text{ max}} = 15 \text{ mA} + 5 \text{ mA} = 20 \text{ mA}$$

$$R_1 = \frac{U_{ein} - U_Z}{I_1} = \frac{12,7V}{20mA} = 635\Omega \quad \rightarrow \text{gewählt: } 620\Omega$$

### 7. Widerstand $R_c$ (Arbeitsbereich bis $U_{CEmin} = 1V$ ):

$$I_{C\max} = I_{Last\_max} + I_{R5} = 500 \text{ mA} + 5 \text{ mA} = 505 \text{ mA}$$

$$R_C = \frac{U_{ein} - U_{aus} - U_{CE\ min}}{I_{C\ max}} = \frac{25,4V - 12V - 1V}{505mA} = 24,5\Omega \quad \rightarrow \text{gewählt: } 24\ \Omega \ (\text{E-24-Reihe})$$

$$P = (U_{ein} - U_{aus} - U_{CE \min}) \cdot I_{C \max} = 6,2W$$

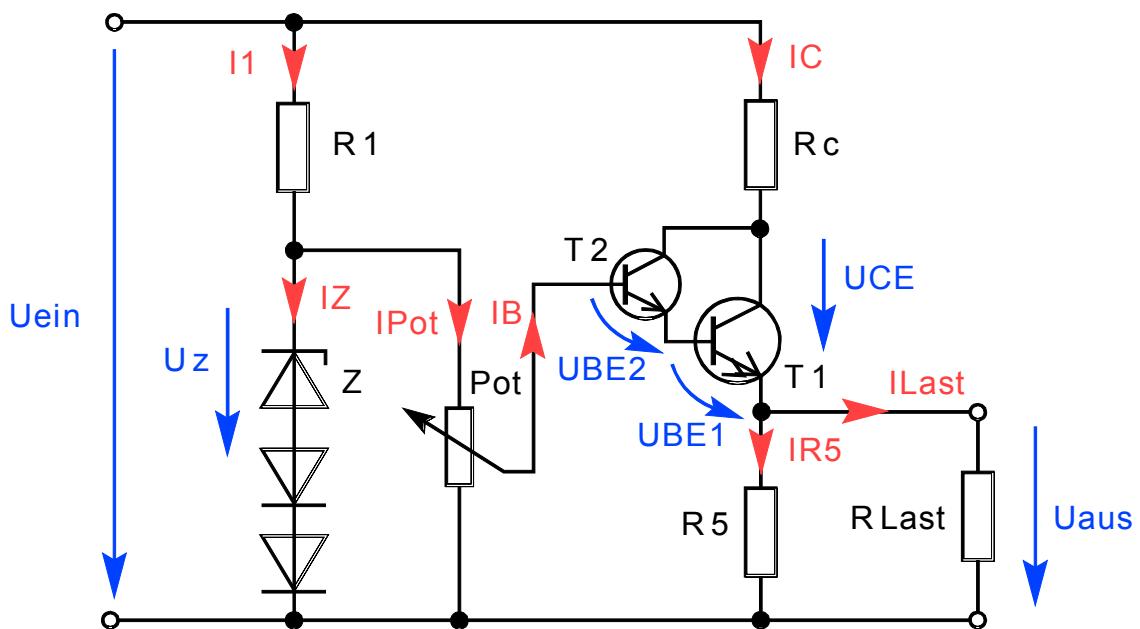
Aus diesem Berechnungsbeispiel kann man folgendes ablesen:

Einfache Kollektorschaltungen sind für hohe Ausgangsströme ungünstig, da Transistoren mit hoher Stromverstärkung ( $B = 200 \dots 500$ ) immer nur für kleine Leistungen (0,3 ... 1W) zur Verfügung stehen. Leistungstransistoren haben in der Regel aber relativ kleine Stromverstärkungen ( $B = 20 \dots 200$ ). Daher ist es günstiger, den Basisstrom einem vorgesetzten Transistor zu entnehmen, also ein Darlingtonsschaltung anzuwenden.

Zu beachten ist dabei, dass die Ausgangsspannung um 2 Basis–Emitter–Spannungen kleiner wird als die Z–Diodenspannung. Auch werden hier zusätzlich die Temperaturkoeffizienten der beiden Transistoren wirksam, so dass sinnvollerweise mit 2 Si–Diode kompensiert wird.

Diese Überlegungen sollen bei dem folgenden Berechnungsbeispiel berücksichtigt werden:

## Berechnungsbeispiel 2:



Wie Sie sehen, kommt diese Schaltung unserem Netzgerät schon sehr nahe. Entsprechend sollen auch die Werte bestimmt werden:

Experimenternetzgerät mit:  $U_A = 0 \dots 12 \text{ V}$ ;  $I_{L\max} = 1 \text{ A}$

Das kontinuierliche Einstellen der Ausgangsspannung wird durch ein Potentiometer erzeugt, das der Z-Diode parallel geschaltet ist.

### 1. Spannung der Z-Diode:

Die stabilisierte Steuerspannung wird hier von der Z-Diode und zwei Siliziumdioden gebildet.

$$U_Z = U_{aus} + U_{BE1} + U_{BE2} - U_{D1} - U_{D2} = 12V + 1,4V - 1,4V = 12V$$

Es wird eine Z-Diode von 12 V gewählt, die Dioden zur Temperaturkompensation sind „normale“ Dioden

### 2. Eingangsspannung:

Die Eingangsspannung wird, um einen günstigen Arbeitspunkt für die Spannungsstabilisierung zu bekommen, auf die doppelte Steuerspannung eingestellt:

$$U_{ein} = 2 \cdot (U_Z + 2 \cdot U_D) = 26,8V$$

### 3. Transistor T<sub>1</sub>:

Transistor T<sub>1</sub> und Kühlkörper müssen für eine Maximalleistung von

$$P_{tot} \approx (U_{ein} - U_{aus}) \cdot (I_{L\max} + I_{R5}) \quad \text{ausgelegt sein.}$$

Der Wert von I<sub>R5</sub> (bzw. I<sub>Cmin</sub>) wird hier, da es sich um einen Leistungstransistor handelt, auf 10 mA festgelegt.

Da die Ausgangsspannung bei dieser Schaltung bis auf Null gestellt werden kann, gilt hier:

$$P_{tot} \approx U_{ein} \cdot (I_{L\max} + I_{R5}) = 26,8V \cdot (1A + 10mA) = 27W$$

Gewählt wird der Transistor 2N3055 mit folgenden Daten:

I<sub>C</sub> = 15 A; B = 20 ... 70; P<sub>tot</sub> = 115 W; T<sub>J</sub> = 200 °C; R<sub>thG</sub> = 1,5 K/W; U<sub>CEsat</sub> = 1,1 V. Bei 150°C Sperrsichttemperatur kann dieser Transistor immer noch 30 W Verlustleistung aufnehmen. Daraus ergibt sich die Gehäusetemperatur zu:

$$T_G = T_J - P \cdot R_{thG} = 150^\circ C - 27W \cdot 1,5K/W = 109,5^\circ C$$

Nimmt man die Umgebungstemperatur mit 40°C an, so beträgt die Temperaturdifferenz ca. 70 K. Es wird also ein Kühlkörper gesucht, der einen maximalen Wärmewiderstand von

$$R_{thG\ max} = \frac{70K}{27W} = 2,6K/W \quad \text{hat.}$$

### 4. Bestimmen des Vorlastwiderstandes R<sub>5</sub>:

Der Wert von I<sub>Cmin</sub> ist für den Transistor 2N3055 in den Datenblättern nicht angegeben. Er wird hier, da es sich um einen Leistungstransistor handelt, auf 10 mA festgelegt.

$$R_5 = \frac{U_{aus}}{I_{C\min}} = \frac{12V}{10mA} = 1,2k\Omega$$

$$P = U_{aus} \cdot I_{C\min} = 12V \cdot 10mA = 120mW$$

### 5. Transistor T<sub>2</sub>:

Er muss bei Voll-Last etwa

$$\frac{I_C}{B} = \frac{1A}{50} = 20mA$$

in die Basis von T<sub>1</sub> liefern. Der Gleichstromverstärkungsfaktor B gilt hier für den Transistor T<sub>1</sub>, die 20 mA sind der Basisstrom für den Transistor T<sub>1</sub>. Wenn T<sub>2</sub> eine große Stromverstärkung hat, werden Z-Diode und Potentiometer praktisch nicht belastet. Hier gibt es eine große Spannweite von möglichen, geeigneten Transistoren, z.B. BC107B mit:

$$I_C = 100mA; B = 290; P_{tot} = 300mW$$

Damit ergibt sich für T<sub>2</sub> ein maximaler Basisstrom von

$$I_B = \frac{20mA}{290} = 69\mu A = 0,069mA$$

Diesen Wert kann man in der weiteren Rechnung vernachlässigen, d.h. der Spannungsteiler von R<sub>1</sub> und der Z-Diode bzw. Z-Diode // Poti wird dadurch praktisch nicht belastet. Man kann hier also eine Z-Diode von z.B. 400 mW wählen. Bei 12 V ergibt sich ein I<sub>Zmin</sub> von 2 mA (Datenbuch).

### 6. Widerstand R<sub>1</sub>:

Wenn man das Potentiometer mit 10 kΩ bemisst, dann nimmt es einen Strom von

$$I_{Pot} = \frac{13,4V}{10k\Omega} = 1,3mA \text{ auf. Durch } R_1 \text{ fließen damit also insgesamt:}$$

$$I_{Zmin} + I_{Pot} = 3,3mA$$

Damit ergibt sich für R<sub>1</sub>:

$$R_1 = \frac{U_{ein} - U_Z - 2 \cdot U_D}{3,3mA} = \frac{13,4V}{3,3mA} = 4k\Omega$$

### 7. Widerstand R<sub>c</sub>:

$$I_{C\max} = I_{Last\_max} + I_{R5} = 1A + 10mA = 1,01A$$

$$R_C = \frac{U_{ein} - U_{aus} - U_{CE\min}}{I_{C\max}} = \frac{26,8V - 12V - 1,1V}{1,01A} = 13,6\Omega \quad \rightarrow \text{gewählt: } 13\Omega \text{ (E-24-Reihe)}$$

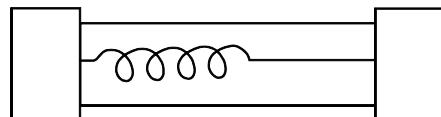
$$P = (U_{ein} - U_{aus} - U_{CE\min}) \cdot I_{C\max} = 13,8W$$

Dieser Schutzwiderstand wird in der endgültigen Schaltung durch eine Kurzschluss-Sicherung ersetzt.

## 5. Funktion: Sichern des Netzgeräts gegen Kurzschlüsse

### Schmelzsicherungen, Gerätesicherungen

Die Form und die Werte der Gerätesicherungen sind nach DIN 41571 genormt:



Diese Sicherungen haben einen Aufdruck folgender Art:

M – 0,125/250

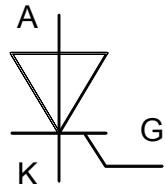
Dies muss man so lesen: M = mittelträge; 0,125 = 125 mA; 250 = 250 V

Gebräuchliche Werte der Stromstärken, die abgesichert werden können:

Wert (mA)	Abschaltung	Wert (A)	Abschaltung
32	M	0,4	F, M, T
50	M	0,5	F, M, T
63	M	0,63	F, M, T
80	M, T	0,8	F, M, T
100	F, M, T	1	F, M, T
125	F, M, T	1,25	F, M, T
160	F, M, T	1,6	F, M, T
200	F, M, T	2	F, M, T
250	F, M, T	2,5	F, M, T
315	F, M, T	4	F, M, T
		6,3	F, M, T

### Kurzschluss–Sicherung mit Thyristor:

Die oben erarbeitete Kurzschluss–Sicherung mit Transistor arbeitet so, dass sie bei gefährlich großen Strömen diese nicht abschaltet, sondern nur begrenzt. Soll eine solche Abschaltung erfolgen, kann man einen Thyristor einsetzen.

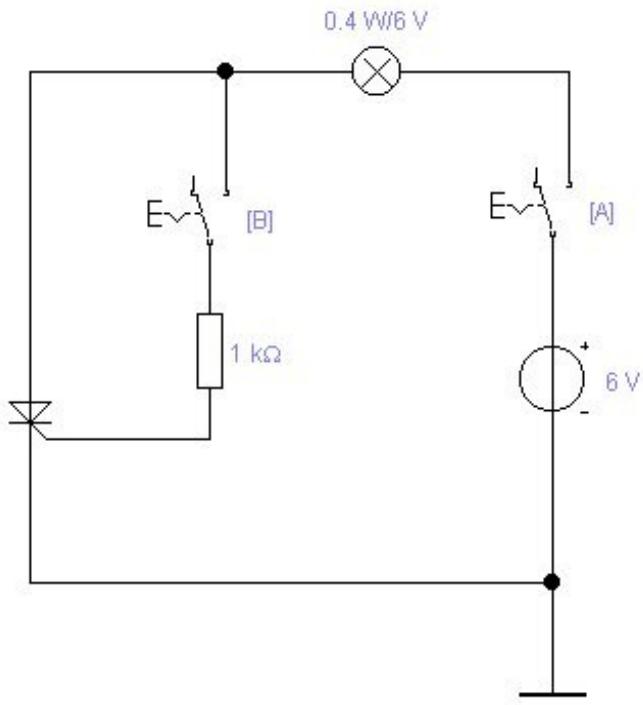


Wie man sieht, ist das Schaltbild von einer Diode abgeleitet. Ein Thyristor ist auch eine Art Diode, die allerdings aus 4 Halbleiterschichten besteht ( $p-n-p-n$ ), die zusätzlich mit einem Steueranschluss versehen sind. Ähnlich wie eine Diode kann ein Thyristor nur leiten oder sperren, allerdings hängt der Übergang in den leitenden Zustand bei ihm nicht von der Spannungsrichtung ab, sondern wird über den Steueranschluss G (vom englischen Gate = Gitter) gesteuert, er ist also ein elektronischer Schalter. Bei A (Anode) wird der positive Pol der Spannung angelegt, bei K (Kathode) der negative. Der Steueranschluss G muss positiv gegen K sein.

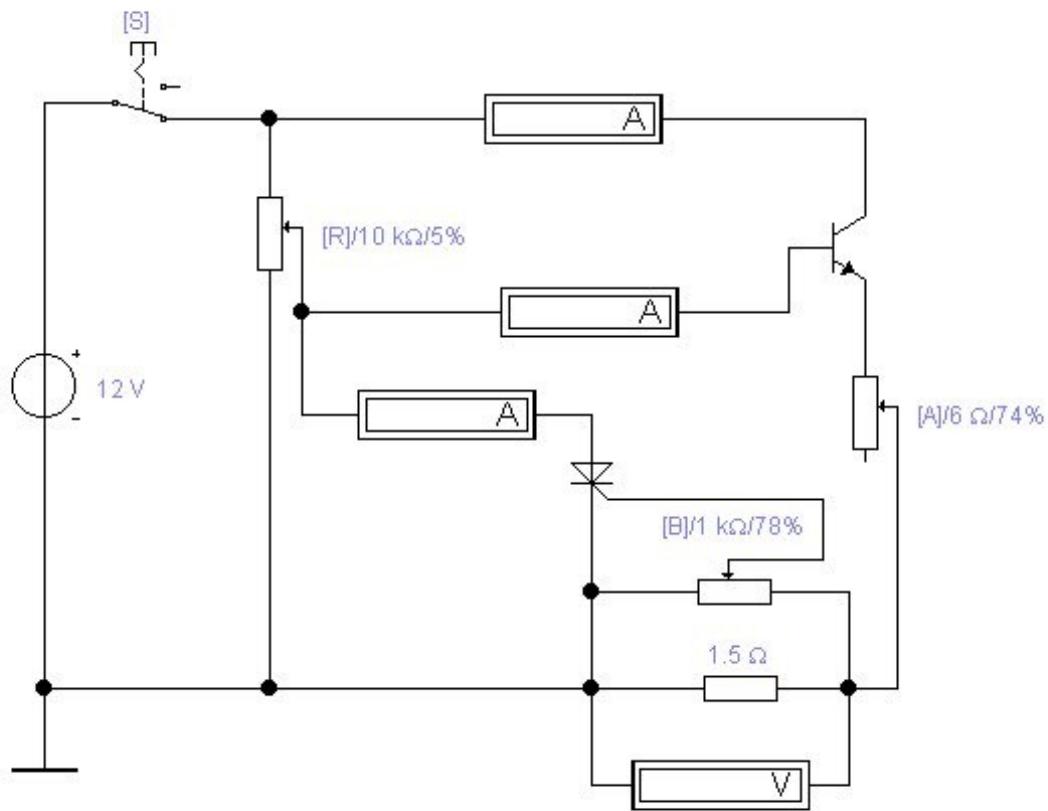
Ähnlich wie beim Transistor muss auch beim Thyristor eine bestimmte Schaltspannung an der Steuerelektrode G anliegen und es muss ein bestimmter Mindeststrom fließen, damit er durchschalten kann. Zum Abschalten des Thyristors genügt es allerdings nicht, nur die Steuerspannung auf Null zu setzen. Man muss vielmehr dafür sorgen, dass die Gesamtspannung abgeschaltet wird, damit der Thyristor wieder in seinen Grundzustand zurückkehren kann.



Um dieses Verhalten zu verstehen, bauen Sie mit EWB folgende Schaltung auf:



- Untersuchen** Sie die Schaltung, indem Sie nacheinander den Schalter A schließen und dann B. Was geschieht, wenn Sie jetzt B wieder öffnen? Wie können Sie den Thyristor wieder sperren?
- Eine elektronische Sicherung mit Thyristor für das Netzgerät könnte also folgendermaßen aussehen.



**Untersuchen** Sie die Funktionsweise der Schaltung genau. Der Schalter S ist zum Abschalten der Gesamtspannung vorgesehen, um den Thyristor wieder in den Grundzustand zu bringen. Das Poti B ist bereits so eingestellt, dass es die richtige Steuerspannung für den Thyristor liefert, um bei Überschreiten der Stromstärke von 1 A abzuschalten. Setzen Sie die Schaltung in Betrieb und verkleinern Sie Schritt für Schritt (Schritt 2%) den Wert des Poti A.

## Berechnung des vollständigen Netzgeräts:



Die Schaltung des vollständigen Netzgeräts ist angegeben im: Erarbeitungsteil: 5. Funktion: Sichern des Netzgeräts gegen Kurzschlüsse; Ergebnis

### Anforderungen:

Experimentiergerät mit:  $U_{A1} = 0 \dots 15 \text{ V}$ ;  $U_{A2} = 5 \text{ V}$  Festspannung;  $I_{L\max} = 1 \text{ A}$

#### 1. Spannungen der beiden Z-Dioden:

- a) Die beiden temperaturstabilisierenden Dioden werden zunächst in die Z-Spannung hineingerechnet:

$$U_{Z2} = U_{aus} + U_{BE1} + U_{BE2} + U_{R4} = 15V + 1,4V + 1V = 17,4V$$

Es wird eine Z-Diode von 16 V gewählt, die Dioden zur Temperaturkompensation sind „normale“ Si-Dioden.

- b): Dies ist die Z-Diode für die stabilisierte Ausgangsspannung (Festspannung) von 5 V.

$$U_{Z1} = U_{aus} + U_{BE1} + U_{BE2} = 5V + 1,4V = 6,4V$$

Vielleicht sind Sie verwirrt, weil in diesem Fall der Spannungsabfall über dem Sensorwiderstand  $R_4$  nicht berücksichtigt wurde. Dies hat einen einfachen Grund: Die Festspannung von 5 V ist für Anwendungen in der Digitaltechnik vorgesehen und dabei sind die Ströme in den Schaltungen minimal, sie bewegen sich im mA-Bereich. Wenn man in diesem Fall also den Spannungsabfall an  $R_4$  in voller Höhe berücksichtigt, dann erhält man eine um 1 V zu große Festspannung.

→ gewählt: Z-Diode von 6,2 V

#### 2. Spannung über dem Kondensator:

Dies ist für die Z-Diodenschaltung die Eingangsspannung. Sie wird, um einen günstigen Arbeitspunkt für die Spannungsstabilisierung zu bekommen, auf die Spannung der Z-Diode 2 eingestellt:

$$U_C = 2 \cdot (U_{Z2} + 2 \cdot U_D) = 34,8V$$

Diese Spannung ist gleichzeitig der Gleichspannungsanteil der gleichgerichteten und geglätteten Sekundärspannung des Trafos.



Siehe dazu: Übungs- und Vertiefungsteil: 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung; Berechnung einer Brücken-Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensa-

tor; Schaltung mit Belastung (S. 122). Dieser Gleichspannungsanteil wird dort mit  $U_{A-}$  bezeichnet.

### 3. Diodenstrom $I_D$ (Ladestrom):

$$I_D = 1,2 \cdot I_{L\max} = 1,2A$$



Siehe dazu: Übungs- und Vertiefungsteil: 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung; Berechnung einer Brücken-Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator; Schaltung mit Belastung (S. 123).

### 4. Sekundärspannung des Transfomers $U_S$ ( $U_{eff}$ ):

$$U_S = \frac{U_{A-} + 2 \cdot U_D}{\sqrt{2}} = \frac{348V + 1,4V}{1,4} = 256V = 26V$$



Siehe dazu: Übungs- und Vertiefungsteil: 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung; Berechnung einer Brücken-Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator; (S. 122).

### 5. Sperrspannung der Gleichrichterdiode:

$$U_{Sp} \geq U_S \cdot \sqrt{2} \cdot 1,5 = 55,2V$$



Siehe dazu: Übungs- und Vertiefungsteil: 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung; Berechnung einer Brücken-Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator; (S. 122).

Gleichrichter-Dioden gewählt: 1N5392 (Datenblatt). Man kann statt 4 Gleichrichterdioden natürlich auch gleich eine komplette Gleichrichterbrücke einbauen, die dieselben Werte aufweist: 1,2 A Diodenstrom und mindestens 55 V Diodensperrspannung.

### 6. Ladekondensator C:

$$U_{BR} = 5\% \text{ von } U_+ = 1,74V$$

Dies ist die erlaubte Größe der Brummspannung; dieser Wert wird normalerweise vorgegeben und danach die Größe des Kondensators berechnet.

$$C_L = \frac{1,7 \cdot I_{Last} (mA)}{U_{Br}} = \frac{1,7 \cdot 1000mA}{1,74V} = 977 \mu F$$



Siehe dazu: Übungs- und Vertiefungsteil: 3. Funktion: Glätten der pulsierenden Gleichspannung; Berechnung einer Brücken-Gleichrichterschaltung mit Glättungskondensator; (S. 123).

→ gewählt: Kondensator mit  $1000 \mu\text{F}$  und einer Spannungsfestigkeit > 35V.

## 7. Transformator:

Die Sekundärspannung ( $U_{\text{eff}}$ ) wurde oben bereits bestimmt:

$$U_S = U_{\text{eff}} = 26 \text{ V}$$

Sekundärstrom:

$$I_S = I_{\text{Last}} \cdot 1,2 = 1,2A$$

→ Transformator sekundär absichern mit 1,25 A-Schmelzsicherung

Es gilt:

$$\frac{U_S}{U_P} = \frac{I_P}{I_S}$$

Daraus ergibt sich:

$$I_P = I_S \cdot \frac{U_S}{U_P} = 1,2A \cdot \frac{26V}{230V} = 0,135A$$

→ Transformator primär absichern mit 0,2 A-Schmelzsicherung

Leistung des Transformators:

$$P_S = I_S \cdot (U_S + 2 \cdot U_D) \cdot 1,1 = 1,2A \cdot (26V + 1,4V) \cdot 1,1 = 36,2W$$

## 8. Transistor T<sub>1</sub> und Kühlkörper:

Transistor T<sub>1</sub> und Kühlkörper müssen für eine Maximalleistung von

$$P_{\text{tot}} \approx (U_C - U_{\text{aus}} - U_{R4}) \cdot (I_{L\max} + I_{R5}) \quad \text{ausgelegt sein.}$$

Der Wert von I<sub>R5</sub> (bzw. I<sub>Cmin</sub>) wird hier, da es sich um einen Leistungstransistor handelt, auf 10 mA festgelegt.

Da die Ausgangsspannung bei dieser Schaltung bis auf Null gestellt werden kann, gilt hier:

$$P_{\text{tot}} \approx (U_C - U_{R4}) \cdot (I_{L\max} + I_{R5}) = 33,8V \cdot (1A + 10mA) = 34,2W$$

Gewählt wird der Transistor 2N3055 mit folgenden Daten:

$I_C = 15 \text{ A}$ ;  $B = 20 \dots 70$ ;  $P_{\text{tot}} = 115 \text{ W}$ ;  $T_J = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $R_{\text{thG}} = 1,5 \text{ K/W}$ ;  $U_{\text{CEsat}} = 1,1 \text{ V}$ . Beim Umsetzen von 35W entsteht eine Sperrsichttemperatur von  $145 \text{ }^\circ\text{C}$ . Daraus ergibt sich die Gehäusetemperatur zu:

$$T_G = T_J - P \cdot R_{\text{thG}} = 145 \text{ }^\circ\text{C} - 35 \text{ W} \cdot 1,5 \text{ K/W} = 92,5 \text{ }^\circ\text{C} = 93 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nimmt man die Umgebungstemperatur mit  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  an, so beträgt die Temperaturdifferenz ca. 63 K. Es wird also ein Kühlkörper gesucht, der einen maximalen Wärmewiderstand von

$$R_{\text{thG max}} = \frac{63 \text{ K}}{35 \text{ W}} = 1,8 \text{ K/W} \quad \text{hat.}$$

→ gewählt: Kühlkörper mit 1,8 K/W.

## 9. Bestimmen des Vorlastwiderstandes $R_5$ :

Der Wert von  $I_{C\min}$  ist für den Transistor 2N3055 in den Datenblättern nicht angegeben. Er wird hier, da es sich um einen Leistungstransistor handelt, auf 10 mA festgelegt.

$$R_5 = \frac{U_{\text{aus}}}{I_{C\min}} = \frac{15 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$P = U_{\text{aus}} \cdot I_{C\min} = 15 \text{ V} \cdot 10 \text{ mA} = 150 \text{ mW}$$

→ gewählt: Widerstand mit 1,5 kΩ und 250 mW.

## 10. Transistor $T_2$ :

Er muss bei Voll–Last etwa

$$\frac{I_C}{B} = \frac{1 \text{ A}}{50} = 20 \text{ mA}$$

in die Basis von  $T_1$  liefern. Der Gleichstromverstärkungsfaktor B gilt hier für den Transistor  $T_1$ , die 20 mA sind der Basisstrom für den Transistor  $T_1$ . Wenn  $T_2$  eine große Stromverstärkung hat, werden Z–Diode und Potentiometer praktisch nicht belastet.

Zur Auswahl muss zuerst die umgesetzte Leistung bestimmt werden:

$$P_{\text{tot}} = (U_C - U_{BE} - U_{R4}) \cdot I_{C2} = 0,662 \text{ W}$$

Hierfür eignet sich z.B. der Transistor BC 140/16 mit:

$I_C = 1 \text{ A}$ ;  $P_{\text{tot}} = 750 \text{ mW}$  (ungekühlt) bei  $T_U \leq 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $B = 100 \dots 250$ ;  $T_J = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $R_{\text{thU}} = 200 \text{ K/W}$ .

Für die errechnete Leistung und eine angenommene Umgebungstemperatur von  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  ergibt sich die Sperrsichttemperatur zu:

$$T_J = R_{thU} \cdot P_{tot} + T_U = 200 \text{ K/W} \cdot 0,662 \text{ W} + 40 \text{ K} = 172,4^\circ\text{C}$$

Dies bedeutet, dass der Transistor ungekühlt verwendet werden kann.

Damit ergibt sich für  $T_2$  ein maximaler Basisstrom von

$$I_B = \frac{20 \text{ mA}}{150} = 0,13 \text{ mA}$$

Diesen Wert kann man in der weiteren Rechnung vernachlässigen, d.h. der Spannungsteiler von  $R_1$  und der Z-Diode bzw. Z-Diode // Poti wird dadurch praktisch nicht belastet. Man kann hier also eine Z-Diode von z.B. 500 mW wählen. Bei einer Z-Diode mit 16 V ergibt sich ein  $I_{Zmin}$  von 3,1 mA.



Siehe dazu: Übungs- und Vertiefungsteil: 4. Funktion: Stabilisieren der Ausgangsspannung; Stabilisieren mit Z-Diode; Berechnung der Vorwiderstände für Z-Dioden (S. 135).

## 11. Potentiometer, Widerstände $R_1$ und $R_2$ :

Wenn man das Potentiometer mit 10 kΩ bemisst, dann nimmt es einen Strom von

$$I_{Pot} = \frac{17,4 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 1,7 \text{ mA auf.}$$

$R_2$ :

Bei einer gewählten Leistung von 500 mW ergeben sich folgende Ströme für die Z-Diode 2:

$$I_{Z2max} = \frac{P}{U_{Z2}} = \frac{500 \text{ mW}}{16 \text{ V}} = 31,25 \text{ mA}$$

$$I_{Z2min} = 0,1 \cdot I_{Z2max} = 3,1 \text{ mA}$$

$$I_{Z2mittel} = \frac{(I_{Z2max} + I_{Z2min})}{2} = 17,2 \text{ mA}$$

→ die in Reihe geschalteten Siliziumdioden sind also unkritisch: man wählt einen Universaltyp mit 100 mA, z.B. 1N4148.

Durch  $R_2$  fließen also im Mittel:  $I_{Zmittel} + I_{Pot} = 18,9 \text{ mA}$ , also 19 mA.

Damit ergibt sich für  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{(U_C - U_{Z2} - 2 \cdot U_D)}{19 \text{ mA}} = 916 \Omega$$

$$P = (U_C - U_{Z2} - 2 \cdot U_D) \cdot 19 \text{ mA} = 0,33 \text{ W}$$

→ gewählt: 1 kΩ (1/2 Watt)

**R<sub>1</sub>:**

Bei einer gewählten Leistung von 500 mW ergeben sich folgende Ströme für die Z–Diode 1:

$$I_{Z1\max} = \frac{P}{U_{Z1}} = \frac{500 \text{ mW}}{6,2V} = 80,6 \text{ mA}$$

$$I_{Z2\min} = 0,1 \cdot I_{Z2\max} = 8 \text{ mA}$$

$$I_{Z2\text{mittel}} = \frac{(I_{Z2\max} + I_{Z2\min})}{2} = 44,3 \text{ mA}$$

Durch R<sub>2</sub> fließen also im Mittel: I<sub>Zmittel</sub> + I<sub>Pot</sub> = 18,9 mA, also 19 mA.

Damit ergibt sich für R<sub>1</sub>:

$$R_1 = \frac{(U_C - U_{Z1})}{44,3 \text{ mA}} = 646 \Omega$$

$$P = (U_C - U_{Z1}) \cdot 44,3 \text{ mA} = 1,27 \text{ W}$$

→ gewählt: 680 Ω (2 Watt)

## 12. Kurzschluss–Sicherung:

Transistor T<sub>3</sub>: die Auswahl dieses Transistors ist unkritisch, da er nur sehr kleine Ströme „verkraften“ muss und keine besonderen Anforderungen an ihn gestellt werden.

→ gewählt: Universaltyp BC 548 mit I<sub>C</sub> = 100 mA; P<sub>tot</sub> = 0,5 W; B = 75 ... 900 (mittlerer Wert: B = 500).

Um den Kurzschlussstrom mit dem Potentiometer bequem einstellen zu können, wird der Spannungsabfall an R<sub>4</sub> mit 1 V gewählt. Damit bei 1 A ein Spannungsabfall von 1 V entsteht, muss R<sub>4</sub> 1 Ohm, 1 W haben.

Das **Potentiometer** zum Einstellen des Kurzschlussstroms ist ebenfalls unkritisch; man nimmt einen Wert zwischen 1 ... 2,4 kΩ.

Auch R<sub>3</sub> ist unkritisch, da der Spannungsabfall, bei dem T3 öffnen soll, mit dem Potentiometer genau eingestellt werden kann. Wählt man R<sub>3</sub> mit 2,2 kΩ, so ergibt sich bei einer Steuerspannung von 0,7 Volt ein Basisstrom von 0,32 mA.

Liste der benötigten Bauteile:

- **Gehäuse:** entweder ein Metall– oder ein Kunststoffgehäuse in ausreichender Größe.
- **Netzanschluss** (Netzkabel mit Zugentlastung; bei einem Metallgehäuse: 3–adriges Netz–kabel mit Schukostecker; bei einem Kunststoffgehäuse reicht ein 2–adriges Kabel mit Euro–Stecker)
- **Hauptschalter:** Ein–Aus; **2–polig**, für 230 V; (wenn gewünscht mit eingebautem Glimmlämpchen als Anzeige)
- **Sicherungshalter:** Für die **Primärsicherung** sollte auf jeden Fall ein Sicherungshalter zum Einbau ins Gehäuse gewählt werden. Damit ist die Sicherung mit ihrer hohen Spannung weit weg von der Platine, außerdem kann man sie bequem auswechseln, ohne das Gehäuse öffnen zu müssen. Für die **Sekundärsicherung** kann sowohl ein Sicherungshalter zum Einbau ins Gehäuse, als auch Sicherungsclipse zum Auflöten auf die Platine gewählt werden.
- **Schalter S<sub>2</sub>** zum Umschalten von der Festspannung auf die einstellbare Spannung: Typ: Einbau ins Gehäuse, 1xUm (Hebel zum Umschalten)
- **Buchsen:** 4–mm–Buchsen zum Abnehmen der Ausgangsspannung; am besten in den Farben rot und blau.
- (Transformator: Sekundärspannung: 24 V; Sekundärstrom: 1,2 A (wird vom Fach gestellt))
- **Gleichrichterdioden:** 4 x 1N5392 . Man kann statt der 4 Gleichrichterdioden natürlich auch gleich eine komplette Gleichrichterbrücke einbauen, die dieselben Werte aufweist: 1,2 A Diodenstrom und mindestens 55 V Diodensperrspannung.
- **Kondensator:** 1000 µF; Spannungsfestigkeit > 35V.
- **Z–Dioden:** Z<sub>1</sub>: Z–Diode mit 6,2 Volt, 500 mW; Z<sub>2</sub>: Z–Diode mit 16 V, 500 mW.
- **Siliziumdioden** zur Temperaturkompensation: 2 x 1N4148.
- **Transistoren:** T<sub>1</sub>: 2N3055 mit Einbauset (Glimmerscheibe, Kunststoffdurchführungen, Schräubchen); T<sub>2</sub>: BC 140/16; T<sub>3</sub>: BC 548 (oder ein Vergleichstyp)
- **Kühlkörper** für T<sub>1</sub>: 1,8 K/W.
- **Widerstände:** R<sub>1</sub>: 680 Ω (2 Watt); R<sub>2</sub>: 1 kΩ (1/2 Watt); R<sub>3</sub>: 2,2 kΩ (1/4 Watt); R<sub>4</sub>: 1 Ω (1 Watt); R<sub>5</sub>: 1,5 kΩ (1/4 Watt); Potentiometer Pot (zum Einstellen der Ausgangsspannung, zum Einbau ins Gehäuse): 10 kΩ (1/4 Watt), dazu passender Drehknopf; Potentiometer/Trimmer P (zum Einstellen des Kurzschlussstroms): ein Wert zwischen 1 ... 2,4 kΩ (am besten große Ausführung, liegender Einbau, Printausführung)
- **Platine:** einseitig beschichtet, Europa–Format (entweder Pertinax oder Epoxidharz als Trägermaterial; zum Fräsen mit KOSY: besser Pertinax)
- Lötstifte und passende Steckschuhe: ca: 15, 1,3 mm.
- Wer möchte, kann sich natürlich ein Einbau–Voltmeter für 15 V besorgen und einbauen.

## SYSTEMATISCHER TEIL

### Begriff: Elektronik

Die Elektronik ist sicher der interessanteste, vielseitigste und am raschesten sich ausweiten-de Bereich der Elektrotechnik. Ihre enorme Bedeutung ergibt sich daraus, daß sie kein in sich abgeschlossenes Gebiet geblieben ist, sondern in die unterschiedlichsten technischen Bereiche vorgedrungen ist und diese revolutioniert hat, angefangen bei der Rechentechnik, über die Steuerungs- und Regelungstechnik, bis hinein in so "elektronikferne Bereiche" wie etwa die Maschinentechnik, die Produktionstechnik, die Verwaltung oder die Medizin usw.

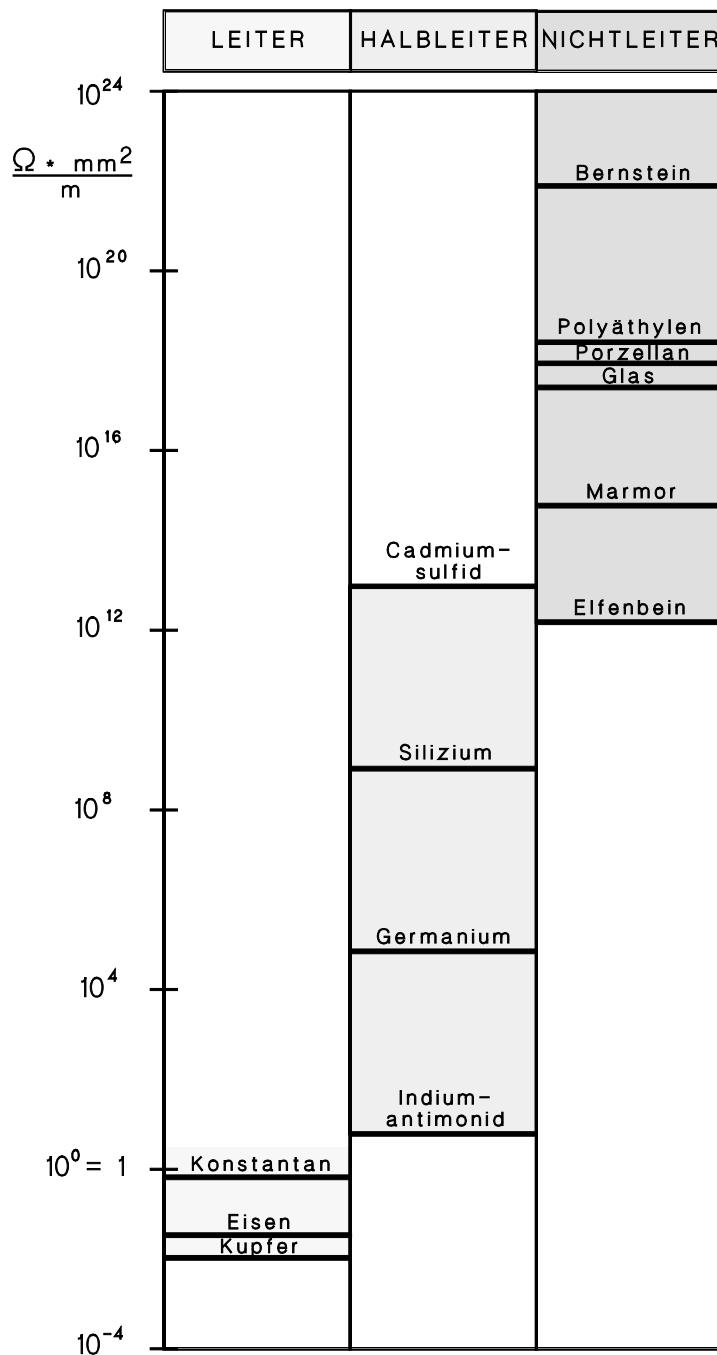
Der Name **Elektronik** wurde Anfang unseres Jahrhunderts von Physikern geprägt, um den Bereich der **elektrischen Erscheinungen außerhalb von metallischen Leitern** zu bezeichnen, also z.B. Elektronenemission aus glühenden Drähten, Leuchterscheinungen in gasgefüllten Röhren, Ablenkung frei fliegender Elektronen durch Magnetfelder usw. Mit dem Aufkommen der Rundfunktechnik weitete sich der Begriff auf die in vielfältigen Formen angewendete **Radioröhre** aus, die vor allem zur Verstärkung schwacher elektrischer Signale diente. Als dann aus dem Kristalldetektor (einem Bleiglanzkristall) der Transistor entwickelt worden war, wurden der Elektronik die Leitvorgänge in den so genannten **Halbleiterkristallen** und den aus ihnen gefertigten Bauelementen hinzugefügt. Dieser Bereich entfaltete durch ein hervorragendes Preis–Leistungsverhältnis, durch die Entwicklung von immer besser angepaßten Bauelementen, durch vielfältig einsetzbare Schaltungen und durch eine immer weiter fortschreitende Miniaturisierung eine solche Dynamik, daß er innerhalb weniger Jahrzehnte die Röhren praktisch völlig verdrängt hat.

Heute ist der Begriff Elektronik bereits zu einem **Schlagwort** geworden, das für Fortschritt, schier ungeahnte Möglichkeiten technischer Entwicklungen und für Bequemlichkeit beim Anwender steht und mit dem auch entsprechend geworben wird.

Angesichts der **enormen Bedeutung der Elektronik in unserer Gesellschaft** ist es heute unbedingt erforderlich, sich bereits in der allgemeinbildenden Schule mit ihr angemessen auseinanderzusetzen. Das Wort "angemessen" bedeutet hier jedoch nicht, daß man sich in physikalischen Details über komplizierte Leitvorgänge, Fermi–Niveaus oder den genauen Aufbau bestimmter Bauelemente verlieren müsste, sondern es bedeutet, daß man die (wichtigsten) Eigenschaften der grundlegenden Bauelemente kennt und ihre Funktionsweise in so genannten Grundschatungen kennenlernt. Es geht also nicht um Spezialistenwissen sondern um ein grundsätzliches, allgemeines Verständnis. Aus diesem Grunde habe ich, wo immer es möglich war, auf Darstellungen der Kristallstruktur von Halbleitern und den genauen Aufbau der Bauelemente verzichtet und das **Verfahren der analogen Beschreibung der Bauelementfunktionen** angewendet.

Moderne Elektronik gliedert sich in zwei große Bereiche, in die Analog– und in die Digital–Elektronik. Hier soll nur die analoge Elektronik (in wenigen Auszügen) behandelt werden.

## Materialien der Elektronik

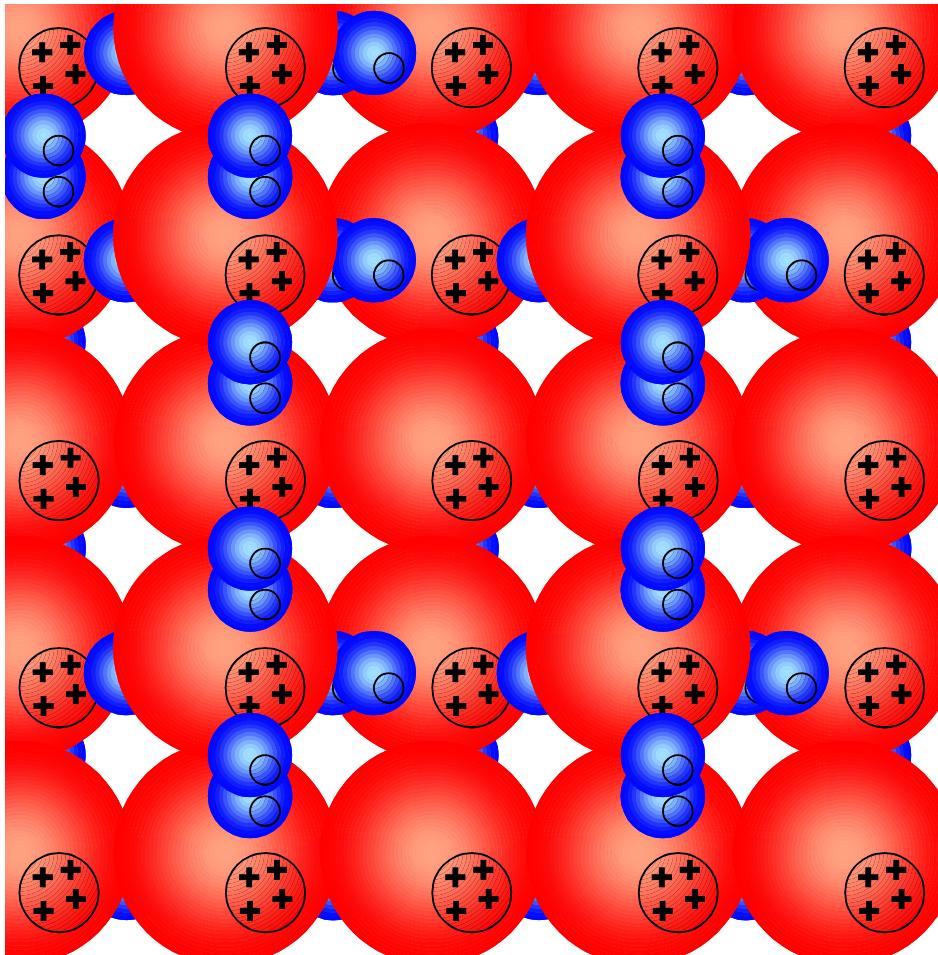


LEITER	HALBLEITER	NICHTLEITER
Kupfer: 0.017	Germanium: $7 \cdot 10^5$	Glas: $10^{15} \dots 10^{19}$
Eisen: 0.1	Silizium: $6 \cdot 10^9$	Porzellan: $5 \cdot 10^{18}$
Konstantan: 0.5		Bernstein > $10^{22}$

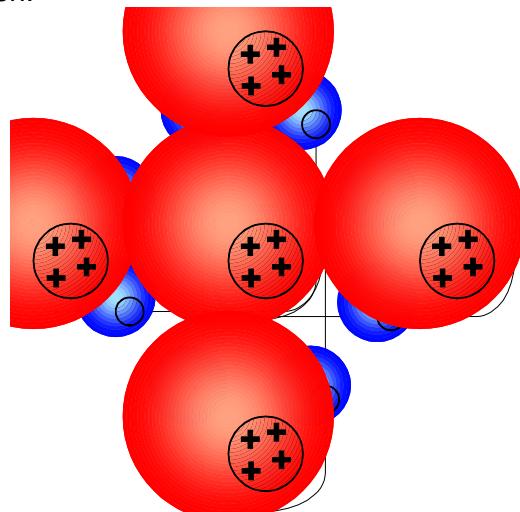
In dieser Abbildung sind zwischen den Leiterwerkstoffen und den Isolatoren die sogenannten "Halbleiter" dargestellt. Sie sind die wichtigsten Materialien, aus denen elektronische Bauelemente gefertigt werden. Ihren Namen haben sie erhalten, weil sie in ihrer spezifischen Leitfähig-

higkeit zwischen den Leitern und den Isolatoren liegen. Ihre **hervorragende technische Bedeutung** liegt aber darin, daß sie **eine Reihe spezieller Eigenschaften** besitzen, die man über weite Grenzen technisch manipulieren und nutzen kann:

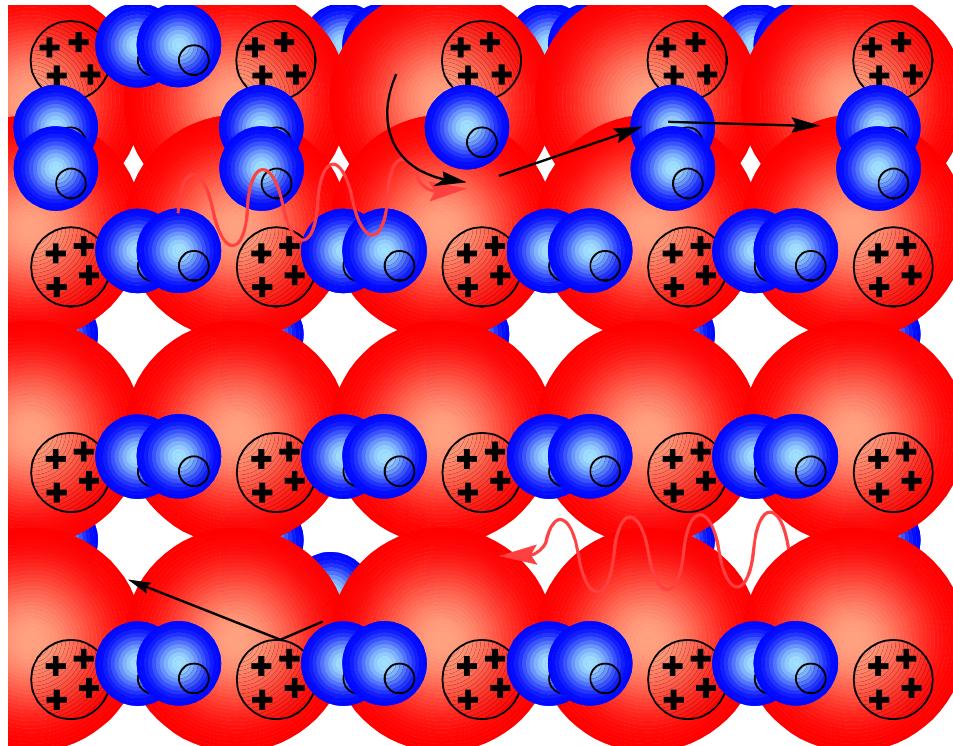
- Durch ihre spezielle Form des Kristallaufbaus, der **Valenzbindung** sind bei den Halbleitern immer **zwei Sorten von Ladungsträgern** am Leitungsmechanismus beteiligt.



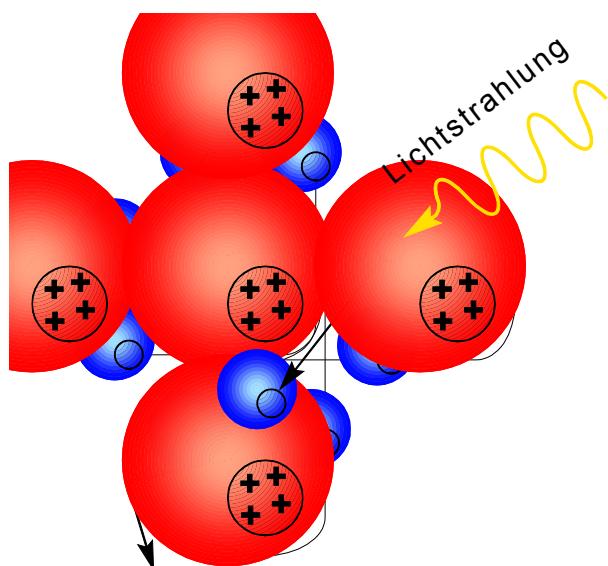
Diese Abbildung zeigt ein völlig reines, ungestörtes Kristallgitter bei tiefer Temperatur. Die Art der Bindung zwischen den Atomen ist eine sogenannte Valenzbindung: dabei umkreist jedes Valenzelektronenpaar zwei benachbarte Atomrümpe wie eine „Schlinge“ und hält sie so zusammen.



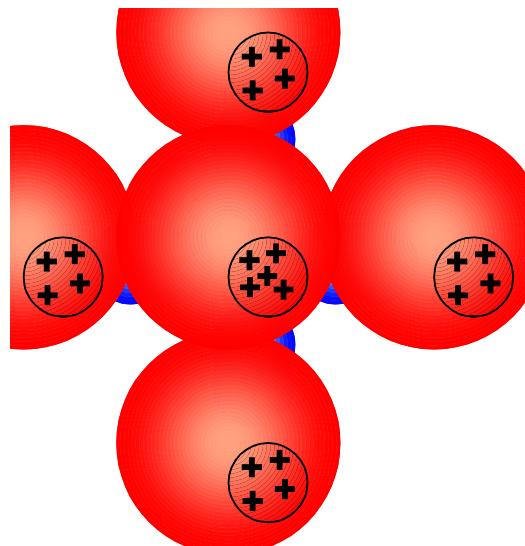
Wird einem solchen Kristall von außen Energie zugeführt, z.B. in Form von Wärme, werden einzelne Elektronen aus ihrer Bindung heraus gerissen und es entstehen sogenannte Elektronen–Loch–Paare. Unter einem „Loch“ versteht man einfach ein fehlendes Elektron, so dass die Valenzbindung unvollständig ist. Beide, sowohl das freigewordene Elektron als auch das Loch tragen zur Leitfähigkeit im Kristall bei: das Elektron bewegt sich relativ frei im Gitter (a) und das Loch tauscht seinen Platz mit einem Nachbarelektron und bewegt sich auf diese Weise ebenfalls im Gitter (b). Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „**Löcherleitung**“.



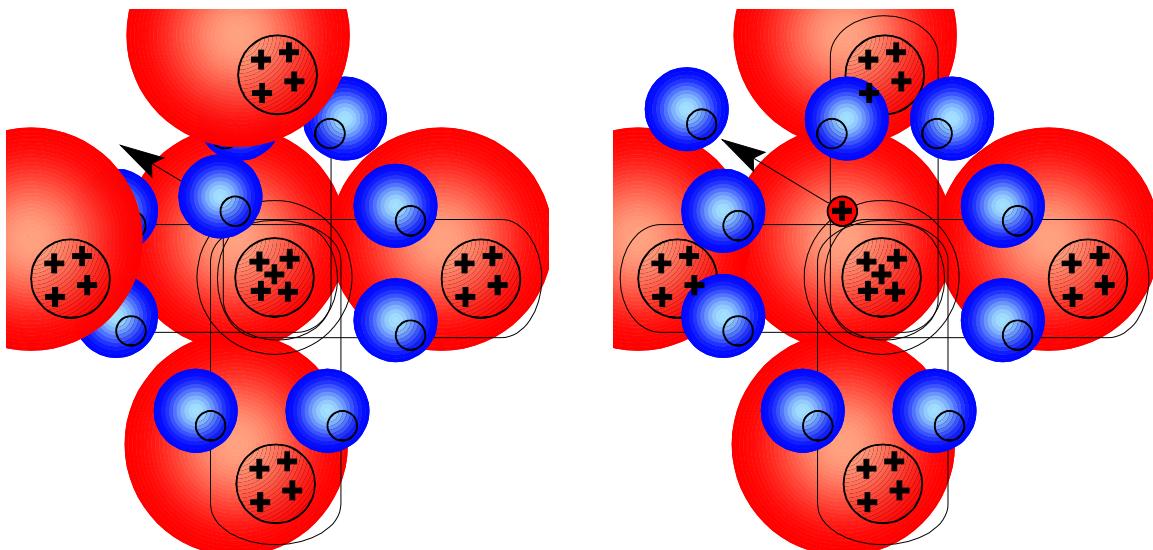
- Wie gezeigt, hängt die Leitfähigkeit von Halbleitern sehr stark von der inneren Energie ab; dieser Effekt wird **Eigenleitung** genannt. Man nutzt ihn bei **Heißleitern** aus.
- Die **innere Energie** kann aber auch durch **Zufuhr von Lichtenergie erhöht** werden; auch dadurch können Ladungsträger freigesetzt werden. Diesen Vorgang nennt man den **inneren fotoelektrischen Effekt** und nutzt ihn bei **Fotowiderständen** aus.



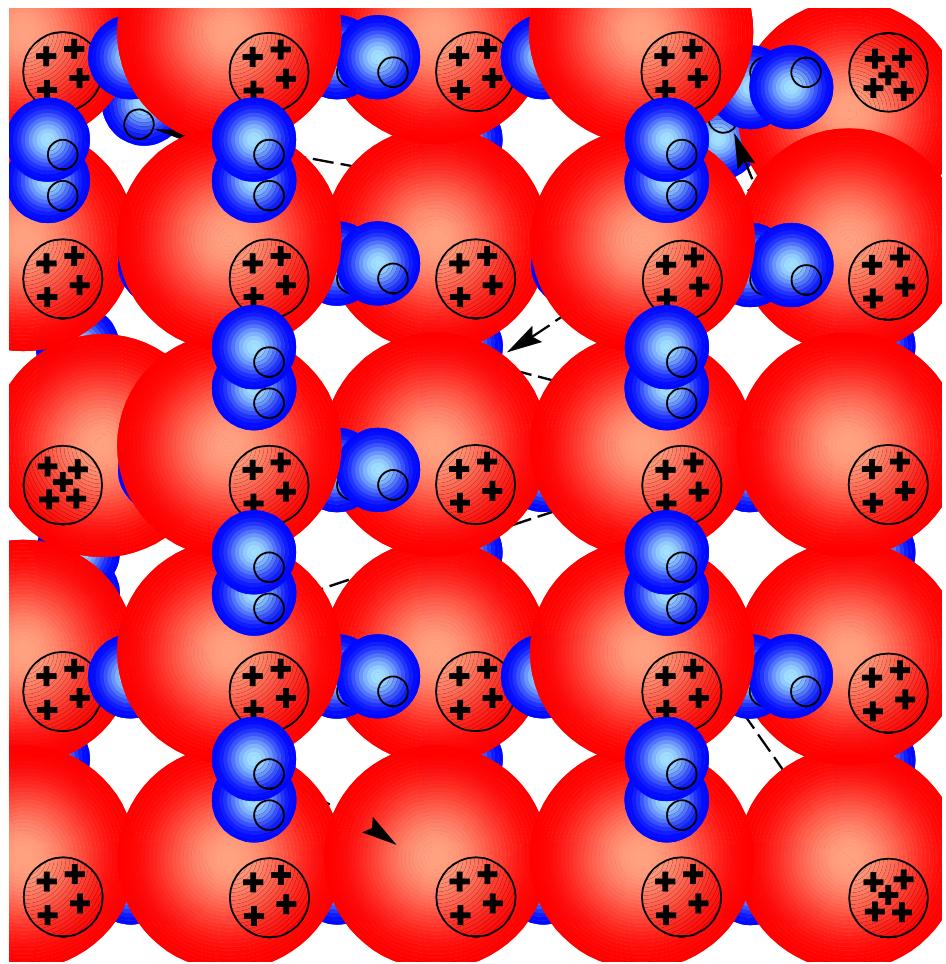
- Die Leitfähigkeit von reinem Halbleitermaterial kann außerdem technisch in weiten Grenzen durch gezieltes Verunreinigen mit Fremdatomen, das sogenannte "Dotieren" variiert werden; dadurch wird künstlich ein Überschuß an negativen oder positiven Ladungsträgern erzeugt. Man spricht dabei von **n-Leitung** bzw. von **p-Leitung**. Die **vielfältigsten Möglichkeiten** für die Konstruktion von Bauelementen liegen in der **Kombination von n- mit p-leitendem Material**: daraus wurden **Dioden, Z-Dioden, Transistoren, Thyristoren usw.** entwickelt.



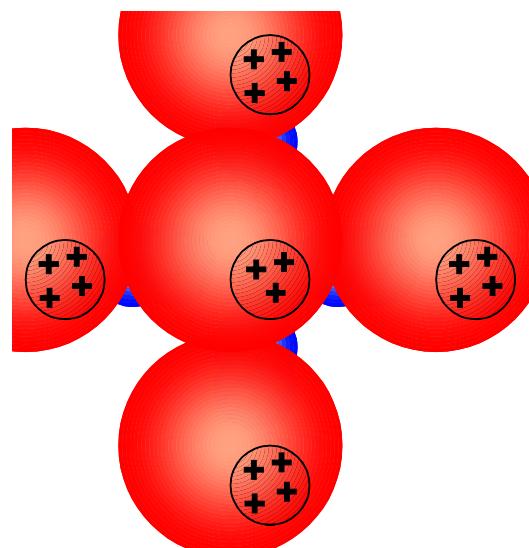
Fügt man in das Kristallgitter ein 5-wertiges Atom ein, das auf der äußeren Schale 5 anstatt 4 Elektronen besitzt (hier nur für eine Stelle des Gitters gezeigt), so werden im Kristallgitter davon 4 für die Bindung benötigt. Das fünfte ist sozusagen „überflüssig“ und kann durch eine sehr kleine Energie (sehr viel kleiner als bei Eigenleitung) abgelöst werden. Damit steht es als Leitungselektron im Kristall zur Verfügung. Da dem 5-wertigen Atom aber nun auf der äußeren Schale ein Elektron fehlt, entsteht an dieser Stelle im Gitter eine positive, ortsfeste Ladung.



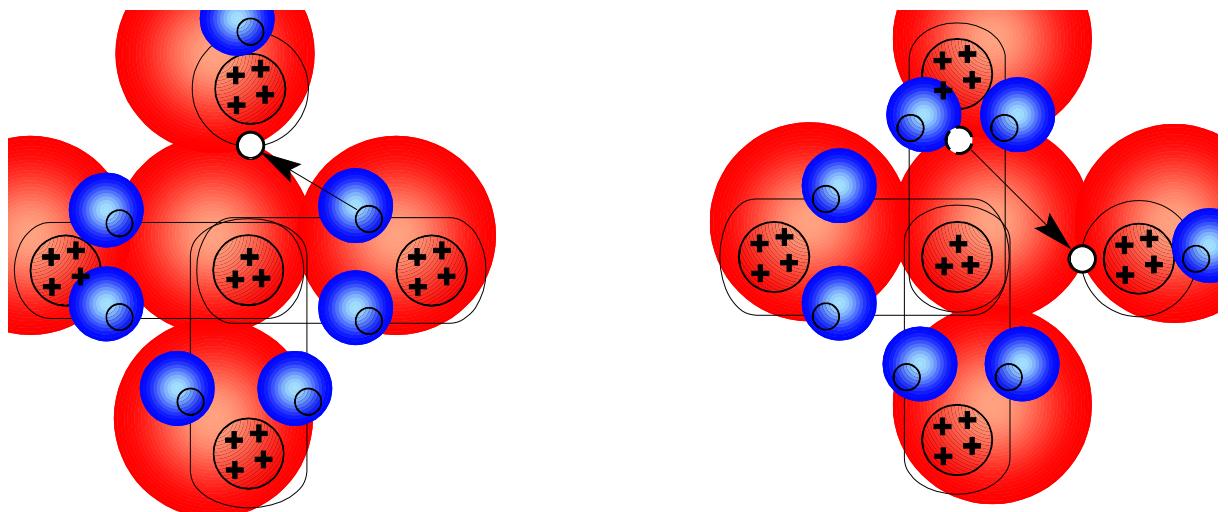
Dieses gezielte Einfügen von sogenannten „Fremdatomen“ nennt man **Dotieren**. Da die Leitfähigkeit in diesem Fall in der Mehrzahl von Elektronen verursacht wird, nennt man sie **n-Leitung**. Im folgenden Bild wird diese Form der Leitfähigkeit in einem größeren Teil des Kristalls (vereinfacht) dargestellt.



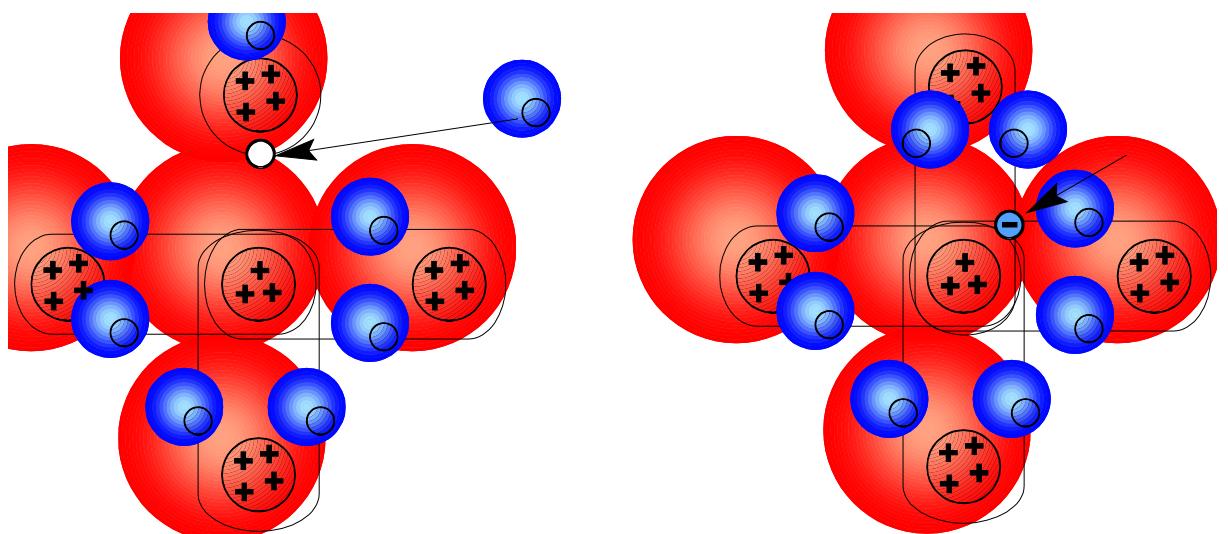
Man kann statt 5-wertiger Atome aber auch 3-wertige in das Kristallgitter einbauen.



Da dieses Atom auf seiner äußeren Schale aber nur drei Elektronen für eine Bindung zur Verfügung hat, fehlt für die Bindung an die 4 Nachbarn im Gitter ein Elektron, es entsteht ein Loch im Bindungsgefüge.

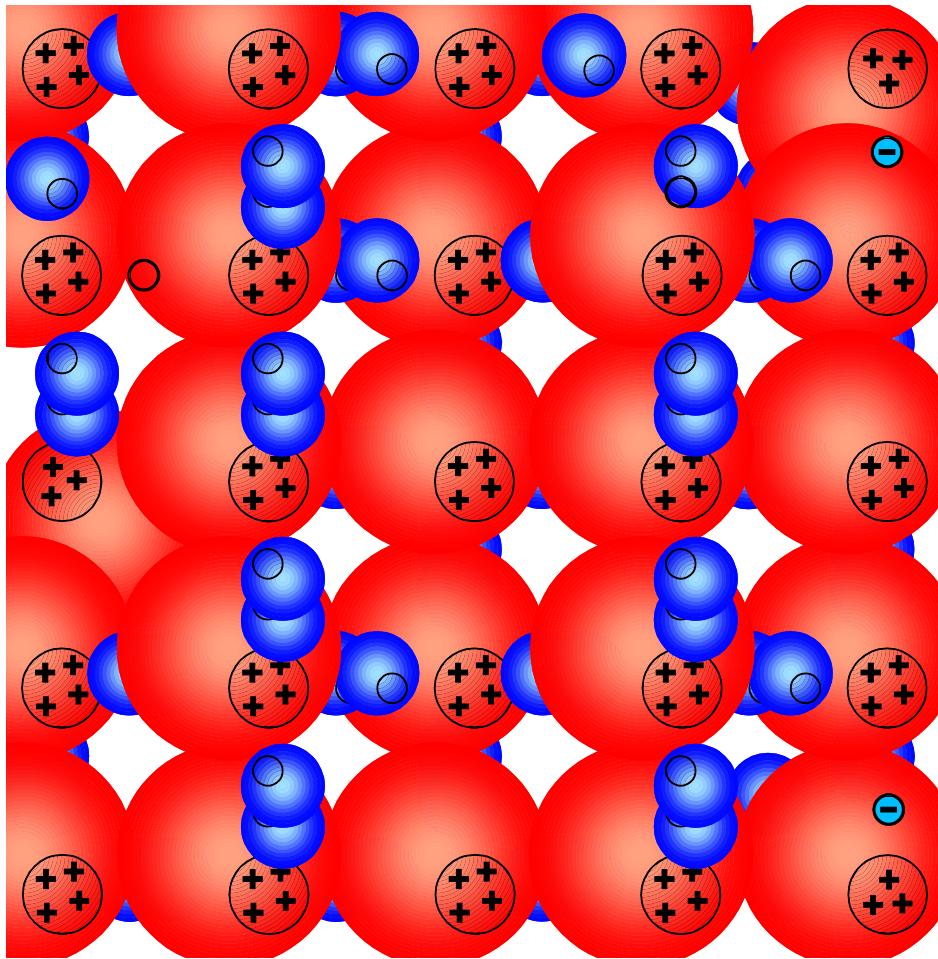


Schaut man sich die Verhältnisse an dieser Stelle genauer an sieht man, dass mit einem der Nachbaratome keine Bindungsschleife gebildet werden kann. Es genügt aber wieder eine sehr kleine Energie, um eines der benachbarten Bindungselektronen in dieses Loch springen zu lassen, was wiederum zur Wanderung des Lohns (der positiven Ladung) führt und damit zu einem Ladungstransport.



Das obige Bild zeigt was passiert, wenn ein Elektron aus einer „entfernten“ Gegend des Gitters in ein solches Loch „hinein fällt“: Einerseits vervollständigt es jetzt die Valenzbindung, so dass um jedes der 4 Nachbaratome wieder eine Schlinge mit je zwei Bindungselektronen gebildet werden kann, andererseits ist jetzt an dieser Stelle ein Elektron zu viel, was nach außen wie eine ortsfeste negative Ladung wirkt.

Da die Leitfähigkeit in diesem Fall in der Mehrzahl von Löchern verursacht wird, nennt man sie **p-Leitung**. Im folgenden Bild wird diese Form der Leitfähigkeit in einem größeren Teil des Kristalls (vereinfacht) dargestellt.

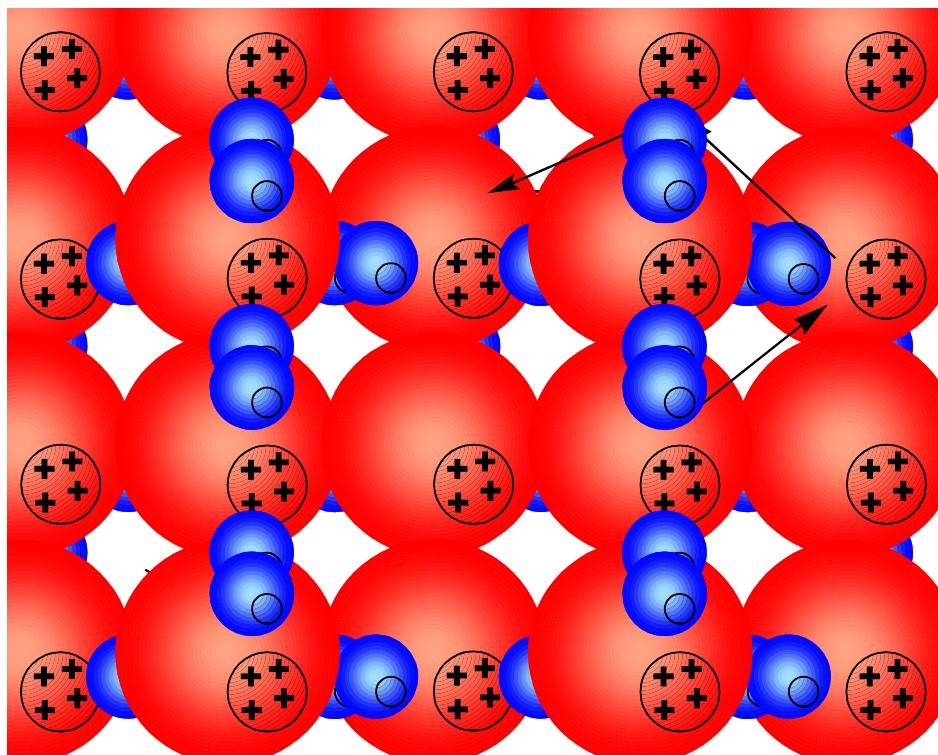


Die Verhältnisse in Halbleitermaterialien sind komplizierter als hier dargestellt, da sich die Eigenleitfähigkeit mit der durch Dotieren erzeugten Leitfähigkeit mischt und deshalb in einem Kristall immer zwei Sorten von Ladungsträgern vorhanden sind: Elektronen und Löcher. Allerdings überwiegt bei einem n-dotierten Kristall die n-Leitung und bei einem p-dotierten Kristall die p-Leitung.

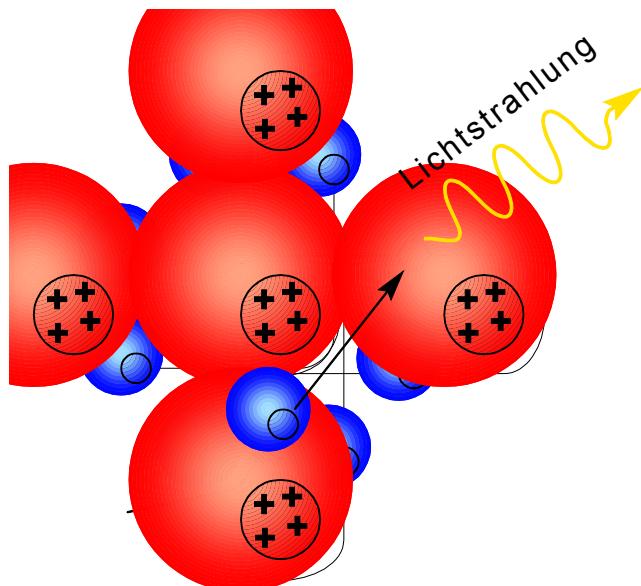
Aus diesem Grund habe ich für die Diode und den Transistor stark vereinfachte Modelle gewählt.

- Kombiniert man diese Möglichkeiten nun noch mit dem inneren fotoelektrischen Effekt, also dem Freiwerden von Ladungsträgern bei Lichteinfall, so kommt man zu Bauelementen wie **Solarzellen, Fotodioden, Fototransistoren, Photothyristoren** usw.
- Den Mechanismus "Entstehen von Ladungsträgern (Aufbrechen von Bindungen) durch Zufuhr von Lichtenergie" kann man bei manchen Halbleiter-Mischkristallen auch umdrehen: **durch Absättigen von Bindungen wird wieder Energie in Form von Licht frei**, die bei entsprechender Konstruktion nach außen abgestrahlt werden kann; diesen Effekt nutzt man bei **Leuchtdioden** aus.

Kommt in einem Halbleiterkristall ein freies Elektron zu einem Loch, so kann es passieren, dass es in dieses Loch „hinein fällt“. Diesen Vorgang nennt man **Rekombination**. Dabei verschwindet sowohl das Elektron als auch das Loch als freie Ladungsträger und stehen für den Stromtransport nicht mehr zur Verfügung.



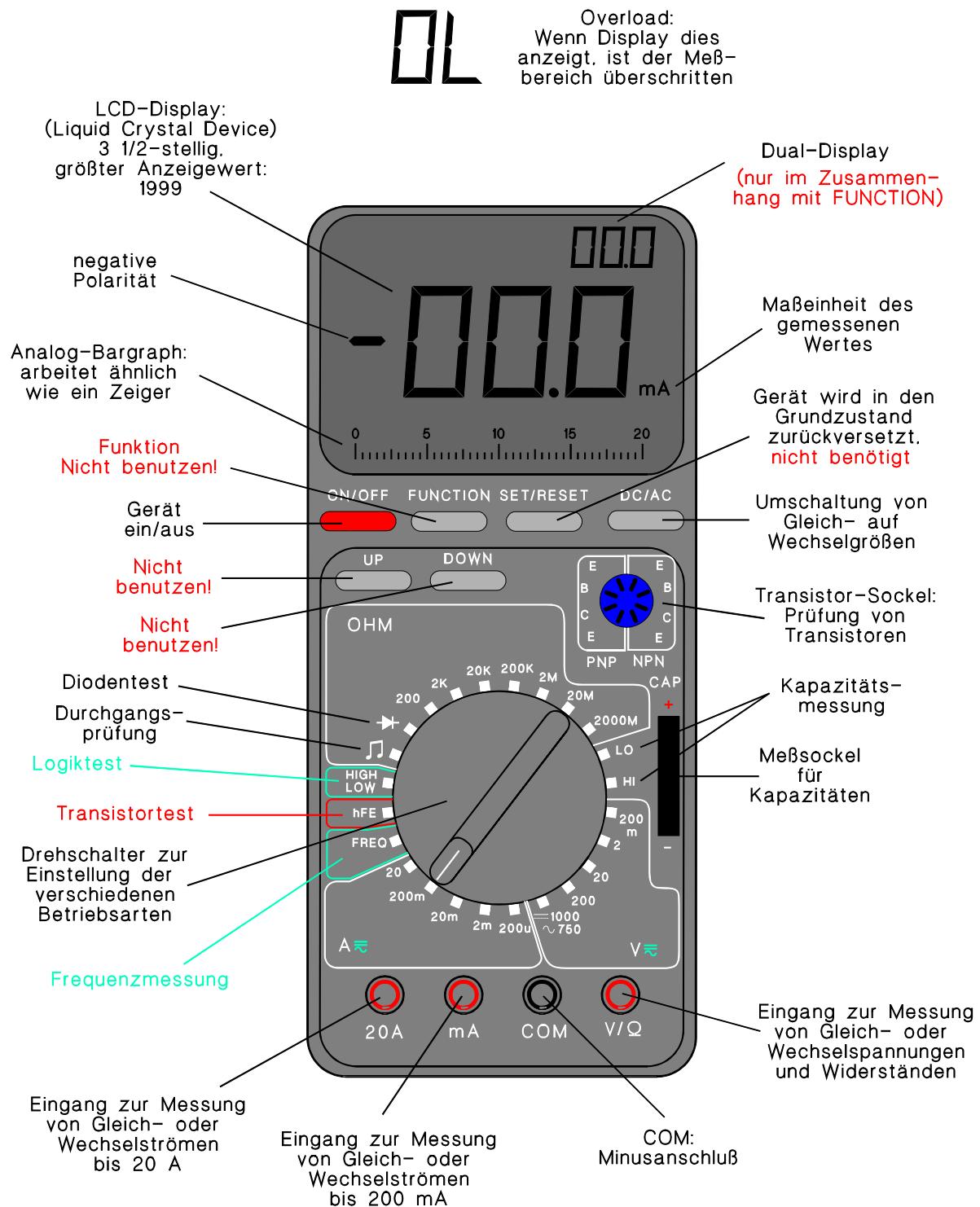
Weiter oben wurde gezeigt, dass zum Ablösen eines Elektrons aus einer Bindung oder von einem 5-wertigen Atom eine gewissen Energie aufgebracht werden muss. Bei der Rekombination wird diese Energie wieder frei und wird nach außen abgegeben. Bei bestimmten Mischkristall-Halbleitern, z.B. Galliumarsenid (GaAs), Galliumphosphid (GaP) und Galliumarsenidphosphid (GaAsP) wird diese Energie in Form von Licht bestimmter Längenwelle abgestrahlt.



Bei den meisten Materialien hängt der elektrische Widerstand von der Temperatur ab. Während bei Halbleitern der Widerstand bei Erwärmung abnimmt, erhöht er sich bei Metallen, allerdings nur geringfügig. Nun gibt es bestimmte **Keramiken**, bei denen dieser **Widerstandsanstieg bei Erwärmung extrem groß** ist. Diesen Effekt nutzt man bei den sogenannten **Kaltleitern** aus.

# **Umgang mit den Digital-Messinstrumenten:**

# Hinweise zu den Digitalmeßgeräten



## Spannungsmessung



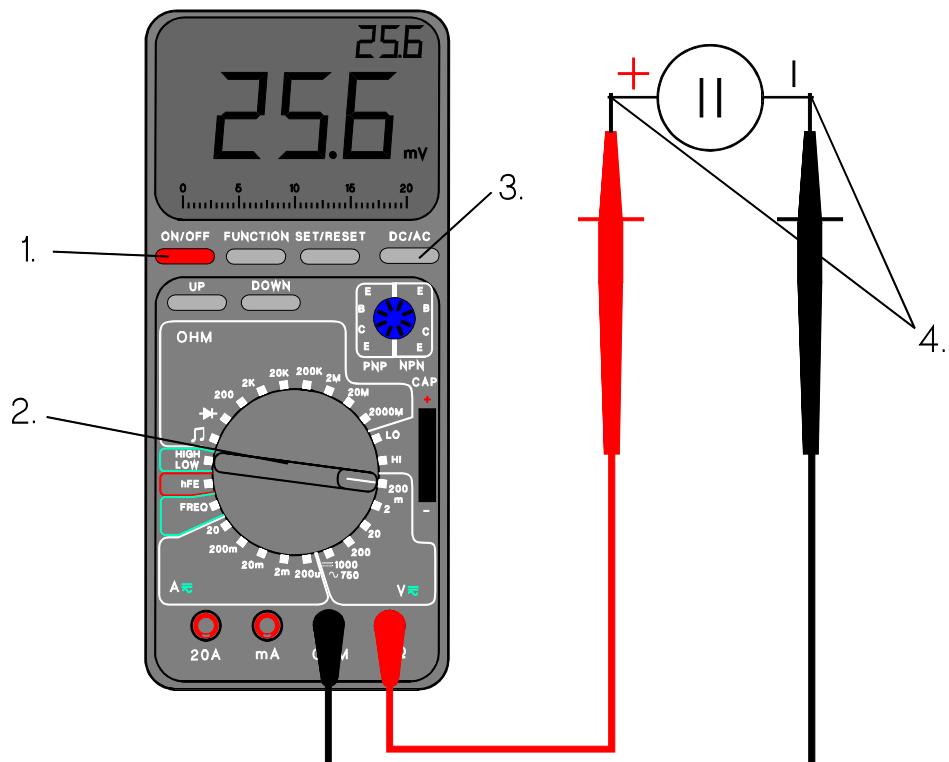
Überschreiten Sie auf keinen Fall die maximal zulässigen Eingangsgrößen: Max. 1000 V Gleichspannung, max. 750 V Wechselspannung. Berühren Sie keine Schaltungen oder Schaltungsteile, wenn Sie höhere Spannungen als 25 VAC oder 35 VDC darin messen!

Vor dem Anschließen der Meßleitungen:

1. Drücken Sie die EIN-Taste: LCD-Anzeige wird sichtbar.
2. Stellen Sie den Drehschalter auf die gewünschte Position (mV oder V). Wenn die zu messende Spannung nicht bekannt ist, immer mit dem größten Meßbereich beginnen!
3. Wählen Sie mit der DC/AC-Taste die Spannungsart aus:  
Erscheint im Display AC: --> Wechselspannung  
Keine Angabe im Display: --> Gleichspannung
4. Erst jetzt verbinden Sie die Meßleitungen mit dem Meßobjekt / der Schaltung.  
Erscheint ein "–" -Zeichen vor dem Meßwert, so ist die gemessene Spannung negativ (oder die Meßleitungen sind vertauscht)



Der Drehschalter darf während der Messung auf keinen Fall verstellt werden, da dadurch das Meßgerät zerstört werden kann bzw. für Sie als Folge davon Lebensgefahr bestehen kann.

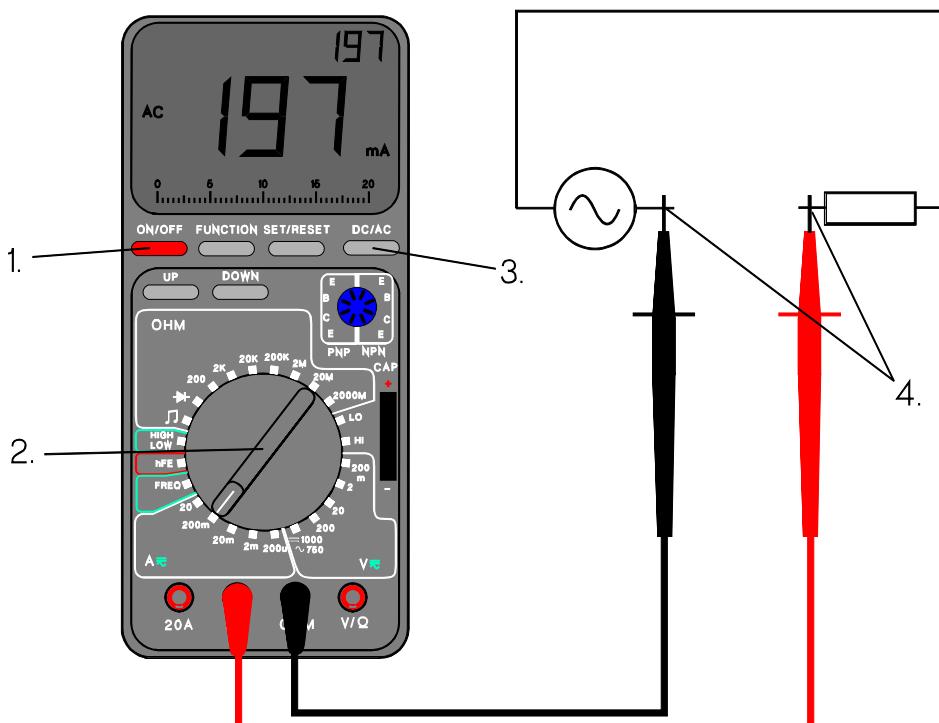


## Strommessung

! Messen Sie keine Ströme in Stromkreisen, in denen Spannungen größer 250 V (DC oder AC) auftreten können, da sonst für Sie Lebensgefahr besteht. Messen Sie auf keinen Fall Ströme über 20 A. Ströme von 20 A dürfen nur max. 30s lang und nur in Intervallen von 15 Minuten durchgeführt werden.

Vor dem Anschließen der Meßleitungen:

1. Drücken Sie die EIN-Taste: LCD-Anzeige wird sichtbar.
2. Stellen Sie den Drehschalter auf die gewünschte Position (mA oder A). Wenn der zu messende Strom nicht bekannt ist, immer mit dem größten Meßbereich beginnen!  
! Der Drehschalter darf bei der Strommessung auf keinen Fall auf Spannungsmessung (V oder mV) stehen
3. Wählen Sie mit der DC/AC-Taste die Stromart aus:  
Erscheint im Display AC: --> Wechselstrom  
Keine Angabe im Display: --> Gleichstrom
4. Erst jetzt verbinden Sie die Meßleitungen mit der Schaltung:  
Meßinstrument in Reihe schalten!  
Erscheint ein "-" -Zeichen vor dem Meßwert, so ist der gemessene Strom negativ (oder die Meßleitungen sind vertauscht)  
! Der Drehschalter darf während der Messung auf keinen Fall verstellt werden, da dadurch das Meßgerät zerstört werden kann bzw. für Sie als Folge davon Lebensgefahr bestehen kann.



## Durchgangsprüfung



Vergewissern Sie sich, daß alle zu messenden Sicherungen, Leitungen, Schaltungen usw. spannungslos sind.  
Messen Sie keine geladenen Kondensatoren, da sonst durch eine mögliche Entladung Ihr Meßgerät zerstört werden kann!

Vor dem Anschließen der Meßleitungen:

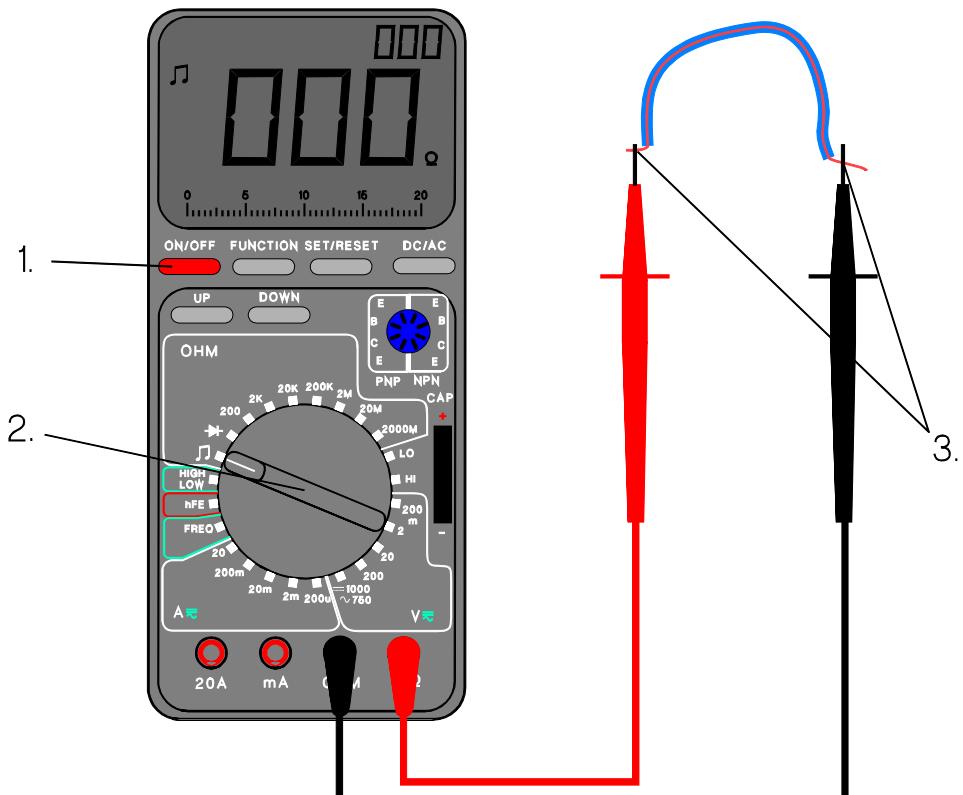
1. Drücken Sie die EIN-Taste: LCD-Anzeige wird sichtbar.
2. Stellen Sie den Drehschalter auf die Noten:
3. Erst jetzt verbinden Sie die Meßleitungen mit dem Meßobjekt / der Schaltung.

Wenn die Prüfspitzen am Meßobjekt anliegen, dauert es einen Moment, bis sich die Messung stabilisiert hat.

Hat die Meßstrecke Durchgang, so ertönt ein akustisches Signal. Erscheint "OL" im Display und der Bargraph blinkt, so ist die Meßstrecke unterbrochen: kein Durchgang.



Der Drehschalter darf während der Messung auf keinen Fall verstellt werden, da dadurch das Meßgerät zerstört werden kann bzw. für Sie als Folge davon Lebensgefahr bestehen kann.



## Widerstandsmessung



Vergewissern Sie sich, daß alle zu messenden Schaltungsteile, Schaltungen und Bauelemente sowie andere Meßobjekte unbedingt spannungslos sind.

Messen Sie keine geladenen Kondensatoren, da sonst durch eine mögliche Entladung Ihr Meßgerät zerstört werden kann!

Vor dem Anschließen der Meßleitungen:

1. Drücken Sie die EIN-Taste: LCD-Anzeige wird sichtbar.
2. Stellen Sie den Drehschalter auf Widerstandsmessung (Größe des Widerstands).
3. Erst jetzt verbinden Sie die Meßleitungen mit dem Meßobjekt / der Schaltung.

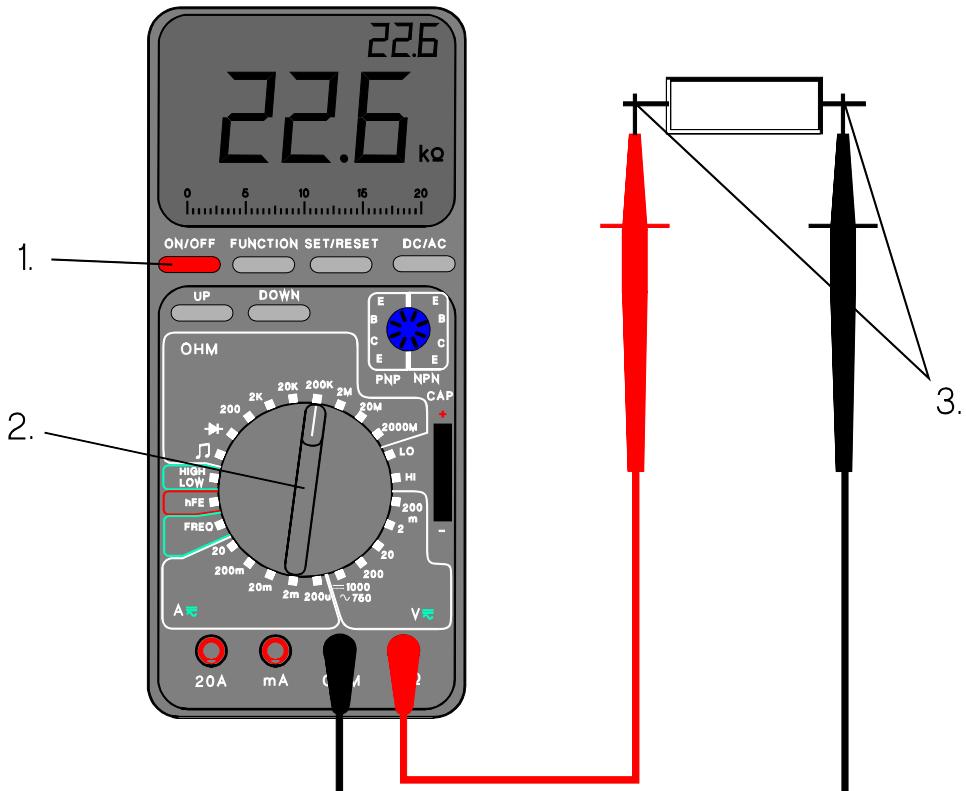
Achten Sie darauf, daß die Meßpunkte frei von Öl, Schmutz oder Lötack sind, da sonst die Meßwerte verfälscht werden.

Bei Widerständen größer 2 MΩ kann es sein, daß die Anzeige etwas Zeit benötigt, um sich zu stabilisieren.

Sobald "OL" im Display erscheint und der Bargraph blinkt, haben Sie den Meßbereich überschritten bzw. die Meßstrecke unterbrochen.



Der Drehschalter darf während der Messung auf keinen Fall verstellt werden, da dadurch das Meßgerät zerstört werden kann bzw. für Sie als Folge davon Lebensgefahr bestehen kann.



## Diodentest



Es dürfen nur Dioden oder Halbleiterstrecken (z.B. Basis-Emitter-, Collektor-Emitter- und Basis-Collektor-Strecke eines Transistors) gemessen werden, die spannungslos sind!

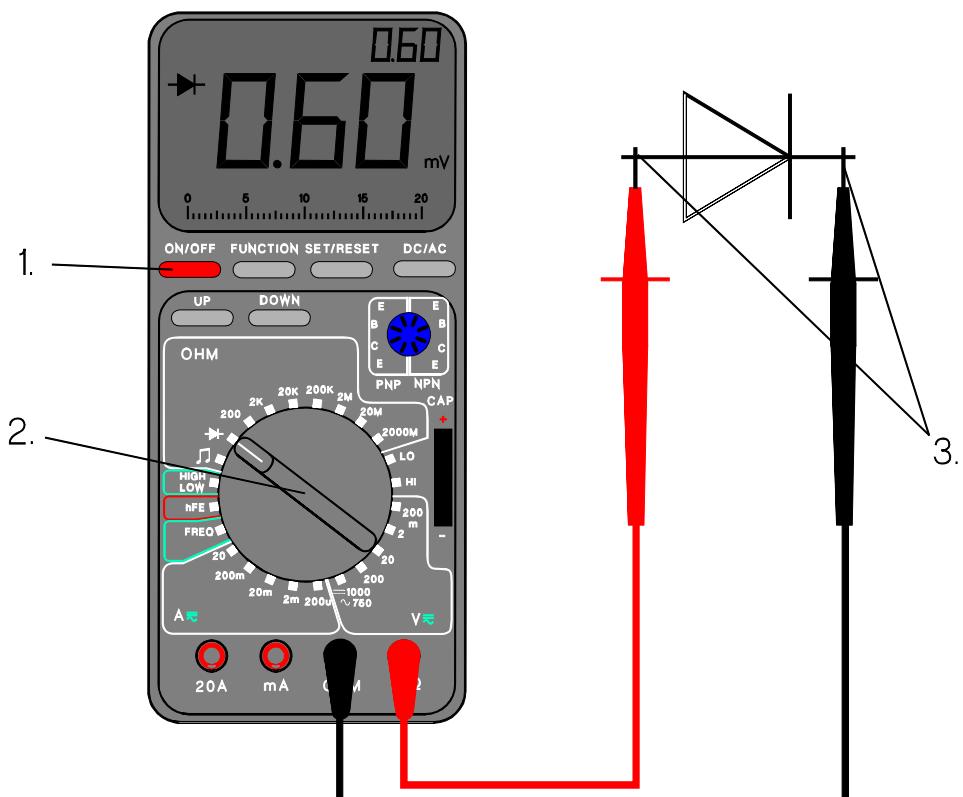
Vor dem Anschließen der Meßleitungen:

1. Drücken Sie die EIN-Taste: LCD-Anzeige wird sichtbar.
2. Stellen Sie den Drehschalter auf das Diodensymbol: →
3. Erst jetzt verbinden Sie die Meßleitungen mit dem Meßobjekt, einer spannungslosen Halbleiterstrecke: rote Prüfspitze an die Anode, schwarze Prüfspitze an die Kathode.

Durchlaßrichtung: Ist die Diodenstrecke in Ordnung, so messen Sie eine Spannung zwischen 0,6 und 2 Volt (Silizium) bzw. ab 0,25 Volt (Germanium).

Sperrrichtung: Ist die Diodenstrecke in Ordnung, so wird Ihnen jetzt "OL" (Overload) angezeigt. Erscheint im Display jedoch ein Wert zwischen 0 und 2 Volt, so ist das Meßobjekt entweder defekt oder falsch angeschlossen.

**!** Der Drehschalter darf während der Messung auf keinen Fall verstellt werden, da dadurch das Meßgerät zerstört werden kann bzw. für Sie als Folge davon Lebensgefahr bestehen kann.



## Ohmsche Widerstände

Bei den Widerständen (als Bauelementen) unterscheidet man unterschiedliche Arten: lineare und nichtlineare Widerstände. Für die **linearen Widerstände** gilt das Ohmsche Gesetz, man bezeichnet sie deshalb auch als Ohmsche Widerstände. Sie haben die Eigenschaft, dass sie bei Gleich- und Wechselspannung den gleichen Widerstand und die gleiche Wirkung haben.

Bei den technischen Widerständen handelt es sich um industriell gefertigte, für einen ganz bestimmten Widerstandswert ausgelegte Widerstände, die in unterschiedlichen Ausführungen zu haben sind. Sie sind so gestaltet, dass sie leicht in elektrische oder elektronische Schaltungen eingefügt werden können. Man unterscheidet Widerstände in Festwiderstände und einstellbare Widerstände.

### Festwiderstände:

Für die **Auswahl von Widerständen** für eine bestimmte Anwendung sind besonders wichtig:

- der Nennwert des Widerstandes
- die Toleranz des Nennwertes
- die Belastbarkeit des Bauelementes
- die Bauform.

### **Nennwert des Widerstands, Toleranz:**

Der Nennwert ist einfach die Größe des Widerstandswerts. Man kann aus wirtschaftlichen Gründen Widerstände nicht für jeden beliebigen Wert herstellen; deshalb hat man sich auf eine Abstufung nach bestimmten Normzahlreihen geeinigt: die international gültigen IEC-Normreihen (siehe unten).

**ICE-Widerstandsnormreihen:**

<b>E6</b> (20%)	<b>E12</b> (10%)	<b>E24</b> (5%)
100	100	100
		110
	120	120
		130
150	150	150
		160
	180	180
		200
220	220	220
		240
	270	270
		300
330	330	330
		360
	380	390
		430
470	470	470
		510
	560	560
		620
680	680	680
		750
	820	820
		910

Wie man sieht, unterscheiden sich die einzelnen Reihen durch die Toleranzen und die Anzahl der möglichen Widerstandswerte.

Zur **Kennzeichnung des Widerstandswertes** auf dem Bauelement werden zwei Formen verwendet:

- der internationale Farbcode

Kennfarbe	1. Ring = 1. Ziffer	2. Ring = 2. Ziffer	3. Ring = Multiplikator	4. Ring = Toleranz
farblos	—	—	—	20%
silber	—	—	$10^{-2}$	10%
gold	—	—	$10^{-1}$	5%
schwarz	—	0	$10^0 = 1$	—
braun	1	1	$10^1$	1%
rot	2	2	$10^2$	2%
orange	3	3	$10^3$	—
gelb	4	4	$10^4$	—
grün	5	5	$10^5$	0.5%
blau	6	6	$10^6$	0.25%
violett	7	7	$10^7$	0.1%
grau	8	8	$10^8$	—
weiß	9	9	$10^9$	—

- eine Wertkennzeichnung durch Zahlen und Buchstaben

Widerstandswert	Kennzeichnung
0.22 Ω	R22
2.2 Ω	2R2
22 Ω	22R
220 Ω	220R
0.22 kΩ	K22
2.2 kΩ	2K2
22 kΩ	22K
220 kΩ	220K
0.22 MΩ	M22
2.2 MΩ	2M2
22 MΩ	22M
220 MΩ	220M

## Belastbarkeit von Widerständen:

Jeder Stromfluss erwärmt die Widerstände, je mehr desto mehr. Da bei zu großer Erwärmung die technologischen Eigenschaften schlechter werden, muss man dafür sorgen, dass die entsprechende Wärme an die Umgebung abgegeben werden kann. Möglichkeiten dafür sind z.B. die Vergrößerung der abstrahlenden Oberfläche bei gleichbleibendem Querschnitt oder auch verhältnismäßig dicke Zu- und Ableitungsdrähte. Man gerät jedoch irgendwann an Grenzen, so dass man die Größe der Belastbarkeit eines bestimmten Widerstandes angeben muss.

Man versteht darunter die Größe der Leistung, die das Bauelement ohne Beeinträchtigung seiner Funktion aufnehmen kann. Sie wird in mW oder in Watt angegeben. Bei kleinen Widerstandsbauteilen liegt die Belastung zwischen 50 mW und 500 mW, während große Drahtwiderstände bis zu 100 W und mehr aufnehmen können.

Die **Leistung eines Widerstandes** bestimmt sich folgendermaßen:

**Leistung des Widerstandes = Spannung am Widerstand \* Strom** durch den Widerstand.

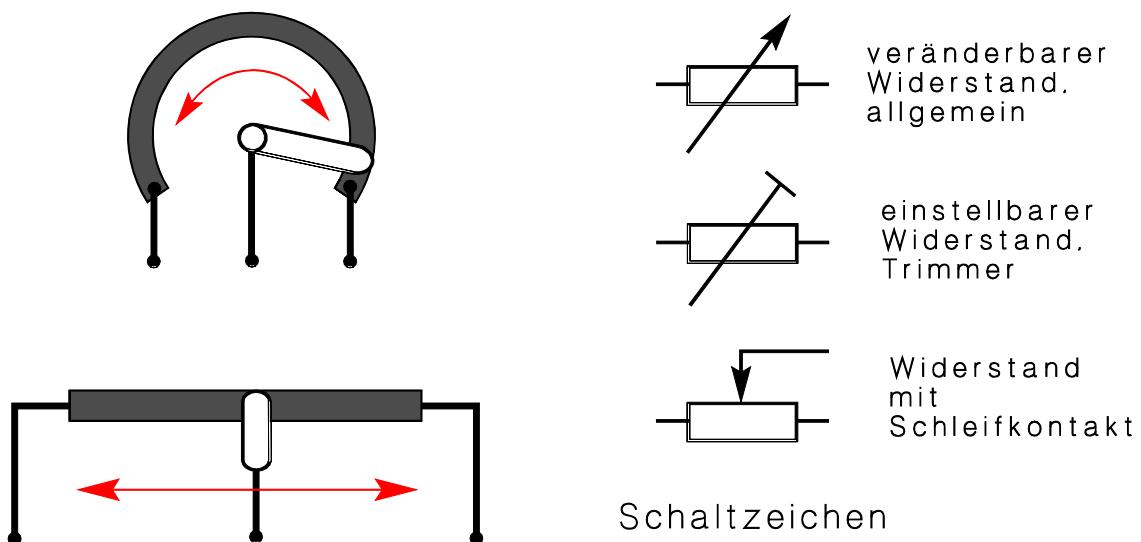
Als Formel:

$$P = U \cdot I$$

Natürgemäß hängt die Möglichkeit der Wärme-Abstrahlung von der Umgebungstemperatur ab. Deshalb geben die Hersteller die Belastbarkeit in der Regel bei 40°C und 70°C an.

## Veränderbare Widerstände: Potentiometer und Trimmer

Veränderbare Widerstände gibt es grundsätzlich in zwei **Bauformen**: Dreh- und Schiebewiderstände. Drehwiderstände besitzen eine kreisförmige Widerstandsbahn, auf der ein Schleifer über eine Drehachse bewegt werden kann. Schiebewiderstände haben eine lineare Widerstandsbahn, auf der der Schleifer hin- und hergeschoben wird.

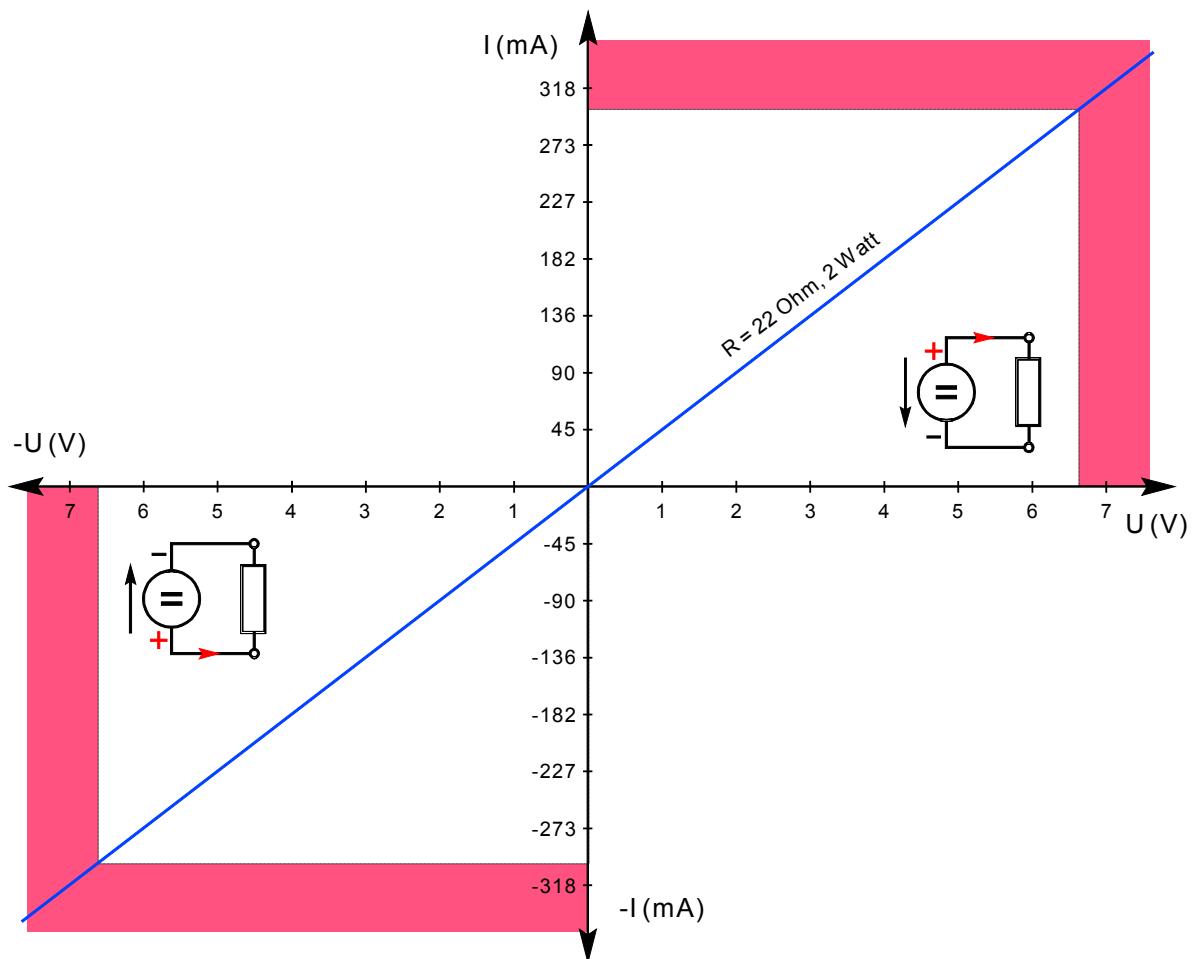


Neben diesen verschiedenen Bauformen gibt es noch einen wichtigeren Unterschied in der **Anwendung** der Widerstände:

- **Potentiometer** werden mit Achsen ausgestattet, auf denen ein Krehknot befestigt werden kann. Sie dienen dazu, **ständige Veränderungen des Widerstands** vorzunehmen, z.B. die Einstellung der Lautstärke an einem Verstärker oder die Einstellung der Spannung an einem Netzgerät.
- **Trimmer** dienen dazu, in einer Schaltung einmalig einen bestimmten Widerstandswert genau einzustellen. Deshalb besitzen sie anstelle einer Achse eine spaltenförmige Vertiefung bzw. einen Schlitz für den Einsatz eines Schraubendrehers. Ist der Wert des Trimmers eingestellt, bleibt er in dieser Stellung stehen.

### Die Kennlinie eines ohmschen Widerstandes:

Kennlinien zeigen das Betriebsverhalten eines Bauelements; meist sind es I-U-Diagramme, d.h. Geraden oder Kurven, die die Abhängigkeit des Stromes von der angelegten Spannung über einen weiten Bereich anschaulich machen. Sie sind zwar auf den ersten Blick sehr abstrakt, weil weder ein Bauelement noch eine Schaltung dargestellt ist, dennoch haben sie einen großen Vorteil, weil sie sehr viele Experimentierergebnisse in einer einzigen Darstellung zusammenfassen.

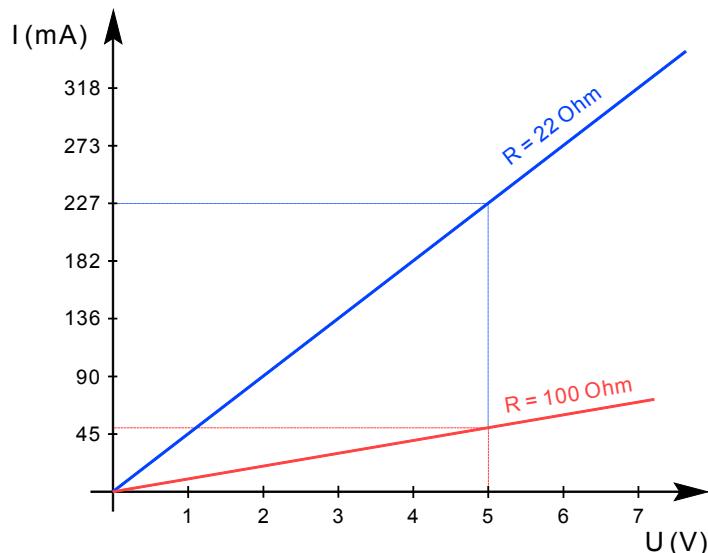


Aus dieser Kennlinie eines ohmschen Widerstands lassen sich mehrere Dinge ablesen:

- Beim Widerstand ist es egal, wie man ihn an Spannung anlegt, er zeigt immer das gleiche Verhalten, erkennbar an der durchgehenden Geraden. Ein Widerstand ist also ein **stromrichtungs-unabhängiges** Bauelement.

- Die Gerade zeigt an, dass der Widerstand ein rein proportionales Verhalten aufweist: im selben Maß, wie die Spannung gesteigert wird, steigt auch die Stromstärke und umgekehrt, so wie es sich im Ohmschen Gesetz ausdrückt. Daher kommt auch die Bezeichnung: ohmscher Widerstand.
- Grenzwert:** Die Spannung am Widerstand darf nicht beliebig hoch gemacht werden. Wird ein bestimmter Wert überschritten, wird die Leistung zu groß und der Widerstand wird zerstört.

Ein Vergleich der Kennlinien verschiedener Widerstände zeigt:



- Verschiedene Widerstandswerte drücken sich in der Kennlinie in unterschiedlich steilen Geraden aus. Große Widerstände haben eine flache Kennlinie, kleine Widerstände eine steile. Aus dem oberen Bild kann man ablesen: bei derselben Spannung  $U_B$  fließt durch den Widerstand  $R_1$  ein viel kleinerer Strom als durch den Widerstand  $R_2 \rightarrow R_1$  hat einen hohen Widerstandswert,  $R_2$  einen kleinen.
- Aus der Mathematik ist bekannt, dass die Steigung einer Geraden definiert ist als

$$k = \frac{\text{Y-Wert}}{\text{X-Wert}}$$

Setzt man dies in der Kennlinie um, so bekommt man:

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

Der Quotient aus  $I$  und  $U$  ist aber nicht der Widerstandswert, sondern der Kehrwert dieses Wertes, also der sogenannte **Leitwert** des Widerstands: Die oben abgebildeten Kennlinien sind also nicht eigentlich Widerstandskennlinien sondern **Leitwertkennlinien**. Sie zeigen die Größe der Leitfähigkeit des dargestellten Widerstands an:

Je kleiner der Widerstandswert  $\rightarrow$  desto größer ist seine Leitfähigkeit  $\rightarrow$  desto steiler ist seine Kennlinie  $\rightarrow$  desto größer ist die Stromstärke.

## Anwendungen von ohmschen Widerständen:

Aufgrund ihrer Eigenschaften werden ohmsche Widerstände vor allem angewendet

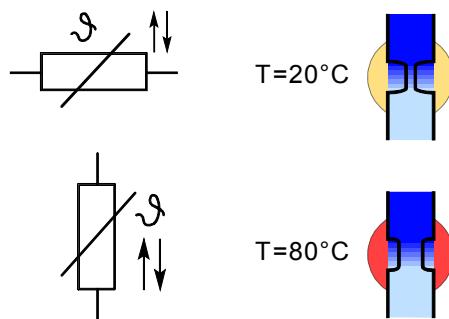
- zur Strombegrenzung
- zur Spannungsteilung
- als Heizwiderstände
- zur Beleuchtung (als Glühwendeln in Glühlampen)
- als Stromsensoren (bei einer bestimmten Stromstärke wird an dem Widerstand eine bestimmte Spannung erzeugt, die man als Steuerspannung benutzen kann).

## **Heißleiter (NTC–Widerstände)**

### Allgemeines:

Heißleiter leiten im heißen Zustand besonders gut, d.h. ihr Widerstandswert nimmt mit steigender Temperatur ab. Sie werden aus gesintertem Granulat (körnige Substanz) von Halbleiter–Mischkristallen hergestellt und haben einen komplizierten Leitungsmechanismus, der hier nicht genauer dargestellt werden soll.

Das Verhalten "sinkender Widerstand bei steigender Temperatur" kann dadurch ausgedrückt werden, daß man sagt, Heißleiter haben einen **negativen Temperaturbeiwert**. Sie werden deshalb auch oft als NTC–Widerstände bezeichnet: NTC steht für **Negativer–Temperatur–Coeffizient**. Das wird im folgenden Schaltbild (links) durch zwei gegeneinander laufende Pfeile ausgedrückt: bei steigender Temperatur (Pfeil 1) sinkt der Widerstand (Pfeil 2). Der griechische Buchstabe  $\vartheta$  (Theta) im Schaltbild steht für „Temperatur“, zeigt also einen temperaturabhängigen Widerstand an.

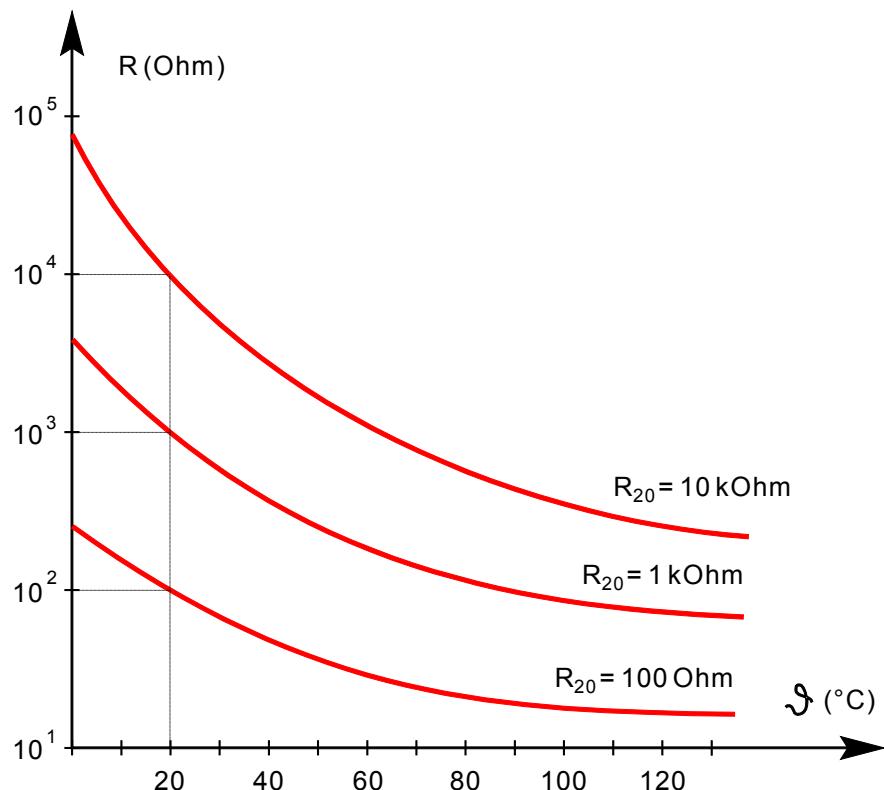


### Analoge Darstellung:

In den Analogie–Darstellungen habe ich für Widerstände immer Engstellen in Rohrleitungen angegeben. Das Verhalten der Heißleiter müßte man danach also wie in der obigen Abbildung, rechts darstellen: bei Erwärmung erweitert sich die Engstelle, bei Abkühlung verengt sie sich wieder.

### Die Kennlinie eines Heißleiters:

Im Gegensatz zu rein ohmschen Widerständen hängen die Widerstandswerte aller anderen Widerstände nicht nur von der angelegten Spannung, sondern auch bzw. vor allem von anderen Größen ab. Bei temperaturabhängigen Widerständen wie z.B. Heißleitern und Kaltleitern wird deshalb in der Kennlinie der Widerstand gegen die Temperatur aufgetragen. Da bei Heißleitern der Widerstand mit der Temperatur schwankt, gibt man – zum Vergleich der einzelnen Typen – ihren Widerstandswert bei 20°C an:  $R_{20}$ .



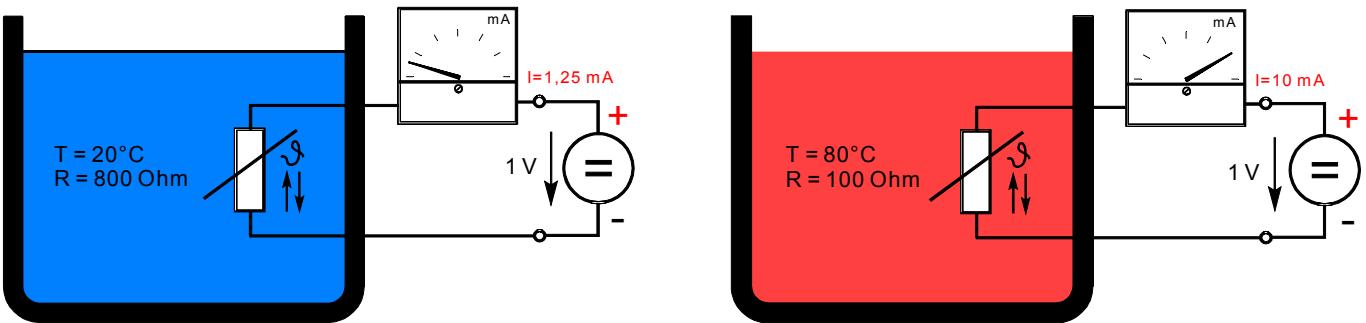
Wie man sieht, hängt der Widerstandswert dieser Widerstände sehr stark von ihrer Temperatur ab.

### Anwendungen von Heißleitern:

Hierzu muß man zwei verschiedene **Betriebsarten** unterscheiden: Fremderwärmung und Eigenwärmung.

#### **Fremderwärmung:**

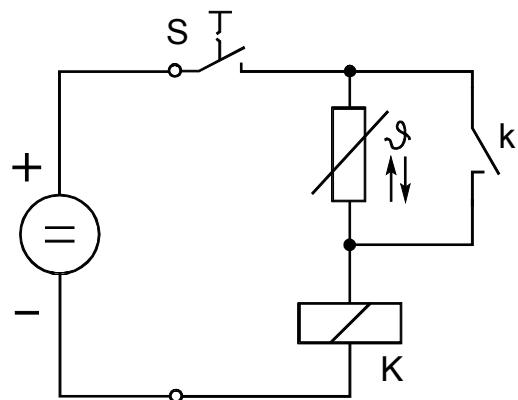
Hier wird der Heißleiter mit einer kleinen Leistung betrieben, so daß er von dem durch ihn hindurch fließenden Strom praktisch nicht erwärmt werden kann. Unter diesen Bedingungen hängt der Widerstandswert allein von der äußeren Temperatur ab → **Heißleiter als Temperaturfühler**. Eine prinzipielle Schaltung zeigt die folgende Abbildung. Nach diesem Verfahren wird z. B. in Kühlschränken, Klima- und Heizungsanlagen, Waschmaschinen oder auch bei Fieberthermometern Temperaturen gemessen. (Die Meß- und Regelschaltungen sind dabei allerdings komplizierter als in der Abb. dargestellt).



### Eigenerwärmung:

Legt man an einen Heißleiter eine größere Spannung an, so kommt schnell ein **positiv rückgekoppelter Prozeß** in Gang: am Anfang hat der Heißleiter einen hohen Kaltwiderstand, der fließende Strom ist noch relativ gering, aber er ist doch so groß, daß er den Heißleiter etwas erwärmt → dadurch sinkt dessen Widerstandswert → der Strom steigt an → dies führt zu einer stärkeren Erwärmung → der Widerstandswert sinkt weiter ab usw. Einmal in Gang gesetzt, beschleunigt sich dieser Prozeß immer stärker, was ohne Schutzmaßnahmen zu einer Zerstörung des Bauelements führen kann.

Dieses Verhalten kann man z. B. zur **Temperaturstabilisierung** von Elektronikschaltungen oder zur **Anzugs- oder Abfallverzögerung** von Relais ausnutzen. Eine prinzipielle Schaltung zur Relais-Anzugsverzögerung zeigt die folgende Abbildung. Wird der Schalter S geschlossen, ist der Heißleiter kalt, hat also einen hohen Widerstand. Dies setzt die Stromstärke in der Schaltung so weit herab, daß das Relais nicht anziehen kann. Durch die Eigenerwärmung des Heißleiters sinkt jedoch dessen Widerstandswert ab und die Stromstärke steigt damit an; hat sie nach einigen Sekunden den Ansprechstrom des Relais erreicht, so schaltet das Relais und schließt damit seinen eigenen Kontakt k, der den Heißleiter überbrückt; dadurch kann dieser wieder abkühlen und besitzt beim nächsten Einschaltvorgang wiederum den hohen Kaltwiderstand.

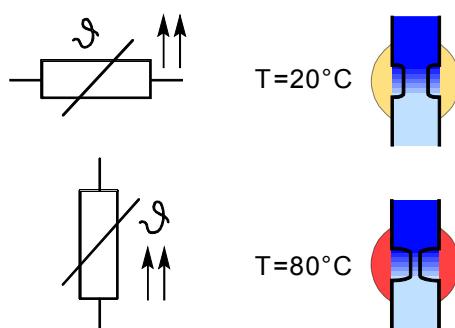


## Kaltleiter (PTC–Widerstände)

### Allgemeines:

Kaltleiter sind Widerstände, die im kalten Zustand besonders gut leiten, d.h. ihr Widerstandswert steigt mit wachsender Erwärmung an. Im Abschnitt über die Materialien der Elektronik wurde bereits gesagt, daß Kaltleiter nicht aus Halbleitermaterial sondern aus bestimmten Keramiken hergestellt werden. Es handelt sich dabei um polykristalline Titanat-Keramiksorten, die diesen Kaltleitereffekt besonders stark zeigen.

Das Verhalten "steigender Widerstand bei steigender Temperatur" kann dadurch ausgedrückt werden, daß man sagt, Kaltleiter haben einen **positiven Temperaturbeiwert**. Sie werden deshalb auch oft als PTC–Widerstände bezeichnet: PTC steht für **Positiver–Temperatur–Coeffizient**. Das wird auch im folgenden Schaltbild (links) durch zwei nach oben weisende Pfeile ausgedrückt: bei steigender Temperatur (Pfeil 1) steigt der Widerstand (Pfeil 2).

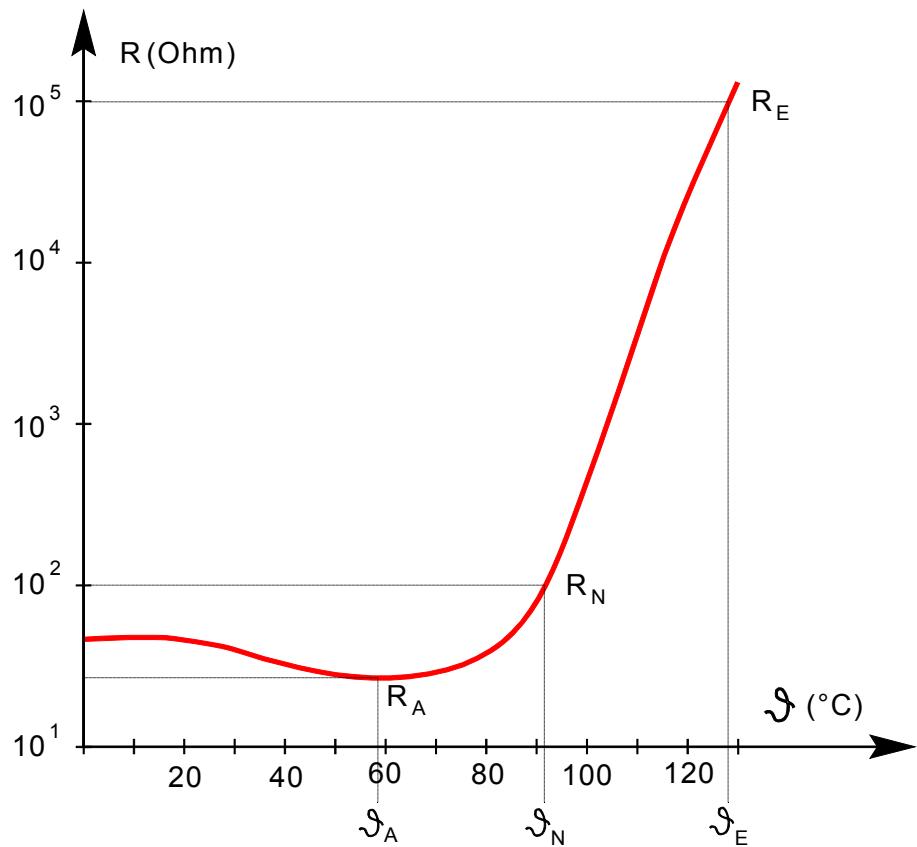


### Analoge Darstellung:

In einer analogen Darstellung des Verhaltens von Kaltleitern muß bei Erwärmung die Widerstands–Engstelle enger werden, bei Abkühlung muß sie sich wieder erweitern (obige Abbildung, rechts).

### Die Kennlinie eines Kaltleiters:

Auch bei Kaltleitern hängt der Widerstandswert von der Temperatur des Bauelements ab, aber in genau umgekehrter Weise wie bei Heißleitern. Deshalb haben sie eine mit der Temperatur ansteigende Kennlinie. Eine typische Kaltleiter–Kennlinie zeigt die folgende Abbildung. Wie man sieht, setzt der eigentliche Kaltleitereffekt erst ab einer bestimmten Temperatur  $\vartheta_A$  ein. Dies weist auf relativ komplizierte Leitungsmechanismen hin, die hier nicht dargestellt werden sollen.

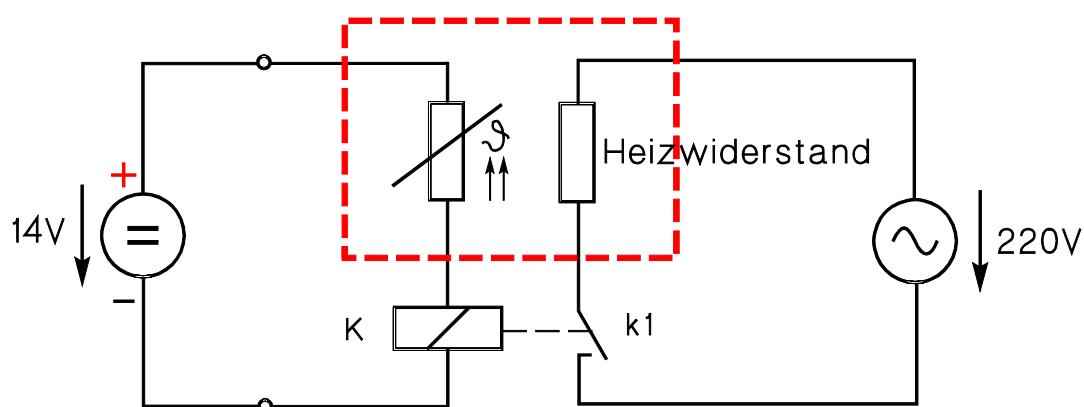


### Anwendungen von Kaltleitern:

Wie beim Heißleiter muß man auch hier die beiden **Betriebsarten** Fremderwärmung und Eigenwärmung unterscheiden.

#### Fremderwärmung:

Legt man an den PTC-Widerstand eine kleine Spannung an (üblich etwa 1 V), so ändert sich seine Temperatur durch den fließenden Strom praktisch nicht, d.h. sein Widerstandswert wird dann nur von der Umgebungstemperatur bestimmt. Unter diesen Bedingungen kann der Kaltleiter **Meß- und Regelaufgaben** übernehmen. Die wichtigste Anwendung besteht im Schutz elektrischer Maschinen vor Übertemperatur.

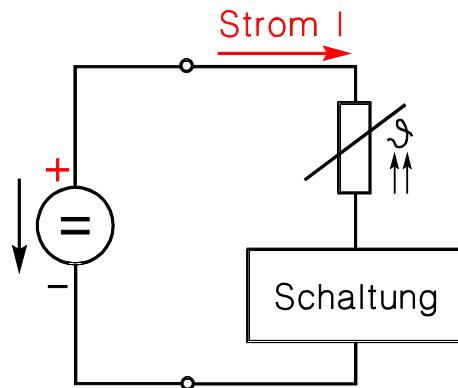


In dieser Schaltung ist der Kaltleiter zur **Temperaturregelung** eingesetzt. Dabei ist der Strom durch Relais und PTC-Widerstand relativ klein, so dass der Kaltleiter dadurch kaum

erwärmt wird, das Relais aber ungehindert anziehen kann und damit den Heizwiderstand einschaltet. Das gestrichelte Kästchen soll andeuten, daß sich Kaltleiter und Heizwiderstand im selben Raum befinden müssen. Mit steigender Temperatur erwärmt sich der PTC-Widerstand und vermindert die Stromstärke für das Relais. Unterschreitet der Strom einen bestimmten Wert, so fällt das Relais ab und schaltet damit die Heizung aus. Bei fallender Temperatur kühlt der Kaltleiter ab, sein Widerstandswert fällt und damit kann die Stromstärke wieder bis zum Ansprechstrom des Relais ansteigen.

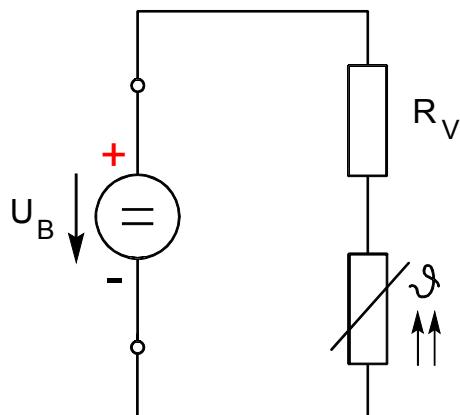
### Eigenerwärmung:

Im Gegensatz zum Heißleiter, bei dem bei ungenügender Absicherung die Eigenerwärmung zur Zerstörung des Bauelements führen kann, ist dies beim Kaltleiter völlig anders. Wird an den PTC-Widerstand eine höhere Spannung angelegt, so erwärmt der fließende Strom das Bauelement und der Widerstandswert nimmt zu, dadurch verringert sich aber die Stromstärke wieder, so daß sich der Kaltleiter etwas abkühlen kann: in diesem Prozeß stellt sich eine bestimmte **Gleichgewichtstemperatur** ein. Durch dieses Verhalten sind Kaltleiter hervorragend geeignet für die **Stabilisierung von Temperaturen und Spannungen**, sie werden aber auch als **Überstromsicherung** und **Verzögerungsglied** eingesetzt. Bei all diesen Schaltungen liegt der PTC-Widerstand in Reihe zum (zu beeinflussenden) Bauelement.

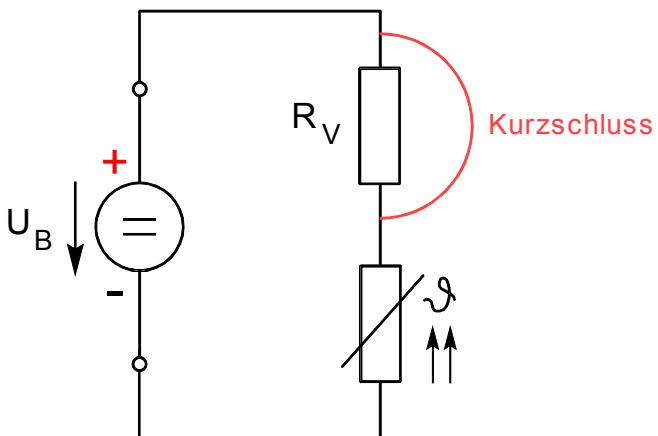


Diese Schaltung zeigt als Beispiel eine einfache Schaltung zur **Überstromsicherung**. Der Kaltleiter arbeitet auch hierbei in der Betriebsart Eigenerwärmung. Steigt die Stromstärke in der angedeuteten Schaltung ungewollt stark an, so wird dadurch der Kaltleiter erwärmt, sein Widerstandswert steigt und vermindert damit wieder die Stromstärke.

Diese Eigenschaft kann man auch für eine Kurzschluss-Sicherung ausnutzen:



Die Schaltung zeigt einen Verbraucherwiderstand  $R_V$ , zu dem der Kaltleiter in Reihe geschaltet ist. Tritt nun am Verbraucherwiderstand ein Kurzschluss auf,



hat der Verbraucher praktisch keinen Widerstand mehr, so dass zunächst der Strom stark ansteigt. Dieser Strom erwärmt den Kaltleiter schnell, so dass sich dessen Widerstandswert drastisch erhöht und er so den Kurzschlussstrom begrenzt.

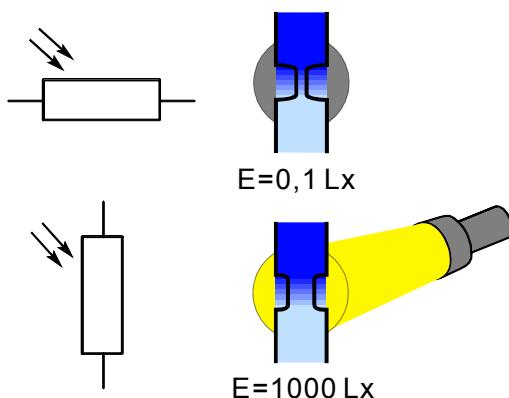
### Fotowiderstände (LDR-Widerstände)

#### Allgemeines:

Verschiedene Halbleitermaterialien sind für unterschiedliche Wellenlängen empfindlich: Cadmiumsulfid (CdS) ist bei sichtbarem Licht besonders lichtempfindlich, Bleisulfid (PbS) und Indiumantimonid (InSb) bei infrarotem Licht. Deshalb werden diese auch für Infrarot-Lichtschranken eingesetzt.

#### Schaltbild und analoge Darstellung:

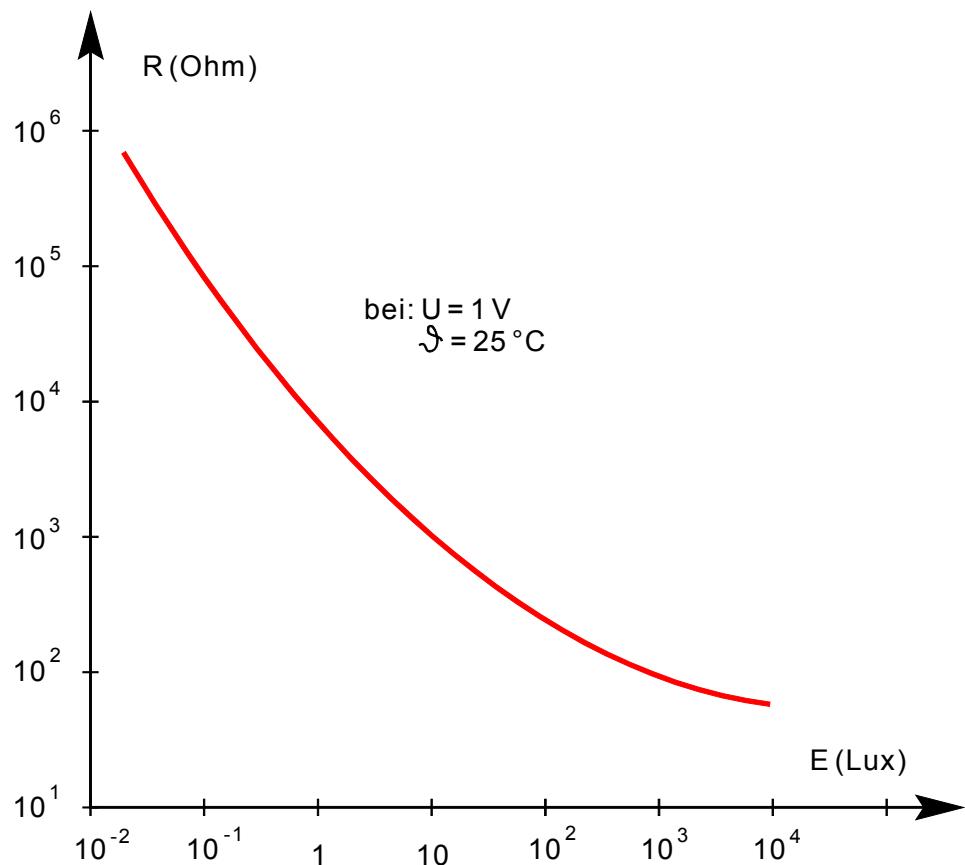
Fotowiderstände werden oft auch als LDR-Widerstände bezeichnet. Dies ist eine Abkürzung aus dem englischen **L**ight-**D**ependent-**R**esistor. Das Schaltbild zeigt ein Widerstandssymbol mit zwei Pfeilen, die die Lichtstrahlung anzeigen sollen (Abb., links).



Verwendet man für den Widerstand wieder die Analogie einer Engstelle in einer Rohrleitung, so müßte man das Verhalten der Fotowiderstände wie in der Abbildung rechts darstellen: bei Beleuchtung erweitert sich die Engstelle, bei Abdunkelung verengt sie sich wieder.

### Die Kennlinie eines Fotowiderstandes:

Im Unterschied zu Heiß- und Kaltleitern hängt der Widerstandswert bei einem Fotowiderstand von der Beleuchtungsstärke ab. Dies zeigt die Kennlinie sehr schön:



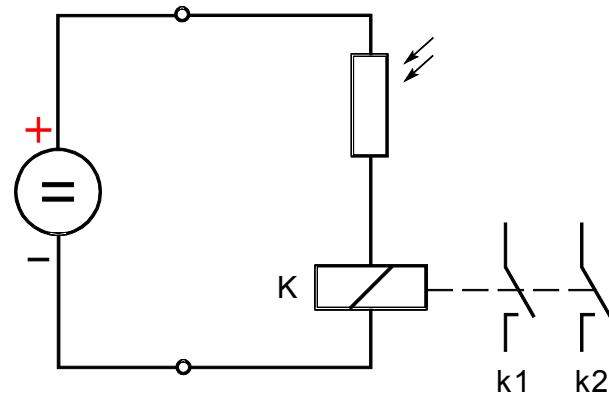
Wie man sieht, sinkt der Widerstandswert mit zunehmender Beleuchtung, allerdings nicht linear.

### Anwendungen:

Fotowiderstände sind zwar sehr lichtempfindliche Bauelemente, aber durch ihre relativ große Ansprechzeit sind sie nur in Anwendungen einsetzbar, bei denen dies keine Rolle spielt. Dennoch ist der mögliche Anwendungsbereich sehr breit:

- Lichtschranken aller Art
- Flammenwächter in Ölzentralheizungen
- Dämmerungsschalter
- Lichtwächterschaltungen
- Alarmanlagen
- usw.

Eine Prinzipschaltung zeigt die folgende Abbildung.



Wird der Fotowiderstand beleuchtet, sinkt sein Widerstand stark ab und das Relais kann durchschalten; bei Dunkelheit hat der Fotowiderstand einen sehr großen Widerstand, weshalb das Relais dann abfällt.

## Ermitteln des Arbeitspunktes mit Kennlinien

### Bei Reihenschaltung:

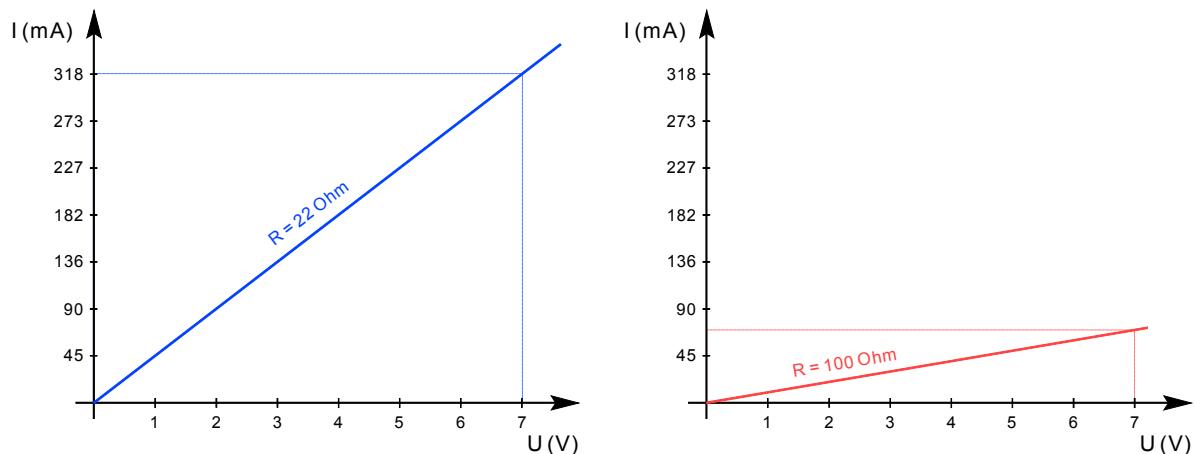
Bei der Reihenschaltung zweier ohmscher Widerstände können die beiden Teilspannungen sowie die Stromstärke mit Hilfe der Spannungsteiler-Formeln ermittelt werden (siehe Literatur). Dies ist dadurch möglich, dass solche Widerstände ein lineares Verhalten aufweisen, d.h. dass sich ihre Stromstärke mit wachsender Spannung proportional ändert (Ohmsches Gesetz). Daraus ergibt sich auch die Aufteilung der Gesamt-Spannung im Verhältnis der Einzelwiderstände.

Hat man jetzt aber eine Reihenschaltung eines Widerstandes mit einem Bauelement, das kein lineares Verhalten aufweist (z.B. eine Diode), dann ist die Berechnung der Teilspannungen und der Gesamtstromstärke nicht mehr so einfach möglich. In diesem Fall muss man zu anderen Formen der Ermittlung dieser Werte greifen. Die exakte rein mathematische (numerische) Berechnung solcher Schaltungen ist sehr aufwendig (numerische Näherungsverfahren), weshalb hier ein einfaches und einleuchtendes graphisches Verfahren gezeigt werden soll, für einen solchen Fall die Schaltung zu berechnen, d.h. den Arbeitspunkt zu ermitteln. Um dieses Verfahren leichter nachvollziehen zu können, soll es zunächst am einfachsten Fall, der Reihenschaltung zweier ohmscher Widerstände hergeleitet werden.

Mit der im vorhergehenden Abschnitt "Allgemeines über Kennlinien" eingeführten Kennliniedarstellung von Widerständen lässt sich dieses Verfahren in vier Schritten entwickeln:

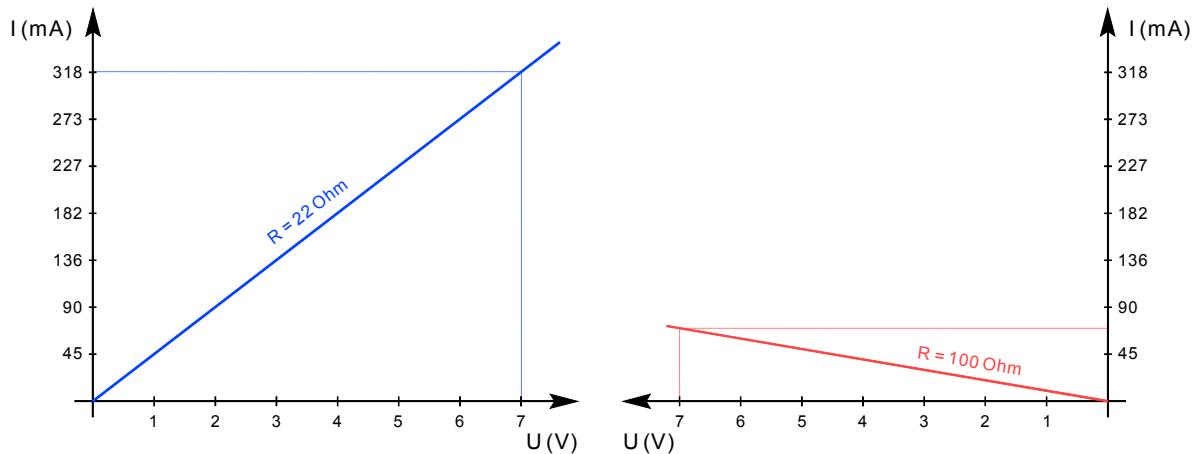
### Schritt 1:

Für jeden der beiden Widerstände kann eine Kennlinie gezeichnet werden (unbedingt im selben Spannungs- und Strommaßstab zeichnen):



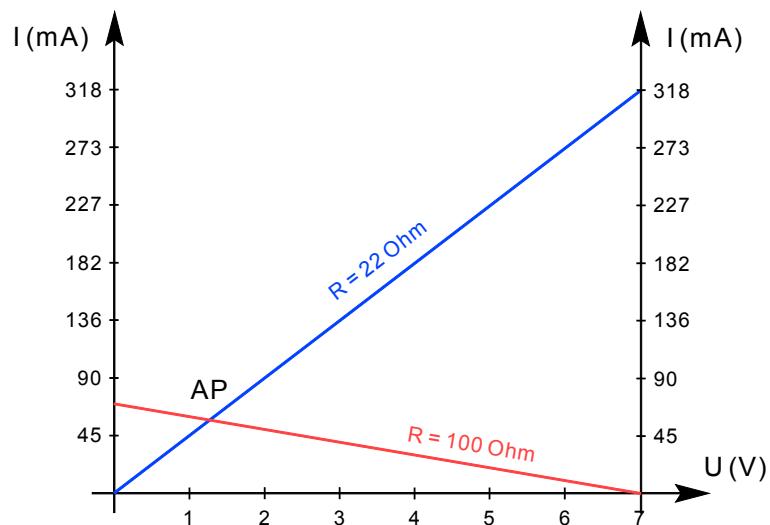
### Schritt 2:

Eines der beiden Diagramme wird jetzt gespiegelt, so dass der Nullpunkt auf der rechten Seite liegt und die Spannungsachse von rechts nach links verläuft.



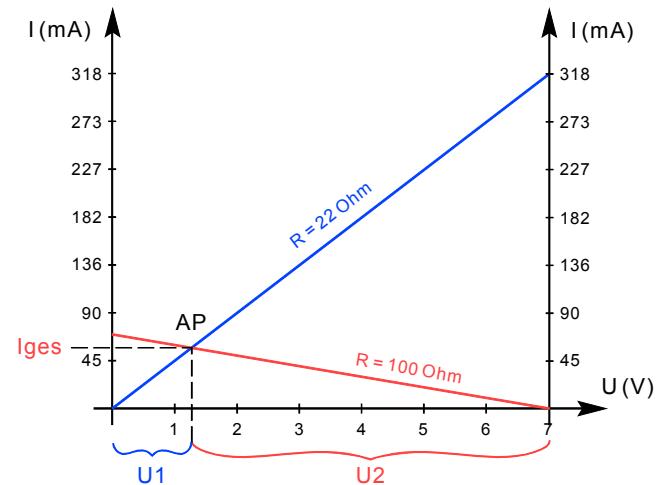
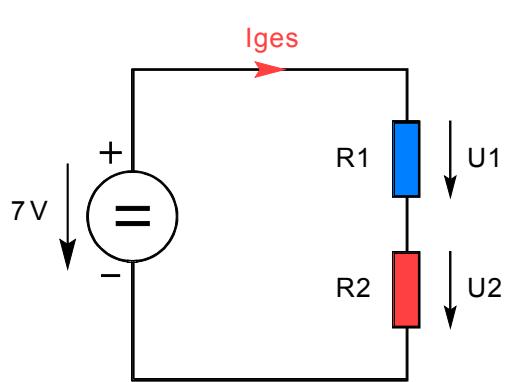
Schritt 3:

Dann werden die beiden Diagramme ineinander gezeichnet. Dabei gilt folgende Vorschrift:  
Der Nullpunkt des gespiegelten Diagramms muss genau auf den Punkt der angelegten Betriebsspannung gesetzt werden: bei 10 V Betriebsspannung auf die 10, bei 7 V Betriebsspannung auf die 7 usw.



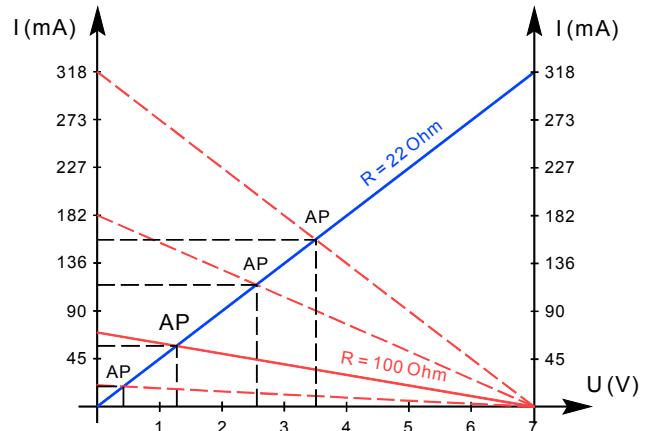
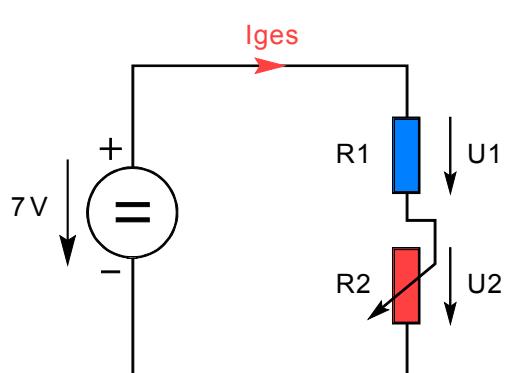
Schritt 4:

Dadurch ergibt sich ein Schnittpunkt der beiden Kennlinien, der den sogenannten **Arbeitspunkt der Reihenschaltung** markiert. Er gibt Auskunft über die Aufteilung der Betriebsspannung auf die beiden Bauelemente und über die Stromstärke im Kreis. Geht man vom Arbeitspunkt senkrecht nach unten auf die Spannungsachse, so ergeben sich die Teilspannungen als die Achsenabschnitte, die unter den jeweiligen Kennlinien liegen:



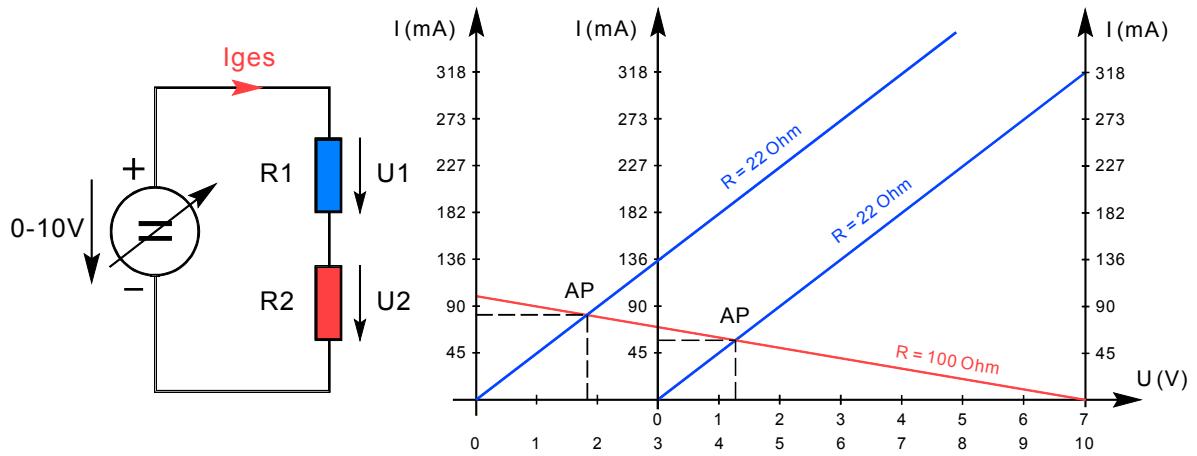
Die Stromstärke durch die beiden Bauelemente bekommt man, wenn man vom Arbeitspunkt nach rechts oder links auf eine der beiden Stromachsen geht.

Obwohl diese Darstellungsform zunächst recht abstrakt ist, stellt sie ein ausgezeichnetes Werkzeug dar, um die Verhältnisse bei der Reihenschaltung anschaulich darzustellen. Man kann z.B. leicht zeigen, was in der Schaltung geschieht, wenn einer der Widerstände größer oder kleiner gemacht wird:



Macht man  $R_2$  größer, wird seine Kennlinie flacher und damit rutscht der Arbeitspunkt auf der Kennlinie von  $R_2$  nach links: Der Spannungsanteil von  $R_2$  wird größer, der von  $R_1$  kleiner und gleichzeitig nimmt die Stromstärke ab, da ja der Gesamtwiderstand größer geworden ist. Umgekehrt verhält es sich, wenn  $R_2$  kleiner gemacht wird: Seine Kennlinie wird steiler und damit rutscht der Arbeitspunkt auf der blauen Kennlinie ( $R_1$ ) nach rechts oben. Der Spannungsanteil von  $R_2$  sinkt ab, derjenige von  $R_1$  steigt an und die Stromstärke nimmt zu, da der Gesamtwiderstand kleiner geworden ist.

Auch für eine Veränderung der Betriebsspannung lassen sich die Auswirkungen in der Schaltung ganz anschaulich nachvollziehen:



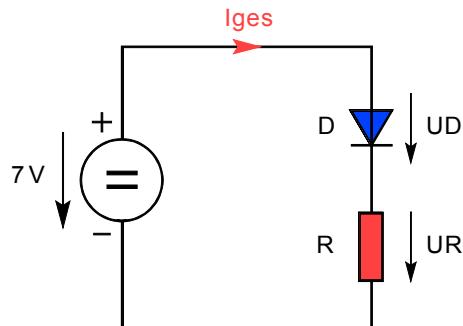
Wird  $U_B$  z.B. von 7 auf 10 Volt erhöht, bedeutet das, dass die Spannungsachse des Diagramms um 3 V länger wird: Man schiebt einfach die linke Stromachse um 3 Einheiten nach links und "nimmt den Widerstand mit". Die Steigung des Widerandes darf dabei aber nicht verändert werden, da er seinen Wert beibehält. Am sich ergebenden Diagramm kann man sofort ablesen, dass sich das Spannungsverhältnis der beiden Widerstände nicht geändert hat, wohl aber die Stromstärke etwas größer geworden ist.

Wichtig bleibt noch anzumerken, dass dieses Verfahren nur mit gleichartigen Kennlinien durchführbar ist, d.h. es sollten  $I-U$ -Kennlinien sein. Man kann nicht eine  $I-U$ -Kennlinie mit einer  $R=0$ -Kennlinie schneiden. Außerdem ist darauf zu achten, dass die Maßstäbe der beiden Kennlinien genau übereinstimmen müssen.

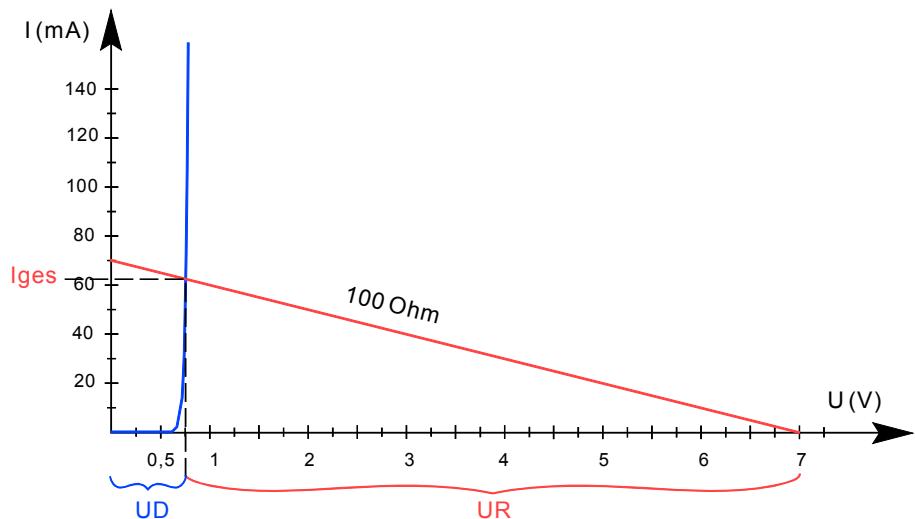
Dieses Verfahren ist generell gültig, kann also auch bei der Reihenschaltung beliebiger Baulemente angewendet werden, wenn die angegebenen Regeln eingehalten werden. Üblicherweise wird es zur Arbeitspunktbestimmung in Transistororschaltungen eingesetzt.

Ein einfaches Beispiel für die Reihenschaltung einer Diode mit einem Widerstand soll das Verfahren noch einmal verdeutlichen.

Zunächst die Schaltung, in der die beiden Bauelemente der Übersichtlichkeit halber wieder farbig markiert wurden:



Und nun die dazugehörige Arbeitspunktbestimmung mittels Kennlinien:



### Kennlinien bei Parallelschaltung:

Bei der Reihenschaltung zweier Bauelemente kann der Arbeitspunkt der Schaltung (Spannungsaufteilung, Gesamtstromstärke) durch das oben beschriebene grafische Verfahren ermittelt werden.

Wie kann man aber Bauelemente darstellen, die parallel geschaltet sind?

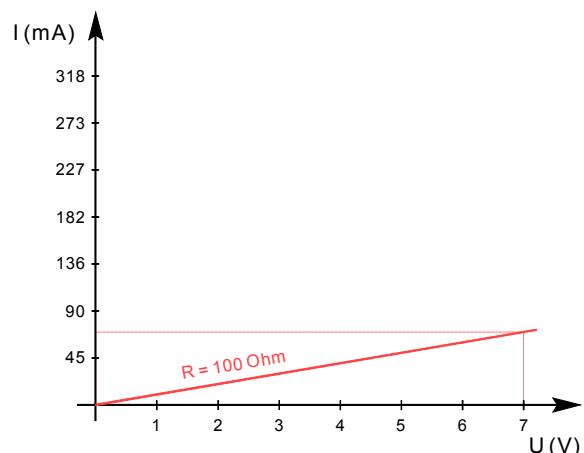
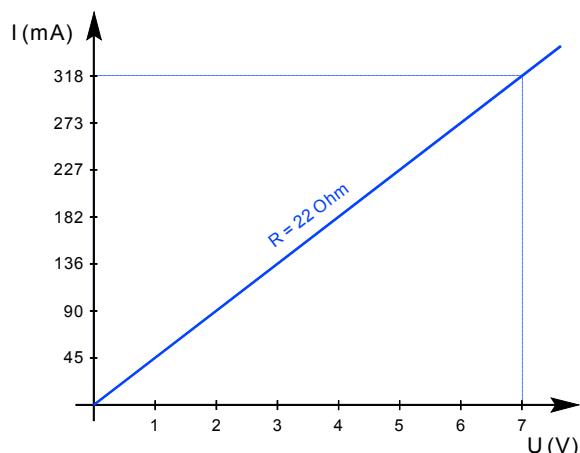
#### Dazu eine grundsätzlich Vorüberlegung:

Bei der Herleitung des grafischen Verfahrens zur Bestimmung des Arbeitspunktes bei der Reihenschaltung zweier Widerstände, wurden die I–U–Diagramme als Widerstands–Kennlinien bezeichnet. Dies ist aber nicht korrekt, wie sich leicht zeigen lässt:

In der Mathematik gilt für die Steigung  $s$  einer Geraden das Verhältnis von

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Bildet man in der Darstellung dieser I–U–Diagramme aber dieses Verhältnis,



so erhält man das Verhältnis von

$$s = \frac{\Delta I}{\Delta U}$$

, und das ist nach dem Ohmschen Gesetz kein Widerstand, sondern der **Kehrwert eines Widerstandes**, also sein **Leitwert G**.

Zum Verständnis: Man kann das Verhalten eines Widerstandes, dem Strom einen Widerstand entgegen zu setzen, auf zwei verschiedene Arten ausdrücken. Man kann einmal sagen, das Bauelement setzt dem Fließen des Stromes einen bestimmten Widerstand entgegen, oder man kann sagen, das Bauelement besitzt eine bestimmte Leitfähigkeit. Dabei sind die beiden Begriffe Widerstand und Leitwert komplementär, d.h. je größer der Widerstand eines Bauelements ist, desto geringer ist sein Leitwert und umgekehrt. Deshalb wird der Leitwert G mathematisch auch als Kehrwert des Widerstandes ausgedrückt. Es gilt also:

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{und:} \quad R = \frac{1}{G}$$

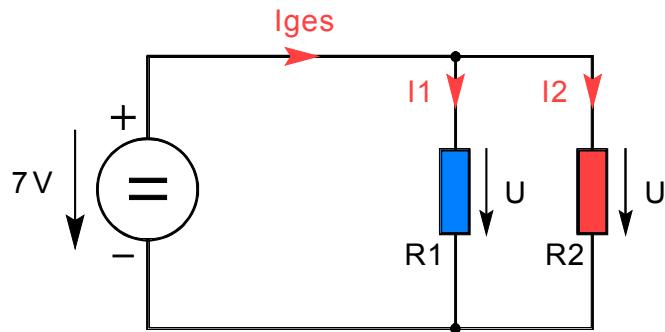
Die oben verwendeten Kennlinien sind also eigentlich keine Widerstands– sondern **Leitwert-Kennlinien**. Das entspricht auch genau dem, was die Kennlinien ausdrücken. So hat ein kleiner Leitwert eine kleine Steigung und ein großer Leitwert eine große Steigung, weshalb man nicht direkt den Widerstand, wohl aber den Leitwert „sehen“ kann.

Nach den Gesetzen für Reihen- und Parallelschaltung gilt: **Bei Reihenschaltung addieren sich die Widerstände, bei Parallelschaltung addieren sich die Leitwerte.**

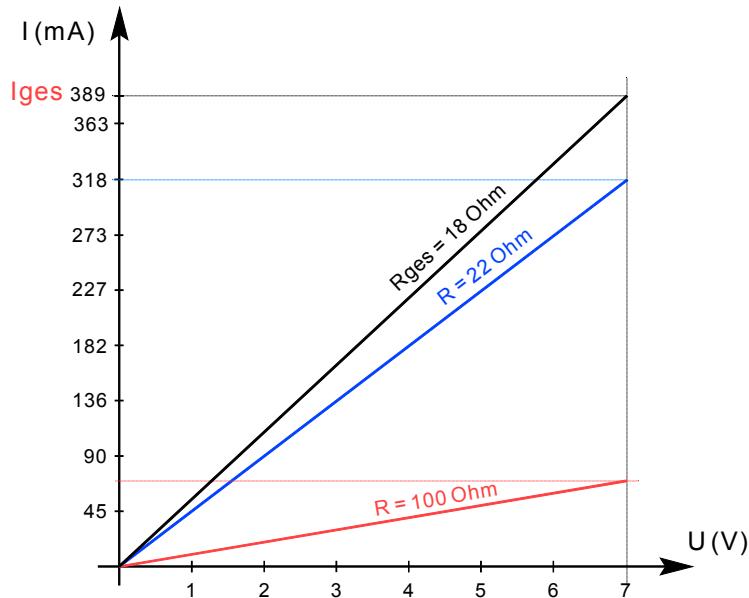
Reihenschaltung:  $R_{ges} = R_1 + R_2$

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

Werden jetzt z.B. die beiden oben gezeigten Widerstände parallel geschaltet,



so kann man in der Kennlinien–Darstellung diese Leitwertaddition leicht als Addition der Steigungen der beiden Leitwerte realisieren:



Die schwarze Kennlinie bekommt man einfach dadurch, dass man die Steigungen der beiden Leitwertkennlinien der Widerstände addiert, was man auch durch Stromaddition bei der Betriebsspannung bekommt. Diese schwarze Kennlinie repräsentiert damit den sich ergebenden Gesamtleitwert der Parallelschaltung.

## Dioden

### Name/Begriff:

Der Name Diode ist zusammengesetzt aus **Di** – Elektrode, meint also ein Bauelement, das **zwei Elektroden** besitzt.

Unter einer Elektrode versteht man einen Festkörper, bei dem Ladungsträger von einem in ein anderes Medium wechseln:

Übergänge: Metall – Flüssigkeit; Metall – Luft/Gas/Vakuum.

Elektroden gibt es z.B. in Batterien, Akkumulatoren, Schweißgeräten, Elektronenröhren, Elektronenstrahlröhren usw.

Diejenige Elektrode, die mit dem Minuspol verbunden ist, nennt man Kathode, die Elektrode, die mit dem Pluspol verbunden ist, nennt man Anode. Früher nannte man Elektronenröhren mit zwei Elektroden, also einer Anode und einer Kathode, Dioden; analog dazu nannte man Elektronenröhren mit drei Elektroden Trioden (und dann Tetroden, Pentoden, Hexoden, Heptoden, Oktoden). Beim geschichtlichen Übergang von den Elektronenröhren zu den Halbleiterbauelementen hat man den Namen Diode einfach übernommen, obwohl es bei einer Halbleiterdiode keine Elektroden mehr gibt.

### Geschichtliches:

Bei der Diode stand nicht ein Problem als „Initialzündung“ am Anfang sondern die Entdeckung eines Phänomens, das dann für technische Zwecke genutzt wurde.

Das Ganze hat seinen Ursprung in der Entdeckung des sog. „Edisoneffekts“. Bei seinen Experimenten mit Glühlampen (ab 1878) hatte Edison festgestellt, dass zwischen dem Glühfaden und einer Platte im Lampeninneren ein schwacher Strom fließt. Dieser Effekt wird später von dem Briten Fleming genauer untersucht. Er optimiert den Vorgang durch eine geeignete Röhrenform und erhält so die Diode (1904). Die Diode wird zeitgleich noch einmal von dem Deutschen Wehnelt erfunden.

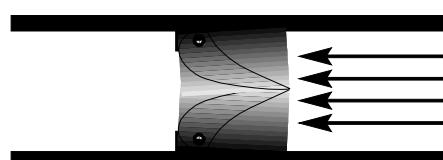
Damit beginnt eine Zeit intensiven Experimentierens mit dieser neuen Anordnung, was 1 Jahr später zur 3-Elektroden-Röhre (Triode), also zur eigentlichen Verstärkerröhre, führt. Auch sie wird zeitgleich und parallel erfunden: von dem Österreicher Robert von Lieben und von dem Amerikaner Lee de Forest, der seine Röhre „Audion“ nannte. Damit ist eine neue Ära, die der Elektronik, eingeleitet.

### Allgemeines: Funktionsweise und Aufbau von Dioden

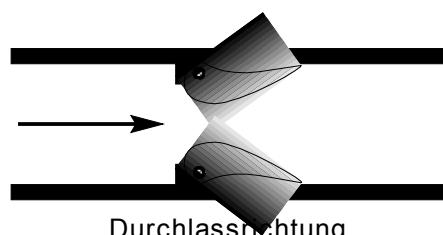
Eine Diode ist ein **elektronisches** Ventil, sie lässt den Strom in einer Richtung durch und sperrt ihn in der anderen, ganz so wie dies technische Ventile mit anderen Medien auch tun.



Ventil ohne Druck



Sperrrichtung



Durchlassrichtung

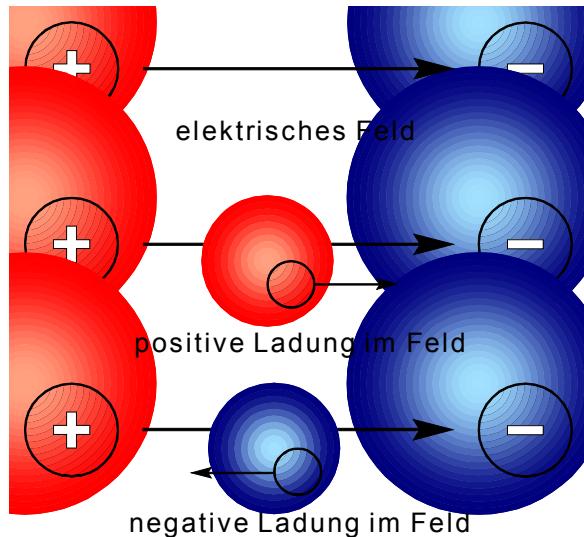
Nun ist relativ leicht nachzuvollziehen, wie solche Ventile z.B. für Flüssigkeiten oder Gase funktionieren, aber die Frage ist: wie kann man **elektrische Ladungsträger** in einer solchen Weise beeinflussen?

Der Aufbau und die Vorgänge in Halbleiterdioden sind recht kompliziert, einige grundlegende Zusammenhänge habe ich im Abschnitt über die Halbleitermaterialien dargestellt.

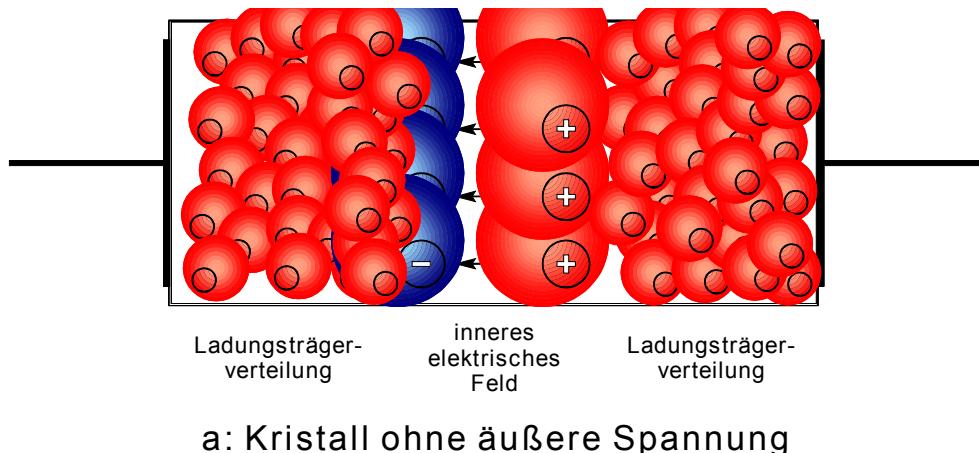
**K** „Systematischer Teil“; Abschnitt Materialien der Elektronik.

Ich werde deshalb ein stark vereinfachtes **Gedankenmodell** vorstellen, das es erlaubt, die inneren Vorgänge prinzipiell zu verstehen.

Die Frage ist also: wie kann man es erreichen, daß Ladungsträger in der einen Richtung ungehindert fließen können, in der anderen aber gesperrt werden? Um der Lösung dieses Problems näher zu kommen, gehen wir von einer Grunderscheinung des elektrischen Feldes aus: zwischen zwei ungleichnamigen Ladungen entsteht ein Kraftfeld, das sogenannte elektrische Feld. Bringt man eine Ladung in dieses Feld, so wirken Anziehungs- bzw. Abstößungskräfte auf sie ein und beschleunigen sie in Richtung der gegenpoligen Ladung.

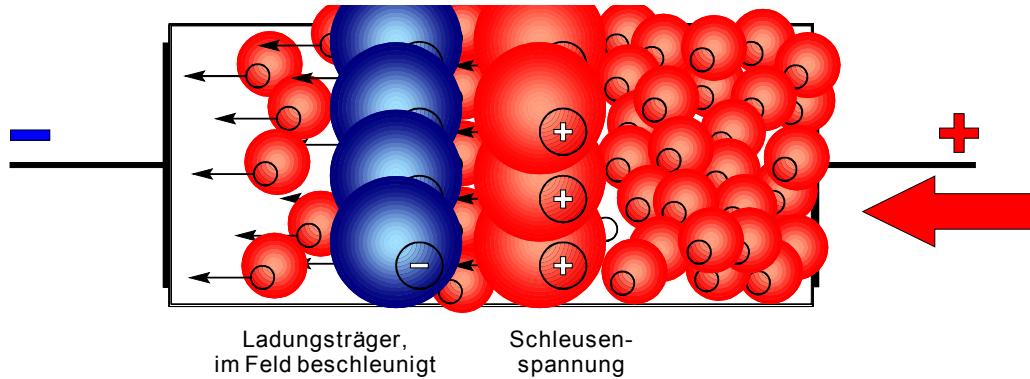


Auf diesem Grundphänomen beruht (unter anderem) die Wirkungsweise von Dioden. Da man in der Technik die technische Spannungs- und Stromrichtung bevorzugt, also in positiven Ladungsträgern denkt, werde ich dies bei den folgenden Erläuterungen auch tun. Bei negativen Ladungsträgern ergibt sich ein komplementäres Bild der Verhältnisse.



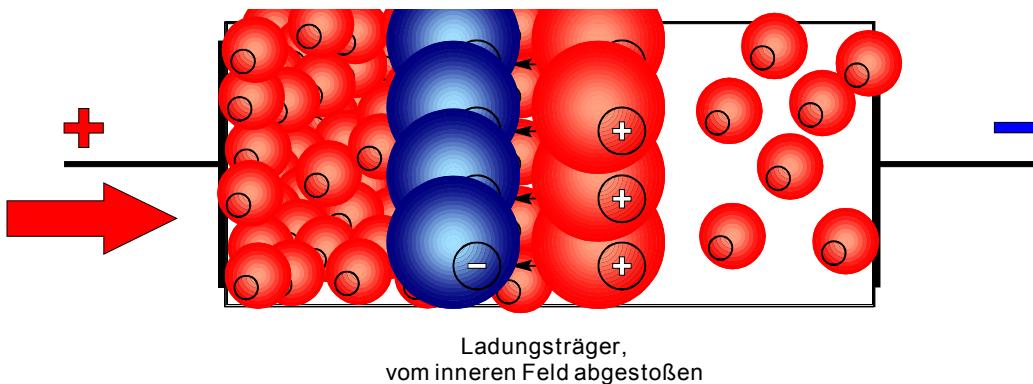
a: Kristall ohne äußere Spannung

Denkt man sich, wie in der Abbildung dargestellt, ein solches elektrisches Feld im Inneren eines Kristalls, so wird sich etwa die angegebene Ladungsverteilung einstellen: die freien Ladungsträger auf der linken Seite werden zwar von den negativen Ladungen des Feldes angezogen, können aber nicht in das Feld gelangen, da sie dort wieder nach links beschleunigt werden; die Ladungsträger auf der rechten Seite können ebenfalls nicht in das Feld gelangen, da sie von den positiven Ladungen des Feldes abgestoßen werden.



b: Kristall mit äußerer Spannung in Richtung des Feldes

Stellen Sie sich vor, man würde nun an diese Anordnung von außen eine Spannung anlegen; ist diese Spannung noch sehr klein, so wird der Druck auf die Elektronen zunächst nicht ausreichen, um sie gegen die Kraft der Feld-Ladungen in das Feld zu bekommen. Wird aber die äußere Spannung allmählich weiter gesteigert, so erreicht man schließlich den Punkt, an dem die Ladungsträger diese Barriere überspringen können (diese Spannung nennt man **Schleusenspannung** oder Schwellenspannung), in das innere Feld gelangen und dort auf die linke Seite beschleunigt werden: es wird ein kräftiger Strom fließen.



c: Kristall mit äußerer Spannung gegen die Richtung des Feldes

Legt man die äußere Spannung in umgekehrter Richtung an, so ergibt sich folgendes Bild: die Ladungsträger der rechten Seite werden vom negativen Pol der Spannungsquelle abgesaugt; die Ladungsträger auf der linken Seite geraten von zwei Seiten unter Druck. Der positive Pol der Spannungsquelle versucht weitere Elektronen in den Kristall hinein zu pumpen, das innere elektrische Feld beschleunigt aber die Elektronen wieder auf die linke Seite zurück: es kann kein Strom fließen. Wird die äußere Spannung noch weiter gesteigert, erreicht man schließlich den Punkt, an dem der Druck auf die Ladungsträger so groß wird, dass sie das innere Feld durchbrechen → es fließt ein sehr großer Strom, der die Diode zerstört.

Die Verhältnisse in realen Halbleiterdioden sind wesentlich komplizierter, dies soll hier nur angedeutet werden:

- bei den Dioden sind immer **zwei Sorten von Ladungsträgern** am Leitungsmechanismus beteiligt: freie Elektronen (–) und Löcher (+), das sind Fehlstellen von Elektronen, die im Gitter wandern können.

- durch gezieltes Verunreinigen mit Fremdatomen, das sogenannte "**Dotieren**" kann künstlich ein Überschuß an negativen oder positiven Ladungsträgern erzeugt werden. Man spricht dabei von n–Leitung bzw. von p–Leitung. Grenzt in einem Halbleiterkristall eine n-dotierte direkt an eine p-dotierte Schicht (**pn–Übergang**), so bildet sich an dieser Grenze das **innere elektrische Feld** aus, das die Ursache für die Diodenfunktion ist. Dioden bestehen also aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten.
- Bei ihren Wanderungsbewegungen treffen immer wieder freie Elektronen auf Löcher und rekombinieren, sind damit also für den weiteren Stromtransport nicht mehr verfügbar.
- Die Geschwindigkeiten von freien Elektronen und Löchern im Kristall ist recht unterschiedlich.
- Alle diese Effekte sind temperaturabhängig.

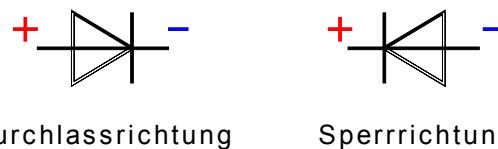
## K „Systematischer Teil“; Abschnitt Materialien der Elektronik.

Dennoch kann man die **Funktion** bzw. das **Verhalten der Diode** auf wenige wichtige Aspekte eingrenzen:

- Sie ist **richtungsabhängig**, d.h. sie hat eine Durchlassrichtung und eine Sperrrichtung.
- In **Durchlassrichtung** öffnet sie nicht sofort, sondern erst nach Überschreiten einer gewissen Spannungsschwelle, der sog. **Schleusenspannung**; dann aber fließt ein kräftiger Strom.
- In **Sperrrichtung** sperrt die Diode; außer einem sehr geringen "Leckstrom" kann **kein Strom** fließen.

### Schaltbild:

Das Schaltbild der Diode orientiert sich an der Richtungsabhängigkeit des Bauelements. Legt man die technische Spannungs– und Stromrichtung zugrunde, so zeigt der Pfeil in die Richtung des fließenden Stroms, der senkrechte Strich symbolisiert das Sperren des Stroms. Da der Strom von Plus nach Minus fließt, ist damit auch klar, wie man die Spannung anlegen muß. Diesen Vorteil der technischen Spannungs– und Stromrichtung sollte man nicht unterschätzen.



## Kennlinie der Diode

Das **Verhalten der Diode** lässt sich sehr schön anhand der Kennlinie darstellen. Da bei der Diode die Temperatur zunächst keine Rolle spielt, ist die Kennlinie hier als **Spannungs–Strom–Diagramm** ausgeführt.

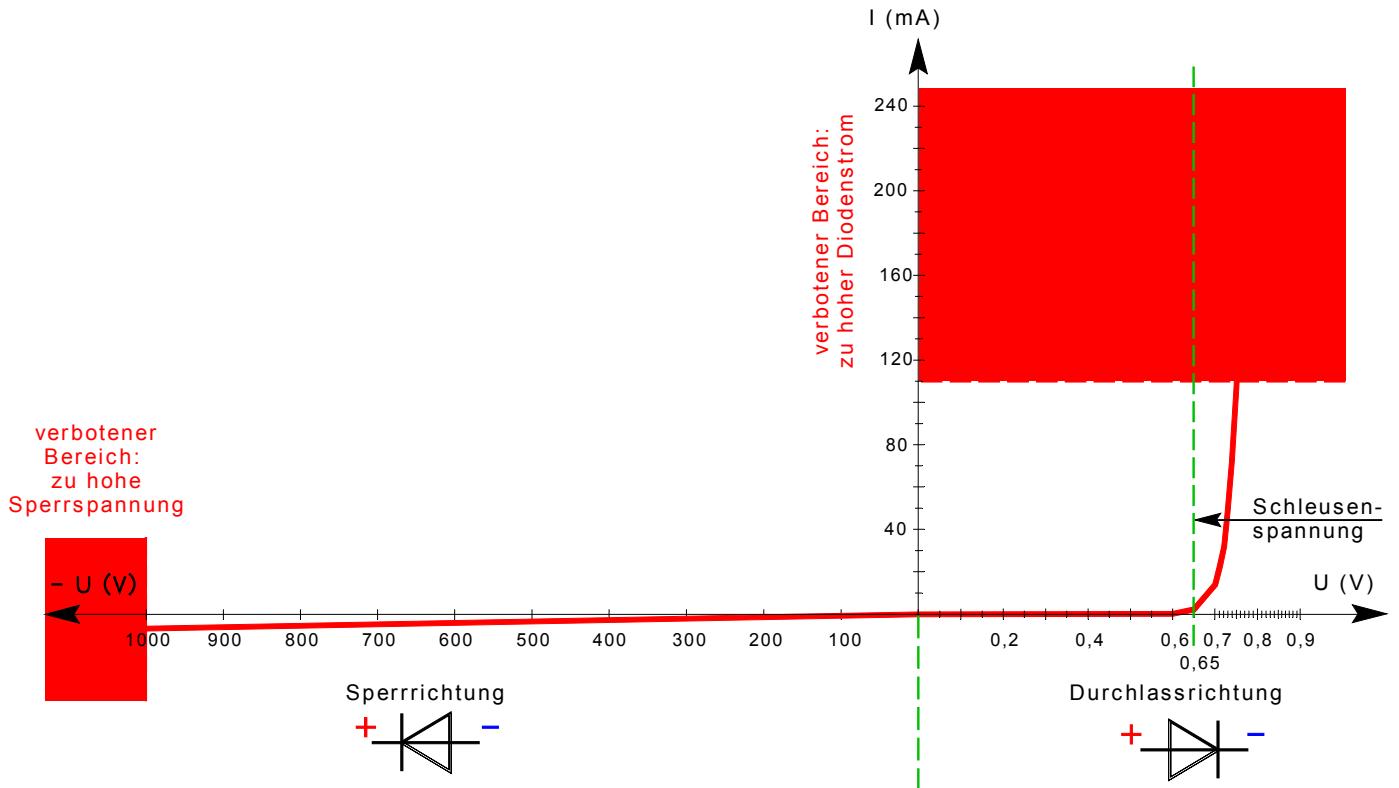


Abb 21: Kennlinie einer Siliziumdiode

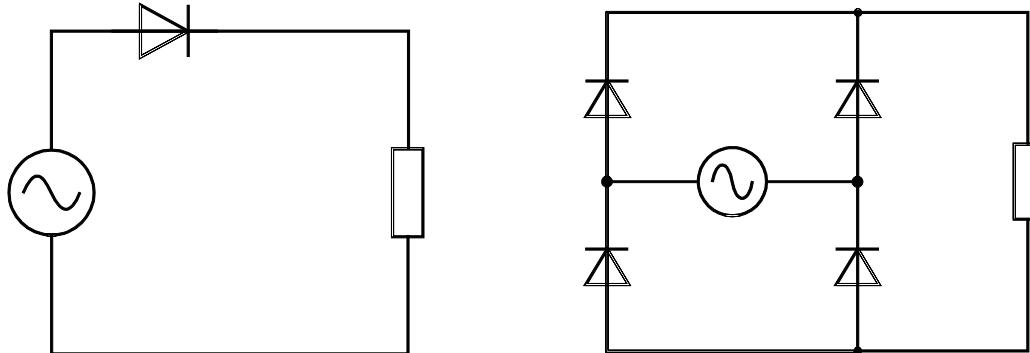
Wie man sieht, kann man aus dieser Darstellung alle wichtigen Punkte herauslesen: es gibt eine Durchlass– und eine Sperrrichtung; in Durchlassrichtung muß zunächst die Schleusenspannung überwunden werden, bevor die Diode öffnen kann; diese Schleusenspannung beträgt hier ca. 0,65 V (Siliziumdiode); danach steigt der Strom sehr steil an; polt man die Spannung um, so fließt praktisch kein Strom mehr, die Diode sperrt. Bei diesem Diagramm bitte die unterschiedlichen Maßstäbe der Spannungsachse in Durchlass– bzw. Sperrrichtung beachten!

Aus dem steilen Stromanstieg in Durchlassrichtung lässt sich folgern, daß man Dioden immer mit einem Schutzwiderstand betreiben sollte, damit sie nicht überlastet und zerstört werden. Auch eine zu hohe Sperrspannung kann zum Durchbruch und damit zur Zerstörung der Diode führen.

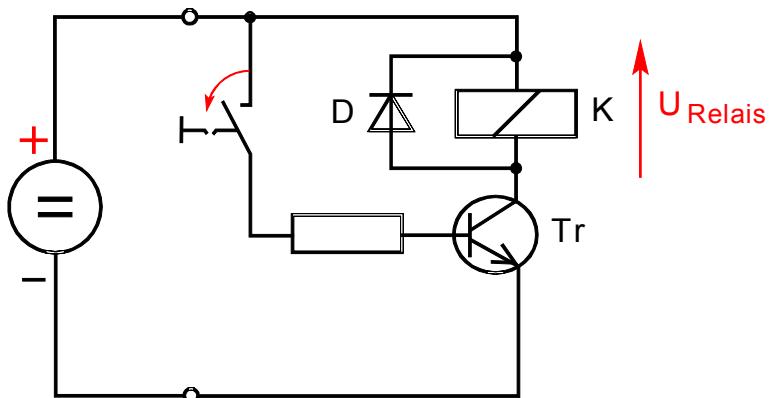
## Anwendungen von Dioden

Dioden können in elektronischen Schaltungen die unterschiedlichsten Aufgaben haben:

- Gleichrichtung von Wechselspannungen und Wechselströmen

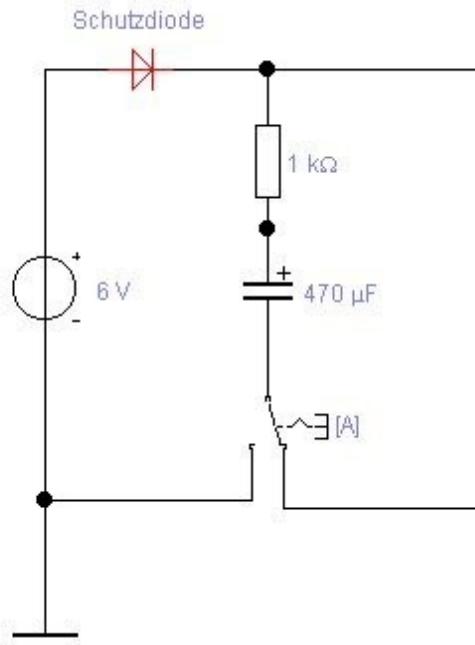


- „Kurzschließen“ von gefährlichen Überspannungen (z.B. beim Abschalten von Spulen, Relais usw.) → Freilaufdiode



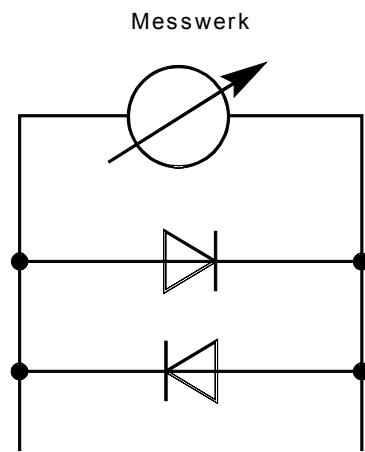
Eine auch in der Schule häufig vorkommende Anwendung von Dioden ist die sogenannte "**Freilaufdiode**". Man schaltet, wie in der Abbildung, eine Diode D parallel zu einem Relais K, um den Transistor Tr zu schützen. Die Diode muß dabei zum Pluspol zeigen. Dies ist folgendermaßen zu verstehen: Spulen haben die Eigenschaft, sich gegen Stromänderungen zu "sträuben", indem sie gegen diese Änderung eine Gegenspannung erzeugen. Wird in der Schaltung der Transistor gesperrt (dies wirkt wie das Öffnen eines Schalters), so nimmt die Stromstärke rapide ab. Um dem entgegenzuwirken, erzeugt die Spule also eine **sehr hohe Gegenspannung**, die den empfindlichen Transistor zerstören könnte. Um dies zu verhindern, wird die Diode so geschaltet, daß sie diese Abschaltspannung der Spule kurzschließt und damit unschädlich macht. Beim Einschalten wirkt sich die Diode nicht aus, da sie ja gegen die Flussrichtung des Stroms zeigt und damit in Sperrrichtung geschaltet ist.

- Verpolungsschutz für gepolte Bauelemente (z.B. Elkos)



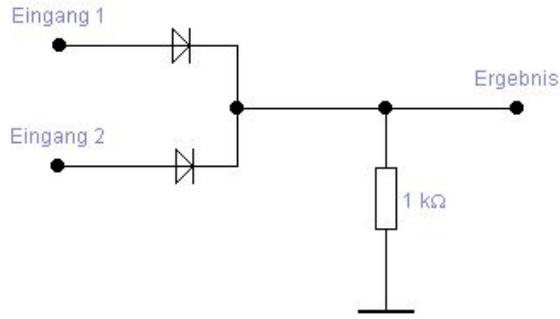
Bei dieser Schaltung dient die Diode zum Schutz des (gepolten) Elektrolytkondensators. Diese Kondensatoren dürfen nicht „verkehrt herum“ an Spannung angeschlossen werden, da sie sonst zerstört werden (mit einem lauten Knall zerplatzen). Die Diode schützt also den Kondensator gegen ein versehentliches Verpolen der Spannungsquelle.

- Begrenzerschaltungen, z.B. Überspannungsschutz für Messwerke

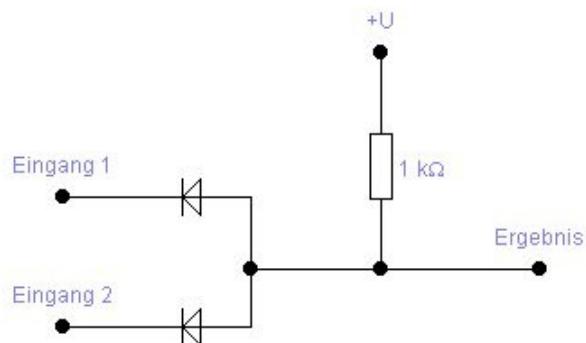


Bei dieser Schaltung sind dem Messwerk zwei Dioden antiparallel geschaltet. Zum Verständnis muss noch gesagt werden, dass das Messwerk nur für Spannungen bis 0,8 Volt ausgelegt ist. Die Dioden stabilisieren in diesem Fall die Spannung für das Messwerk und schützen es dadurch gegen Überspannungen.

- Diode als Wechselstromschalter, z.B. Rechts–Links–Steuerung eines Gleichstrommotors
- Diode als Entkopplungselemente, z.B. in der Digitaltechnik (Diodendecodierer, logische Funktionen)

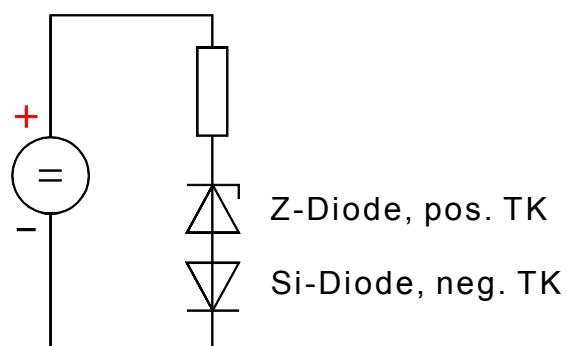


Dies ist eine logische ODER-Funktion, realisiert mit Dioden (die Spannungsversorgung ist der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt). Am Ausgang der Schaltung bekommt man eine Spannung gegen Masse, wenn entweder am Eingang 1 eine Spannung angelegt wird (Signal) ODER am Eingang 2 ODER an beiden.



Dies ist eine logische UND-Funktion, realisiert mit Dioden. Am Ausgang der Schaltung bekommt man nur dann eine Spannung, wenn am Eingang 1 und am Eingang 2 eine Spannung anliegt (Signal). In diesem Fall sperren die beiden Dioden und die Spannung wird auf den Ausgang geschaltet. Liegt auch nur an einem der beiden Eingänge Spannung Null (Masse), so wird auch der Ausgang Spannung Null führen.

- Diode zur Temperaturkompensation eines Transistors oder einer Z-Diode



## Leuchtdioden

### Allgemeines: Funktionsweise und Aufbau

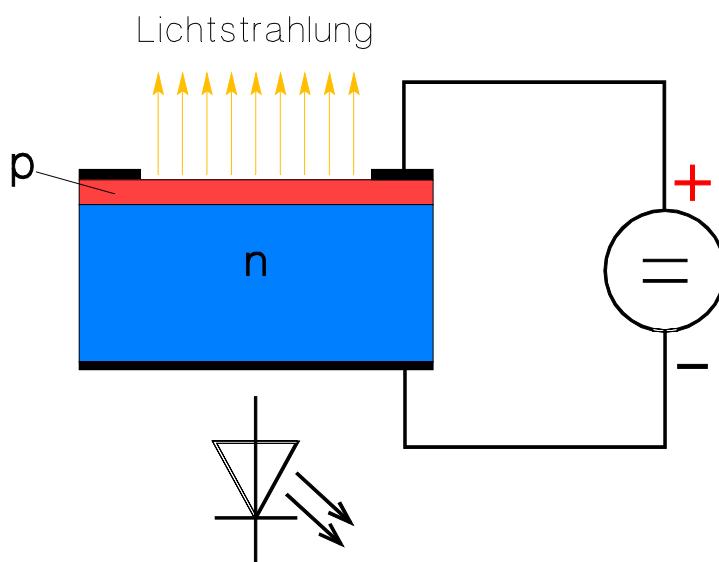
Leuchtdioden sind, wie der Name sagt, Dioden und besitzen deshalb eine n- und eine p-leitende Schicht. Der Effekt, auf dem ihre Wirkungsweise beruht, ist folgender: bei den Heißleitern und Fotowiderständen hatten wir gesehen, daß zum Aufbrechen von Valenzbindungen und damit zum Freisetzen von Ladungsträgern Energie in Form von Wärme oder Licht benötigt wird. Nun kann es aber auch geschehen, daß ein freies Elektron auf seinem Weg durch das Gitter auf eine offene Bindung trifft und in dieses Loch "hineinfällt". Diesen Vorgang nennt man Rekombination und dabei wird die vorher aufgewendete Energie wieder frei. Bei bestimmten Mischkristall-Halbleitern, z.B. Galliumarsenid (GaAs), Galliumphosphid (GaP) und Galliumarsenidphosphid (GaAsP) wird diese Energie in Form von Licht bestimmter Wellenlänge abgestrahlt.

K „Systematischer Teil“; Abschnitt Materialien der Elektronik.

Um diesen Effekt möglichst effektiv in ein Bauelement umzusetzen, müssen zwei Bedingungen erfüllt werden:

- die p-Schicht muß einen hohen Dotierungsgrad aufweisen, damit viele Löcher vorhanden sind und damit die Wahrscheinlichkeit hoch ist, daß "vorbei kommende" Elektronen in diese Löcher fallen;
- die Schicht, in der die Rekombinationen stattfinden (die p-Schicht), muß außerordentlich dünn sein, damit das frei werdende Licht nach außen abgestrahlt werden kann.

Die folgende Abbildung zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Leuchtdiode und deren Schaltzeichen. Um den lichtemittierenden Effekt zu erzeugen, muß die Leuchtdiode in Durchlassrichtung betrieben werden. Dabei wandern die Elektronen durch das innere elektrische Feld in die p-Schicht, wobei die meisten dort rekombinieren. **Leuchtdioden** werden oft auch als **LEDs** bezeichnet: **L**ight-Emitting-Diodes.



## Bauarten und Eigenschaften:

LEDs werden in verschiedenen Größen, Formen und in verschiedenen Lichtfarben angeboten. Der Vorteil von Leuchtdioden gegenüber Glühfadenlämpchen liegt in der größeren Lebensdauer, der geringeren Empfindlichkeit gegen Erschütterungen, den geringen Abmessungen, der höheren Strom-Empfindlichkeit (die wahrnehmbare Lichtabstrahlung beginnt bei etwa 2 mA!) und den extrem niedrigen Schalt- bzw. Reaktionszeiten.

Gerade in neuester Zeit wurden bei der Entwicklung neuer LED-Typen große Erfolge erzielt. So ist es inzwischen gelungen, blau leuchtende LEDs zu konstruieren (sie haben allerdings ein klares Gehäuse). Doch der wohl größte Fortschritt besteht darin, dass man heute in der Lage ist, LEDs mit größerer Lichtabstrahlung herzustellen, die **weißes Licht** abgeben. Wenn es gelingt, sie mit größeren Abmessungen zu bauen, können sie auf längere Sicht gesehen zur Beleuchtung von Räumen eingesetzt werden, was bisher nicht möglich war.

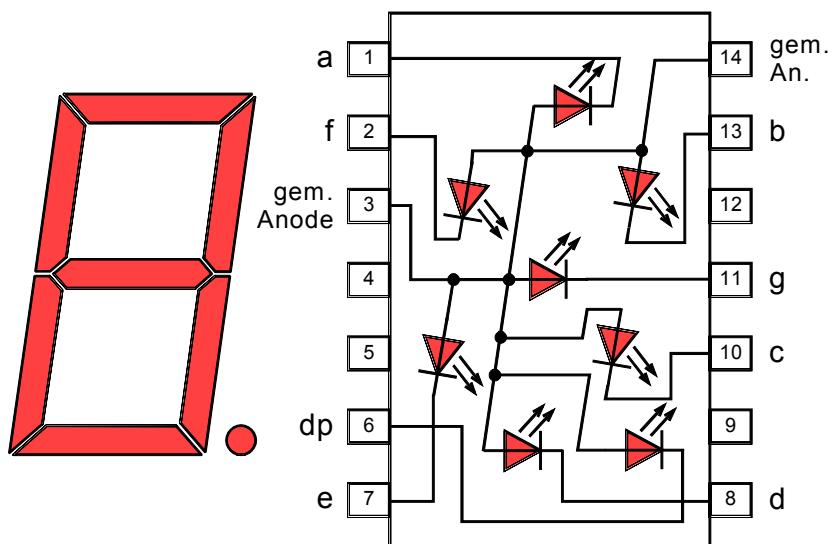
Werden LEDs an Spannung angeschlossen, so müssen sie mit einem Schutzwiderstand versehen werden. Dabei ist zu beachten, daß ihre **Schleusenspannungen** höher als die von "normalen" Dioden ist:

- rote LEDs: 1,2 bis 1,5 V
- gelbe LEDs: 1,4 bis 1,8 V
- grüne LEDs: 2,0 bis 2,5 V
- blaue LEDs: ... 3,3 bis 3,7 V
- weiße LEDs: ... 3,3 bis 3,7 V
- infrarote LEDs: 1,2 bis 1,5 V

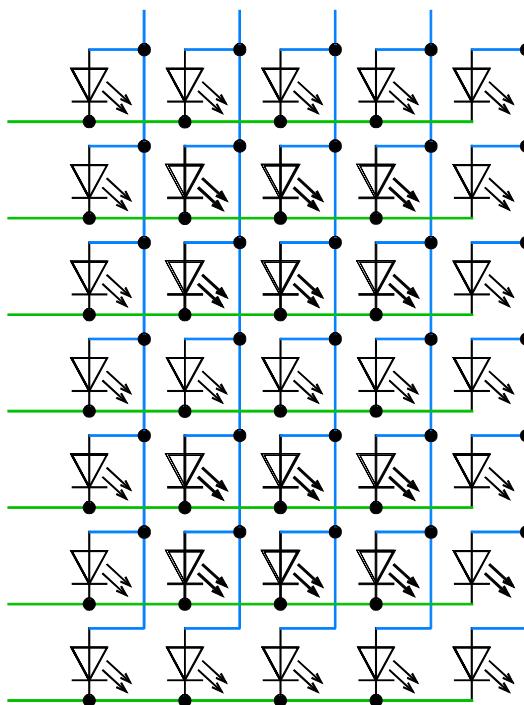
Auch in der **Höhe der Sperrspannungen** unterscheiden sie sich stark von den Dioden: während Silizium-Dioden sehr hohe Sperrspannungen (manche Typen bis 1000 V) aushalten können, liegt dieser Wert bei LEDs etwa zwischen 3 und 8 V!

## Anwendungen:

Aufgrund ihrer guten Eigenschaften werden Leuchtdioden in den unterschiedlichsten Formen als Anzeigen verwendet. Dies reicht von einfachen Anzelglämpchen, über 7-Segment-Anzeigen zur Darstellung von Zahlen und Buchstaben,



Punktmatrizen,



die beide allerdings nur mit speziellen Steuerschaltungen betrieben werden können, Displays zur Anzeige der Lautstärke von Verstärkern usw. Wie oben schon angedeutet, werden neuere Bauarten in Zukunft wohl auch zur Beleuchtung von Räumen eingesetzt werden können.

Leuchtdioden, die Infrarotlicht abstrahlen, werden vor allem für Lichtsender in Lichtschranken, Optokopplern, Fernbedienungen usw. verwendet.

## Z-Dioden

### Allgemeines: Name, Funktionsweise und Aufbau

Der Name röhrt von dem deutschen Physiker Zener her, der diesen Effekt entdeckt und untersucht hat, der der Wirkungsweise der Z-Dioden zugrunde liegt. Aus diesem Grund nannte man ihm zu Ehren diese Dioden auch lange Zeit Zener-Dioden. Zener war aber ein sehr bescheidener Mensch, der diese Ehrung nicht annehmen wollte und so wurden diese Dioden kurzerhand in Z-Dioden umbenannt.

Z-Dioden werden zur **Spannungsstabilisierung** eingesetzt. Dies muß zuerst erläutert werden: Es gibt sehr viele Schaltungen in der Elektronik, die nur dann einwandfrei funktionieren, wenn die Versorgungs-Spannung nicht schwankt. Eine solche Schwankung würde natürlich auch schwankende Ströme und damit sich verändernde Temperaturen, Frequenzen usw. nach sich ziehen. Nun lassen sich solche Schwankungen sowohl bei der Eingangsspannung als auch am Ausgang oft nicht vermeiden, also muß man sich eine schaltungstechnische Lösung überlegen, die hier Abhilfe schafft.

Der **Effekt der Spannungsstabilisierung** läßt sich auch an einer "normalen" Diode zeigen, wenn man sie in Durchlassrichtung betreibt.

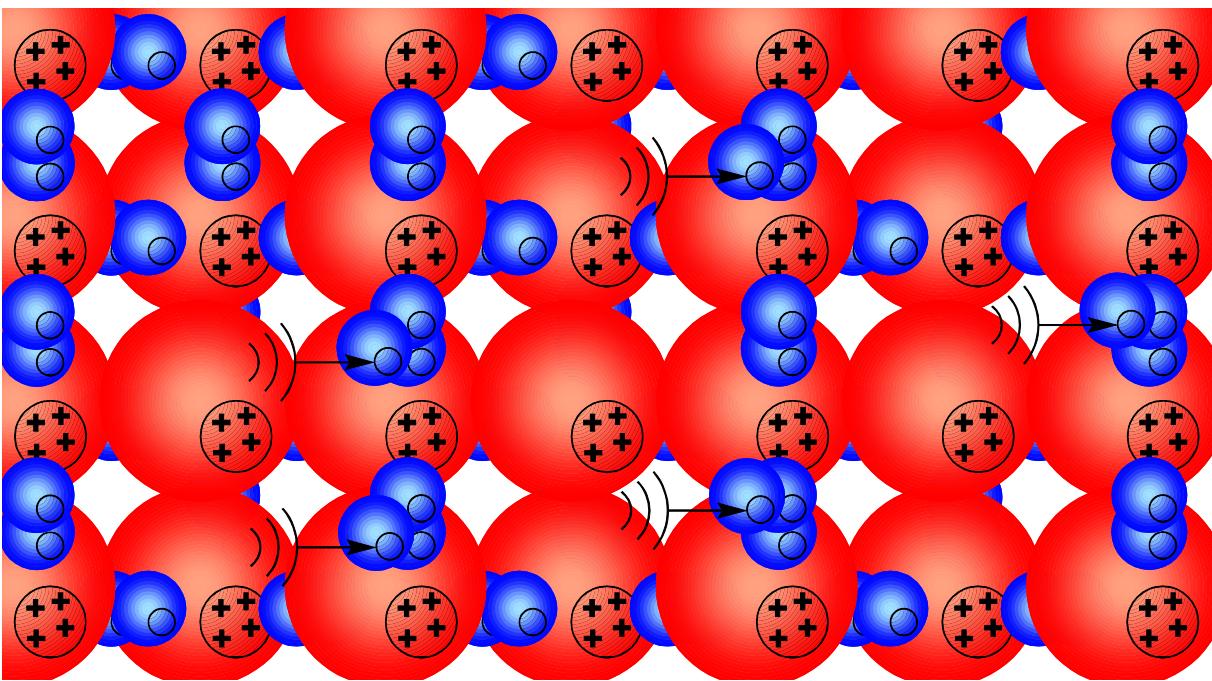
**K** Siehe dazu: „Erarbeitungsteil; 4. Funktion: Stabilisierung der Ausgangsspannung; Stabilisieren mit Z-Dioden“.

Allerdings werden Z-Dioden in Sperrrichtung betrieben.

### Aufbau und Funktionsweise:

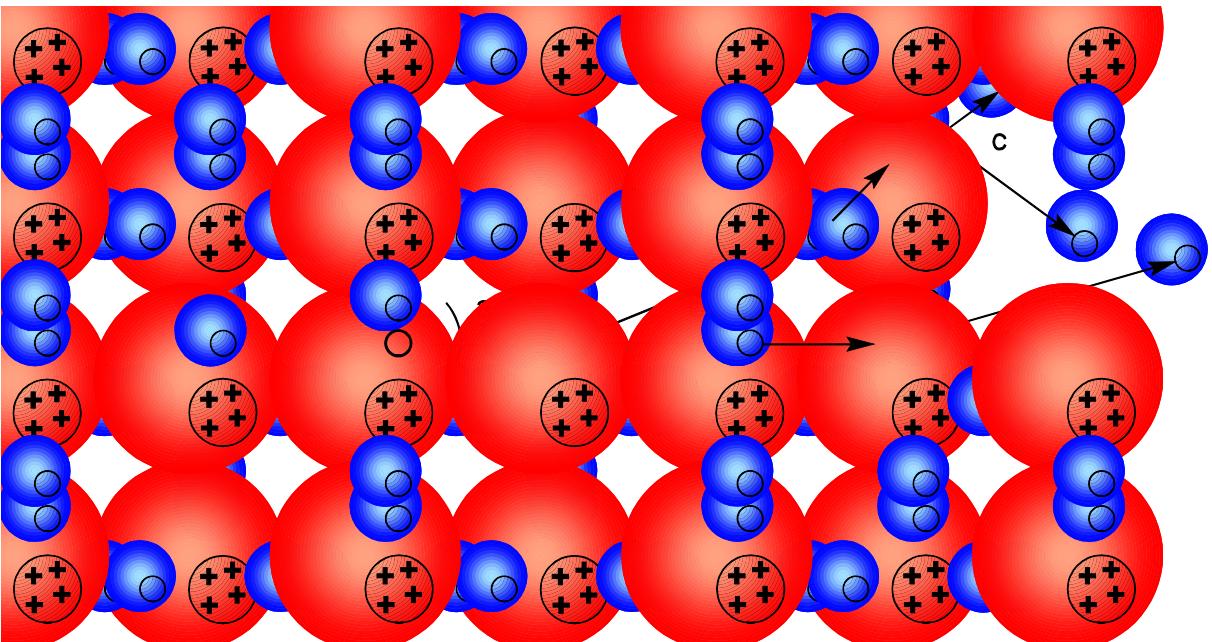
Wird an „normale“ Dioden in Sperrrichtung eine größer werdende Spannung angelegt, so steigt das elektrische Feld in der Sperrsicht (pn-Übergang) sehr stark an. Da dieses Feld Kräfte auf die Bindungs-Elektronen ausübt, kann es nicht beliebig gesteigert werden. Bei einer Größenordnung von etwa 200kV/cm (eine sehr große Feldstärke!) ist die Kraft auf die Elektronen so groß geworden, dass sie aus ihren Bindungen herausgerissen und durch die enorme Feldstärke stark beschleunigt werden → Die Sperrsicht wird von Ladungsträgern überschwemmt, der Strom steigt lawinenartig an und die Diode wird durch die hohe Energie zerstört.

Bei Z-Dioden wird nun die Dotierung so verändert, dass die kritische Feldstärke für die Bindungs-Elektronen viel niedriger liegt. Dadurch ist nach ihrer Ablösung die Energie der Elektronen auch viel geringer und die Dioden können durch entsprechende Maßnahmen vor Zerstörung geschützt werden. Die spezifische Spannung, bei der dieser Effekt eintritt, kann durch Dotierung eingestellt werden und wird **Zener-Spannung** genannt.



In dieser Abbildung soll das Zustandekommen des **Zener-Effekts** dargestellt werden. Hat die Feldstärke ein bestimmtes Maß überschritten, ist sie in der Lage, Valenzzbindungen im Gitter direkt aufzubrechen. Dadurch entstehen schlagartig viele Elektronen–Loch–Paare, die durch das elektrische Feld beschleunigt werden. Dies ist eine vereinfachte Abbildung, da dieser Vorgang in der Z–Diode am pn–Übergang stattfindet und dadurch die Sperrwirkung überwindet.

Dem Zener-Effekt überlagert sich in der Z–Diode noch der Lawineneffekt oder Avalancheeffekt.

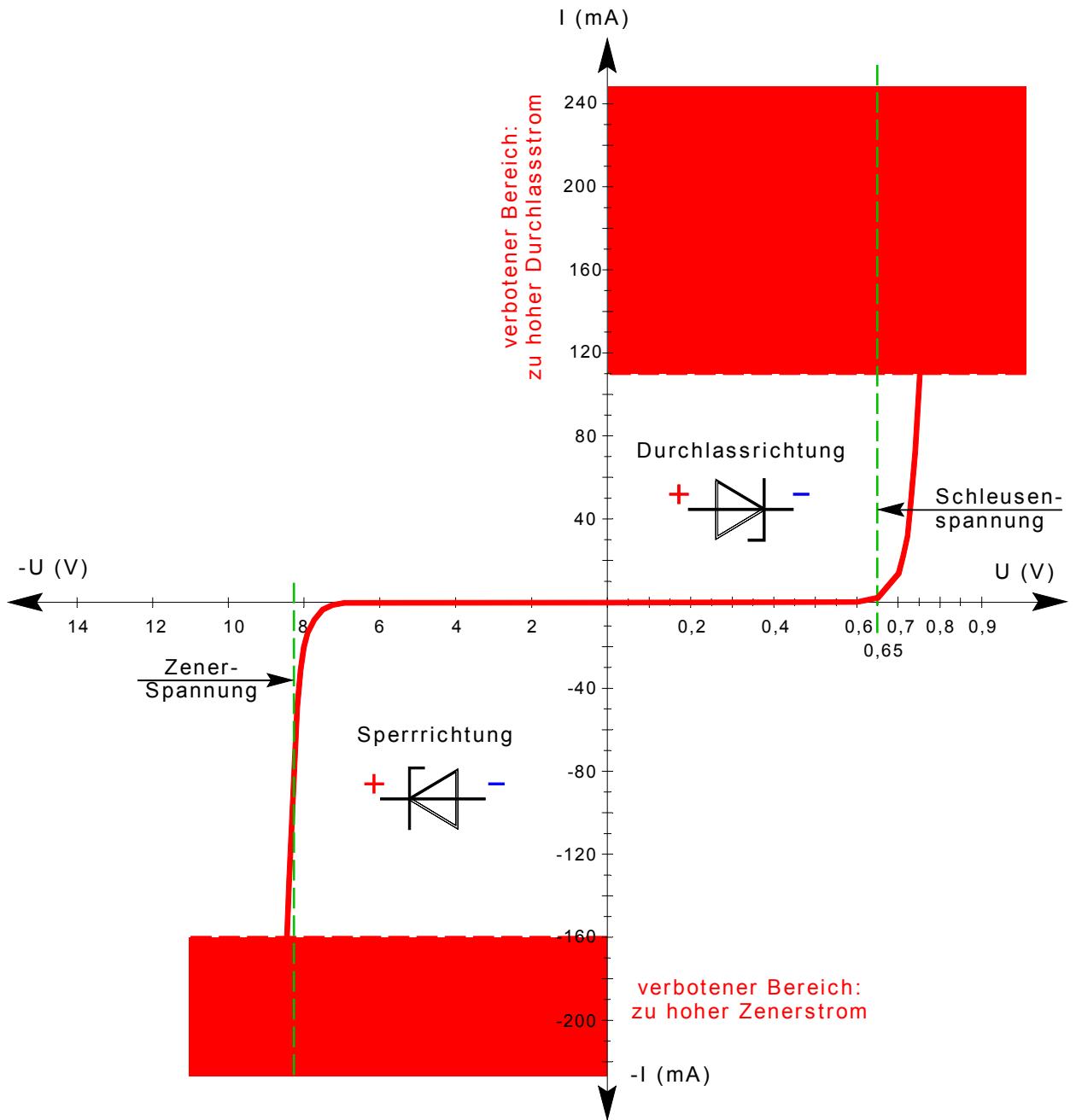


Die durch den Zener-Effekt frei gewordenen Elektronen und Löcher werden durch das elektrische Feld stark beschleunigt (a), sie bekommen dadurch eine große Energie und schlagen andere Elektronen (Löcher) aus ihren Bindungen (b). Dabei kann ein Elektron (Loch) zwei oder mehr Elektronen (Löcher) herausschlagen (c), wodurch die Zahl der Ladungsträger la-

winenartig ansteigt. Dieser Effekt wurde in der obigen Abbildung der Einfachheit halber nur für die Elektronen dargestellt.

### Kennlinien von Z-Dioden

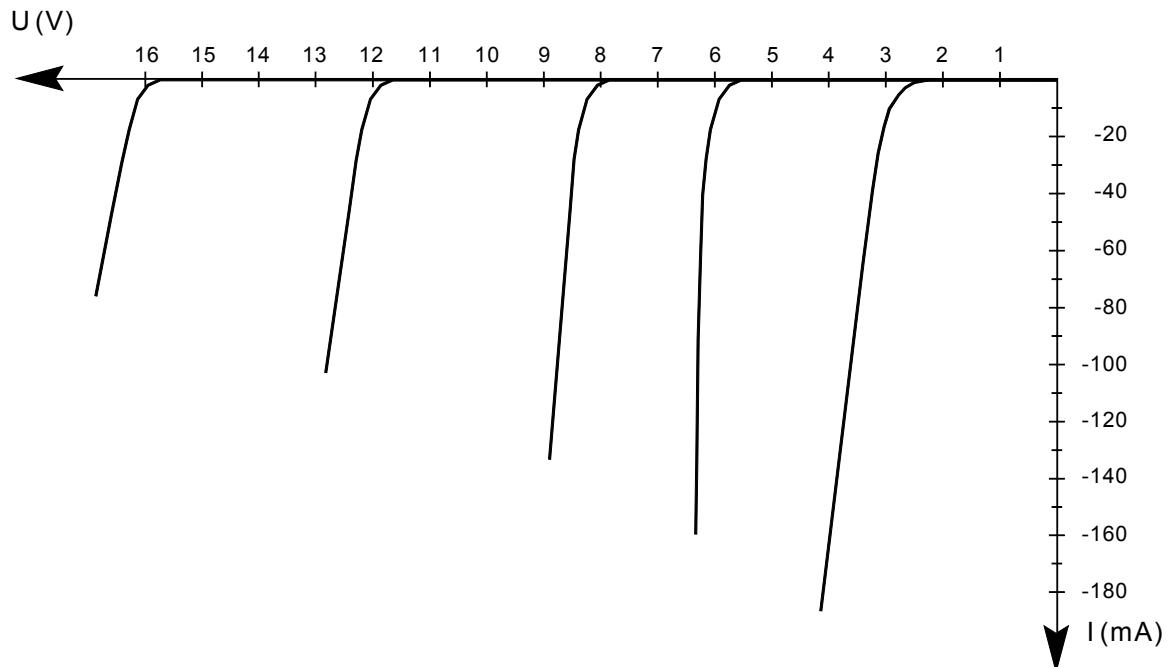
Das **Verhalten der Z-Diode** lässt sich schön anhand der Kennlinie erkennen. Wie die meisten Kennlinien ist sie als **Spannungs–Strom–Diagramm** ausgeführt.



Wie man sieht, verhält sich eine Z-Diode in Durchlassrichtung genau wie eine „normale“ Diode: es muß zunächst die Schleusenspannung überwunden werden, bevor die Diode öffnen kann; danach steigt der Strom sehr steil an. In Sperrrichtung sperrt sie zunächst genau wie die „normale“ Diode; beim Überschreiten einer bestimmten Spannung (hier 8,2 Volt) wird die innere Feldstärke so groß, dass die Ladungsträger aus ihren Bindungen gerissen werden und die Z-Diode wird leitend. Um sie vor Überlastung zu schützen, muss sie immer mit einem Schutzwiderstand betrieben werden.

Auch hier bitte die unterschiedlichen Maßstäbe der Spannungsachse in Durchlass- bzw. Sperrrichtung beachten!

Trägt man im selben Diagramm die Kennlinien von Z-Dioden für unterschiedliche Zenerspannungen ein, so erhält man folgendes Bild:



Wie man sieht, sind die Äste bei verschiedenen Z-Spannungen unterschiedlich steil, was eine unterschiedlich gute Stabilisierungseigenschaft bedeutet.

### Bauarten und Eigenschaften:

Z-Dioden werden in verschiedenen Größen und für verschiedene Leistungen angeboten. Ihr Vorteil gegenüber „normalen“ Dioden liegt darin, dass der Ast im Sperrbereich in der Regel steiler ist als der Ast in Durchlassrichtung, was bedeutet, dass die Stabilisierung besser ist. Außerdem lassen sich diese Äste für gewünschte (beliebige) Spannungen einstellen. So gibt es Z-Dioden in gestuften Abständen im Spannungsbereich von 2,7 V ... 200 V.

2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1	10	11
12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51
56	62	68	75	82	91	100	110	120	130	150	160	180	200		

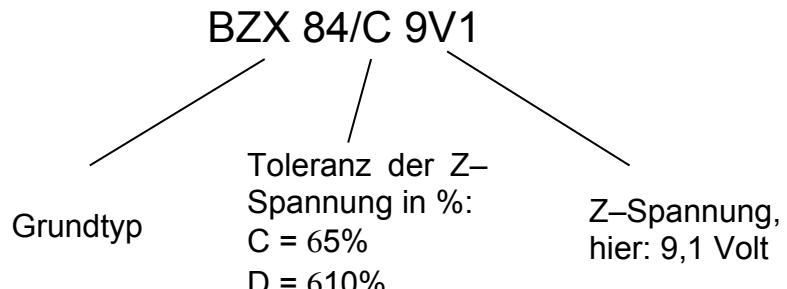
Leistungen sind in Abstufungen von: 250 mW; 500 mW; 1,3 W; 1,5 W; 2,5 W; 12,5 W; 20 W erhältlich.

Um Z-Dioden im Betrieb zu schützen, werden sie mit **Vorwiderständen** betrieben. Die Ermittlung der genauen Werte kann dem **Übungs- und Vertiefungsteil** entnommen werden:  
4. Funktion: Stabilisieren der Ausgangsspannung; Stabilisieren mit Z-Dioden; Berechnung der Vorwiderstände für Z-Dioden.

### Bezeichnungsschema für Z-Dioden:

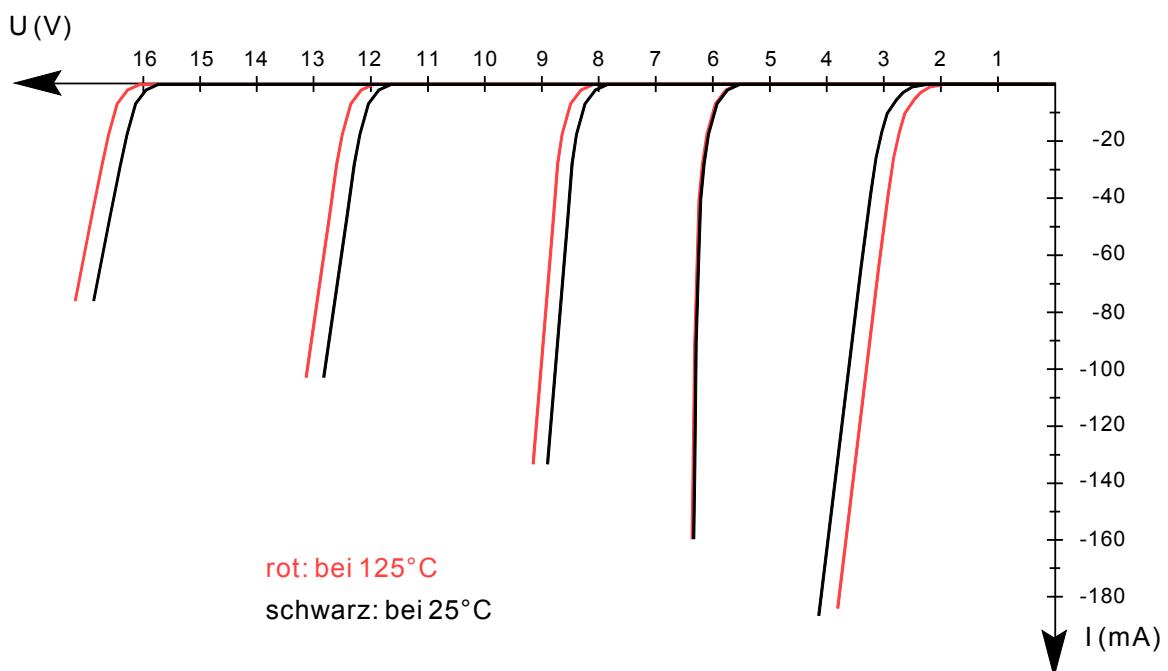
Z-Dioden unterliegen einem besonderen Bezeichnungsschema. Die Bezeichnung des Grundtyps besteht aus 3 Buchstaben und zwei Ziffern, z.B. BZX 84. An die Bezeichnung des Grundtyps wird eine Zusatzkennung angehängt. Es ergibt sich damit beispielsweise: BZX 84/C 9V1.

Das folgende Schema erläutert das Bezeichnungsschema:



### Temperaturabhängigkeit:

Da Z-Dioden Halbleiter-Bauelemente sind, sind sie temperaturempfindlich, d.h. in diesem Fall, dass sich oberhalb von 6,2 Volt bei Temperaturerhöhung der Kennlinienast zu größeren Zener-Spannungen hin verschiebt. Bei der Z-Diode von 6,2 Volt kann man praktisch keine Temperaturverschiebung feststellen, bei kleineren Z-Spannungen verschiebt sich der Kennlinienast zu kleineren Zener-Spannungen.

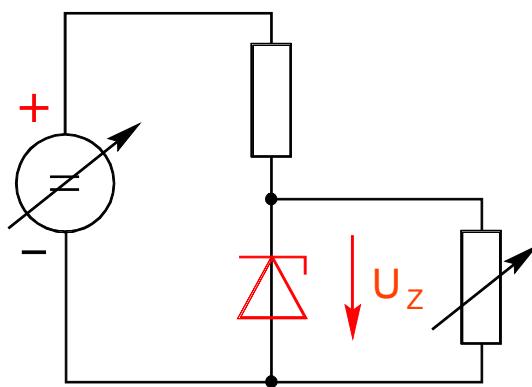


Dies kann für bestimmte Anwendungen sehr unerwünscht sein, weshalb man für temperatur empfindliche Prozesse dieses Verhalten der Z-Dioden kompensieren muss. Dies geschieht in der Regel durch Kombination mit Bauelementen von entgegengesetztem Temperaturverhalten (z.B. kann man Z-Dioden mit unterschiedlicher Temperaturabhängigkeit in Reihe schalten, oder man kombiniert sie mit Siliziumdioden, die entgegengesetztes Temperaturverhalten zeigen). Die Hersteller von Z-Dioden führen solche Zusammenschaltungen oft bereits innerhalb des Diodengehäuses durch und liefern diese Bauteile als temperaturkompensierte Z-Dioden oder als **Referenzelemente**.

### Anwendungen:

Wie eingangs schon gesagt, werden Z-Dioden fast ausschließlich zur **Stabilisierung von Spannungen** eingesetzt. Sollen bei einer sehr stark schwankenden Spannung die Spitzen „abgeschnitten“ werden, kann man Z-Dioden auch als **Begrenzer-Dioden** einsetzen. Die temperaturstabilisierten Z-Dioden bzw. die Referenzelemente dienen vor allem in der Steuerungs- und Regelungstechnik als **Sollwertgeber** (Bezugsspannung).

Eine einfache Schaltung zur Spannungsstabilisierung zeigt die folgende Abbildung. Die beiden Pfeile bei der Eingangsspannung und dem Lastwiderstand sollen andeuten, dass die Z-Diode beide Schwankungen ausgleichen kann.



## Transistoren

### Allgemeines: Geschichtliches, Name, Pneumatische Analogie

#### **Geschichtliches:**

In den Laboratorien der BELL–Telefongesellschaft waren die drei amerikanischen Forscher Shockley, Bardeen und Brattain tätig, die bereits seit 1940 Halbleiter–Bauelemente untersuchten. Als sie im Jahre 1947 eine Diode auf ihren pn–Übergang überprüften, stellten sie etwas Seltsames fest: jedes Mal, wenn der Stecker des Messkabels auf den pn–Übergang gedrückt wurde, beobachteten sie, dass sich der Widerstand der Grenzschicht änderte. Das konnte nur bedeuten, dass durch den Stecker aus Metall, den man ja als n–Leiter betrachten kann, eine npn–Folge entstanden war! Dadurch wirkten in der Anordnung zwei pn–Übergänge: einmal der pn–Übergang der Diode selbst (von der p– zur n–Zone) und dann durch das Messkabel von der p–Zone der Diode zum Metall des Kabels, das wiederum als n–Zone wirkte.

#### **Name:**

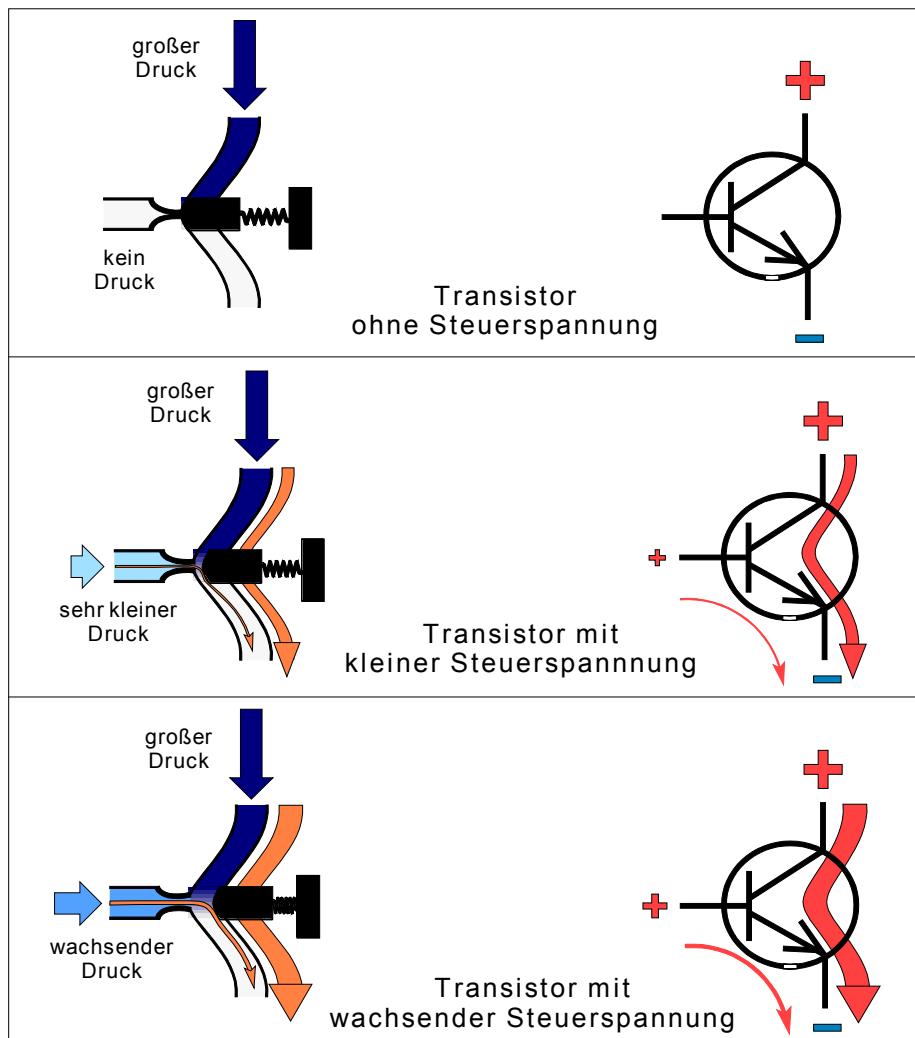
Außerdem fiel ihnen auf, dass immer dann, wenn eine der Grenzschichten ihren Widerstand änderte, das auch bei der anderen der Fall war: die erste Grenzschicht übertrug also ihre Widerstandsänderung auf die andere! Diesen Vorgang nannten sie „Widerstandsübertragung“ oder engl. transfer–resistor, womit der **Name Transistor** (Kunstwort aus transfer resistor) geboren war.

#### **Pneumatische Analogie**

Während sich bei Dioden der innere Widerstand durch die Polarität der angelegten Spannung verändert (Durchlass– und Sperrrichtung), kann bei Transistoren der innere Widerstand kontinuierlich verändert werden. Um dafür ein Vorverständnis zu bekommen ist es gut, sich zunächst eine Analogie genauer anzuschauen.

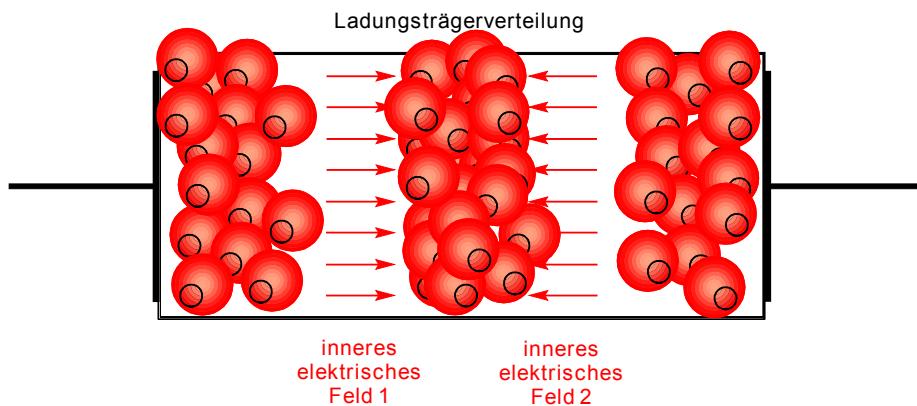
In der folgenden Abbildung ist auf der linken Seite in drei verschiedenen Betriebszuständen jeweils die pneumatische Analogie und rechts der elektronische Transistor dargestellt. Die Analogie besteht aus einem geschwungenen Rohr, das durch einen Schieber verschlossen ist. Der Schieber wird durch eine Feder nach links gedrückt. Wirkt von oben in dem Rohr ein großer Druck (Pumpe), so kann durch den geschlossenen Schieber keine Luft nach unten fließen. Der Schieber lässt sich über einen zweiten Druckanschluss (links) bewegen, der an seiner Einmündung zwei bewegliche Lippen besitzt (pneumatische Diode), die in Ruhestellung geschlossen sind. Beaufschlagt man diese Leitung gerade mit so viel Druck, dass sich die Lippen öffnen können (Schleusenspannung), so wird der dadurch fließende Luftstrom auf den Schieber prallen und ihn etwas nach hinten drücken. Diese Bewegung gibt aber in dem abwärts laufenden Rohr einen kleinen Spalt frei, durch den jetzt ebenfalls ein Luftstrom hindurchgedrückt werden kann. Da dieses linke Rohr ausschließlich dazu dient, den Schieber zu steuern, nennt man es auch **Steuerleitung**. Durch Vergrößern des Drucks in der Steuerleitung kann nun der Schieber immer weiter zurück gedrückt werden und desto größer wird der Luftstrom sein, der in der abwärts laufenden Hauptleitung fließen kann. Wie man sieht, kann man mit dieser Anordnung mit einem kleinen Luftstrom einen sehr großen, kräftigen Luftstrom beeinflussen (steuern). Selbstverständlich gibt es in Transistoren keine Schieber, Federn oder Luftströme, aber wenn man den Luftdruck durch eine elektrische Spannung und die Luftströme durch elektrische Ströme ersetzt, so hat man die grundsätzliche Funktionsweise des Transistors verstanden. Auch bei ihm kann durch eine kleine Spannung ein Steu-

erstrom fließen, der den inneren Widerstand des Transistors verkleinert. Dadurch kann in der Haupteitung ein großer Laststrom fließen, d.h. die grundsätzlichen Verhältnisse der Veränderung des inneren Widerstandes durch einen (sehr kleinen) Steuerstrom zeichnen auch den elektronischen Transistor aus.



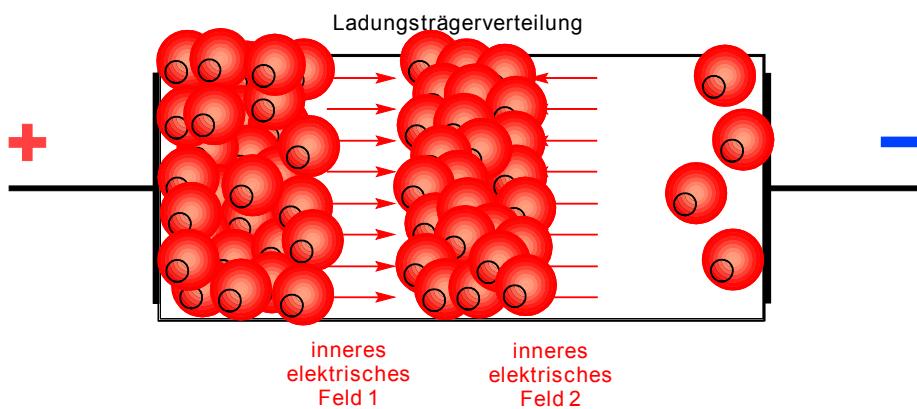
### Aufbau und Wirkungsweise von bipolaren Transistoren:

Elektronisch kommt diese Eigenschaft dadurch zustande, dass Transistoren in ihrem Inneren zwei gegeneinander gerichtete elektrische Felder (pn-Übergänge) besitzen und nicht nur einen, wie die Dioden.



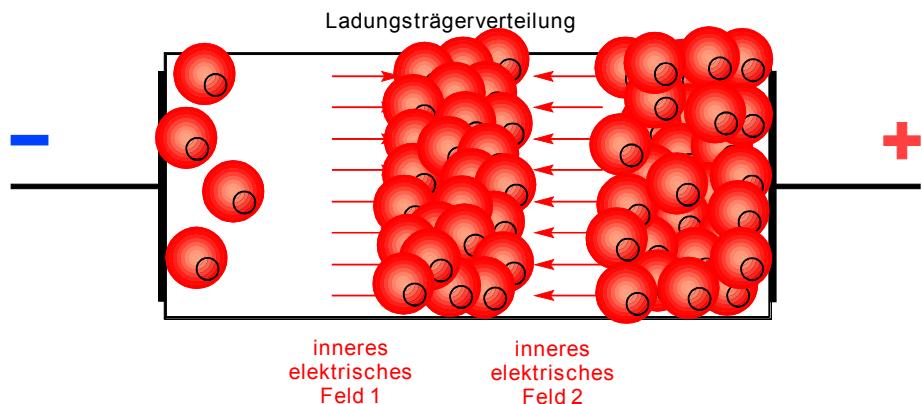
a: Kristall ohne äußere Spannung

Die obige Abbildung zeigt dazu ein stark vereinfachtes Modell der inneren Vorgänge. Der Übersichtlichkeit halber sind die beiden inneren Felder nur mit Pfeilen angedeutet und es werden nur eine Sorte Ladungsträger dargestellt (positive). Man sieht, dass sich durch die Wirkung der beiden Felder die Ladungsträger in der Mitte ansammeln, während sich an den Enden eine Verdünnung der Ladungsträgerkonzentration ergibt.



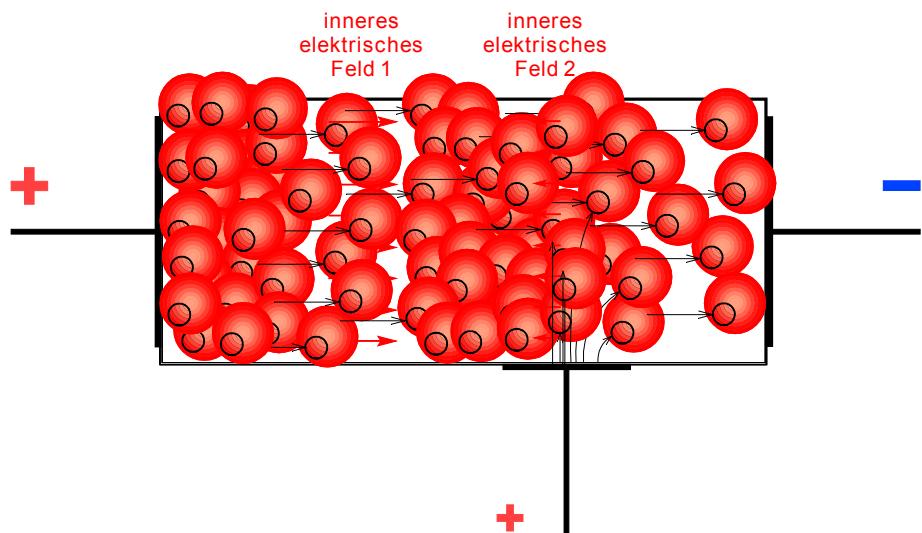
b: Kristall mit äußerer Spannung,  
Polarität 1

Legt man an diese Anordnung eine äußere Spannung an, so ist einer der beiden pn–Übergänge in Sperrrichtung, der andere in Durchlassrichtung geschaltet → es kann kein Strom fließen.



c: Kristall mit äußerer Spannung,  
Polarität 2

Dreht man die Spannung um, so ändern sich die Verhältnisse grundsätzlich nicht. Die Beeinflussung des inneren Widerstandes kann man nun dadurch realisieren, dass man von außen Ladungsträger in die sperrende Schicht einbringt. Dies geschieht durch einen zusätzlichen elektrischen Anschluss an der mittleren Schicht, der so angebracht und so mit Spannung beaufschlagt werden muss, dass fast alle Ladungsträger dieses Stromes in die sperrende Schicht gelangen.



d: Kristall mit Steueranschluss  
und äußerer Spannung

Dadurch wird das sperrende Feld abgebaut (inneres elektrisches Feld 2) und es kann ein kräftiger Strom durch den Transistor fließen. (Die roten Pfeile symbolisieren die inneren elektrischen Felder, die schwarzen Pfeile symbolisieren die Bewegung der Ladungsträger). Auf diese Weise ist es möglich, mit Hilfe eines variierenden Steuerstroms den inneren Widerstand des Transistors zu beeinflussen und damit den Hauptstrom zu steuern.

Wie bei den Dioden sind die Verhältnisse in realen Transistoren wesentlich komplizierter, was hier aber nicht weiter ausgeführt werden soll.

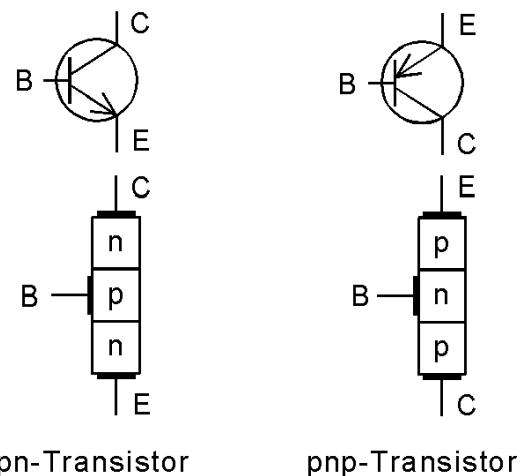
## Bauarten und Eigenschaften

Man unterscheidet bei den Transistoren zwei große Gruppen: **bipolare** Transistoren sind solche, in denen zwei verschiedene Ladungsträger (Elektronen und „Löcher“) vorhanden sind, Feldeffekttransistoren arbeiten dagegen nur mit einer Sorte Ladungsträgern und werden deshalb als **unipolar** bezeichnet. Wir beschäftigen uns hier nur mit den bipolaren Typen.

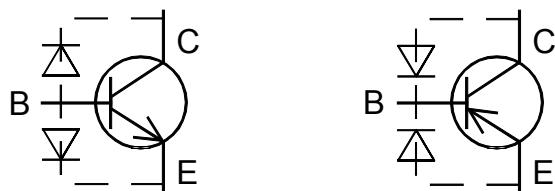
Um sie unterscheiden zu können, wurden die drei Anschlüsse der bipolaren Transistoren mit unterschiedlichen Bezeichnungen versehen:

- E steht für **Emitter**; das ist derjenige Anschluss, der – bezogen auf die physikalische Stromrichtung – die Ladungsträger emittiert, also „losschickt“.
- C steht für **Collektor**; das ist derjenige Anschluss, der die Ladungsträger sammelt.
- B steht für **Basis**; diese Bezeichnung hat rein historische Gründe: die ersten Transistoren wurden so gefertigt, dass auf ein Basisplättchen die beiden anderen Schichten aufgelegt wurden.

Wie oben dargestellt haben diese Transistoren also drei Halbleiterschichten, und da es nur zwei Möglichkeiten gibt, reines Halbleitermaterial zu dotieren – entweder n-leitend oder p-leitend – ergeben sich damit auch nur zwei unterschiedliche Transistortypen: npn- und pnp-Transistoren. Die folgende Abbildung zeigt die Schaltzeichen für diese beiden Typen.



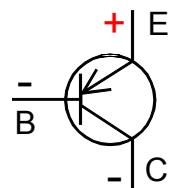
Dabei kann man sie sehr einfach unterscheiden, wenn man bedenkt, dass der Pfeil immer am Emitteranschluss sitzt und immer auf die n-Schicht zeigt. Man könnte sich diese Transistoren also aus zwei Dioden zusammengesetzt denken. Allerdings gelingt es nicht, real zwei Dioden so zusammen zu schalten und damit einen funktionierenden Transistor zu bekommen.



Bezüglich ihrer Arbeitsweise und ihres Verhaltens unterscheiden sich diese beiden Typen praktisch nicht, da sie aber andere Polaritäten haben, müssen sie unterschiedlich an Spannung angeschlossen werden.



Da in elektrischen und elektronischen Schaltungen die Vereinbarung gilt, dass die Plus–Anschlüsse oben und die Minus–Anschlüsse unten gezeichnet werden, dreht man den pnp–Transistor normalerweise um:



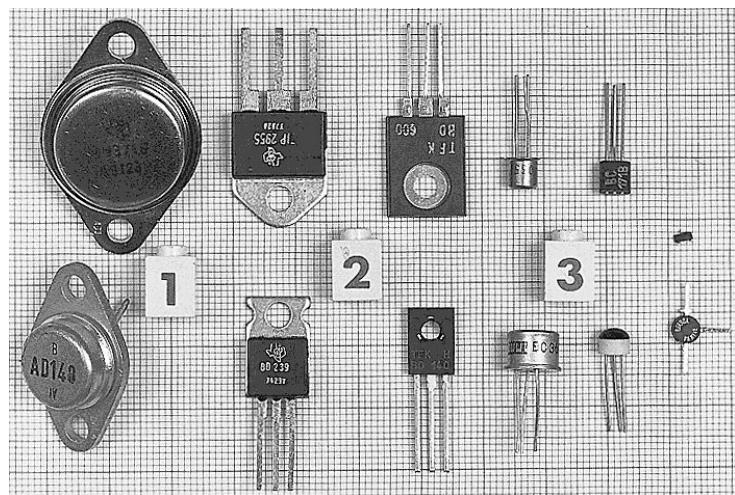
**Da diese beiden Typen unterschiedlich an Spannung angeschlossen werden müssen, sollte man in der Schule keine Schaltungen mit unterschiedlichen Typen verwenden, da dies die Schüler/Innen verwirrt.** Da npn–Typen einfacher hergestellt werden können, werden sie heute fast ausschließlich verwendet.

Diese bisherige Unterscheidung bezieht sich allerdings nur auf die Schichtenfolge. Betrachtet man die Einsatzgebiete von Transistoren, so kann man natürlich wesentlich mehr Typen unterscheiden, wie man sie auch in Datenbüchern findet, z.B.:

- Universaltransistoren (Niederfrequenz– oder Schalteranwendungen)
- Transistoren für Hochfrequenzanwendungen (Radio– und Fernsehtechnik, Sendetechnik)
- Leistungstransistoren (höhere Leistungen, Leistungsstufen, Endstufen, Darlingtontransistoren)
- Schalttransistoren (langsame und schnelle, Schalteranwendungen, Digitaltechnik)

Je nach Anwendungsgebiet wurden diese Typen mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgestattet, so müssen **Leistungstransistoren** so konstruiert sein, dass sie durch die bei den geforderten Stromstärken entstehende Wärme nicht zerstört werden; schnelle **Schalttransistoren** müssen sehr schnell vom durchgeschalteten auf den sperrenden Zustand umschalten können, d.h. die Sperrsicht muss sehr schnell von Ladungsträgern geräumt bzw. wieder überflutet werden. Auch bei **Hochfrequenztransistoren** kommt es darauf an, dass sie den hohen Frequenzen mit den Strömen folgen können, allerdings hier nicht nur bezüglich der beiden Extrempunkte ein – aus, sondern über den gesamten Steuerbereich hinweg. **Universaltransistoren** sind auf keines dieser Einsatzgebiete speziell zugeschnitten und weisen deshalb keine dieser Eigenschaften in ausgeprägter Weise auf: sie können alles, aber nichts besonders gut.

Eine Übersicht über verschiedene Gehäuseformen von Transistoren gibt folgende Abbildung:

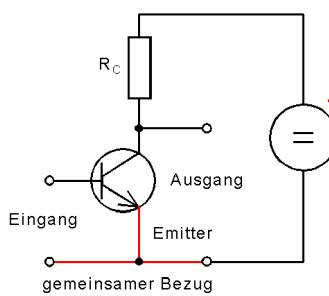


Gehäuseformen: (Beispiele in Klammern)

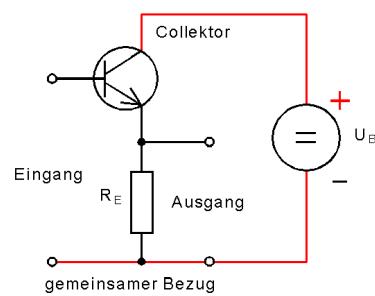
- 1 oben links : TO-3 (2 N 3055)
- 1 unten links : SOT-9 (AD 148)
- 2 oben links : TO-218 AA (TIP 2955)
- 2 oben rechts : TO-126/SOT-22 (BD 600)
- 2 unten links : SOT-32 P/TO-66 P (BD 239)
- 2 unten rechts: TO-125/SOT-32 (BD 140)
- 3 oben links : TO-18 (BC 107)
- 3 oben rechts : TO-92/SOT-54 (BC 171)
- 3 rechts Mitte : SOT-23/SOT 143 Miniaturgehäuse
- 3 unten links : TO-39
- 3 unten rechts: TO-106/105 (Keramik)
- 3 unten rechts (außen): SOT 37/4 (BFR 90)

### Transistor–Grundschaltungen:

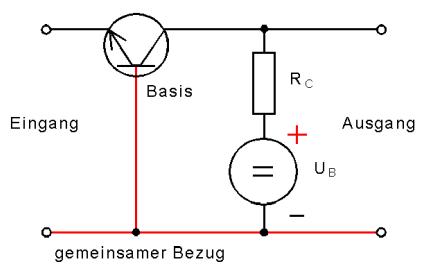
Da Transistoren drei Anschlüsse haben, ergeben sich – anders als bei den zweipoligen Baulementen – mehr als eine Grundschaltung. Um sie verstehen zu können, muss man sich daran erinnern, dass mit der Steuerleitung (Basis–Emitterstrecke) der innere Widerstand des Transistors (Collektor–Emitterstrecke) beeinflusst wird. Die drei Grundschaltungen ergeben sich aus den drei Möglichkeiten, wie man diese Steuerstrecke von der Eingangsseite her beeinflussen kann (siehe Abbildung). Die Namen sind nach demjenigen Anschluss gebildet, der sowohl für den Eingang als auch für den Ausgang als gemeinsamer Bezug dient.



a: Emitterschaltung



b: Collektorschaltung



c: Basisschaltung

Die universellste dieser Grundschaltungen ist wohl die Emitterschaltung: sie bietet die Grundlage für einen Großteil der elektronischen Verstärker– und Schalttechnik. Die Basis-

schaltung wird nur im Bereich der Hochfrequenztechnik genutzt, kann hier also außer acht gelassen werden. Die Kollektorschaltung hat auch in der Verstärkertechnik eine gewisse Bedeutung, vor allem aber wird sie bei Stabilisierungs- bzw. Regelungsschaltungen eingesetzt.

Natürlich können hier nicht die vielen Schaltungsvarianten dieser Grundschatungen besprochen werden, es soll nur die grundsätzliche Funktionsweise erläutert werden.

### **Emitterschaltung:**

Für die Emitterschaltung sollen zwei, in der Schule genutzte Schaltungsvarianten besprochen werden:

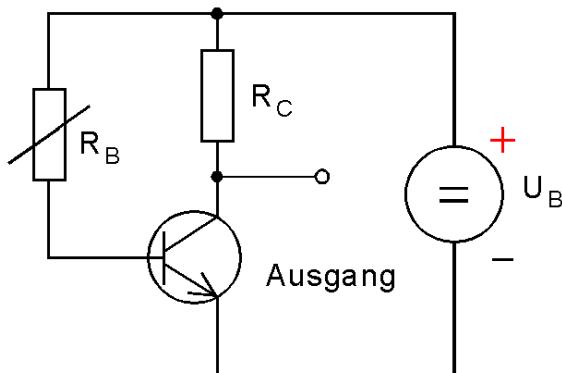
- Emitterschaltung mit Basisvorwiderstand
- Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler

Diese beiden Varianten unterscheiden sich in der Art und Weise, wie die Steuerspannung für die Basis-Emitterstrecke erzeugt wird.

#### Emitterschaltung mit Basisvorwiderstand:

Die einfachste Art, die Eingangsspannung zu erzeugen, die den Steuerstrom fließen lässt und damit den Transistor „öffnet“, besteht darin, einen Widerstand ( $R_B$ ) in Reihe zur Basis-Emitterstrecke zu schalten. Dies ist die Schaltungsart, die wir bei der Füllstandsanzeige genutzt haben: Wasserstrecke und Schutzwiderstand bildeten zusammen den Basisvorwiderstand.

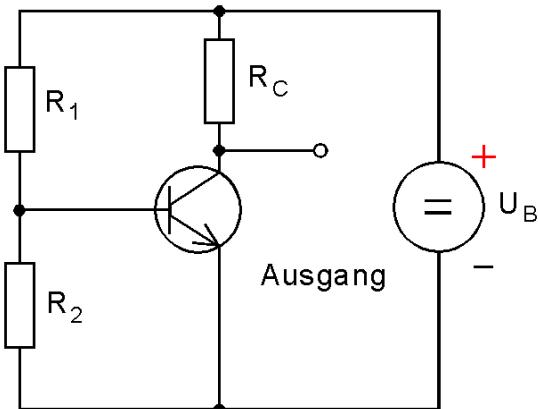
**K** **Zur Kontrolle:** siehe Erarbeitungsteil; 4. Funktion: Stabilisieren der Ausgangsspannung, Der Transistor: Füllstandsanzeige



Dadurch entsteht am Eingang des Transistors ein Spannungsteiler, an dem man durch Verändern des Wertes des Widerandes ( $R_B$ ) die Steuerspannung ( $U_{BE}$ ) variieren und damit den Innenwiderstand des Transistors verändern kann: von sehr groß (MOhm-Bereich) bis sehr klein (wenige Ohm). Die beiden folgenden Abbildungen sollen das verdeutlichen. Dazu dient sowohl die analoge Darstellung der Druckverteilung (Spannung) in der Schaltung als auch die (qualitative) Darstellung der fließenden Ströme.

#### Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler:

Eine zunächst aufwändiger Art, die Steuerspannung für den Transistor zu erzeugen, besteht in der Verwendung eines Spannungsteilers im Eingangsbereich.

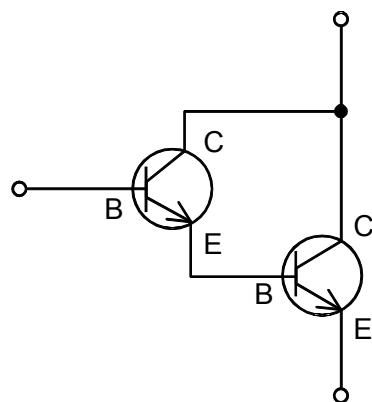


Dieser Spannungsteiler wird so bemessen, dass an dem Widerstand  $R_2$  die Steuerspannung für den Transistor entsteht.

Diese Abbildung macht klar, dass man in diesem Fall drei Stromkreise unterscheiden muss: den Stromkreis für den Basisspannungsteiler, den Eingangs- und den Ausgangstromkreis des Transistors. Dabei ist die Wirkungsrichtung eindeutig: Der Basisspannungsteiler stellt die Steuerspannung zur Verfügung, diese stellt den inneren Widerstand des Transistors ein und daraus wiederum folgt (im Zusammenspiel mit dem Lastwiderstand  $R_C$ ) die Größe des Laststromes. Die Vorteile dieser Schaltung sollen bei den Anwendungen dargestellt werden.

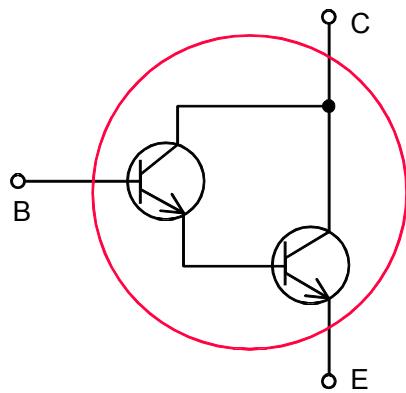
### Darlingtonschaltung:

Besteht die Aufgabe darin, sehr große Ströme durch sehr kleine Steuerströme zu beeinflussen, also eine sehr große Stromverstärkung zu erzielen, dann kann man die Darlingtonschaltung verwenden. Die einfachste Form entsteht, wenn man zwei Transistoren direkt miteinander koppelt, wie es die folgende Abbildung zeigt:

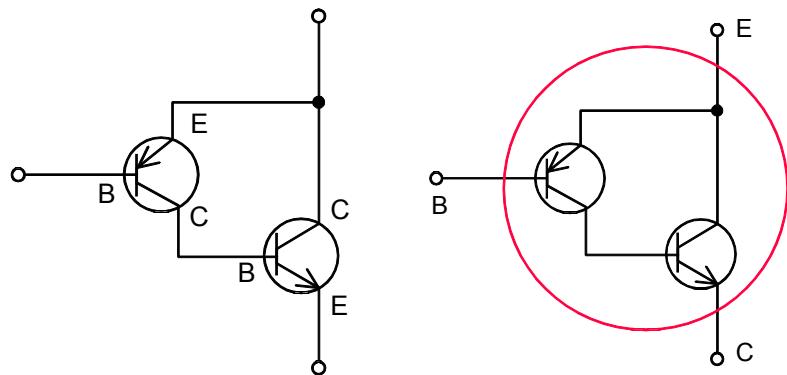


Dabei wird der am linken Eingang an kommende Basis–Emitterstrom im linken Transistor verstärkt und dieser verstärkte Strom direkt wieder als Basis–Emitterstrom in den rechten Transistor eingespeist, der diesen verstärkten Strom noch einmal verstärkt. Man erhält also eine multiplizierte Stromverstärkung. Diese Schaltung ist außerordentlich empfindlich und man kann mit ihr noch kleinste Strömchen verstärken und nutzen.

Da diese Schaltung recht häufig vorkommt, wird sie von verschiedenen Herstellern als sogenannter Darlington–Transistor in einem einzigen Gehäuse angeboten. Er wirkt von außen wie ein einzelner Transistor mit sehr hoher Stromverstärkung.



Eine Variante der Darlington-Schaltung kann man auch mit einem pnp–Typ und einem npn–Typ realisieren:

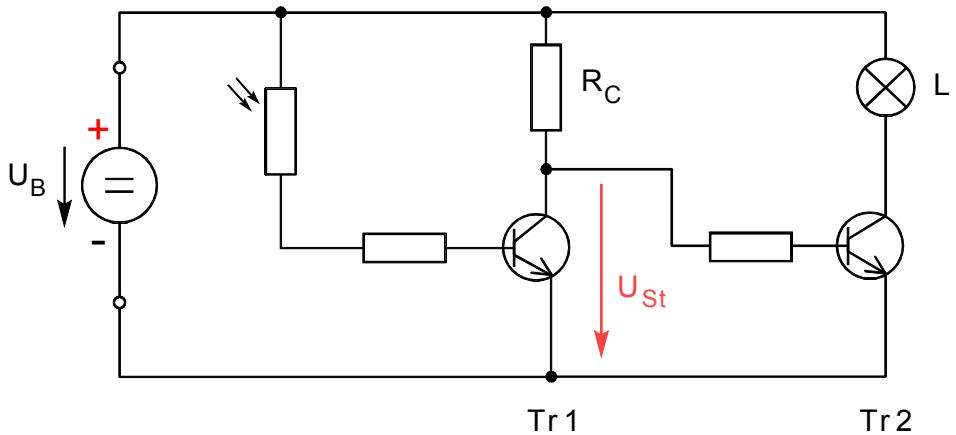


Diese Schaltung wirkt nach außen wie ein einzelner pnp–Transistor. Für die nach außen wirksamen Anschlüsse ist also der linke Eingangstransistor bestimmend.

Die Darlington–Schaltung gibt es auch noch in anderen Varianten, die hier aber nicht besprochen werden sollen.

#### Mehrstufige Schaltungen:

Sowohl bei der Anwendung des **Transistors als Verstärker** als auch **als Schalter** sind mehrstufige Schaltungen gebräuchlich. In der Verstärkertechnik werden auf diese Weise hohe Verstärkungsfaktoren (Spannungs-, Strom- und Leistungsverstärkung) erzielt. Bei der Anwendung des Transistors als Schalter lässt sich so eine **Invertierung des Eingangssignals** erzielen. Diese Schaltung soll hier erläutert werden:

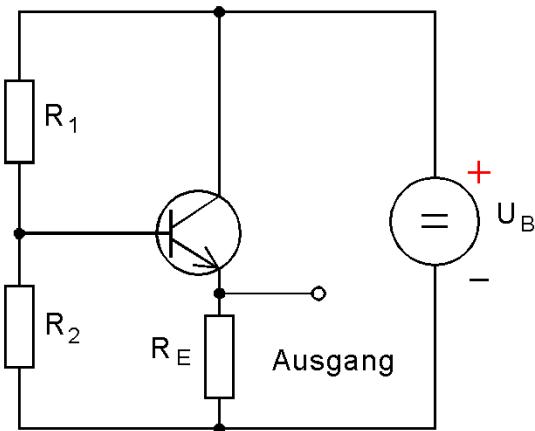


Als Beispiel ist hier eine zweistufige Schaltung dargestellt, bei der ein Fotowiderstand das Eingangssignal liefert. Um die Schaltung verstehen zu können, muss man beachten, dass bei den beiden Stufen der innere Widerstand des Transistor jeweils den unteren Widerstand eines Spannungsteilers bildet (mit  $R_C$  bzw. mit der Lampe  $L$ ). Das hat zur Folge, dass die Ausgangsspannung des Transistor 1 für den Transistor 2 die Eingangsspannung liefert → **Transistor 1 steuert Transistor 2**.

Verfolgt man die Vorgänge im Einzelnen, so ergibt sich:

- Wird der Fotowiderstand abgedunkelt (kein Signal am Eingang), hat er einen sehr großen Widerstand → der Transistor 1 sperrt → an seinem Ausgang entsteht eine hohe Spannung (ca.  $U_B$ ), die als Steuerspannung für Transistor 2 wirkt → Transistor 2 öffnet und die Lampe leuchtet (Signal am Ausgang).
- Wird der Fotowiderstand beleuchtet (Signal am Eingang), hat er einen kleinen Widerstand → der Transistor 1 öffnet → an seinem Ausgang entsteht eine sehr kleine Spannung (ca. 0,2 – 0,5 V), die als Steuerspannung für Transistor 2 wirkt → Transistor 2 sperrt, da diese Spannung zu klein ist und die Lampe erlischt (kein Signal am Ausgang).

### Kollektorschaltung:



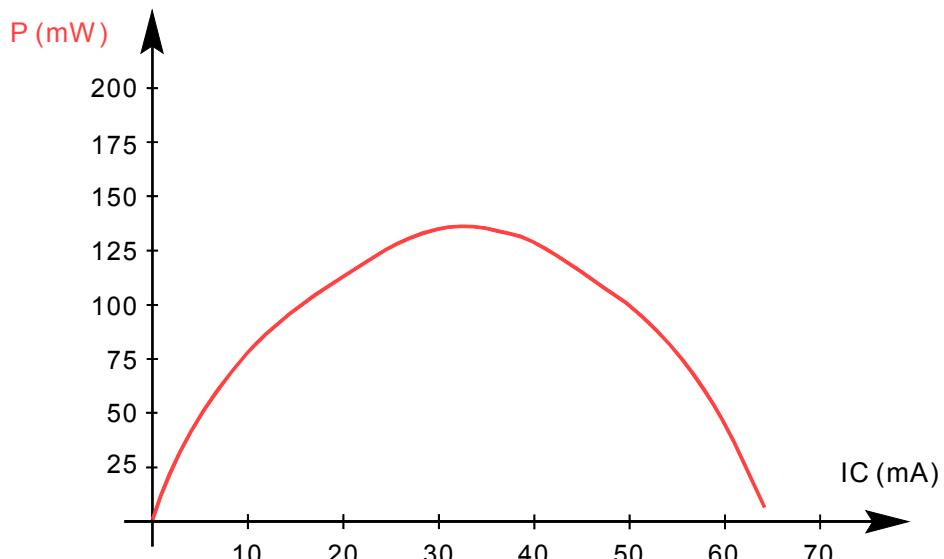
Aus der Abbildung geht hervor, dass sich die Kollektorschaltung (hier nur in der Version mit Basisspannungsteiler dargestellt) nur in einem einzigen Punkt von der Emitterschaltung unterscheidet: die Reihenfolge von Transistor und Widerstand im Ausgangskreis ist vertauscht.

Diese kleine Änderung hat aber erhebliche Auswirkungen auf die Arbeitsweise der Schaltung. Während bei der Emitterschaltung durch die Steuerspannung lediglich die Größe der Basis–Emitter–Spannung (etwa 0,7 V) erzeugt werden muss, addiert sich dazu bei der Kollektorschaltung noch die Spannung über dem Ausgangswiderstand  $R_E$  dazu! D.h. die Steuerspannung muss in diesem Fall viel größer sein, um den Transistor zu öffnen. Würde man in diesem Fall den Basisspannungsteiler genau so bemessen wie bei der Emitterschaltung, so könnte der Transistor nicht durchschalten.

Dies klingt so, als hätte die Kollektorschaltung nur Nachteile, dies bezieht sich aber nur auf Verstärkerschaltungen: dabei ist es so, dass die Ausgangsspannung (Spannung gegen Masse, hier also am Lastwiderstand) immer kleiner ist als die Spannung am Eingang, d.h. die Spannungsverstärkung bei der Kollektorschaltung ist immer kleiner als 1. Ihre Vorteile spielt die Kollektorschaltung vor allem bei Stabilisierungsschaltungen aus (siehe dazu: Anwendungen).

### Leistung beim Transistor:

Trägt man die Leistung ( $P$ ) im Transistor über der Stromstärke ( $I_C$ ) auf, so bekommt man eine Kurve, die etwa so aussieht:



**Form des Diagramms:** Die Stromstärke wächst zwar auf der X–Achse kontinuierlich an, aber da die Leistung das Produkt aus Stromstärke und Spannung ist, ergibt sich diese charakteristische Form: links ist zwar die Spannung am Transistor hoch, aber dafür die Stromstärke gering, rechts ist die Stromstärke hoch, dafür aber die Spannung am Transistor gering. Das Produkt erreicht ein Maximum dann, wenn sowohl Spannung als auch Stromstärke einen mittleren Wert aufweisen.

### Leistungshyperbel:

Die Leistung am Transistor wird allerdings normalerweise nicht in der obigen Form angegeben, sondern in der Form einer Leistungshyperbel.

Der Grundgedanke dabei ist folgender: Alle Bauelemente haben eine maximale Leistung, für die sie ausgelegt sind, die in der Regel mit  $P_{\text{tot}}$  bezeichnet wird. Steigt die Wärmeleistung über dieses Maß an, so kann das Bauelement die entstehende Wärme nicht mehr nach außen abführen und es erhitzt sich unzulässig hoch, wobei es zerstört wird. Um hier genaue Angaben zu bekommen, geht man also von der maximal zulässigen Leistung ( $P_{\text{max}}$ ) des Bau-

elements aus und trägt dafür jeweils die Spannungs- und die zugehörigen Stromwerte in ein Diagramm ein.

Beim Transistor unterscheidet man die Kollektor–Emitter–Verlustleistung  $P_{CE}$  und die Basis–Emitter–Verlustleistung  $P_{BE}$ . Es gilt:

$$P_{CE} = U_{CE} \cdot I_C$$

$$P_{BE} = U_{BE} \cdot I_B$$

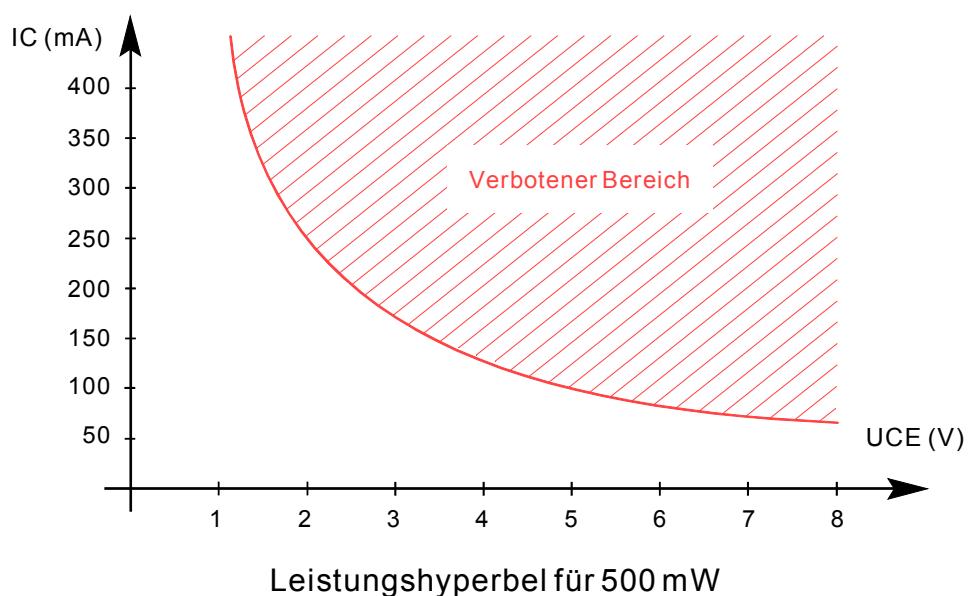
Beide Verlustleistungen zusammen ergeben die Gesamtverlustleistung  $P_{tot}$ :

$$P_{tot} = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B$$

Da die Basis–Emitter–Verlustleistung meist sehr viel kleiner als die Kollektor–Emitter–Verlustleistung ist, wird die Gesamtverlustleistung angenähert angegeben mit:

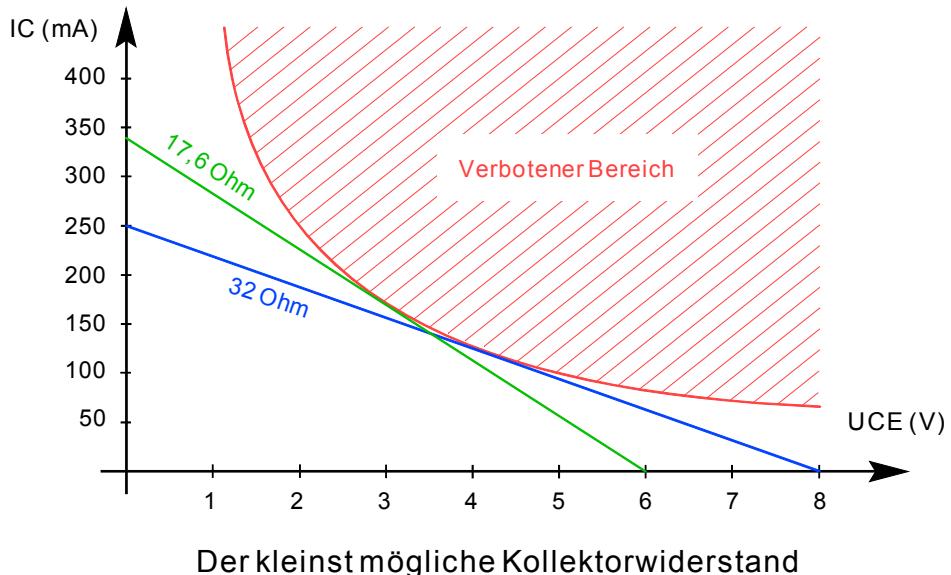
$$P_{tot} \approx U_{CE} \cdot I_C$$

Diese zulässige Verlustleistung wird für bestimmte Kühlbedingungen angegeben. Soll sie nicht überschritten werden, so ist für jede Spannung  $U_{CE}$  ein bestimmter Strom  $I_{Cmax}$  einzuhalten. Was sich dabei ergibt, ist eine Hyperbel:



Damit hat man für jede Spannung am Ausgang des Transistors ein genaues Maß, wie hoch der Strom sein darf, um die zulässige Leistung nicht zu überschreiten. Dieser erlaubte Bereich liegt unter der Hyperbel, oberhalb der Hyperbel liegt der Bereich, bei dem die zulässige Leistung überschritten wurde.

Mit Hilfe dieser Leistungshyperbel kann man für eine bestimmte Betriebsspannung sofort den kleinste möglichen Kollektorwiderstand angeben, der nicht unterschritten werden darf. Man bekommt ihn, wenn man vom Punkt der Betriebsspannung aus eine Tangente an die Hyperbel legt:



In der Darstellung wurde dies für die beiden Spannungen 6 und 8 Volt gemacht.

### Kühlung von Transistoren:

Die höchst zulässige Verlustleistung  $P_{tot}$  hängt einmal davon ab, welche Sperrsichttemperatur der Transistorkristall aushalten kann und zum anderen, welche Wärmemenge pro Zeiteinheit abgeführt wird. Bei den kleinen Kunststofftransistoren wird die Wärme über die Anschlussdrähte abgeführt, weshalb man diese Drähte beim Einbau auf eine Platine nicht zu stark kürzen darf.

Um mehr der entstehenden Wärme abführen zu können, können Transistoren gekühlt werden. Um dies korrekt durchführen zu können, sind einige zusätzliche Informationen notwendig:

Die höchst zulässige Sperrsichttemperatur wird in den Transistordaten angegeben. Sie wird mit dem Kurzzeichen  $T_J$  bezeichnet.

Die Wärmemenge, die bei einem bestimmten Temperaturunterschied zwischen Sperrsicht und der kühlenden Umgebung pro Zeiteinheit abgeführt wird, ergibt den Wärmeleitwert  $G_{th}$ . Der Kehrwert des Wärmeleitwertes ist der Wärmewiderstand  $R_{th}$ .

Dem liegt die Vorstellung zugrunde, dass dem Abfließen der Wärme bestimmte Widerstände entgegen stehen, die dafür verantwortlich sind, dass die Wärme schnell oder langsam fließt. Metalle haben danach einen geringen Wärmewiderstand, Kunststoffe dagegen einen sehr hohen.

Wenn die Temperatur im Kristall nicht ansteigen soll, muss die pro Zeiteinheit entstehende Wärmemenge so groß sein, wie die pro Zeiteinheit abgeführte Wärmemenge. Die pro Zeiteinheit entstehende Wärmemenge ist aber die Verlustleistung  $P_{tot}$ . Grundsätzlich gilt:

$$R_{th} = \frac{T_J - T_U}{P_{tot}}$$

Die Einheit des Wärmewiderstandes  $R_{th}$  ist  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  oder  $\text{K}/\text{W}$ . Dabei ist  $T_J$  die höchst zulässige Sperrsichttemperatur und  $T_U$  die Temperatur der kühlenden Umgebung.

Je höher der Wert eines Wärmewiderstandes also ist, desto schlechter kann die Wärme über ihn abfließen. Dies ist besonders bei Kühlkörpern zu beachten. Der Wert °C/W sagt aus, um wieviel Grad sich der Kühlkörper erwärmt, wenn ihm 1 W elektrische Leistung zugeführt wird. Je größer dieser Wert ist, desto stärker erwärmt sich der Kühlkörper, d.h. desto schlechter kann er die entstehende Wärme abführen. Kühlkörper mit kleinen Wärmewiderständen sind in der Regel groß, sind meist schwarz (wegen der besseren Wärmeabstrahlung) und haben Kühlrippen (große abstrahlende Fläche).

Als kühlende Umgebung kann das Transistorgehäuse, die umgebende Luft oder auch ein Kühlblech bzw. ein Metallgehäuse gelten. Diesen unterschiedlichen Möglichkeiten entsprechen die verschiedenen Wärmewiderstände:

$R_{thG}$  = Wärmewiderstand Sperrsicht – Gehäuse (engl.:  $R_{thJC}$ , von case)

$R_{thGK}$  = Wärmewiderstand Gehäuse – Kühlkörper

$R_{thK}$  = Wärmewiderstand Kühlkörper – umgebende Luft

$R_{thU}$  = Wärmewiderstand Sperrsicht – umgebende Luft (engl.:  $R_{thJA}$ , von ambient)

Der Gesamtwärmewiderstand eines auf einem Kühlkörper montierten Transistors zwischen Sperrsicht und umgebender Luft setzt sich also folgendermaßen zusammen:

$$R_{thg} = R_{thG} + R_{thGK} + R_{thK}$$

$R_{thg}$  ist damit der gesamte Wärmewiderstand.  $R_{thG}$  kann dem Transistordatenblatt entnommen werden.  $R_{thK}$  ist ein Kennwert des Kühlkörpers.  $R_{thGK}$  hängt von der Montage ab. Es ist günstig, eine Wärmeleitpaste zu verwenden.

**Achtung! Diese Pasten sind giftig, vor allem, wenn sie Berylliumoxyd enthalten!**

Ist eine elektrische Isolation z.B. durch eine Glimmerfolie oder Silikonfolie erforderlich, erhöht sich der Gesamtwärmewiderstand  $R_{thg}$ . Die genauen Werte können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Werte für $R_{thGK}$ bei Isolierung mit Glimmerscheibe				
$R_{thGK}$ in K/W	TO-3, TO-41	TO-26	SOT-9	SOT-23
Glimmer trocken	1,25	8	2,5	8
Glimmer mit Wärmeleitpaste beidseitig	0,35	4	1	4

(Die Gehäuseformen finden Sie in: Bauarten und Eigenschaften, S. 232)

Je besser ein Transistor gekühlt ist, desto höher ist die zulässige Verlustleistung  $P_{tot}$ .

Transistoren mit Metallgehäuse können zusätzlich über Kühlsterne gekühlt werden, die man auf das Gehäuse aufsetzt. Leistungstransistoren haben an ihrem Gehäuse eine Metallfläche (z.B. BD 135), auf die ein Kühlblech aufgeschraubt werden kann oder das Gehäuse besteht vollständig aus Metall (z.B. 2N3055). In diesem Fall werden die Transistoren auf separate Kühlkörper aufgebracht, die durch ihre große Fläche und die meist schwarze Farbe die entstehende Wärme viel effektiver abstrahlen können.

Beispiel:

Für den Leistungstransistor 2N3055 ist eine höchste Sperrsichttemperatur von  $T_J = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  angegeben. Für  $R_{\text{thG}}$  gibt der Hersteller  $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$  an. Der Transistor wird auf einen Kühlkörper mit einem Wärmewiderstand  $R_{\text{thK}} = 1,8 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$  montiert. Zur Isolation ist eine Glimmerscheibe erforderlich. Wird sie beidseitig mit Wärmeleitpaste eingestrichen, ergibt sich ein Wärme-Übergangswiderstand von  $R_{\text{thGK}} = 0,35 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ .

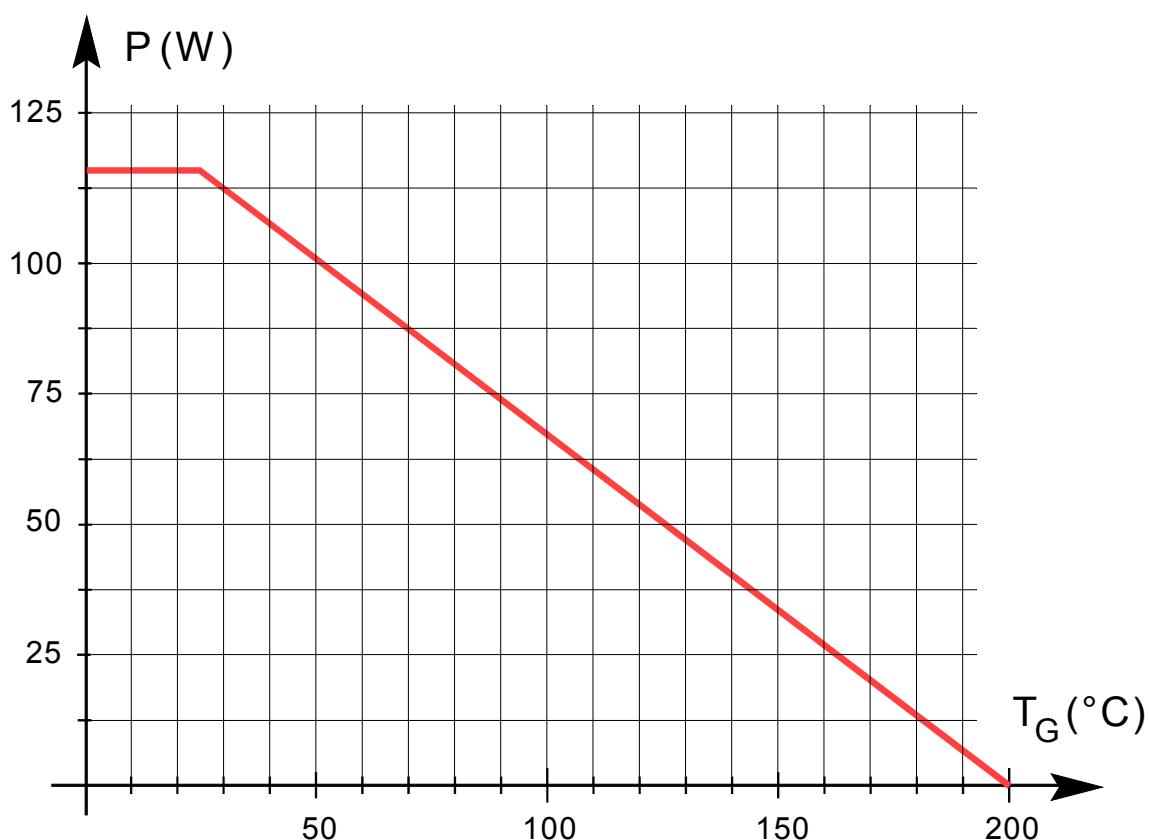
Welche größte Verlustleistung kann der Transistor aushalten, wenn die Umgebungstemperatur maximal  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt?

$$R_{\text{thg}} = R_{\text{thG}} + R_{\text{thGK}} + R_{\text{thK}} = 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C/W} + 1,8 \text{ }^{\circ}\text{C/W} + 0,35 \text{ }^{\circ}\text{C/W} = 3,65 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

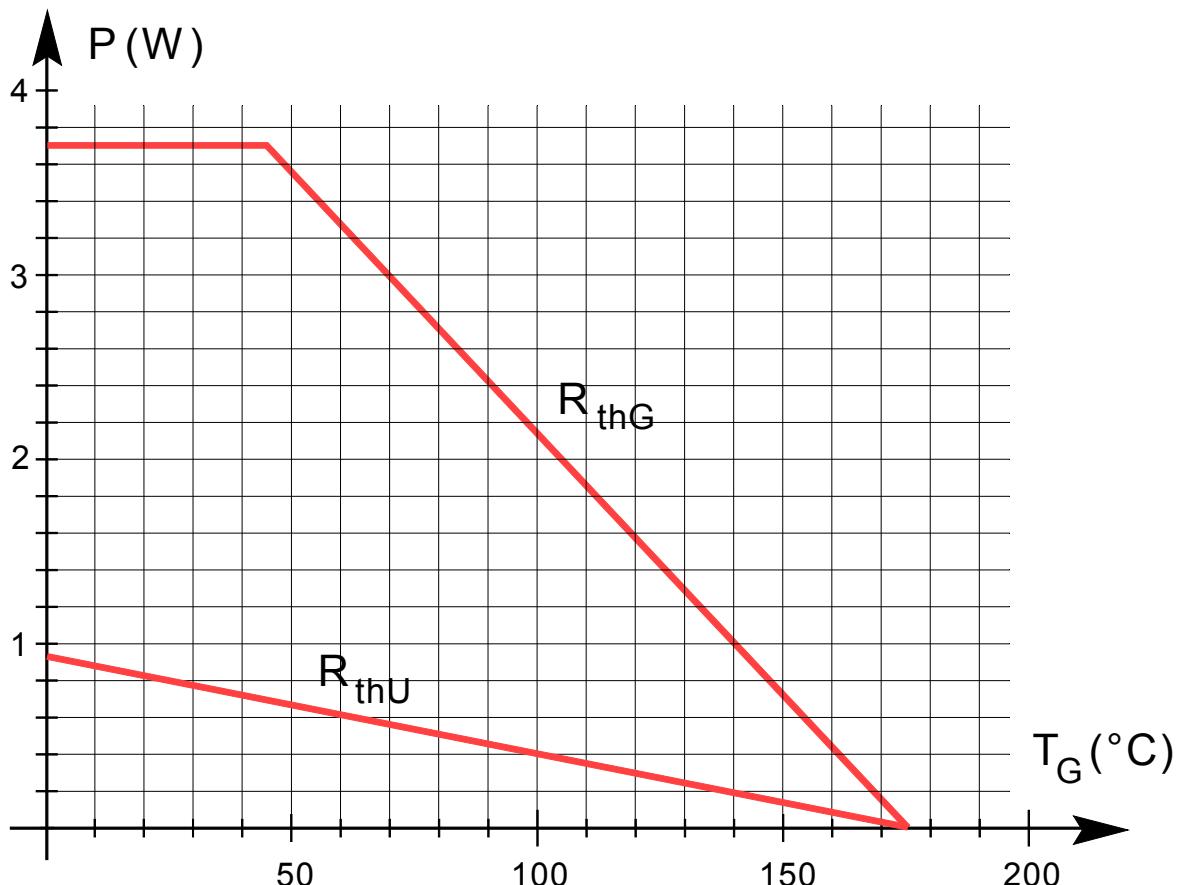
$$P_{\text{tot}} = \frac{T_J - T_U}{R_{\text{thg}}} = \frac{200 \text{ }^{\circ}\text{C} - 35 \text{ }^{\circ}\text{C}}{3,65 \text{ }^{\circ}\text{C/W}} = 45,2 \text{ W}$$

Zum Vergleich: den Wert für den Wärmewiderstand  $R_{\text{thG}} = 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$  gibt der Hersteller an für eine Gehäusetemperatur von  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Für diese Temperatur gilt auch die angegebene Leistung  $P_{\text{tot}} = 115 \text{ W}$ . Setzt man in die Formel für  $P_{\text{tot}}$  die Gehäusetemperatur von  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und den Wärmewiderstand  $R_{\text{thG}}$  ein, so bekommt man wieder die vom Hersteller angegebene Verlustleistung von  $115 \text{ W}$ .

Diese Minderung der Leistung bei steigender Umgebungstemperatur wird oft in sogenannten Derating-Kurven angegeben. Die folgende Abbildung zeigt diese Kurve für den Transistor 2N3055.



Für den Transistor BC 140, der ebenfalls im Netzgerät verwendet wird, zeigt die folgende Abbildung die Derating-Kurve. Hier sind sowohl die Kurve für den Wärmewiderstand  $R_{thG}$  als auch für den Wärmewiderstand  $R_{thU}$  angegeben. Man sieht, wie groß der Unterschied in der umsetzbaren Leistung ist.



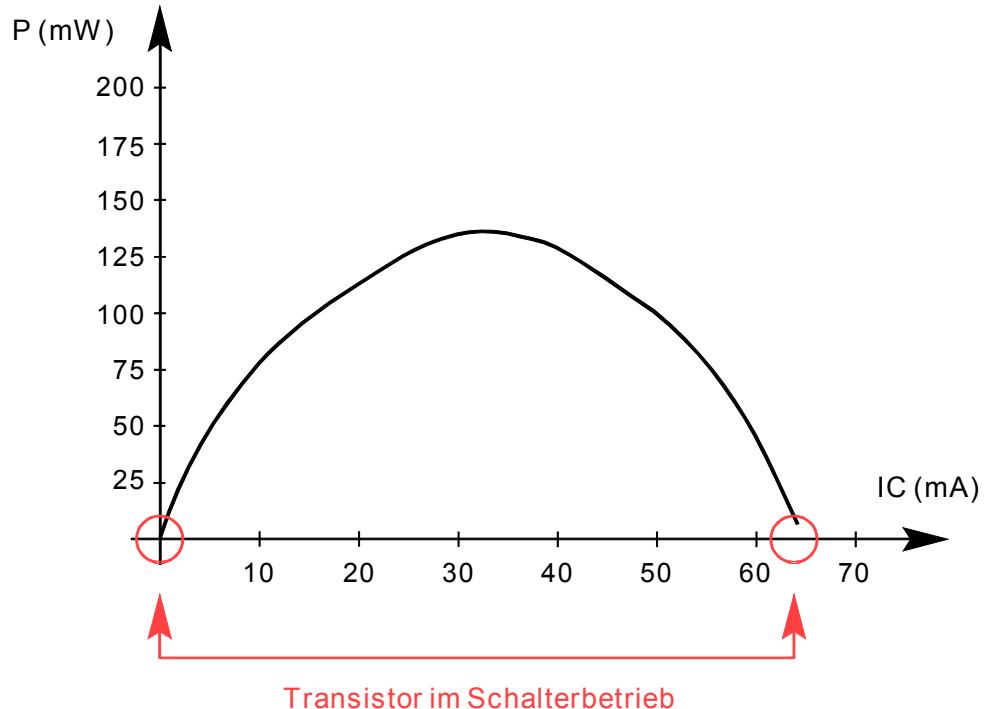
### Betriebsarten des Transistors:

Einen Transistor kann man grundsätzlich in zwei Betriebsarten betreiben:

- als Schalter
- als Verstärker

### **Transistor als Schalter**

Im **Schalterbetrieb** kippt der Transistor vom gesperrten Zustand (keine Steuerspannung  $\rightarrow$  kein Steuerstrom  $\rightarrow$  maximaler Innenwiderstand) – das ist der Nullpunkt im folgenden Leistungsdiagramm – in den voll durchgeschalteten Zustand (maximale Steuerspannung  $\rightarrow$  maximaler Steuerstrom  $\rightarrow$  minimaler Innenwiderstand) – das ist der Punkt ganz rechts im Diagramm.

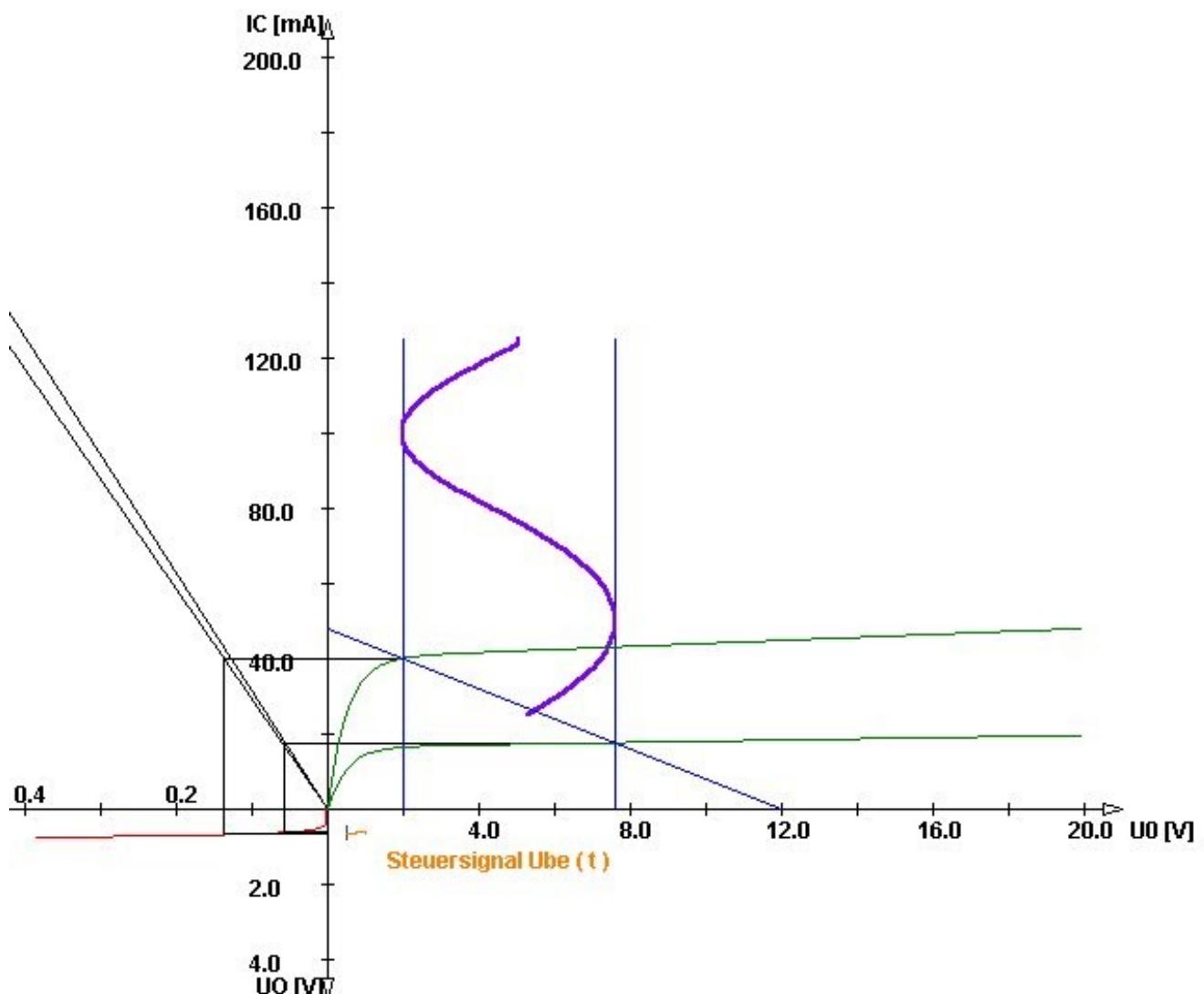


### Transistor als Verstärker

Im Verstärkerbetrieb arbeitet man dagegen möglichst genau in der Mitte, man vermeidet die Endbereiche der Kurve. Das hat allerdings nichts mit der Leistung des Transistors zu tun, sondern damit, dass man die Signale möglichst verzerrungsfrei verstärken möchte und das ist nur in den linearen Bereichen der Kennlinien möglich.

In der folgenden Abbildung sind drei verschiedene Kennlinien des Transistors in einem einzigen Diagramm zusammen gefasst und zwar so, dass man das Prinzip der Verstärkung schön erkennen kann.

Die Eingangskennlinie ( $U_{BE} - I_B$  – Kennlinie) ist unten links dargestellt (rot); an ihr ist ein sinusförmiges Eingangssignal zu erkennen: die sinusförmige Spannungsschwankung erzeugt damit eine sinusförmige Stromschwankung, die über die Stromsteuerkennlinie ( $I_B - I_C$  – Kennlinie) entsprechend verstärkt wird. Sie ist im linken Teil des Diagramms zu erkennen (schwarz) und für die beiden Extrempunkte des Eingangssignals dargestellt.



Die sich damit ergebenden Punkte des Ausgangsstroms bestimmen die Lage der Ausgangskennlinien ( $I_C - U_{CE}$  – Kennlinien), die für jeden Stromwert eine bestimmte Höhe einnehmen, ihre charakteristische Form aber beibehalten (grün). Wie man sieht, ist bei den Ausgangskennlinien die Kennlinie des Kollektorwiderstandes eingezeichnet (blau), was zu zwei Schnittpunkten mit den Ausgangskennlinien führt, die die beiden Extremwerte für das verstärkte Ausgangssignal bestimmen. Die Verstärkung ist qualitativ zu erkennen: das Steuersignal am Eingang hat einen Spitzenwert von 0,03 V, das Ausgangssignal schwankt zwischen 1,8 und 7,6 V, hat also einen Spitzenwert von 2,9 V, das ergibt einen Verstärkungsfaktor B von 97.

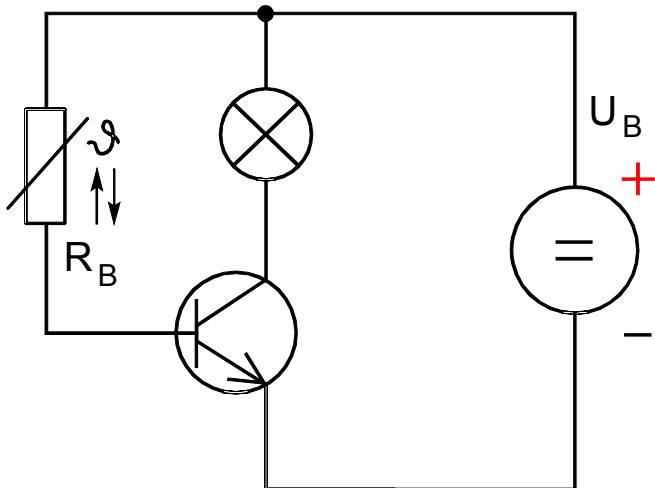
## Anwendungen:

Für Transistoren und ihre Grundschaltungen gibt es derart vielfältige Einzel-Anwendungen, dass sie hier nicht alle dargestellt werden können. In dem hier möglichen Rahmen sollen nur die (für die Schule) wichtigsten herausgegriffen und erläutert werden.

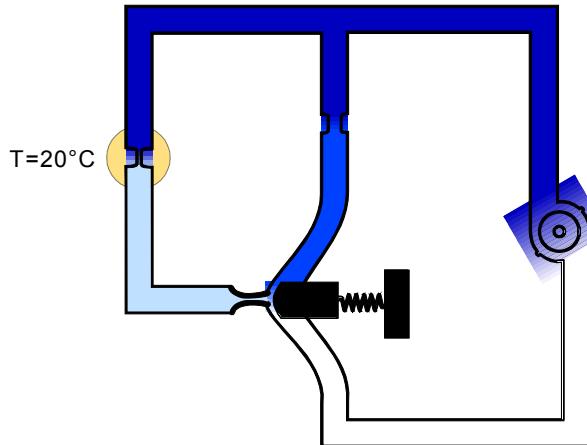
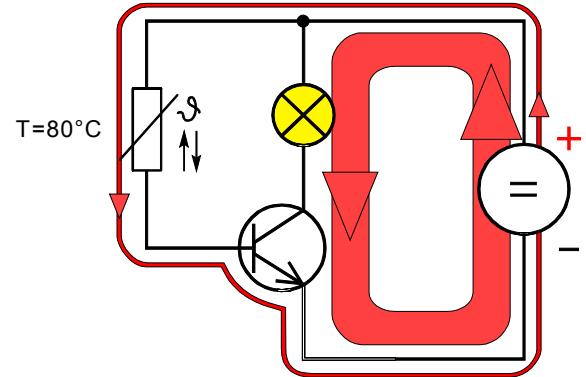
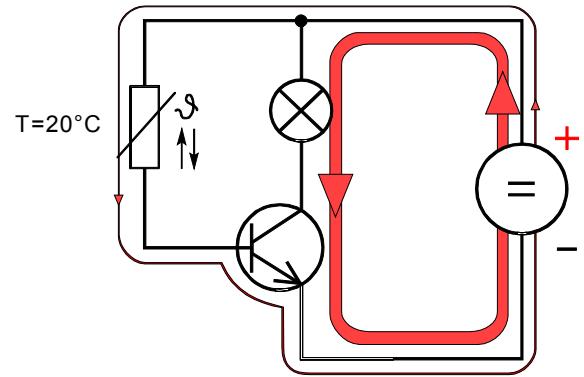
## **Emitterschaltung:**

### Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik:

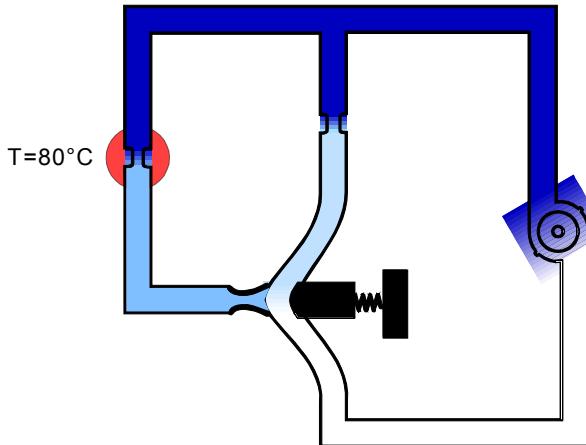
Die Emitterschaltung in ihren beiden Formen spielt in der **Steuerungstechnik** bei der Verstärkung von Sensorsignalen eine große Rolle. Um die Arbeitsweise dieser beiden Schaltungen und hierbei vor allem die Vorteile der Schaltung mit Basisspannungsteiler deutlich zu machen, soll folgende **Aufgabe** ausgewählt werden: Der Anstieg der Temperatur in einem Raum soll durch einen Heißleiter erfasst und über die Helligkeit eines Lämpchens grob angezeigt werden. Verwendet man für diese Aufgabe die Emitterschaltung mit Basisvorwiderstand, so ergibt sich folgende Schaltung.



Die Funktionsweise dieser Schaltung zeigt die folgende Abbildung sowohl in der analogen Form der Spannungsverteilung als auch durch die Größe und Verteilung der Ströme.

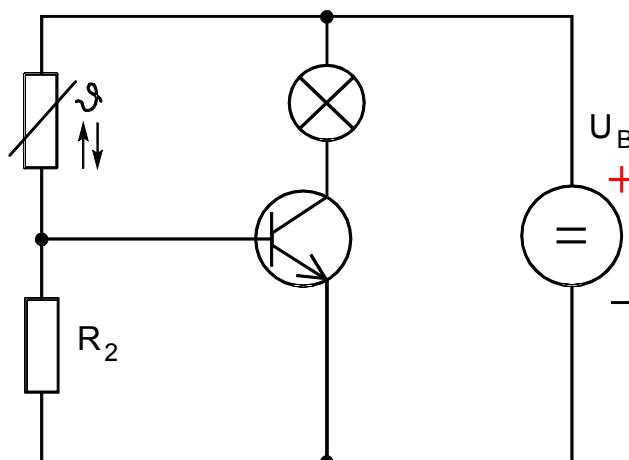


a: Schaltung bei  $20^\circ\text{C}$

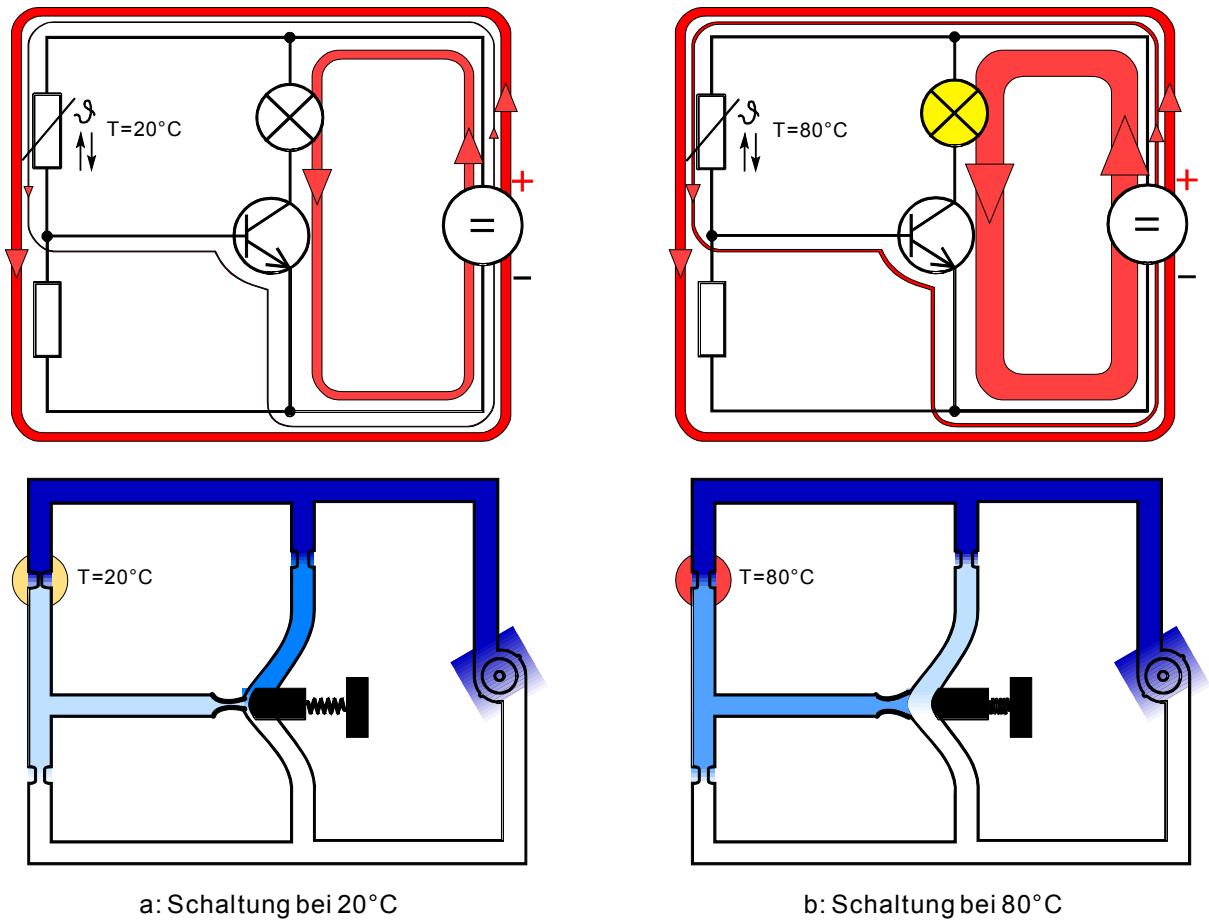


b: Schaltung bei  $80^\circ\text{C}$

Wird für dieselbe Aufgabe die Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler verwendet, so gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, den Heißleiter einzubauen: entweder für den Widerstand  $R_1$  oder den Widerstand  $R_2$ .



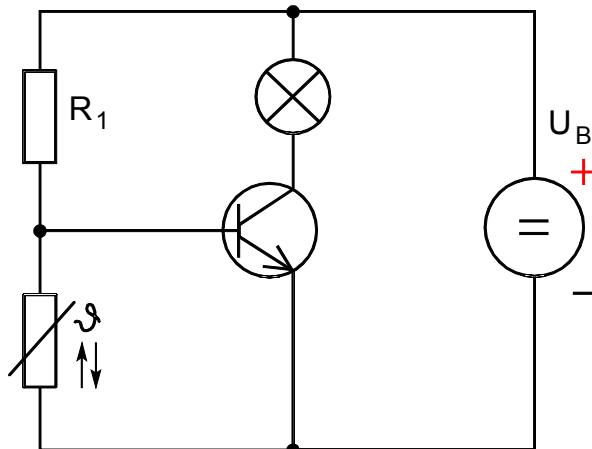
Ersetzt er den Widerstand  $R_1$ , so gibt es in der Funktionsweise der Schaltung keinen Unterschied zur Schaltung mit Basisvorwiderstand (oben).



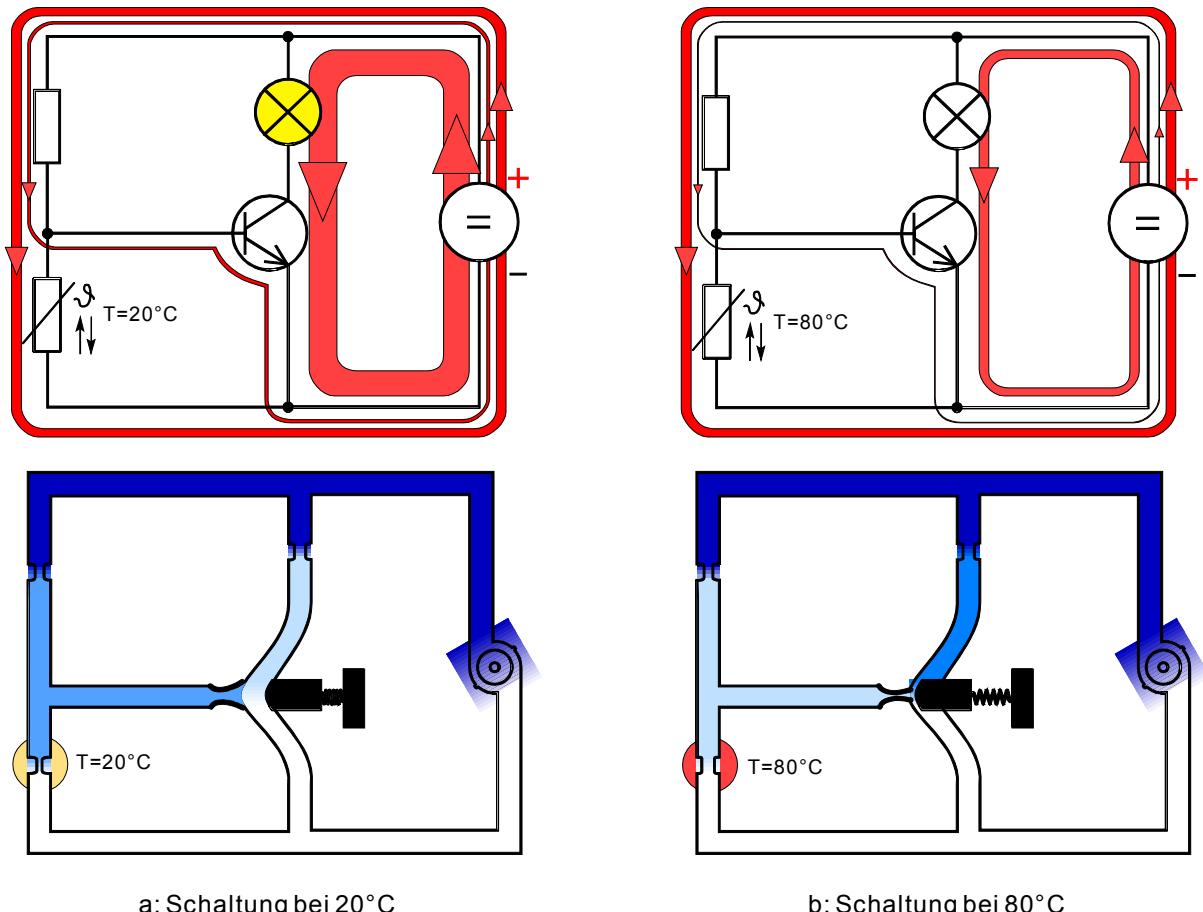
a: Schaltung bei  $20^\circ\text{C}$

b: Schaltung bei  $80^\circ\text{C}$

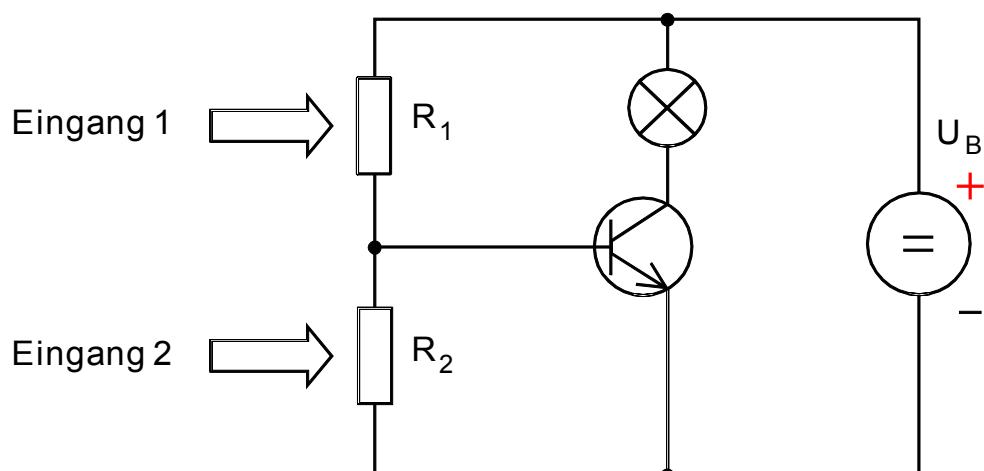
Setzt man den Heißleiter aber statt dessen an die Stelle von R2,



dann ergibt sich ein grundsätzlicher Unterschied in der Funktionsweise der Schaltung. Wie man sieht, arbeitet die Schaltung jetzt genau umgekehrt, wie es die Aufgabe fordert: sie zeigt die sinkende Temperatur an!



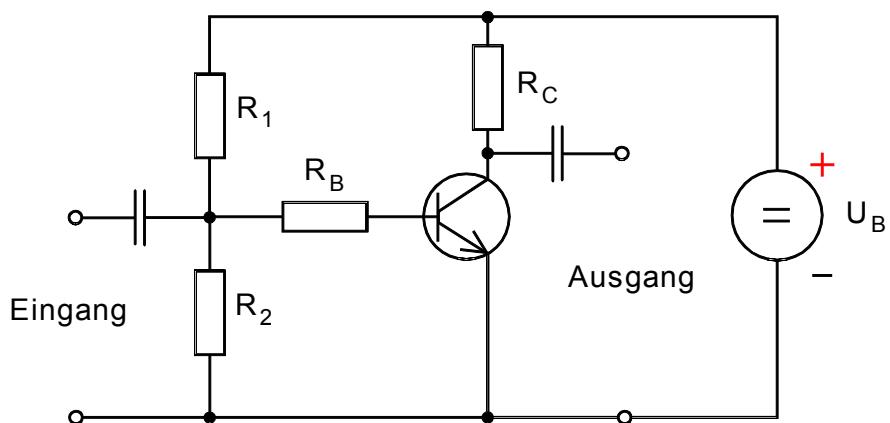
Dieses Beispiel macht deutlich, dass die Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler im Unterschied zur Schaltung mit Basisvorwiderstand eigentlich **zwei Eingänge** für einen möglichen Sensor besitzt: am Widerstand  $R_1$  und am Widerstand  $R_2$ . Benutzt man den „oberen“ Eingang für den Sensor (Eingang 1), dann arbeiten Eingang und Ausgang **gleichläufig**, d.h. wenn am Eingang ein Signal kommt ( $T=80^{\circ}\text{C}$ ), dann zeigt der Ausgang das an und umgekehrt. Benutzt man aber den „unteren“ Eingang (Eingang 2), so arbeiten Eingang und Ausgang **gegenläufig**, d.h. wenn am Eingang ein Signal kommt ( $T=80^{\circ}\text{C}$ ), dann zeigt der Ausgang nichts an, wenn aber am Eingang kein Signal kommt ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ), dann zeigt der Ausgang an! Man sagt in diesem Fall, das Signal wird **invertiert**. Diese Funktion wird in der Steuerungstechnik und in der Digitaltechnik sehr häufig benötigt.



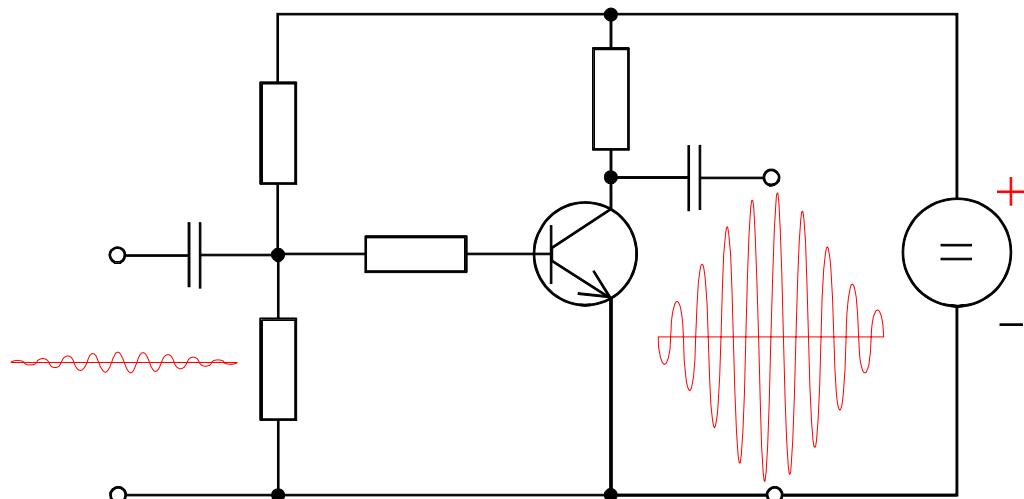
Selbstverständlich können statt Heißleitern alle möglichen anderen Sensoren benutzt werden: Kaltleiter, Fotowiderstände, Wasserstrecken (für Füllstandsanzeigen) usw.

### Verstärkertechnik:

Aber auch in der **Verstärkertechnik**, also wenn es um die Verstärkung von Sprach- oder Musiksignalen geht, hat die Emitterschaltung eine herausragende Bedeutung. Will man Wechselsignale verstärken (Sprache oder Musik), müssen diese sowohl am Eingang als auch am Ausgang der Schaltung von der Gleichspannung (Betriebsspannung) entkoppelt werden. Dies geschieht mit Kondensatoren, die außerdem an die Frequenz der zu verstärkenden Signale angepasst werden müssen.



Wie die Schaltung in einem solchen Fall grundsätzlich arbeitet, zeigt die folgende Abbildung.



Wie man sieht, werden die Spannungsschwankungen des Signals auf den Eingang des Transistors (Basis–Emitterstrecke) gekoppelt, was dort zu Schwankungen des Steuerstroms und damit zu Schwankungen des Innenwiderstands des Transistors führt. Diese ergeben dann ein identisches, aber verstärktes Signal am Ausgang des Transistors (Collektor–Emitterstrecke), das allerdings bei der Emitterschaltung „phasenverkehrt“ erscheint: Steigt beim Eingangssignal die Spannung an, so fällt sie beim Ausgangssignal ab und umgekehrt. Dies hängt damit zusammen, dass bei der Emitterschaltung der Transistor den „unten“ Widerstand des Ausgangs–Spannungsteilers bildet.

In der vorliegenden Abbildung ist es nicht möglich, die wirkliche Größe der Verstärkung (Verhältnis der Ausgangs- zur Eingangsspannung) optisch sichtbar zu machen: Beträgt sie in

der Abbildung etwa 14, so kann der reale Verstärkungsfaktor bei Emitterschaltungen bei mehreren Hundert liegen.

### Kollektorschaltung:

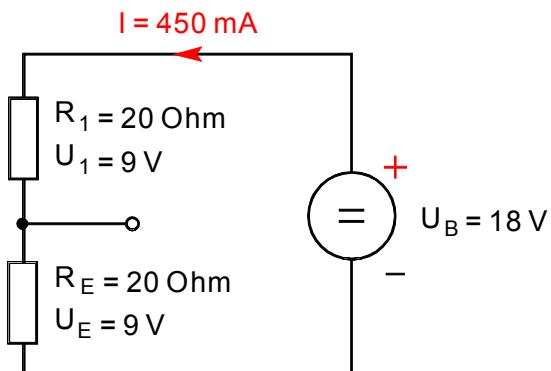
Wie oben schon angedeutet, wird die Kollektorschaltung hauptsächlich zur Realisierung von Stabilisierungsschaltungen eingesetzt, da sie von ihrer Konstruktion her bereits solche stabilisierenden Eigenschaften besitzt. Dies soll im Folgenden erläutert werden, wobei ich mich hier nur auf die Stabilisierung von Spannungen beschränke.

Dazu muss man aber zunächst zwei verschiedene Arten von Störungen der Spannung in einer Schaltung unterscheiden:

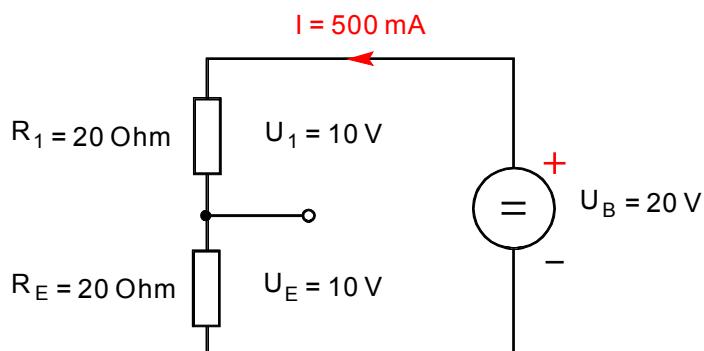
- Störungen, die von Schwankungen der Versorgungsspannung herrühren;
- Störungen, die von unterschiedlicher Belastung (am Ausgang) herrühren.

Für beide Formen der Störung hat die Kollektorschaltung stabilisierende Eigenschaften.

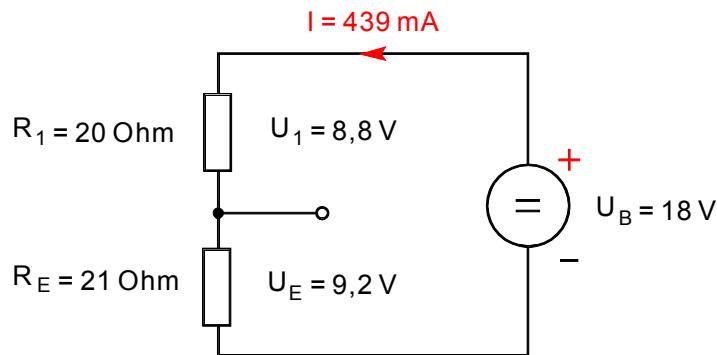
Um dies zeigen zu können, muss zunächst festgelegt werden, welche Spannung innerhalb der Schaltung konstant gehalten werden soll. Dies ist in der Regel die Spannung am Ausgang, bei der Kollektorschaltung also die Spannung am Widerstand  $R_E$ . Schaut man sich die Spannungsverhältnisse zum besseren Verständnis bei einem „normalen“ Spannungsteiler an,



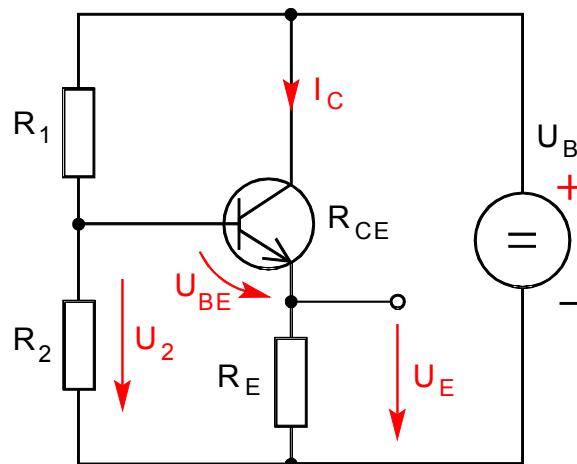
so wird sofort deutlich, dass dabei sowohl Veränderungen der Versorgungsspannung,



als auch Änderungen der Größe des Ausgangswiderstands ( $R_E$ ) eine Veränderung der Spannung an diesem Widerstand zur Folge haben.

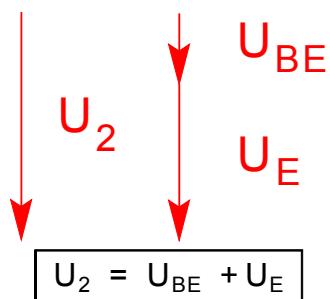


Bei der folgenden Abb. 60 habe ich gleich die entscheidenden Spannungen eingezeichnet: dies sind die Eingangsspannung  $U_2$ , die Steuerspannung des Transistors  $U_{BE}$  und die Ausgangsspannung  $U_E$ . Für unsere Betrachtungen spielen weiterhin der Innenwiderstand des Transistors  $R_{CE}$  und der Kollektorstrom  $I_C$  eine Rolle. Wir gehen wie beim einfachen Spannungsteiler die beiden Störmöglichkeiten durch und verfolgen dabei das Verhalten der Schaltung.



**Störung durch Veränderung des Ausgangswiderstandes  $R_E$ :** Vergrößert man beispielsweise  $R_E$ , dann ergeben sich in der Schaltung nacheinander folgende Prozesse:

Ansteigen von  $R_E$  bedeutet zunächst Vergrößerung von  $U_E$  (Spannungsteilung). Da  $U_2$  aber gleich geblieben ist, heißt das, dass die Steuerspannung  $U_{BE}$  dadurch kleiner wird.

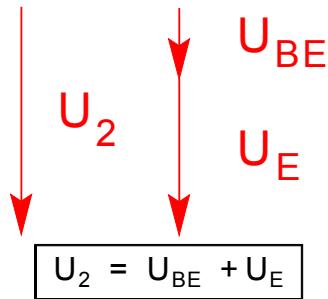


Dies vergrößert aber den Innenwiderstand  $R_{CE}$ , was den Kollektorstrom  $I_C$  wiederum verkleinert. Fließt aber jetzt durch den Widerstand  $R_E$  ein kleinerer Strom, so bedeutet das, dass die Spannung an ihm ebenfalls wieder kleiner wird (natürlich unterstützt durch die Vergrößerung von  $R_{CE}$ ) → **die Spannung  $U_E$  sinkt wieder ab!** (Stabilisierung)

Selbstverständlich gelten diese Überlegungen analog für den Fall, dass man den Ausgangswiderstand  $R_E$  verkleinert.

**Störung durch Veränderung der Versorgungsspannung  $U_B$ :** In diesem Fall sind die Verhältnisse etwas komplizierter, da hier zunächst auch Veränderungen im Eingangsbereich der Schaltung stattfinden. Wir gehen zunächst davon aus, dass die Versorgungsspannung ansteigt und verfolgen nacheinander die sich daraus ergebenden Prozesse:

Ein Ansteigen von  $U_B$  vergrößert zunächst die Eingangsspannung  $U_2$ , was unmittelbar eine Vergrößerung von  $U_{BE}$  nach sich zieht, da ja  $U_E$  zunächst gleich geblieben ist.

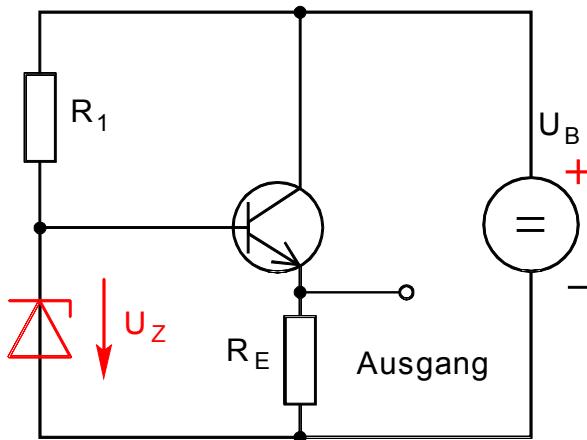


Wächst die Steuerspannung  $U_{BE}$  an, dann bedeutet das für den Innenwiderstand des Transistors  $R_{CE}$  ein Absinken, was wiederum unmittelbar eine Vergrößerung des Ausgangsstromes  $I_C$  bedeutet. Fließt aber durch den Widerstand  $R_E$  jetzt ein größerer Strom, so entsteht an ihm auch eine größere Spannung (natürlich wieder unterstützt durch die Verkleinerung von  $R_{CE}$ ), was aber die Steuerspannung  $U_{BE}$  wiederum absenkt, den Innenwiderstand  $R_{CE}$  ansteigen und damit den Strom  $I_C$  wieder absinken lässt und somit die Ausgangsspannung  $U_E$  ebenfalls wieder auf einen niedrigeren Wert einpendelt.

Selbstverständlich gelten diese Überlegungen analog für den Fall, dass man die Versorgungsspannung verkleinert.

Natürlich wird in beiden Fällen die sich neu einstellende Ausgangsspannung nicht exakt denselben Wert haben wie vorher, dennoch zeigen diese Überlegungen die grundsätzliche Tendenz der Kollektorschaltung zur Stabilisierung der Ausgangsspannung auf. Dieses Verhalten resultiert aus einer **Koppelung des Ausgangs mit dem Eingang der Schaltung**, die durch den Emitterwiderstand  $R_E$  erreicht wird: er ist sowohl Teil des Eingangs- wie auch des Ausgangskreises des Transistors. Veränderungen der Spannung an ihm wirken sich deshalb immer wieder auf den Eingang, also auf die Steuerspannung  $U_{BE}$  des Transistors aus.

Um eine noch bessere Stabilisierung der Ausgangsspannung zu erreichen, verwendet man in der Praxis statt des Widerstandes  $R_2$  zur Erzeugung der Eingangsspannung eine Z-Diode. Sie verändert ihre Spannung auch bei großen Schwankungen der Versorgungsspannung oder des Ausgangswiderstandes kaum, so dass eine sehr gute Stabilisierung über einen weiten Bereich erreicht werden kann.



Neben diesen, für die allgemeinbildende Schule wichtigen Anwendungen des Transistors gibt es noch eine ganze Reihe weiterer Anwendungen, z.B. bei Kippschaltungen (Flip-Flop-Schaltungen, Monoflop-Schaltungen, Multivibrator, Schwellwertschalter), Generatorschaltungen (Schwingschaltungen), Begrenzerschaltungen, Schaltungen zur Realisierung mathematischer Funktionen (Integrieren, Differenzieren), Schaltungen zur Digitaltechnik (logische Schaltungen, Schaltungen zum Codieren, zum Multiplexen, zum Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren, Dividieren, Vergleichen und zum Speichern von Zahlen), Schaltungen zum Senden von Musik und Sprache (Radio) bzw. von Bildern (TV) usw.

Die als Grenzwert angegebene zulässige Sperrsichttemperatur darf nicht überschritten werden, weil das eine Beschädigung oder Zerstörung des Transistorkristalls zur Folge haben könnte. Da in der Praxis diese Temperatur nicht gemessen werden kann, enthalten die Datenblätter die zulässige Verlustleistung  $P_{tot}$ , meist auch als Derating-Kurve (siehe Abb. 3.10.1-3). In Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur  $T_U$  muß die zulässige Verlustleistung entsprechend reduziert werden. Wenn man die reduzierte Verlustleistung einhält, wird auch die zulässige Sperrsichttemperatur nicht überschritten.